



**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**

**Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών**

**“Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών”**

**Βέλτιστη Ανάθεση Φορτίου σε Αεριοστροβλικές Μονάδες  
Ηλεκτροπαραγωγής – Μέθοδος, Λογισμικό, Πιστοποίηση**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Κωνσταντίνου Ν. Προεστού**

**Επιβλέπων: Κ. Χ. Γιαννάκογλου, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**Αθήνα, Οκτώβρης 2008**

Από την θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας κ. Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ, για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το ενδιαφέρον αυτό θέμα, την καθοδήγηση και τη διάθεση σημαντικού μέρους του χρόνου του.

Θα ήθελα να εκφράσω της θερμές μου ευχαριστίες σε όλη την ερευνητική ομάδα του Εργαστήριου Θερμικών Στροβιλομηχανών για την άψογη συνεργασία και υποστήριξη. Ιδιαίτερα την υποψήφια διδάκτορα Χαρίκλεια Γεωργοπούλου για την βοήθειά της πάνω στο θέμα και την καθοδήγηση σε θέματα επεξήγησης και χρήσης των αλγορίθμων.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συμπαράστασή της και για την δυνατότητα που μου παρείχε να σπουδάσω σε ένα από το καλύτερα τεχνολογικά πανεπιστήμια του κόσμου.

# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

## Βέλτιστη Ανάθεση Φορτίου σε Αεριοστροβιλικές Μονάδες Ηλεκτροπαραγωγής – Μέθοδος, Λογισμικό, Πιστοποίηση

Διπλωματική Εργασία  
Κωνσταντίνου Ν. Προεστού

Οκτώβρης 2008

Επιβλέπων: Κ. Γιαννάκογλου, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Η διπλωματική αυτή εργασία επικεντρώνεται, αξιοποιώντας τη στοχαστική μέθοδο βελτιστοποίησης των Εξελικτικών Αλγορίθμων (ΕΑ), στην επίλυση του προβλήματος της ανάθεσης φορτίου σε αεριοστροβιλικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, δηλαδή στην εύρεση προγραμμάτων λειτουργίας που ικανοποιούν τη ζήτηση ισχύος με το ελάχιστο κόστος. Ξεκινά από μία διερεύνηση του γενικού προβλήματος και καταλήγει δίνοντας έμφαση στην εξέταση επιμέρους περιπτώσεων όπως τη βελτιστοποίηση με περιοδική ζήτηση και την κάλυψη της απότομης αύξησης της ζήτησης. Συγκεκριμένα, αναπτύσσεται διαδικασία για τη δημιουργία περιοδικών προγραμμάτων λειτουργίας και διαδικασία για την ενεργοποίηση ανενεργών μονάδων στην περίπτωση που η ζήτηση ισχύος προκύψει μεγαλύτερη της αρχικά προβλεπόμενης, ώστε να καλυφθεί η νέα ζήτηση. Για την επίλυση του προβλήματος, ως βάση λαμβάνεται λογισμικό του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ (εξελικτικός αλγόριθμος, αλγόριθμος υπολογισμού της συνάρτησης κόστους). Ο αλγόριθμος υπολογισμού της συνάρτησης κόστους τροποποιείται κατάλληλα για την εξέταση των επιμέρους περιπτώσεων. Η πιστοποίηση γίνεται για περιπτώσεις από τη βιβλιογραφία, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Το πρόβλημα της περιοδικότητας αντιμετωπίζεται κάνοντας χρήση δύο μεθόδων, τη μέθοδο της επιβολής ποινής και τη μέθοδο της διόρθωσης των προγραμμάτων λειτουργίας. Για το πρόβλημα της απότομης αύξησης ζήτησης ισχύος προτείνονται δύο τεχνικές για την ενεργοποίηση των μονάδων. Η πρώτη στηρίζεται στην ενεργοποίηση των μονάδων βάσει της μέγιστης ισχύος που μπορούν να αποδώσουν και η δεύτερη στην ελαχιστοποίηση του ωριαίου κόστους λειτουργίας. Τα αποτελέσματα της εργασίας είναι ικανοποιητικά και συνηγορούν στη χρήση των προαναφερθέντων τεχνικών. Για το πρόβλημα ενός συστήματος 10 μονάδων ηλεκτροπαραγωγής σε μία χρονική περίοδο 24 ωρών, ο νέος περιορισμός της περιοδικότητας επέφερε μία αύξηση του συνολικού κόστους λειτουργίας μόνο κατά περίπου 1%. Στο πρόβλημα της απότομης αύξησης ζήτησης και οι δύο τεχνικές οδηγούν στην κάλυψη της απαιτούμενης ισχύος αλλά η μέθοδος της ελαχιστοποίησης του ωριαίου κόστους οδηγεί σε μικρότερο συνολικό κόστος λειτουργίας.

# **National Technical University of Athens**

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

LABORATORY OF THERMAL TURBOMACHINES

## **Optimal Unit Commitment of Gas-Turbine Power Plants- Methods, Software, Assessment**

**Diploma Thesis  
Konstantinos N. Proestos**

**October, 2008  
Advisor: K.C. Giannakoglou**

This diploma thesis uses the stochastic optimization method of evolutionary algorithms (EA), as a means to solve the unit commitment problem of gas-turbine power plants, which is to define the operating scenario that fulfills the power demand at minimum cost. It begins with a presentation of the general problem and continues by focusing on some specific cases, such as the handling of periodic demands or sudden increase in the power demand. Two procedures, one for the creation of periodic operating scenarios and another for the activation of closed units should the power demand become greater than the one initially forecasted, have been programmed. The problem is solved using software (EA, cost function calculation algorithm) developed in the laboratory of Thermal Turbomachines of the NTUA. The cost function calculation algorithm is modified properly in order to examine the sub-cases. The assessment is based on test-cases taken from the relevant literature on the subject, so that a comparison of the results is possible. The periodicity problem is handled using two methods, the penalty method and the operating scenario repairing method. As for the problem of the sudden power demand increase two methods are suggested for the activation of closed units. The first method is based on the activation of units according to their maximum power and the second method on the minimization of the hour operating cost. The results of the work are satisfactory and consent the use of the aforementioned techniques. While examining the problem of a 10-unit power plant in a 24-hour period, the new periodicity constraint led to the increase only by 1% of the total operating cost. As for the sudden power demand increase problem, both methods succeed in covering the power demand, and as it was expected, the method of the minimization of the hour operating cost leads to lower total operating cost.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή .....</b>	<b>8</b>
1.1	Το πρόβλημα.....	8
1.2	Μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος.....	12
1.3	Οι σύγχρονες προσπάθειες και τεχνικές επίλυσης του προβλήματος.....	20
<b>2</b>	<b>Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι ως εργαλείο βελτιστοποίησης .....</b>	<b>26</b>
2.1	Βασικά χαρακτηριστικά των ΕΑ .....	28
2.2	Κωδικοποίηση ελεύθερων μεταβλητών.....	30
2.2.1	Δυαδική Κωδικοποίηση.....	30
2.2.2	Πραγματική Κωδικοποίηση.....	31
2.3	Οι ΕΑ ως μέθοδος επίλυσης του προβλήματος ανάθεσης φορτίου σε αεριοστροβιλικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής.....	32
<b>3</b>	<b>Προτεινόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης ανάθεσης φορτίου .....</b>	<b>35</b>
3.1	Ορισμός του προβλήματος.....	36
3.2	Μέθοδος υπολογισμού της συνάρτησης κόστους.....	41
3.2.1	Θερμή Εφεδρεία (Spinning Reserve).....	44
3.3	Νέα Στοιχεία .....	46
3.3.1	Το πρόβλημα της χρονικής περιοδικότητας .....	46
<b>4</b>	<b>Πιστοποίηση – ανάλυση των εξεταζόμενων περιπτώσεων .....</b>	<b>61</b>
4.1	Περίπτωση χωρίς τον περιορισμό περιοδικότητας.....	64
4.1.1	Ανάλυση τη βέλτιστης λύσης .....	66
4.2	Περίπτωση με τον περιορισμό περιοδικότητας .....	68
4.2.1	Εύρεση περιοδικής λύσης με επιβολή ποινής PC από τη σχέση (3.2).....	68
4.2.2	Ανάλυση της βέλτιστης περιοδικής λύσης .....	69
4.2.3	Εύρεση περιοδικής λύσης με επιβολή ποινής PC από τη σχέση (3.3).....	71
4.2.4	Εύρεση περιοδικής λύσης με διόρθωση του προγράμματος λειτουργίας.....	73
4.2.5	Ανάλυση της βέλτιστης περιοδικής λύσης .....	77
4.3	Σύγκριση των μεθόδων .....	79
<b>5</b>	<b>Το πρόβλημα της απότομης αύξησης ζήτησης – τρόποι αντιμετώπισης.....</b>	<b>80</b>
5.1	Ορισμός του νέου προβλήματος.....	80
5.2	Επίλυση του προβλήματος – τεχνικές επίλυσης.....	82
5.2.1	Περιγραφή.....	82
5.3	Περιγραφή του Αλγορίθμου Ενεργοποίησης Μονάδων και Διόρθωσης του νέου προγράμματος λειτουργίας .....	84
5.3.1	Ενεργοποίηση των μονάδων βάσει της μέγιστης παραγόμενης ισχύος.....	84
5.3.2	Ενεργοποίηση μονάδων με στόχο την ελαχιστοποίηση του ωριαίου κόστους λειτουργίας .....	87

5.3.3	Πιστοποίηση του νέου αλγορίθμου .....	90
<b>6</b>	<b>Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα.....</b>	<b>109</b>
<b>7</b>	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>112</b>

### ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

<b>ΑΥΣΚ</b>	Αλγόριθμος υπολογισμού συνάρτησης κόστους
<b>ΓΑ</b>	Γενετικός Αλγόριθμος
<b>ΕΑ</b>	Εξελικτικός Αλγόριθμος
<b>ΑΕΜ</b>	Αλγόριθμος Ενεργοποίησης Μονάδων
<b>ΠΑΦ</b>	Πρόβλημα Ανάθεσης Φορτίου
<b>ΣΚΛ</b>	Συνολικό Κόστος Λειτουργίας
<b>ΚΚ</b>	Κόστος Καυσίμου
<b>ΚΑΦ</b>	Κόστος Αλλαγής Φάσης

# *1 Εισαγωγή*

## *1.1 Το πρόβλημα*

Η τεχνολογική πρόοδος των τελευταίων ετών και οι σύγχρονες κοινωνικές συνθήκες επιβάλλουν υψηλή στάθμη αξιοπιστίας τροφοδότησης με ηλεκτρική ενέργεια. Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν ως σκοπό την επίτευξη του στόχου αυτού και αποτελούν ίσως τα πιο σύνθετα, μεγάλης κλίμακας, τεχνολογικά δημιουργήματα που έχει κατασκευάσει ποτέ ο άνθρωπος. Τα συστήματα αυτά σχεδιάζονται και υλοποιούνται βάσει προδιαγραφών με στόχο να λειτουργήσουν ικανοποιητικά για αρκετά χρόνια μετά την αρχική τους εγκατάσταση.

Η απαιτούμενη από ένα δίκτυο ηλεκτρική ισχύς παρουσιάζει καθημερινά μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των ωρών αιχμής και μη-αιχμής, διότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες αντίστοιχα απαιτούν μεγαλύτερη ισχύ κατά τη διάρκεια της ημέρας σε σχέση με αυτή της νύχτας και μεγαλύτερη ισχύ κατά τη διάρκεια μιας καθημερινής σε σχέση με αυτή ενός Σαββάτου λόγω των παραγωγικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα. Με τη χρήση στατιστικών δεδομένων, τα οποία ανανεώνονται κάθε έτος λόγω της αύξησης της ζητούμενης ισχύος, είναι δυνατή η πρόβλεψη της ισχύος που απαιτεί το δίκτυο



καθημερινά και έτσι να γίνουν οι κατάλληλες ενέργειες ώστε να παραχθεί η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια και η ζήτηση αυτή να καλυφθεί επαρκώς.

Αν κατά τη διάρκεια μιας ημέρας η αποδιδόμενη ισχύς παραμένει στα επίπεδα της ζήτησης αιχμής τότε πολλές από τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να λειτουργούν στο κατώτατο όριο παραγωγής στις ώρες μη-αιχμής. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο χειριστής του συστήματος είναι ο καθορισμός των μονάδων που πρέπει να βγουν εκτός λειτουργίας και το αντίστοιχο χρονικό διάστημα, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος λειτουργίας.

Οι οικονομικές επιπτώσεις του προγραμματισμού της λειτουργίας είναι πολύ σημαντικές. Εφόσον το κόστος του καυσίμου είναι ουσιαστικά ο κύριος συντελεστής του συνολικού κόστους, η μείωση του κόστους αυτού έστω και κατά 0,5% μπορεί να οδηγήσει στην εξοικονόμηση εκατομμυρίων ευρώ το χρόνο για μεγάλες εγκαταστάσεις.

Στα περισσότερα συστήματα ισχύος, η απαραίτητη από το δίκτυο ηλεκτρική ισχύς καλύπτεται από αεριοστροβιλικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Διάφορες στρατηγικές χειρισμού και λειτουργίας είναι ικανές να οδηγήσουν στην κάλυψη της απαιτούμενης ζήτησης ισχύος, η οποία διαφέρει από ώρα σε ώρα κατά τη διάρκεια μίας ημέρας. Είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί μία βέλτιστη ή “περίπου βέλτιστη” στρατηγική η οποία να βασίζεται σε οικονομικά κριτήρια. Με άλλα λόγια, ένα σημαντικό κριτήριο στη λειτουργία των ηλεκτρικών συστημάτων ισχύος είναι η κάλυψη της ζήτησης με το ελάχιστο δυνατό κόστος λειτουργίας κάνοντας χρήση των διατιθέμενων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με το βέλτιστο τρόπο. Επιπλέον έχει αναγνωρισθεί ότι μία από τις καλύτερες επιλογές, ώστε να καλυφθεί η πελατεία με ηλεκτρική ισχύ κατά ένα ασφαλές και οικονομικό τρόπο, είναι αυτή των θερμοηλεκτρικών σταθμών. Η εύρεση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος ανάθεσης φορτίου σε θερμικά συστήματα, πρόβλημα που αφορά τον καθορισμό του προγράμματος λειτουργίας των μονάδων παραγωγής του συστήματος ισχύος μέσα από ένα πλήθος περιορισμών λειτουργίας, οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση χρημάτων ιδιαίτερα σήμερα, που το κόστος του πετρελαίου και των παραγώγων του αυξάνεται καθημερινά με υψηλούς ρυθμούς. Άλλοι λόγοι που πλέον επιβάλλουν την ανάγκη για καλύτερη διαχείριση των θερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής είναι η μόλυνση του περιβάλλοντος και η υποβάθμιση της ποιότητας

ζωής του σύγχρονου ανθρώπου, η οποία επιβαρύνεται καθημερινά από τις ποσότητες των ρύπων που εκπέμπονται στο περιβάλλον.

Το πρόβλημα της ανάθεσης φορτίου σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής γίνεται ακόμα πιο σημαντικό αν αναλογιστεί κανείς ότι μετά από μια μακρά περίοδο αναζητήσεων, προετοιμασίας, μελετών και οργανωτικών βημάτων τόσο σε Ευρωπαϊκό όσο και σε εθνικό επίπεδο, δημιουργείται βαθμιαία ελεύθερη αγορά και στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας. Πρόκειται για μια επανάσταση στο χώρο της ηλεκτρικής ενέργειας, που παραδοσιακά κυριαρχούνταν διεθνώς από μονοπώλια και απόλυτη ρύθμιση. Αυτό θα επιτρέψει σε πελάτες να επιλέγουν τον προμηθευτή τους και σε νέους παραγωγούς να ανταγωνιστούν τη ΔΕΗ, που σήμερα είναι ο μόνος παραγωγός. Σε αυτή την απελευθερωμένη αγορά και στο πλαίσιο του ελεύθερου ανταγωνισμού αποκτά ιδιαίτερη σημασία η ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Στα πλαίσια των αλλαγών αυτών έχει δημιουργηθεί η **Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ)** και η Ανώνυμη Εταιρεία **Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας** (ή Διαχειριστής του Συστήματος ή ΔΕΣΜΗΕ), η εταιρεία που διαχειρίζεται το Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας. Πρόκειται για τους δύο βασικούς φορείς λειτουργίας της απελευθερωμένης αγοράς. Η ΡΑΕ είναι μια ανεξάρτητη αρχή που φροντίζει, εισηγείται και προωθεί την ύπαρξη συνθηκών ίσων ευκαιριών, και υγιούς ανταγωνισμού και παρέχει την άδεια λειτουργίας σε παραγωγούς, προμηθευτές και λοιπούς φορείς της αγοράς. Ο βασικότερος ρόλος του ΔΕΣΜΗΕ είναι αυτός που ασκούσε η ΔΕΗ σε σχέση με το σύστημα μεταφοράς. Φροντίζει να υπάρχει ανά πάσα στιγμή ισορροπία παραγωγής και κατανάλωσης και η ηλεκτρική ενέργεια να παρέχεται κατά τρόπο αξιόπιστο, ασφαλή και ποιοτικά αποδεκτό.

Όπως προαναφέρθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης ανάθεσης φορτίου σε αεριοστροβιλικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής αφορά στον καθορισμό του προγράμματος λειτουργίας των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής συστημάτων με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας και την κάλυψη της ζήτησης. Η συνάρτηση κόστους ορίζεται ως το άθροισμα του κόστους παραγωγής, του κόστους κράτησης και εκκίνησης των μονάδων. Όλοι οι περιορισμοί λειτουργίας που σχετίζονται με την ισορροπία του συστήματος ισχύος, όπως η ελάχιστη και η μέγιστη παραγωγική

δυνατότητα μιας μονάδας, ο ελάχιστος χρόνος εκκίνησης, κράτησης και παραμονής σε μια κατάσταση, πρέπει να ικανοποιούνται.

Διάφορες προσεγγίσεις έχουν γίνει μέχρι σήμερα ώστε να επιλυθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης ανάθεσης φορτίου σε αεριοστροβλικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Αυτές οι προσεγγίσεις ποικίλουν από πολύ σύνθετες και θεωρητικά πολύπλοκες μεθόδους μέχρι απλές και πρακτικές μεθόδους. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά των μεθόδων αυτών καθώς και των μεθόδων που εξελίσσονται και δοκιμάζονται σήμερα.

Στην παρούσα εργασία θα εξεταστούν δύο σενάρια του προβλήματος ανάθεσης φορτίου. Το πρώτο σενάριο αφορά την περιοδική λειτουργία των μονάδων, δηλαδή το αν το σενάριο λειτουργίας που έχει προκύψει για ένα σύνολο μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και μία δεδομένη ζήτηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην αμέσως επόμενη χρονική περίοδο, η οποία παρουσιάζει την ίδια ζήτηση ισχύος, χωρίς να παραβιαστεί κανένας περιορισμός λειτουργίας. Το δεύτερο σενάριο που θα εξεταστεί αφορά το πρόβλημα της απότομης αύξησης ζήτησης, δηλαδή στον καθορισμό των απαραίτητων ενεργειών που πρέπει να γίνουν ώστε να καλυφθεί η ζήτηση ισχύος σε περίπτωση που προκύψει μεγαλύτερη της προβλεπόμενης.

## 1.2 Μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος

Τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες, στις οποίες έχει δοθεί και ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην ανάλυση και επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ανάθεσης φορτίου, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι και τεχνικές, οι οποίες και αναφέρονται στη συνέχεια. Σκοπός δεν είναι η πλήρης ανάλυση των μεθόδων αυτών αλλά μία συνοπτική παρουσίασή τους.

### ➤ **Εξαντλητική Απαρίθμηση (Exhaustive Enumeration)**

Αρχικά το πρόβλημα ανάθεσης φορτίου επιλυόταν απαριθμώντας όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των μονάδων παραγωγής. Ο συνδυασμός που παρουσίαζε το ελάχιστο κόστος λειτουργίας επιλέγοταν ως η βέλτιστη λύση. Οι Kerr<sup>1</sup> και Hara<sup>2</sup> το 1966 επίλυσαν το πρόβλημα επιτυχώς για την Florida Power Corporation χρησιμοποιώντας την μέθοδο της εξαντλητικής απαρίθμησης. Αν και η μέθοδος δεν ήταν κατάλληλη για μεγάλες εγκαταστάσεις, ήταν ικανή να παρέχει μία ακριβή λύση.

### ➤ **Κατάταξη κατά σειρά προτεραιότητας (Priority Listing)**

Η μέθοδος της κατάταξης κατά σειρά προτεραιότητας αρχικά κατατάσσει τις μονάδες παραγωγής με αύξουσα σειρά του κόστους λειτουργίας. Η προκαθορισμένη πλέον σειρά χρησιμοποιείται για να ικανοποιηθεί η ζήτηση του δικτύου. Οι Burns<sup>3</sup> και Lee<sup>4</sup> ασχολήθηκαν με το πρόβλημα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο αυτή. Ο Shoults<sup>5</sup> παρουσίασε έναν ευθύ και υπολογιστικά αποτελεσματικό αλγόριθμο ο οποίος έκανε χρήση της κατάταξης κατά σειρά προτεραιότητας.

➤ **Δυναμικός προγραμματισμός (Dynamic Programming)**

Το βασικό χαρακτηριστικό του δυναμικού προγραμματισμού είναι ότι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της λειτουργίας ενός συνόλου  $N$  μονάδων ηλεκτροπαραγωγής για ένα συνολικό φορτίο  $x$  MW επιτυγχάνεται με τέτοιο τρόπο ώστε αν το φορτίο των  $y$  MW καλύπτεται από μία μονάδα, το υπόλοιπο φορτίο των  $(x-y)$  MW να καλύπτεται από τις υπόλοιπες  $(N-1)$  μονάδες πάλι με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Σε μαθηματική μορφή έχουμε:

$$F_N(x) = \min [g_N(y) + f_{N-1}(x-y)], \text{όπου}$$

$F_N(x)$ , το ελάχιστο κόστος λειτουργίας  $N$  μονάδων ηλεκτροπαραγωγής για  $x$  (MW) φορτίου.

$g_N(y)$ , το κόστος λειτουργίας της μονάδας  $N$  για  $y$  (MW) φορτίου.

$f_{N-1}(x-y)$ , το ελάχιστο κόστος λειτουργίας του υπόλοιπου φορτίου των  $(x-y)$  (MW) για τις υπόλοιπες  $(N-1)$  μονάδες

Ο δυναμικός προγραμματισμός ήταν η πρώτη μέθοδος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε για το πρόβλημα της ανάθεσης φορτίου. Σήμερα χρησιμοποιείται ευρύτατα σε όλο τον κόσμο. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η ευκολία να προστεθούν περιορισμοί οι οποίοι επηρεάζουν ωριαίες λειτουργίες. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αδυναμία εύκολου χειρισμού των υπόλοιπων περιορισμών.

Το 1971 ο Harr<sup>6</sup> ανέφερε τα πλεονεκτήματα των λύσεων που προέκυψαν από έναν προσωπικό υπολογιστή έναντι των εμπειρικών λύσεων και ισχυρίστηκε ότι η εξοικονόμηση είναι της τάξεως του 1% το οποίο μεταφράζεται σε 7000\$ για ένα σύστημα 100 μονάδων.

➤ **Ακέραιος και Γραμμικός Προγραμματισμός (Integer and Linear Programming)**

Ο Dillon<sup>7</sup> δημιούργησε μία μέθοδο ακέραιου προγραμματισμού για πρακτικού μεγέθους προβλήματα, η οποία βασίζεται στην επέκταση και τροποποίηση της μεθόδου branch-and-bound. Το πρόβλημα της ανάθεσης φορτίου μπορεί να χωριστεί σε ένα μη-γραμμικό οικονομικό πρόβλημα και σε ένα καθαρό ακέραιο μη γραμμικό.

➤ **Μέθοδος «κλάδου-φράγματος» (Branch and Bound)**

Οι Lauer<sup>8</sup> και Cohen<sup>9</sup> παρουσίασαν μία νέα μέθοδο επίλυσης του προβλήματος βέλτιστης ανάθεσης φορτίου, η οποία βασίζεται στη μέθοδο «κλάδου-φράγματος» (branch-and-bound), η οποία ενσωματώνει όλους τους χρονικούς περιορισμούς και δεν απαιτεί την κατάταξη προτεραιότητας των μονάδων.

Η διαδικασία branch-and-bound αποτελείται από την επαναλαμβανόμενη εφαρμογή των ακόλουθων βημάτων. Πρώτον, το τμήμα του χώρου των λύσεων, δηλαδή το σύνολο των μεταβλητών κατάστασης, στο οποίο αναμένεται να βρίσκεται η βέλτιστη λύση χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα. Δεύτερον, αν όλες οι λύσεις ενός επιμέρους τμήματος παραβιάζουν τους περιορισμούς του προβλήματος βελτιστοποίησης, το τμήμα αυτό διαγράφεται και δεν λαμβάνεται πλέον υπόψη. Τρίτον υπολογίζεται ένα ανώτατο όριο για την ελάχιστη τιμή της συνάρτησης κόστους. Τέλος υπολογίζονται κατώτερα όρια για την τιμή της συνάρτησης κόστους όταν οι μεταβλητές σχεδιασμού είναι περιορισμένες να βρίσκονται σε κάθε επιμέρους τμήμα που βρίσκεται ακόμα υπό εξέταση. Ένα επιμέρους τμήμα διαγράφεται αν το κατώτερο όριο ξεπερνά το ανώτατο όριο του προβλήματος ελαχιστοποίησης, εφόσον η βέλτιστη λύση αποκλείεται να βρίσκεται στο επιμέρους τμήμα αυτό. Η σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν μόνο έχει μείνει μόνο ένα επιμέρους τμήμα, οπότε το ανώτερο και κατώτερο όριο είναι ίσα για το τμήμα αυτό.

➤ **Langrangian Relaxation (Χαλάρωση κατά Lagrange)**

Οι τεχνικές που βασίζονται στην Langrangian Relaxation (Χαλάρωση κατά Lagrange) αποτελούν ένα σημαντικό και πολύ διάσημο εργαλείο για την επίλυση διακριτών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Οι περιορισμοί του προβλήματος που δεν ικανοποιούνται ενσωματώνονται στην συνάρτηση κόστους ως ποινές (επιπλέον όροι). Η συνάρτηση κόστους του προβλήματος βέλτιστης ανάθεσης φορτίου μπορεί να γραφεί ως:

$$OF = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M OC(G_i(t), U_i(t)),$$

η οποία υπόκειται στους περιορισμούς των μονάδων  $L_i(G_i, U_i) \leq 0$  και στους περιορισμούς της απόδοσης ισχύος:

$$\sum_{i=1}^M R_{i,n}(G_i(t), U_i(t)) \geq Res\_Re q(t)$$

Για όλες τις χρονικές στιγμές  $t$  και κάθε απαίτηση  $n$ , ο Everett έδειξε ότι μία προσεγγιστική λύση στο πρόβλημα μπορεί να επιτευχθεί συμπεριλαμβάνοντας τους περιορισμούς στο κόστος κάνοντας χρήση πολλαπλασιαστών Lagrange. Το προκύπτον χαλαρωμένο πρόβλημα είναι η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης Lagrange η οποία υπόκειται στους περιορισμούς των μονάδων:

$$L(G_i, U_i) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \left[ OC(G_i(t), U_i(t)) - \sum_{i=1}^M \lambda_n(t) R_{i,n}(G_i(t), U_i(t)) \right]$$

$\lambda_n(t)$  είναι οι πολλαπλασιαστές που σχετίζονται με  $n$ -οστή απαίτηση για τη χρονική στιγμή  $t$ .

Η μέθοδος παρουσιάζει πλεονεκτήματα για μεγάλες εγκαταστάσεις με μεγάλο αριθμό μονάδων. Επίσης έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να τροποποιηθεί εύκολα για να μοντελοποιηθούν ειδικά χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων. Επιπλέον είναι εύκολο να προστεθούν περιορισμοί για τις μονάδες. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ο εγκλωβισμός σε τοπικά ακρότατα.

➤ **Βελτιστοποίηση του εσωτερικού σημείου (Interior Point Optimization)**

Οι μέθοδοι του εσωτερικού σημείου δε χρησιμοποιούνται μόνο για την επιτυχή επίλυση μεγάλων γραμμικών και μη-γραμμικών προβλημάτων προγραμματισμού, αλλά επίσης και για την επίλυση συνδυαστικών και μη-διαφορίσιμων προβλημάτων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται πλέον και στην επίλυση των προβλημάτων προγραμματισμού σε ηλεκτρικά συστήματα ισχύος. Ο Madrigal<sup>10</sup> εφάρμοσε τη μέθοδο του εσωτερικού σημείου για την επίλυση του προβλήματος ανάθεσης φορτίου μετά την παρατήρησή του ότι η μέθοδος αυτή παρουσιάζει ταχύτερη σύγκλιση και δεν εξαρτάται από την αρχικοποίηση των παραμέτρων.

➤ **Ανίχνευση με απαγορεύσεις (Tabu Search)**

Η μέθοδος της ανίχνευσης με απαγορεύσεις είναι μία ισχυρή διαδικασία βελτιστοποίησης η οποία έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε πολλά συνδυαστικά προβλήματα βελτιστοποίησης. Έχει την ιδιότητα να αποφεύγει τον εγκλωβισμό σε τοπικά ακρότατα μέσω ενός ευέλικτου συστήματος μνήμης. Ο Mori<sup>11</sup> <sup>12</sup> παρουσίασε έναν αλγόριθμο, ο οποίος συνδύαζε την μέθοδο Priority Listing με τη μέθοδο Tabu Search, για να επιλύσει το πρόβλημα της ανάθεσης φορτίου. Ο Rajan<sup>13</sup> επίλυσε το πρόβλημα της ανάθεσης φορτίου χρησιμοποιώντας μία νευρωνική μέθοδο ανίχνευσης με απαγορεύσεις.



### ➤ Προσομοιούμενη Ανόπτηση (Simulated Annealing)

Η προσομοιούμενη ανόπτηση παρουσιάστηκε ανεξάρτητα από τους Kirkpatrick, Gelatt και Vecchi το 1983<sup>14</sup> και από τον Cerny<sup>15</sup> το 1985. Η ανόπτηση, ως μορφή κατεργασίας, είναι γνωστή από τη μεταλλουργία. Πρόκειται για τη διαδικασία κατά την οποία ένα μεταλλικό αντικείμενο θερμαίνεται σε μία θερμοκρασία και στη συνέχεια ψύχεται σταδιακά<sup>16 17</sup>. Κάνοντας μία αναλογία μεταξύ της διαδικασίας ανόπτησης και του προβλήματος βελτιστοποίησης, ένα μεγάλο πλήθος συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης μπορούν να επιλυθούν ακολουθώντας την ίδια διαδικασία της μετάβασης από μία κατάσταση ισορροπίας σε μία άλλη, φτάνοντας έτσι στην ελάχιστη ενέργεια του συστήματος. Για την επίλυση του προβλήματος της ανάθεσης φορτίου πρέπει να καθοριστούν δύο τύποι μεταβλητών. Οι μεταβλητές κατάστασης των μονάδων (δυαδικές μεταβλητές)  $U$  και  $V$  και οι μεταβλητές της ισχύος εξόδου των μονάδων (συνεχής μεταβλητή)  $P$ . Το πρόβλημα μπει να χωριστεί σε δύο υποπροβλήματα, ένα συνδυαστικό πρόβλημα των  $U$  και  $V$  και σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα των  $P$ . Ο Mantawy<sup>18</sup> δημιούργησε έναν αλγόριθμο επίλυσης του προβλήματος ανάθεσης φορτίου και κατέληξε στο ότι αν και η μέθοδος απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό χρόνο, έχει άλλα δυνατά χαρακτηριστικά όπως η ανεξαρτησία της από την αρχική λύση.

### ➤ Έμπειρα Συστήματα (Expert Systems)

Τα έμπειρα συστήματα είναι έξυπνα προγράμματα που χρησιμοποιούν την υπάρχουσα γνώση και συμπερασματικές διαδικασίες για να επιλύσουν προβλήματα. Γενικά η γνώση αντλείται από ανθρώπους ειδικούς στον τομέα και το πρόγραμμα επιχειρεί να προσομοιώσει τη μεθοδολογία τους. Πρόκειται, ουσιαστικά, για συγκεντρωμένη και κωδικοποιημένη πληροφορία την οποία χειρίζονται τα προγράμματα για να επιλύσουν το πρόβλημα.

➤ **Artificial neural networks (Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα)**

Τα νευρωνικά δίκτυα στοχεύουν στη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς βιολογικών νευρικών δικτύων. Η αρχική ελπίδα που υπήρχε για τις δυνατότητες των νευρωνικών δικτύων αναμένεται να επαληθευθεί με τη χρήση παράλληλων επεξεργαστών. Πολλά μοντέλα νευρωνικών δικτύων έχουν δημιουργηθεί και εφαρμοστεί στο πρόβλημα της βέλτιστης ανάθεσης φορτίου. Ο Sasaki<sup>19</sup> ερευνήσε την πιθανότητα της επίλυσης ενός συνδυαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης, και συγκεκριμένα για ένα πρόβλημα βέλτιστης ανάθεσης φορτίου εφαρμόζοντας το νευρωνικό δίκτυο Hopfield. Το προτεινόμενο δίκτυο επέλυσε ένα πρόβλημα 30 μονάδων για 24 περιόδους και τα αποτελέσματα ήταν πολύ ικανοποιητικά.

➤ **Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms)**

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 30 χρόνων έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στη δημιουργία συστημάτων επίλυσης προβλημάτων βασισμένα στη θεωρία της εξέλιξης. Πρόκειται για μία στοχαστική μέθοδο βελτιστοποίησης η οποία χειρίζεται στοιχεία τυχαίας ή και ακόμα οργανωμένα τυχαίας αναζήτησης της βέλτιστης λύσης. Ένας πληθυσμός ατόμων τίθεται προς αξιολόγηση, τα καλύτερα άτομα επιλέγονται για διασταύρωση και έτσι προκύπτει ένας νέος πληθυσμός, μία νέα γενιά ατόμων. Κατά αυτόν τον τρόπο τα καλά χαρακτηριστικά των ατόμων περνούν από γενιά σε γενιά και ο συνδυασμός των χαρακτηριστικών αυτών οδηγεί σταδιακά στη βέλτιστη λύση του προβλήματος.

Οι **γενετικοί αλγόριθμοι** (genetic algorithms, ΓΑ) είναι μάλλον η πιο διαδεδομένη κατηγορία εξελικτικών αλγορίθμων. Οι **εξελικτικές στρατηγικές** (evolution strategies, ΕΣ) είναι μία λιγότερο χρησιμοποιούμενη τεχνική. Ως τρίτη κατηγορία, αρκετά διαφορετική από τις δύο προηγούμενες, αναφέρεται ο **γενετικός προγραμματισμός** (ΓΠ), ο οποίος αποτελεί μία σημαντική παραλλαγή

των ΓΑ όπου ως άτομα του πληθυσμού χρησιμοποιούνται προγράμματα υπολογιστή.

Για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ανάθεσης φορτίου με τη χρήση ΕΑ γίνεται εκτενέστερη παρουσίαση σε επόμενο κεφάλαιο.

### ➤ **Ant Colony Search Algorithms (Αλγόριθμοι Αποικίας Μυρμηγκιών)**

Η φυσική μεταφορά πάνω στην οποία βασίζονται οι αλγόριθμοι αυτοί είναι η συμπεριφορά των μυρμηγκιών. Τα μυρμήγκια είναι ικανά να βρίσκουν το συντομότερο δρόμο από μία εστία τροφής προς τη φωλιά τους χωρίς να χρησιμοποιούν οπτικά στοιχεία αλλά αξιοποιώντας πληροφορίες φερομόνης. Ενώ τα μυρμήγκια καθώς προχωρούν αποθέτουν φερομόνη στο έδαφος, ακολουθούν τη φερομόνη που άλλα μυρμήγκια είχαν αποθέσει στο έδαφος προηγουμένως. Η συμπεριφορά αυτή των μυρμηγκιών οδήγησε στη σύλληψη και δημιουργία αυτών των αλγορίθμων. Ένα σύνολο τεχνητών μυρμηγκιών συνεργάζονται για να επιλύσουν το πρόβλημα με την ανταλλαγή πληροφοριών μέσω της φερομόνης που είναι αποθηκευμένη. Οι αλγόριθμοι αυτοί έχουν χρησιμοποιηθεί για την επίλυση συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Οι Sisworahardjo και El-Kaib<sup>20</sup> επίλυσαν ένα πρόβλημα βέλτιστης ανάθεσης φορτίου κάνοντας χρήση της μεθόδου αυτής.

### 1.3 Οι σύγχρονες προσπάθειες και τεχνικές επίλυσης του προβλήματος

Αν και έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές επίλυσης του προβλήματος ανάθεσης φορτίου οι τελευταίες προσπάθειες επικεντρώνονται κυρίως στη μέθοδο των Εξελικτικών Αλγορίθμων. Ένας από τους λόγους που οι περισσότερες προσπάθειες επίλυσης του προβλήματος συγκλίνουν στη μέθοδο αυτή είναι το γεγονός ότι ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα των ΕΑ, ο μεγάλος απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος, μέσω της παραλληλοποίησης έχει πλέον ξεπερασθεί. Στην ενότητα αυτή θα περιγραφούν εν συντομία οι τελευταίες προσπάθειες που έχουν γίνει πάνω στο πρόβλημα της βέλτιστης ανάθεσης φορτίου.

Οι Jose Manuel Arroyo και Antonio J.Conejo<sup>21</sup> κάνουν χρήση ενός **κατανεμημένου γενετικού αλγορίθμου** για να επιλύσουν το πρόβλημα της βέλτιστης ανάθεσης φορτίου. Τα άτομα που προκύπτουν από τον ΓΑ διορθώνονται ώστε να τηρούνται όλοι οι περιορισμοί λειτουργίας και το άτομο αυτό να ενταχθεί, διορθωμένο πλέον, στο χώρο των αποδεκτών λύσεων. Άρα όλα τα άτομα που αξιολογούνται είναι αποδεκτές λύσεις του προβλήματος. Ένας αλγόριθμος διόρθωσης παρουσιάζει δύο πλεονεκτήματα σχετικά με τους αλγόριθμους επιβολής ποινής:

1. Δεν επεξεργάζεται ένα ευρύ χώρο εντοπισμού αποδεκτών και μη αποδεκτών λύσεων, αλλά ένα πιο περιορισμένο χώρο ο οποίος αποτελείται μόνο από αποδεκτές λύσεις. Έτσι περιορίζεται ο χώρος των λύσεων και αυξάνεται η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου.
2. Αποφεύγεται το πρόβλημα του καθορισμού όρων ποινής διαφορετικής φύσης για τους περιορισμούς.

Οι αλγόριθμοι διόρθωσης απαιτούν μεγάλο υπολογιστικό χρόνο για να μετατρέψουν τις μη αποδεκτές λύσεις σε αποδεκτές. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση ενός κατανεμημένου ΓΑ, δηλαδή με την κατανομή των απαιτούμενων εργασιών σε παράλληλους επεξεργαστές

Η κατανομή των εργασιών πραγματοποιείται με τη χρήση δύο μεθόδων:

1. Της ολικής κατανομής (Global Parallelization)
2. Της αδρομερούς κατανομής (Coarse-grained Parallelization)

Η ολική κατανομή στοχεύει στην ελάττωση του υπολογιστικού χρόνου. Ένας κεντρικός επεξεργαστής (master) αναθέτει τις διάφορες εργασίες σε άλλους επεξεργαστές- σκλάβους (slaves), οι οποίοι πραγματοποιούν τις διαδικασίες εκείνες που μπορούν να γίνουν άμεσα.

Η αδρομερής κατανομή στοχεύει στην αποφυγή του εγκλωβισμού σε τοπικό ελάχιστο αυξάνοντας τις επιπτώσεις της μετάλλαξης και της διασταύρωσης.  $N$  πληθυσμοί εξελίσσονται ξεχωριστά σε διαφορετικούς επεξεργαστές. Μετά την ικανοποίηση ενός προκαθορισμένου κριτηρίου, οι  $M$  καλύτερες λύσεις κάθε πληθυσμού μεταφέρονται σε κάθε πληθυσμό αντικαθιστώντας τις  $(N-1) \times M$  χειρότερες λύσεις κάθε πληθυσμού. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο σύγκλισης.

Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω μεθόδων οδηγεί σε ένα υβριδικό κατανεμημένο ΓΑ ο οποίος επιτυγχάνει ταυτόχρονα: 1) την εξερεύνηση του χώρου των λύσεων, 2) την εκμετάλλευση των καλύτερων ατόμων, και 3) την ελάττωση του υπολογιστικού χρόνου.

Οι S. A. Kazarlis, A. G. Bakirtzis, V. Petridis έχουν προτείνει και δημιουργήσει διάφορες μεθοδολογίες επίλυσης του προβλήματος. Στο <sup>22</sup> για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστης ανάθεσης φορτίου γίνεται χρήση ενός ΓΑ, ο οποίος εκτός των κλασικών τελεστών χρησιμοποιεί και άλλους τέσσερις τελεστές:

1. Τον τελεστή **ανταλλαγής παραθύρου** (swap-window operator)
2. Τον τελεστή **μετάλλαξης παραθύρου** (window-mutation operator)
3. Τον τελεστή **ανταλλαγής-μετάλλαξης** (swap-mutation operator)
4. Τον τελεστή **ανταλλαγής παραθύρου λόφου** (swap-window hill-climb operator)

Η χρήση των παραπάνω τελεστών έδειξε ότι για ένα πρόβλημα ανάθεσης φορτίου ο ΓΑ είναι πιο αποτελεσματικός στα αρχικά στάδια και βρίσκει καλές λύσεις ταχύτερα από το παραδοσιακό σχήμα των ΓΑ.

Οι G. Damousis, A. G. Bakirtzis, P. S. Dokopoulos <sup>23</sup> κάνουν χρήση ενός ΓΑ όχι δυαδικά κωδικοποιημένου. Χρησιμοποιείται μία κωδικοποίηση ακέραιων αριθμών, όπου το χρωμόσωμα αποτελείται από μία ακολουθία ακέραιων αριθμών, οι οποίοι αναπαριστούν την αλληλουχία των κύκλων διάρκειας ON/OFF κάθε μονάδας για το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα. Το μήκος του χρωμοσώματος ισούται με τον αριθμό των κύκλων ON/OFF όλων των μονάδων. Εφόσον ο αριθμός των εναλλαγών ON/OFF των μονάδων παραγωγής είναι πρακτικά μικρός (τυπικά 1-5 εναλλαγές τη μέρα), επιτυγχάνεται μία σημαντική μείωση του μήκους του χρωμοσώματος. Ένας θετικός ακέραιος αναπαριστά τη διάρκεια της συνεχούς λειτουργίας μίας μονάδας (ON), ενώ ένας αρνητικός ακέραιος αναπαριστά τη διάρκεια της συνεχούς παραμονής σε ανενεργή κατάσταση (OFF). Το άθροισμα των απολύτων τιμών των ακεραίων αυτών για κάθε μονάδα πρέπει να ισούται με τη διάρκεια της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου  $T$ .

Η συνάρτηση κόστους αποτελείται από δύο όρους, από το συνολικό κόστος λειτουργίας και από μία συνάρτηση ποινής που ενεργοποιείται μόνο όταν οι περιορισμοί του συστήματος παραβιάζονται.

Οι ακέραια κωδικοποιημένοι ΓΑ δοκιμάστηκαν για μία περίοδο 24 ωρών για διαφορετικά πλήθη μονάδων και ζητήσεις. Τα αποτελέσματα που πρόεκυψαν έδειξαν ότι η μέθοδος υπερτερεί του κλασσικού δυαδικά κωδικοποιημένου ΓΑ αλλά και της μεθόδου χαλάρωσης Lagrange. Επιπλέον μειώθηκε σημαντικά ο χρόνος υπολογισμού έναντι του δυαδικά κωδικοποιημένου ΓΑ.

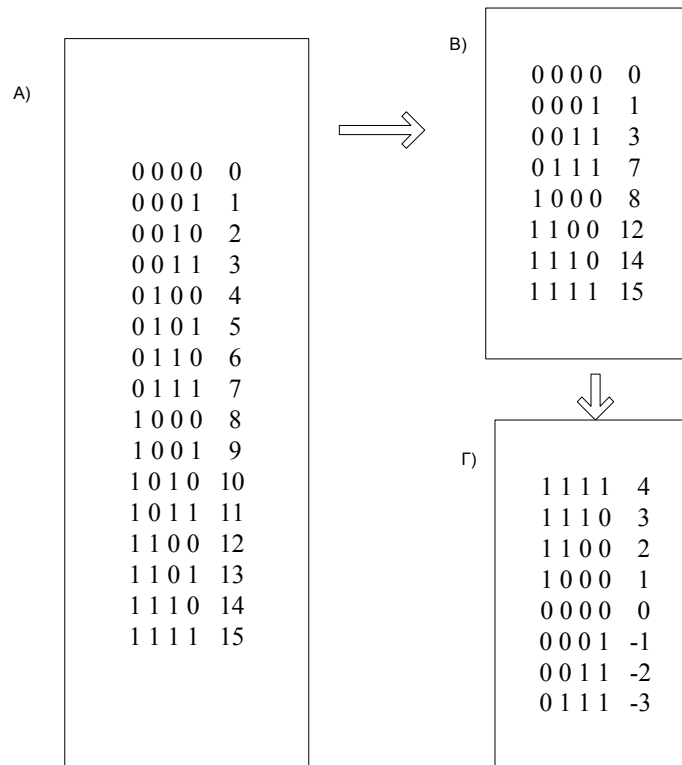
Οι Juste, Kita, Tanaka και Hasegawa<sup>24</sup> προτείνουν την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ανάθεσης φορτίου με μία μέθοδο εξελικτικού προγραμματισμού. Σε αντίθεση με τους ΓΑ, οι οποίοι είναι προτιμότερο να κάνουν χρήση της δυαδικής κωδικοποίησης, ο εξελικτικός προγραμματισμός δεν έχει περιορισμό όσον αφορά την κωδικοποίησή του.

Για την κωδικοποίηση του αλγόριθμου ΕΠ πραγματοποιούνται οι ακόλουθες ενέργειες. Αρχικά για κάθε μονάδα η χρονική περίοδος των  $T$  ωρών χωρίζεται σε υποδιαστήματα των  $p$  ωρών με βάση το ακόλουθο σχήμα:

$$p \leq \min(\text{minimum up time}, \text{minimum down time})$$

Το  $p$  πρέπει να είναι διαιρέτης του  $T$

Π.χ. για μία χρονική περίοδο 24 ωρών και μία μονάδα με  $\min up = 4$  και  $\min dn = 4$  το  $p$  μπορεί να πάρει τις τιμές 2,3,4. Έστω ότι επιλέγεται  $p = 4$ . Το διάστημα των 24 ωρών χωρίζεται σε 6 υποδιαστήματα. Αρχικά η κωδικοποίηση ξεκινά με ένα απλό δυαδικό σύστημα (ΣΧΗΜΑ 1.1-A).



ΣΧΗΜΑ 1.1

Στη συνέχεια όλοι οι συνδυασμοί που παραβιάζουν τους χρόνους εκκίνησης και τερματισμού αποκλείονται (ΣΧΗΜΑ 1.1-B). Οι εναπομείναντες συνδυασμοί επανακατατάσσονται ανάλογα με τον αριθμό των ωρών που η μονάδα είναι ON και ανάλογα με τη μετάβαση που γίνεται (ΣΧΗΜΑ 1.1-Γ). Προκύπτει μια νέα κωδικοποίηση θετικών και αρνητικών ακεραίων και ορίζεται μια νέα μεταβλητή κατάστασης  $a_{ij}$  για κάθε υποδιάστημα (ΣΧΗΜΑ 1.2).

Μονάδα i [0 0 0 0] [0 0 0 1] [1 1 1 1] [1 1 1 1] [1 1 1 0][0 0 0 0] Μονάδα i [0] [-1] [4] [4] [3] [0]
--

**ΣΧΗΜΑ 1.2**

Προκύπτει μία νέα μορφή κωδικοποίησης η οποία χρησιμοποιείται από τον ΕΠ. Τα αποτελέσματα της μεθόδου δείχνουν μία πολύ καλή συμπεριφορά. Επίσης στα θετικά της μεθόδου είναι και ο μικρότερος υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται σε σύγκριση με άλλες μεθόδους.

Οι Chuangyin Dang και Minqiang Li<sup>25</sup> προτείνουν έναν ΓΑ μεταβλητού σημείου. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του προφίλ της ζήτησης ισχύος, μία νέα αναπαράσταση του χρωμοσώματος και ένα νέο σχήμα κωδικοποίησης-αποκωδικοποίησης σχεδιάστηκαν για να ελαττωθούν οι πολυπλοκότητες στο χειρισμό των χρόνων εκκίνησης και κράτησης. Λόγω της πολυπλοκότητας της κωδικοποίησης αυτής δεν θα αναφέρουμε τον τρόπο με τον οποίο αυτή επιτυγχάνεται. Τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης ανάθεσης φορτίου 10 μονάδων, έδειξαν ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα η μέθοδος αυτή υπερίσχυσε των παραδοσιακών τεχνικών επίλυσης.



Τέλος αναφέρουμε τα χαρακτηριστικά του ΕΑ που έχει αναπτυχθεί από το Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του Ε.Μ.Π. για την επίλυση προβλημάτων ανάθεσης φορτίου σε αεριοστροβιλικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής<sup>26 27 28</sup>.

Ένας παραδοσιακός ΕΑ που τίθεται να επιλύσει ένα πρόβλημα βέλτιστης ανάθεσης φορτίου για ένα μεγάλο χρονικό ορίζοντα μπορεί να γίνει πολύ αναποτελεσματικός για δύο λόγους. Ο πρώτος είναι το μεγάλο μήκος του χρωμοσώματος και ο δεύτερος σχετίζεται με την υποχρεωτική χρήση επιδιορθωτικών τεχνικών για τα εξελισσόμενα χρωμοσώματα, ώστε να σέβονται τους περιορισμούς λειτουργίας. Για την αντιμετώπιση αυτών των αδυναμιών δημιουργήθηκε ένας ΕΑ δύο επιπέδων.

Στο πρώτο στάδιο, ο ΕΑ επιλύει μία απλοποιημένη μορφή του εξεταζόμενου προβλήματος με στόχο να αποκτηθεί μία γενική γνώση για υποσχόμενες περιοχές του χώρου των λύσεων με χαμηλό κόστος CPU. Οι περιορισμοί λειτουργίας αγνοούνται και έτσι μπορεί να οδηγηθούμε σε μη-αποδεκτές βέλτιστες λύσεις.

Κατά το δεύτερο στάδιο το πρόβλημα αναλύεται λαμβάνοντας υπόψη όλους τους περιορισμούς. Για να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα του ΕΑ γίνεται αξιοποίηση των πληροφοριών που έχουν προκύψει από το πρώτο στάδιο.

Δοκιμάστηκαν δύο σχήματα αυτού του ΕΑ. Στο πρώτο σχήμα, ο σύγχρονος ΕΑ δύο επιπέδων, το απλοποιημένο και το αναλυτικό πρόβλημα λύνονται ταυτόχρονα και οι υποσχόμενες λύσεις μεταφέρονται από το ένα επίπεδο στο άλλο με κάποια προκαθορισμένη συχνότητα. Συγκεκριμένοι τελεστές μετατρέπουν τις λύσεις ώστε να μπορούν να γίνουν αποδεκτές από το κάθε επίπεδο. Στο δεύτερο σχήμα, ο σειριακός ΕΑ δύο επιπέδων, το πρώτο στάδιο βελτιστοποίησης ακολουθεί το πρώτο χωρίς καμία επανατροφοδότηση.

Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές που έγιναν έδειξαν ότι και οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά από τους συμβατικούς ΕΑ, οι οποίοι είχαν δυσκολίες στον εντοπισμό αποδεκτών λύσεων.

## 2 Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι ως εργαλείο βελτιστοποίησης

Με τον όρο βελτιστοποίηση ορίζεται η διαδικασία μεταβολής των τιμών των παραμέτρων ενός προβλήματος με σκοπό να εντοπιστούν οι τιμές εκείνες οι οποίες ελαχιστοποιούν ή μεγιστοποιούν μία ή περισσότερες κατάλληλα ορισμένες συναρτήσεις κόστους. Η βασικότερη διάκριση στα είδη των μεθόδων βελτιστοποίησης που συναντάται στη βιβλιογραφία είναι η διάκριση σε αιτιοκρατικές και στοχαστικές μεθόδους.

Μία αιτιοκρατική μέθοδος καλείται να υπολογίσει ή να προσεγγίσει τιμές της παραγώγου της συνάρτησης κόστους. Αυτό σημαίνει ότι δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια σε κάποιο άλλο πρόβλημα καθώς αλλάζει η συνάρτηση κόστους και απαιτούνται τροποποιήσεις στο λογισμικό βελτιστοποίησης. Ο ρυθμός σύγκλισης των μεθόδων αυτών είναι σχετικά γρήγορος, όμως υπάρχει ο κίνδυνος εγκλωβισμού της λύσης σε κάποιο τοπικό βέλτιστο.

Οι στοχαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης χειρίζονται στοιχεία τυχαίας ή και ακόμα οργανωμένα τυχαίας αναζήτησης της βέλτιστης λύσης. Έχουν αργό ρυθμό σύγκλισης αλλά μπορούν ευκολότερα να εντοπίσουν το καθολικό ακρότατο. Πλεονέκτημά τους επίσης είναι η γενικότητά τους, δηλαδή η δυνατότητα να προσαρμοστούν εύκολα για να επιλυθούν διαφορετικά προβλήματα.

Ένας από τους κυριότερους εκπροσώπους των στοχαστικών μεθόδων είναι οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (ΕΑ). Η μέθοδος αυτή είναι και η συνηθέστερη στην επίλυση του προβλήματος ανάθεσης φορτίου σε αεριοστροβλικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής.

## 2.1 Βασικά χαρακτηριστικά των ΕΑ

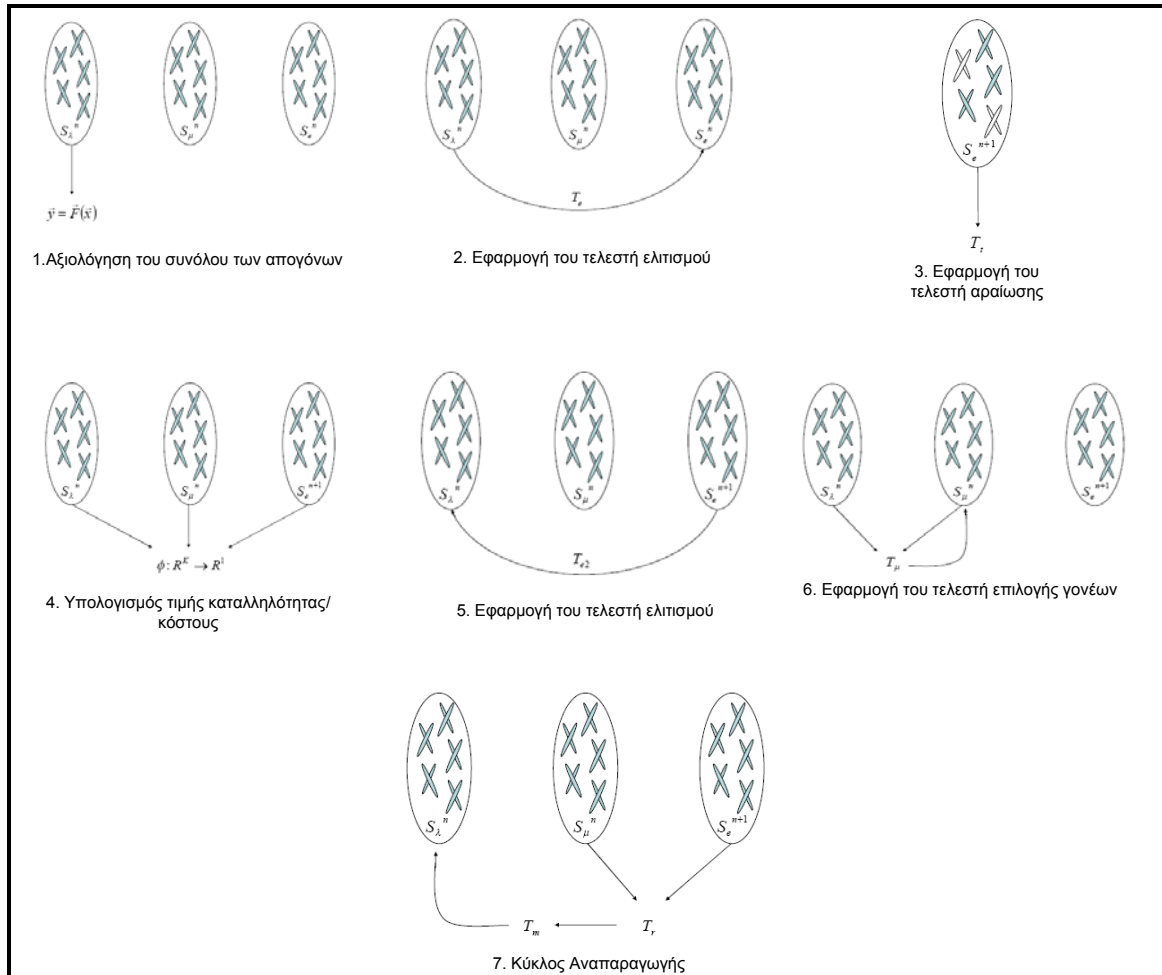
Βασικό χαρακτηριστικό των ΕΑ είναι ότι χειρίζονται πληθυσμούς υποψήφιας λύσεων και όχι μια μεμονωμένη λύση σε κάθε επανάληψη όπως άλλες στοχαστικές μέθοδοι. Προσομοιώνουν μερικώς τη θεωρία της εξέλιξης των φυσικών πληθυσμών, η οποία διατυπώθηκε από το Δαρβίνο περίπου το 1960. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, τα άτομα ενός πληθυσμού συναγωνίζονται για την απόκτηση πόρων και την προσέλκυση συντρόφου. Τα επιτυχημένα άτομα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να οδηγηθούν σε αναπαραγωγή και να μεταδώσουν τα χαρακτηριστικά τους σε μεγαλύτερο αριθμό απογόνων με την πάροδο των γενεών.

Στους ΕΑ κάθε άτομο του πληθυσμού διαχωρίζεται από τα υπόλοιπα με την αντιστοίχιση ενός μοναδικού συνόλου τιμών των παραμέτρων του προβλήματος. Σε κάθε άτομο αντιστοιχίζεται μία τιμή καταλληλότητας η οποία και καθορίζει την πιθανότητα του συγκεκριμένου ατόμου για επιβίωση και αναπαραγωγή.

Τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης ώστε να χαρακτηριστεί εξελικτικός είναι τα εξής:

- Να χρησιμοποιεί πληθυσμούς ατόμων τα οποία εξελίσσονται συγχρόνως, αντί μεμονωμένων ατόμων.
- Η εξέλιξη του πληθυσμού από γενιά σε γενιά να καθορίζεται από την τιμή καταλληλότητας (μεγιστοποίηση) ή τιμή κόστους (ελαχιστοποίηση), με βάση την κατάλληλη συνάρτηση κόστους.
- Να λαμβάνει χώρα δυναμική διαδοχή πληθυσμών, με τη δημιουργία νέων ατόμων και εξαφάνιση άλλων με βάση την τιμή κόστους ή καταλληλότητας.
- Κατά την εξέλιξη από γενιά σε γενιά, να υπάρχει κληρονομικότητα χαρακτηριστικών από τους γονείς στους απογόνους, αλλά και στοχαστική εμφάνιση νέων χαρακτηριστικών.

Ακολουθεί μία σύντομη παρουσίαση των διαδικασιών και των συνηθέστερων τελεστών ενός ΕΑ στο ΣΧΗΜΑ 2.1.



ΣΧΗΜΑ 2.1 – Βασικές Διαδικασίες και τελεστές των ΕΑ

## 2.2 Κωδικοποίηση ελεύθερων μεταβλητών

### 2.2.1 Δυαδική Κωδικοποίηση

Η δυαδική κωδικοποίηση είναι ουσιαστικά χαρακτηριστικό των κλασικών Γενετικών Αλγορίθμων (ΓΑ). Αυτός ο τρόπος κωδικοποίησης ταιριάζει με τα χαρακτηριστικά του προβλήματος που εξετάζεται στην εργασία αυτή, διότι κάθε ελεύθερη μεταβλητή  $x_m$  μπορεί να πάρει μόνο δύο διακριτές τιμές, την τιμή **0** και την τιμή **1**. Η τιμή **0** αντιστοιχεί σε μονάδες που βρίσκονται σε καταστάσεις **OFF**, **STUP** και **SHDN** και η τιμή **1** σε μονάδες που βρίσκονται στην κατάσταση **ON**. Έστω ότι  $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_N)$  είναι το διάνυσμα των ελεύθερων μεταβλητών. Κατά τη διαδικασία της κωδικοποίησης αυτής, απαιτείται ο καθορισμός ενός κατώτατου ορίου,  $L_m$ , και ενός ανώτατου ορίου,  $U_m$ , για κάθε συνιστώσα  $x_m$  του διανύσματος  $\vec{x}$ , η οποία αντιστοιχίζεται σε ένα πλήθος δυαδικών ψηφίων  $b_m$ . Όσο μεγαλύτερο είναι το  $b_m$ , τόσες περισσότερες τιμές μπορεί να πάρει η μεταβλητή και επομένως το μέγεθός του καθορίζει την ακρίβεια διακριτοποίησης της μεταβλητής  $x_m$ . Η διακριτική ικανότητα της μεταβλητής  $x_m$  είναι:

$$R = \frac{U_m - L_m}{2^{b_m} - 1}$$

Στην περίπτωση μας  $R = 1$ .

Η συνένωση των δυαδικών ψηφίων όλων των μεταβλητών δημιουργεί την ενιαία δυαδική συστοιχία, η οποία σύμφωνα με την ορολογία των ΓΑ αποτελεί το χρωμόσωμα ενός ατόμου. Για παράδειγμα, αν  $N = 3$ ,  $b_1 = 5$ ,  $b_2 = 7$ ,  $b_3 = 6$  ένα χρωμόσωμα θα μπορούσε να είναι το:

$$\underbrace{101101010101100010}_{x_1} \underbrace{10101010101010101010101010101010}_{x_2} \underbrace{10101010101010101010101010101010}_{x_3}$$

Η τιμή της μεταβλητής  $x_m$  δίνεται από τη σχέση:

$$x_m = L_m + \frac{U_m - L_m}{2^{b_m} - 1} \sum_{i=1}^{b_m} (2^{i-1} \cdot d_{m,i})$$

### 2.2.2 Πραγματική Κωδικοποίηση

Η πραγματική κωδικοποίηση χαρακτηρίζει κυρίως τις Εξελικτικές Στρατηγικές (ΕΣ). Εδώ η διαχείριση των μεταβλητών γίνεται απευθείας από το διάλυμα των μεταβλητών βελτιστοποίησης. Οι τελεστές εξέλιξης είναι διαφορετικοί από αυτούς της δυαδικής κωδικοποίησης. Επίσης τα όρια των μεταβλητών  $U_m$  και  $L_m$  χρησιμοποιούνται μόνο κατά το σχηματισμό του αρχικού συνόλου απογόνων και στη συνέχεια μπορούν να μεταβληθούν εκτός και αν περιορίζονται από τους τελεστές διασταύρωσης και μετάλλαξης. Η κωδικοποίηση αυτή δεν ταιριάζει με τη μορφή του προβλήματος που εξετάζεται στην εργασία αυτή.

### 2.3 Οι ΓΑ ως μέθοδος επίλυσης του προβλήματος ανάθεσης φορτίου σε αεριοστροβιλικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής

Αρχικά μπορεί να γίνει πολύ εύκολα αντιληπτός ο λόγος για τον οποίο είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθεί μία αιτιοκρατική μέθοδος βελτιστοποίησης. Όπως προαναφέρθηκε, μία αιτιοκρατική μέθοδος βελτιστοποίησης απαιτεί τον υπολογισμό της παραγωγού της συνάρτησης κόστους. Η συνάρτηση κόστους του προβλήματος που εξετάζουμε δεν είναι όμως μία συνεχής και παραγωγίσιμη συνάρτηση, διότι συνδυάζει διακριτές μεταβλητές ( $s_i^j$ ) με συνεχείς μεταβλητές ( $x_i^j$ ).

Αρα είναι επιβεβλημένο από τη φύση του προβλήματος να χρησιμοποιηθεί μία στοχαστική μέθοδος, η οποία να μπορεί να χειριστεί δυαδικά κωδικοποιημένες μεταβλητές.

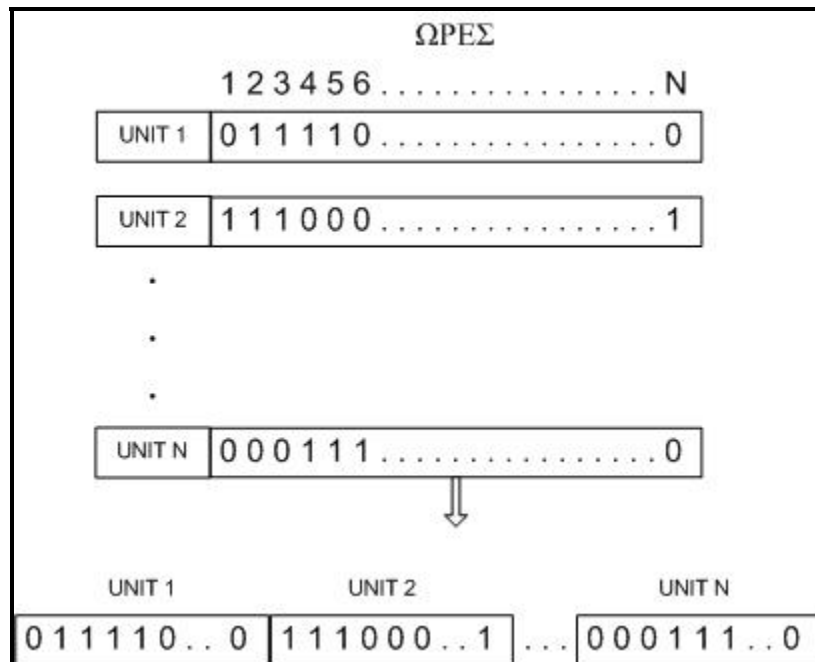
Επιπλέον αναφέρεται ότι ο αλγόριθμος υπολογισμού της συνάρτησης κόστους είχε ήδη δημιουργηθεί από το Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του Ε.Μ.Π.. Ο αλγόριθμος αυτός (ΑΥΣΚ), διορθώνει τα προγράμματα λειτουργίας ώστε να ικανοποιούνται οι χρονικοί περιορισμοί, υπολογίζει τα φορτία των ενεργών μονάδων για κάθε ώρα του εξεταζόμενου χρονικού διαστήματος ώστε να ελαχιστοποιείται το ωριαίο κόστος λειτουργίας και επιπλέον υπολογίζει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (συνολικό κόστος και ποινές λόγω παραβίασης των περιορισμών λειτουργίας). Ο ΑΥΣΚ τροφοδοτείται με το πρόγραμμα λειτουργίας των μονάδων και παράγει την τιμή της συνάρτησης κόστους. Γίνεται αντιληπτό, ότι ένας ΓΑ είναι πολύ εύκολο να προσαρμοστεί στον αλγόριθμο αυτό και να τον τροφοδοτήσει με προγράμματα λειτουργίας (ακολουθίες απο 0 και 1) τα οποία και μετά θα αξιολογήσει, θα μεταλλάξει και θα διασταυρώσει.

Επιπλέον όπως είναι γνωστό οι ΓΑ χειρίζονται πληθυσμούς υποψήφιων λύσεων και όχι μία μεμονωμένη λύση όπως άλλες στοχαστικές μέθοδοι, πράγμα που σημαίνει ότι μειώνεται η πιθανότητα ο ΓΑ να εγκλωβιστεί σε τοπικό ελάχιστο.



Στο τελευταίο κομμάτι της εργασίας αυτής εξετάζεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης δύο στόχων. Οι ΓΑ μπορούν να αντιμετωπίσουν προβλήματα πολλών στόχων και μάλιστα υπερτερούν ως προς αυτό το θέμα σε σχέση με άλλες μεθόδους λόγω του γεγονότος ότι χειρίζονται έναν πληθυσμό ατόμων και, με την ολοκλήρωσή τους, αποδίδουν ένα σύνολο λύσεων.

Για την εφαρμογή των ΓΑ στο πρόβλημα της βέλτιστης ανάθεσης φορτίου επιλέγεται ένα απλό δυαδικό αλφάβητο για να κωδικοποιηθεί μία λύση. Αν  $N$  ο αριθμός των μονάδων και  $T$  ο αριθμός των ωρών της χρονικής περιόδου χρειαζόμαστε μία σειρά από  $T$  δυαδικά ψηφία για να περιγράψουμε το πρόγραμμα λειτουργίας μίας μονάδας. Σε μία τέτοια σειρά το '1' σε κάποια θέση σημαίνει ότι η μονάδα είναι ON για τη συγκεκριμένη ώρα ενώ το '0' ότι η μονάδα είναι είτε OFF, είτε σε φάση STUP, είτε σε φάση SHDN. Κρίνεται σκόπιμο να τονιστεί ότι το '1' σημαίνει ότι η μονάδα παράγει ενέργεια. Αν μία μονάδα κάποια ώρα λειτουργεί, αλλά είναι στην εκκίνηση ή στο κλείσιμο, τότε το σύμβολο της μονάδας αυτής για την ώρα αυτή είναι το '0'. Συνδυάζοντας τις σειρές των δυαδικών ψηφίων όλων των μονάδων προκύπτει μία νέα σειρά από  $N \cdot T$  δυαδικά ψηφία, που αποτελεί και το χρωμόσωμα του ΓΑ, όπως φαίνεται στο ΣΧΗΜΑ 2.2.



ΣΧΗΜΑ 2.2

Σημαντικό πλεονέκτημα των ΓΑ έναντι των άλλων τεχνικών επίλυσης του προβλήματος, αν και στη δική μας περίπτωση δε χρησιμοποιήθηκε, είναι η δυνατότητα παραλληλοποίησής τους. Κατ'αυτόν τον τρόπο μπορεί να αντιμετωπιστεί ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα των ΓΑ που είναι ο μεγάλος χρόνος υπολογισμού που απαιτείται για την επίλυση του προβλήματος.

Αναφέρονται εν συντομία τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των ΓΑ:

1. Ένας ΓΑ χρησιμοποιεί πιθανοκρατικούς κανόνες μετάβασης σε σχέση με τις αιτιοκρατικές μεθόδους. Κατά αυτόν τον τρόπο μπορεί να ψάξει σε μία μη κυρτή περιοχή για να βρει το ολικό βέλτιστο.
2. Η αναζήτηση πραγματοποιείται σε ένα πληθυσμό λύσεων, και όχι σε μια λύση όπως στις κλασικές μαθηματικές προγραμματιστικές μεθόδους. Ο ΓΑ παράγει πολλαπλές λύσεις που τίθενται προς επεξεργασία και αξιολόγηση. Επειδή ο υπολογισμός για κάθε άτομο του πληθυσμού είναι ανεξάρτητος από τα άλλα είναι δυνατή η παραλληλοποίηση των υπολογισμών.
3. Οι ΓΑ προσαρμόζονται άμεσα σε κάθε συνάρτηση κόστους, χωρίς να είναι αυτή απαραίτητα συνεχής και διαφορίσιμη.

### 3 Προτεινόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης ανάθεσης φορτίου

Σε ηλεκτρικά συστήματα ισχύος, ο προγραμματισμός της λειτουργίας ενός πλήθους μονάδων ηλεκτροπαραγωγής στοχεύει στον καθορισμό των εκκινήσεων, των κρατήσεων και της αποδιδόμενης από το σύστημα ισχύος ώστε να καλυφθούν οι προβλεπόμενες ανάγκες του δικτύου για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η εύρεση ενός βέλτιστου προγράμματος ανάθεσης φορτίων, το οποίο να οδηγεί στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής ενώ θα ικανοποιεί την ζήτηση ισχύος και δε θα παραβιάζει τους περιορισμούς λειτουργίας, όπως π.χ. οι χρόνοι εκκίνησης και κράτησης.

### 3.1 Ορισμός του προβλήματος

Εξετάζεται το πρόβλημα του προγραμματισμού  $M$  μονάδων ηλεκτροπαραγωγής σε ωριαία βάση για μία περίοδο  $T$  ωρών. Κάθε μονάδα ηλεκτροπαραγωγής  $i$ ,  $i \in [1, M]$ , συμβολίζεται με  $u_i$ . Το αντίστοιχο ελάχιστο ποσό ισχύος που κάθε μονάδα μπορεί να αποδώσει συμβολίζεται με  $P_{\min,i}$ , και το αντίστοιχο μέγιστο ποσό ισχύος με  $P_{\max,i}$ . Επιπλέον οι συμβολισμοί  $\bar{T}_i$ ,  $\overline{\overline{T}}_i$  χρησιμοποιούνται για να δηλώσουν την ελάχιστη χρονική διάρκεια που απαιτείται για την εκκίνηση (STUP) και τον κράτηση (SHDN) της μονάδας  $u_i$ . Ως  $T_i$  συμβολίζεται η ελάχιστη χρονική διάρκεια που πρέπει η μονάδα  $u_i$  να παραμείνει στην ίδια κατάσταση, δηλαδή εν λειτουργία και συνδεδεμένη στο δίκτυο (ON) ή κλειστή (OFF). Κατά τη διάρκεια εκκίνησης (STUP) και κλεισίματος (SHDN) της μονάδας  $u_i$  η κατανάλωση καυσίμου σε  $MW$  συμβολίζεται με  $\overline{C}_i$  και  $\overline{\overline{C}}_i$  αντίστοιχα. Με  $t_j$  συμβολίζεται η  $j$  ώρα της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου. Σε ωριαία βάση η ζήτηση ισχύος (θεωρώντας σταθερή την ισχύ για μία ώρα, η παραγόμενη ενέργεια εντός της ώρας ισούται με το γινόμενο της ώρας επί την ισχύ) συμβολίζεται με  $d^{(j)}$  και η ωριαία αποδιδόμενη ισχύς συμβολίζεται με  $p^{(j)}$ . Η κατάσταση στην οποία βρίσκεται η μονάδα  $u_i$  την ώρα  $t_j$  συμβολίζεται με τη δυαδική μεταβλητή  $s_i^{(j)}$ . Η κατάσταση ON αντιστοιχεί στην τιμή  $s_i^{(j)} = 1$  ενώ όλες οι υπόλοιπες καταστάσεις (OFF, STUP, SHDN) αντιστοιχούν στην τιμή  $s_i^{(j)} = 0$ . Στην περίπτωση που  $s_i^{(j)} = 0$ , η φάση στην οποία βρίσκεται η  $u_i$  προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας στοιχεία από προηγούμενες ή επόμενες καταστάσεις.

Το χρωμόσωμα που χρησιμοποιείται από τον δυαδικά κωδικοποιημένο ΓΑ αποτελείται από  $M \cdot T$  δυαδικά ψηφία, τα οποία αντιπροσωπεύουν τις καταστάσεις  $s_i^{(j)}$ .

Το πρόβλημα εύρεσης της τιμής του φορτίου  $x_i^{(j)}$ , όπου  $\left( \frac{P_{\min,i}}{P_{\max,i}} \leq x_i^{(j)} \leq 1 \right)$ , της μονάδας  $u_i$ , ώστε να επιτευχθεί η παραγωγή της απαιτούμενης ενέργειας με το ελάχιστο κόστος,

επιλύεται χρησιμοποιώντας την **Επαυξημένη Μέθοδο με Πολλαπλασιαστές Lagrange** (ALM), αφού πρώτα έχουν πλήρως καθορισθεί οι τιμές των  $s_i^{(j)}$  για κάθε ώρα  $t_j$ . Το πρόβλημα της ανάθεσης φορτίου στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του **Συνολικού Κόστους Λειτουργίας** (ΣΚΛ) στην εξεταζόμενη χρονική περίοδο και περιλαμβάνει κόστος καυσίμου (ΚΚ), κόστη εκκίνησης (STUP) και κλεισίματος (SHDN). Ακολουθεί η συνάρτηση κόστους που ζητείται να ελαχιστοποιηθεί:

$$TOC = \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^M OC_i^{(j)} + \sum_{j=1}^T \Phi \left( \left| d^{(j)} - p^{(j)} \right| \right) \quad (3.1)$$

Το  $OC_i^{(j)}$  είναι το κόστος λειτουργίας της μονάδας  $u_i$  κατά την χρονική διάρκεια  $t_j$  και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$OC_i^{(j)} = a_i \left( x_i^{(j)} \right)^2 + b_i x_i^{(j)} + c_i + \overline{C}_i', \text{ αν } s_i^{(j)} = 1$$

$$\text{ή } OC_i^{(j)} = \overline{\overline{C}}_i' \text{ αν } s_i^{(j)} = 0$$

Οι συντελεστές  $a_i, b_i, c_i$  είναι γνωστοί συντελεστές για κάθε μονάδα  $u_i, i \in [1, M]$ . Αν  $s_i^{(j-1)} = 0$ , τότε  $\overline{C}_i' = \overline{C}_i$  και αν  $s_i^{(j-1)} = 1$ , τότε  $\overline{\overline{C}}_i' = \overline{\overline{C}}_i$ . Η συνάρτηση  $\Phi(\cdot)$  είναι μία συνάρτηση ποινής και εκφράζεται με ένα πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού που επιβάλλεται κάθε φορά που οι ΟΝ μονάδες αδυνατούν να καλύψουν τη δεδομένη ζήτηση ισχύος.

Όλα τα προαναφερθέντα μεγέθη συνοψίζονται στον ΠΙΝΑΚΑ 3.1.

$M$	Αριθμός μονάδων ηλεκτροπαραγωγής
$T$	Αριθμός ωρών εξεταζόμενης περιόδου
$u_i$	Μονάδα $i$
$P_{\min,i}$	Ελάχιστο ποσό παραγόμενης ισχύος της $u_i$
$P_{\max,i}$	Μέγιστο ποσό παραγόμενης ισχύος της $u_i$
$\bar{T}_i$	Ελάχιστη χρονική διάρκεια εκκίνησης της $u_i$
$\overline{\overline{T}}_i$	Ελάχιστη χρονική διάρκεια κλεισίματος της $u_i$
$T_i$	Ελάχιστη χρονική διάρκεια παραμονής της $u_i$ σε ON ή OFF
$\overline{C}_i$	Κόστος εκκίνησης της $u_i$
$\overline{\overline{C}}_i$	Κόστος κλεισίματος της $u_i$
$t_j$	Ωρα $t_j$
$d^{(j)}$	Ζήτηση ισχύος των ώρα $t_j$
$p^{(j)}$	Παραγόμενη ισχύς την ώρα $t_j$
$s_i^{(j)}$	Κατάσταση της μονάδας $u_i$
$x_i^{(j)}$	Φορτίο της μονάδας $u_i$
$OC_i^{(j)}$	Κόστος λειτουργίας της μονάδας $u_i$ τη χρονική στιγμή $t_j$
$a_i, b_i, c_i$	Συντελεστές πολυωνύμου 2 <sup>ου</sup> βαθμού της μονάδας $u_i$
$\Phi( )$	Συνάρτηση ποινής

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης ανάθεσης φορτίου υπόκειται στους ακόλουθους περιορισμούς:

- Όλες οι μονάδες πρέπει να συμμορφώνονται με τη γνωστή κατάσταση λειτουργίας στην αρχή της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου. Κάθε δυαδικά κωδικοποιημένο πρόγραμμα λειτουργίας που αδυνατεί να ικανοποιήσει τον περιορισμό διορθώνεται κατάλληλα. Για κάθε μονάδα πραγματοποιείται η ακόλουθη διαδικασία. Ελέγχεται η κατάσταση στην οποία βρίσκεται η μονάδα ακριβώς πριν το χρονικό διάστημα που εξετάζουμε και η χρονική διάρκεια για την οποία βρίσκεται ήδη στην κατάσταση αυτή. Επιπλέον εντοπίζεται η ώρα στην οποία η μονάδα βρίσκεται για πρώτη φορά σε

κατάσταση ON. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται οι ακόλουθες ενέργειες ανάλογα με την αρχική κατάσταση των μονάδων:

- Αν η μονάδα  $u_i$  είναι σε κατάσταση ON, διασφαλίζεται ότι η μονάδα θα παραμείνει στην κατάσταση αυτή για τον ελάχιστο χρόνο παραμονής της  $T_i$ . Λαμβάνεται υπόψη και το παρελθόν της μονάδας αυτής (ώρες σε κατάσταση ON πριν το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα). Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι αν ο περιορισμός αυτός δεν τηρείται πραγματοποιείται η αλλαγή της κατάστασης της μονάδας από 0 σε 1.
- Αν η μονάδα  $u_i$  βρίσκεται σε διαδικασία εκκίνησης (STUP), διασφαλίζεται ότι η μονάδα θα παραμείνει στην κατάσταση αυτή για την ελάχιστη χρονική διάρκεια εκκίνησης  $\bar{T}_i$ . Λαμβάνεται υπόψη και το παρελθόν της μονάδας (ώρες σε διαδικασία εκκίνησης πριν το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα). Αν η χρονική αυτή διάρκεια δεν επαρκεί, πραγματοποιείται η αλλαγή από 1 σε 0.
- Αν η μονάδα  $u_i$  βρίσκεται σε κατάσταση OFF, διασφαλίζεται ότι η μονάδα θα παραμείνει στην κατάσταση αυτή για τον ελάχιστο χρόνο παραμονής της  $T_i$ . Εντοπίζεται η τελευταία ώρα που η μονάδα ήταν σε κατάσταση ON και ελέγχεται αν επαρκεί το χρονικό διάστημα για ένα κλείσιμο (SHDN)  $\bar{\bar{T}}_i$ , για τον ελάχιστο χρόνο παραμονής  $T_i$  σε κατάσταση OFF και για μία εκκίνηση (STUP)  $\bar{T}_i$ . Αν δεν επαρκεί γίνεται η διόρθωση από 1 σε 0.
- Αν η μονάδα  $u_i$  βρίσκεται σε διαδικασία κράτησης (SHDN), διασφαλίζεται ότι αυτή θα πραγματοποιηθεί κανονικά. Ελέγχεται αν μετά το κλείσιμο η μονάδα παραμένει σε κατάσταση OFF για τον ελάχιστο χρόνο παραμονής  $T_i$  και στη συνέχεια ελέγχεται μία επερχόμενη διαδικασία εκκίνησης. Αν δεν επαρκεί ο χρόνος για

εκκίνηση, τότε η διαδικασία εκκίνησης ακυρώνεται (αλλαγή από 1 σε 0 μέχρι να καλυφθεί ο χρόνος εκκίνησης  $\bar{T}_i$ ).

- Η αποδιδόμενη ισχύς πρέπει να ισούται με την ζήτηση ισχύος για κάθε ώρα της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου. Πρέπει να επιβάλλεται ποινή στην συνάρτηση κόστους κάθε υποψήφιας λύσης που αδυνατεί να ικανοποιήσει αυτή την προϋπόθεση. Η συνάρτηση ποινής είναι το άθροισμα των ωριαίων όρων  $\Phi(\Delta d^{(j)})$ . Η ποινή εκφράζεται με ένα πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού της απόκλισης  $\Delta d^{(j)} = |d^{(j)} - p^{(j)}|$  ως ακολούθως:

$$\Phi(\Delta d^{(j)}) = e_1 \Delta d^{(j)^2} + e_2 \Delta d^{(j)} + e_3, \text{ αν } \Delta d^{(j)} \neq 0$$

$$\Phi(\Delta d^{(j)}) = 0, \text{ αν } \Delta d^{(j)} = 0$$

όπου  $(e_1, e_2, e_3)$  είναι συντελεστές που καθορίζονται από το χρήστη.

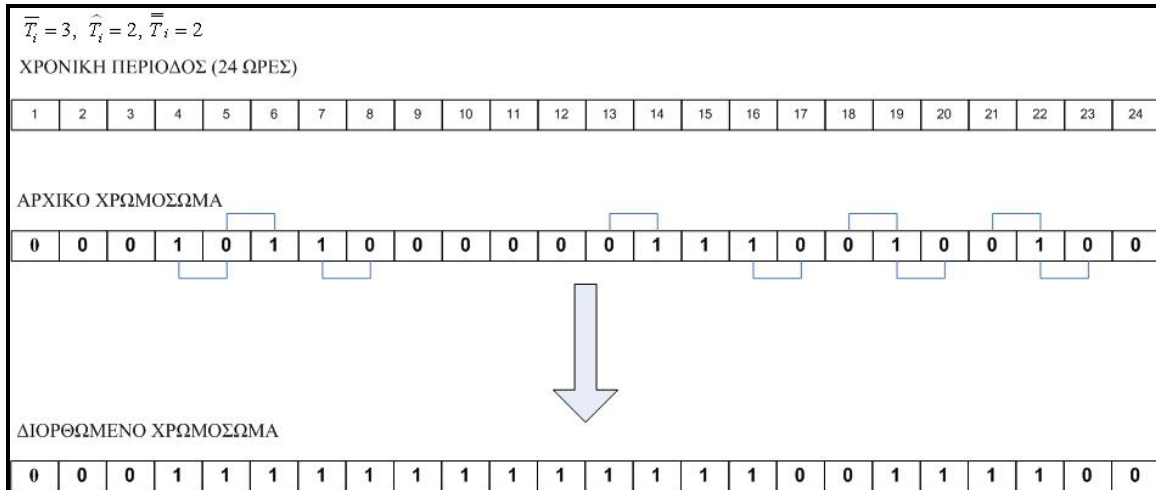
- Οι ελάχιστοι χρόνοι εκκίνησης, κράτησης και παραμονής σε μία κατάσταση λαμβάνονται υπόψιν σε κάθε αλλαγή φάσης κάθε μονάδας. Τα δυαδικά χρωμοσώματα που δεν ικανοποιούν αυτούς τους κανόνες πρέπει να διορθώνονται. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι οι τιμές των bit αλλάζουν από 0 σε 1 κάθε φορά που μία ακολουθία από συνεχόμενα 0 δεν επαρκεί να συμπεριλάβει μία διαδικασία τερματισμού (SHDN) ακολουθούμενη από μία διαδικασία εκκίνησης (STUP). Η αντίθετη αλλαγή (από 1 σε 0) δεν επιτρέπεται καθώς μπορεί να οδηγηθούμε στην παραβίαση των άλλων περιορισμών και συγκεκριμένα στη μη κάλυψη της ζήτησης ισχύος. Η διόρθωση του χρωμοσώματος γίνεται σύμφωνα με το ακόλουθο σχήμα:

$$s_i^{j+1} - s_i^j = \begin{cases} 0 \\ 1 \Rightarrow s_i^{j+k} = 1, \forall k \in [1, T_i] \end{cases}$$

$$s_i^{j+1} - s_i^j = -1 \text{ iff } s_j^{j+k} = 0, \forall k \in [1, \bar{T}_i + T_i + \bar{T}_i]$$



Στο ΣΧΗΜΑ 3.1 παρουσιάζεται η διόρθωση του χρωμοσώματος μιας μονάδας για μια χρονική περίοδο 24 ωρών.



ΣΧΗΜΑ 3.1

### 3.2 Μέθοδος υπολογισμού της συνάρτησης κόστους

Κάθε απόγονος που παράγεται από τον γενετικό αλγόριθμο αξιολογείται με βάση την τιμή της συνάρτησης κόστους. Για τον υπολογισμό της τιμής αυτής έχει δημιουργηθεί από το Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του Ε.Μ.Π. ένας αλγόριθμος (ΑΥΣΚ), ο οποίος και αναλύεται παρακάτω.

Αρχικά εισάγονται όλα τα δεδομένα του εξεταζόμενου προβλήματος, δηλαδή ο αριθμός και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των μονάδων, οι αρχικές καταστάσεις των μονάδων, η κατανομή της ζήτησης ισχύος, άλλες αναγκαίες παράμετροι καθώς και συντελεστές ποινής οι οποίοι επαυξάνουν την τιμή της συνάρτησης κόστους στην περίπτωση που παραβιάζονται οι περιορισμοί λειτουργίας ή δεν καλύπτεται η ζήτηση ισχύος.

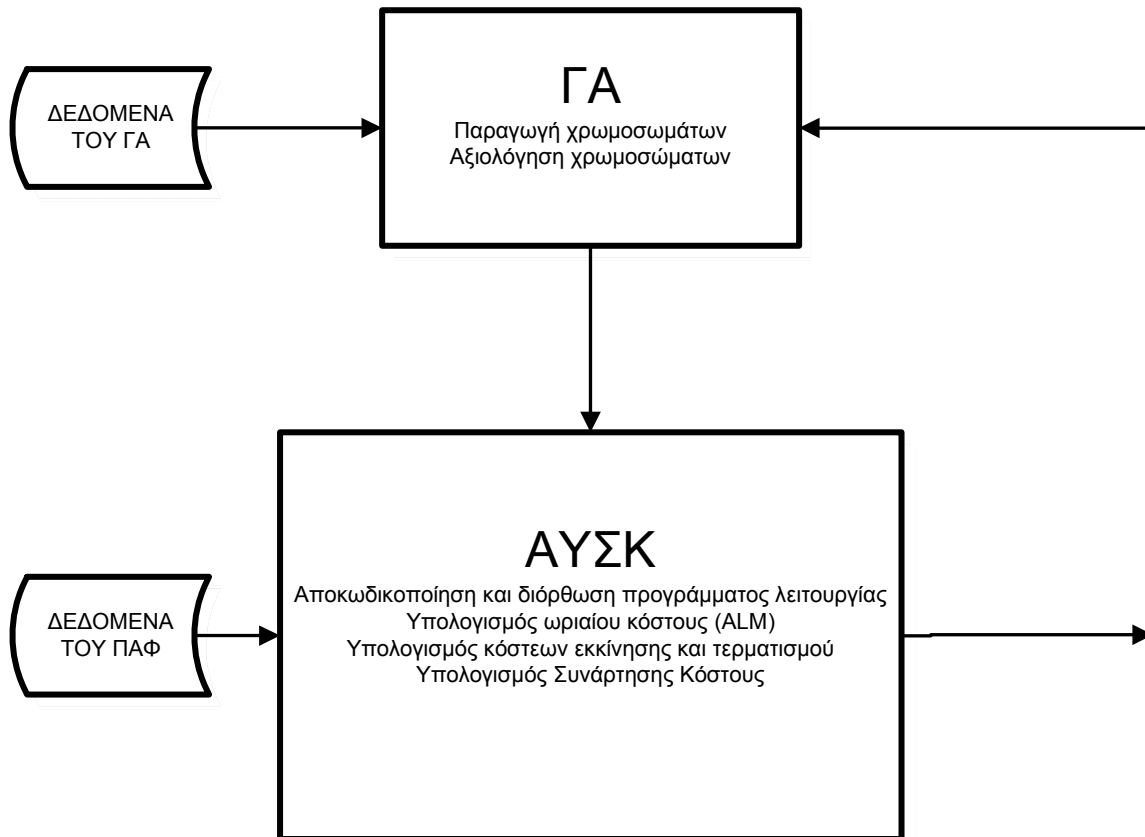
Αφού πλέον έχουν εισαχθεί τα δεδομένα του προβλήματος, ο ΓΑ τροφοδοτεί τον ΑΥΣΚ με ένα χρωμόσωμα το οποίο για τον ΑΥΣΚ αποτελεί ένα πρόγραμμα λειτουργίας. Αρχικά διορθώνεται το πρόγραμμα λειτουργίας ώστε οι αρχικές καταστάσεις των μονάδων (ON, OFF, STUP, SHDN), δηλαδή η κατάσταση των μονάδων ακριβώς πριν την εξεταζόμενη χρονική περίοδο, να συμβαδίζει με την κατάσταση των μονάδων στην αρχή της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου. **Επιτρέπονται διορθώσεις από 0 σε 1 και από 1 σε 0.** Στη συνέχεια πραγματοποιείται η διόρθωση του προγράμματος λειτουργίας ώστε να τηρούνται οι χρόνοι εκκίνησης, τερματισμού και παραμονής των μονάδων σε μία κατάσταση (ON, OFF), λαμβάνοντας όμως υπόψιν πάντα την αρχική κατάσταση των μονάδων. **Η μόνη διόρθωση που επιτρέπεται να πραγματοποιηθεί είναι από 0 σε 1.** Ο λόγος είναι ότι μία πιθανή αλλαγή από 1 σε 0, δηλαδή πρακτικά η απενεργοποίηση μίας μονάδας μπορεί να οδηγήσει στην αδυναμία του ηλεκτρικού συστήματος να καλύψει για κάποιες ώρες την απαιτούμενη από το δίκτυο ζήτηση ισχύος. Στην περίπτωση αυτή ένα χρωμόσωμα με καλή προοπτική εξέλιξης θα μπορούσε λόγω της αλλαγής από 1 σε 0 να αδυνατούσε να καλύψει τη ζήτηση, πράγμα που σημαίνει αυξημένη τιμή της συνάρτησης κόστους λόγω της επιβαλλόμενης ποινής.

Εφόσον πλέον έχουν γίνει οι απαραίτητες διορθώσεις ο ΑΥΣΚ καλείται να υπολογίσει το **Συνολικό Κόστος Λειτουργίας (ΣΚΛ)** του προγράμματος λειτουργίας. Αυτό επιτυγχάνεται με την ακόλουθη διαδικασία. Για κάθε ώρα του χρονικού διαστήματος, και με δεδομένες τις μονάδες που είναι ενεργές και παράγουν, αναζητείται η τιμή του φορτίου της κάθε μονάδας ώστε να ελαχιστοποιείται το ωριαίο κόστος παραγωγής. Για την επίλυση αυτού του υποπροβλήματος βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται η επαυξημένη μέθοδος με χρήση πολλαπλασιαστών Lagrange (Augmented Lagrange Multiplier Method, μέθοδος ALM). Επίσης για κάθε ώρα του προγράμματος λειτουργίας ελέγχεται αν υπάρχει αλλαγή κατάστασης των μονάδων σχετικά με την προηγούμενη χρονική στιγμή (τερματισμός, εκκίνηση) και αντίστοιχα συνυπολογίζεται το κόστος εκκίνησης (cold startup cost ή hot startup cost) και κράτησης.

Όλα τα προαναφερθέντα κόστη αθροίζονται και προκύπτει το ΣΚΛ του εξεταζόμενου χρονικού διαστήματος. Στο κόστος αυτό προστίθενται όλες οι ποινές που έχουν προκύψει από την πιθανή παραβίαση των περιορισμών λειτουργίας και προκύπτει τελικά η τιμή της συνάρτησης κόστους ως το σύνολο του ΣΚΛ και όλων των επιβληθέντων ποινών.

Η τιμή της συνάρτησης κόστους αποτελεί το κριτήριο με το οποίο ο ΓΑ αξιολογεί το κάθε παραγόμενο χρωμόσωμα και έτσι οδηγούμαστε στη βέλτιστη ή σε μία περίπου βέλτιστη λύση του εξεταζόμενου προβλήματος.

Η παραπάνω διαδικασία παραπέμπει στο διάγραμμα ροής του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 3.2.



ΣΧΗΜΑ 3.2

### 3.2.1 Θερμή Εφεδρεία (Spinning Reserve)

**Θερμή εφεδρεία (Spinning Reserve, εν συντομία SR)** είναι η διαθέσιμη ισχύς των μονάδων παραγωγής, οι οποίες λειτουργούν κάτω από την ονομαστική τους φόρτιση και η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί σε ελάχιστο χρόνο, εάν ζητηθεί. Σε όλα τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας τηρείται ένα ελάχιστο επίπεδο θερμής εφεδρείας, η οποία κρίνεται απαραίτητη για λόγους ασφάλειας, αξιοπιστίας και ποιότητας ισχύος. Αξίζει να σημειωθεί ότι, η απαίτηση για τήρηση θερμής εφεδρείας **οδηγεί σε σημαντική αύξηση του κόστους λειτουργίας**.

Η θερμή εφεδρεία είναι η διαφορά της αποδιδόμενης από ένα πλήθος μονάδων ισχύος  $u_i$  και της μέγιστης ισχύος που θα μπορούσε να αποδώσει το ίδιο πλήθος μονάδων. Η παράμετρος αυτή εισάγεται ώστε να αντιμετωπισθούν τυχούσες απότομες αυξήσεις της ζήτησης ισχύος. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς του συστήματος για κάθε ώρα πρέπει να είναι μεγαλύτερη της ζήτησης ισχύος κατά ένα συντελεστή. Εξ'ορισμού πρέπει  $SR \geq 1$ . Το ΣΚΛ υπολογίζεται με βάση την ωριαία ζήτηση ισχύος  $d^j$ , αλλά πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα του συστήματος να καλύψει με τις ήδη ενεργές (ON) μονάδες ηλεκτροπαραγωγής τη ζήτηση  $SR \cdot d^j$ . Σε κάθε περίπτωση πρέπει να ικανοποιείται ο ακόλουθος περιορισμός:

$$\sum_{i=1}^M p_{\max,i}^j \cdot s_i^j \geq SR \cdot d^j, \forall j \in [1, N]$$

Αν ο περιορισμός αυτός δεν ικανοποιείται επιβάλλεται ποινή μέσω ενός συντελεστή ποινής (**Spinning Reserve Penalty Coefficient, SRPC**) και της σχέσης:

$$PC = SRPC \cdot \sum_{j=1}^N \left[ SR \cdot d^j - \sum_{i=1}^M p_{\max,i}^j \cdot s_i^j \right]$$

Η θερμή εφεδρεία χρησιμοποιείται ώστε να υπάρχει ένα περιθώριο του συστήματος στην περίπτωση που η ζήτηση αυξηθεί. Στην περίπτωση αυτή όμως οι μονάδες λειτουργούν σε χαμηλότερα φορτία και άρα προκύπτει ένα μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας σε σχέση με την περίπτωση που αρκεί μόνο η κάλυψη της απαιτούμενης ζήτησης.

### 3.3 Νέα Στοιχεία

#### 3.3.1 Το πρόβλημα της χρονικής περιοδικότητας

##### 3.3.1.1 Ορισμός του προβλήματος

Η επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης ανάθεσης φορτίου σε αεριοστροβλικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής για μια χρονική περίοδο παρέχει στο χειριστή του συστήματος την απαραίτητη πληροφορία για να ρυθμίσει τη συνολική λειτουργία των μονάδων για το χρονικό διάστημα αυτό αλλά και το κόστος λειτουργίας του. Όταν πλέον παρέλθει το χρονικό διάστημα αυτό θα πρέπει με τα νέα δεδομένα (νέα ζήτηση ισχύος, νέες τιμές για την κατάσταση λειτουργίας των μονάδων πριν το νέο εξεταζόμενο χρονικό διάστημα), που έχουν προκύψει, να πραγματοποιηθεί εκ νέου η επίλυση του προβλήματος.

Καθ'όλη τη διάρκεια ενός έτους υπάρχουν περίοδοι κατά τις οποίες η καθημερινή ζήτηση παραμένει η ίδια ή μεταβάλλεται ελάχιστα. Ως μία τέτοια περίοδο θα μπορούσαμε π.χ. να θεωρήσουμε έναν μήνα του έτους. Αν η επίλυση του προβλήματος γίνεται επί καθημερινής βάσεως (24 ώρες), δηλαδή κάθε μέρα της περιόδου αυτής υπολογίζεται το πρόγραμμα λειτουργίας που θα ακολουθήσει ο χειριστής την επόμενη, τότε για μία περίοδο που αποτελείται από  $N$  ημέρες το πρόβλημα θα πρέπει να επιλυθεί  $N$  φορές.

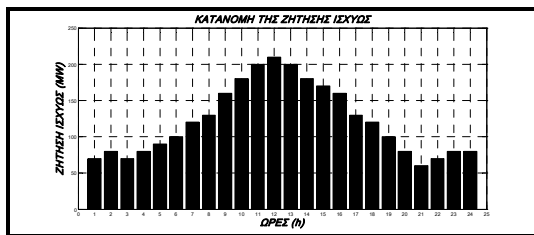
Εφόσον όμως υποθέσουμε ότι η καθημερινή ζήτηση παραμένει η ίδια, γεννάται το ερώτημα για ποιο λόγο να μην επιλυθεί το πρόβλημα μία φορά και το πρόγραμμα λειτουργίας που θα προκύψει να επαναλαμβάνεται για κάθε ημέρα της περιόδου αυτής. Προκύπτει έτσι το πρόβλημα της χρονικής περιοδικότητας ή αλλιώς της χρονικής περιοδικότητας του προγράμματος λειτουργίας των μονάδων. Ακολουθεί ένα παράδειγμα για την κατανόηση του προβλήματος.

### 3.3.1.1.1 Παράδειγμα

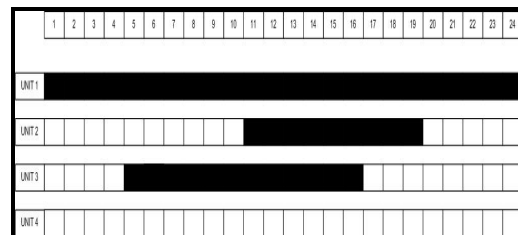
Εξετάζεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης ανάθεσης φορτίου σε ένα σύστημα 4 αεριοτροβιλικών μονάδων για μία περίοδο 24 ωρών με τα στοιχεία του ΠΙΝΑΚΑ 3.2 και την κατανομή ζήτησης ισχύος του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 3.3.

$i$	$P_{\min,i}$	$P_{\max,i}$	$OC_i^{(j)}$	$\bar{C}_i$	$\overline{\overline{C}}_i$	$\bar{T}_i$	$\overline{\overline{T}}_i$	$T_i$	$s_o$
1	20	40	$80x_i^{(j)^2} + 40$	120	100	2	2	1	ON
2	30	70	$108x_i^{(j)^2} + 69x + 63$	180	150	2	2	1	ON
3	50	100	$169x_i^{(j)^2} - 5.6x + 266$	240	200	2	2	1	OFF
4	60	120	$180x_i^{(j)^2} + 312$	240	200	2	2	1	ON

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2 – Όλα τα κόστη σε MWh



ΣΧΗΜΑ 3.3

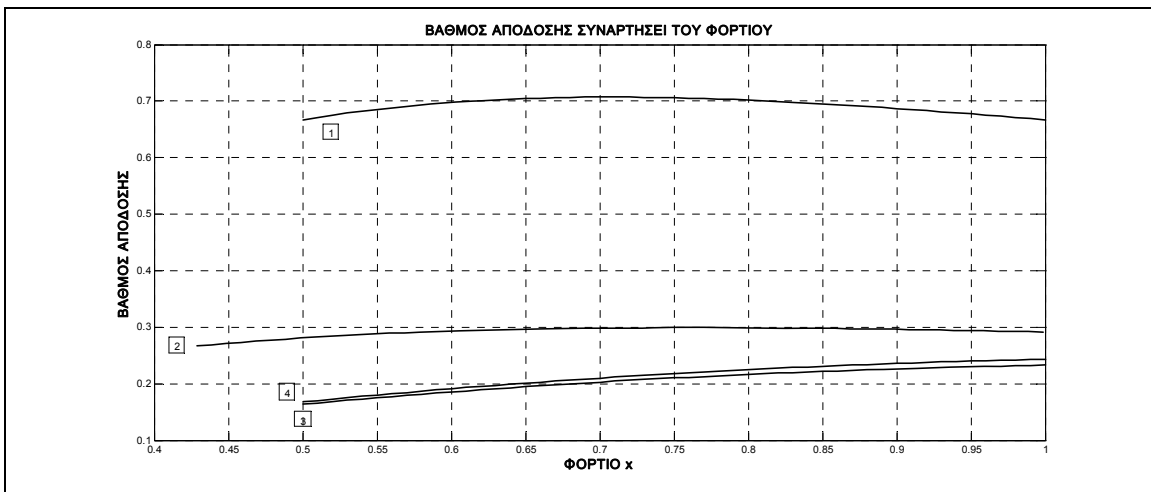
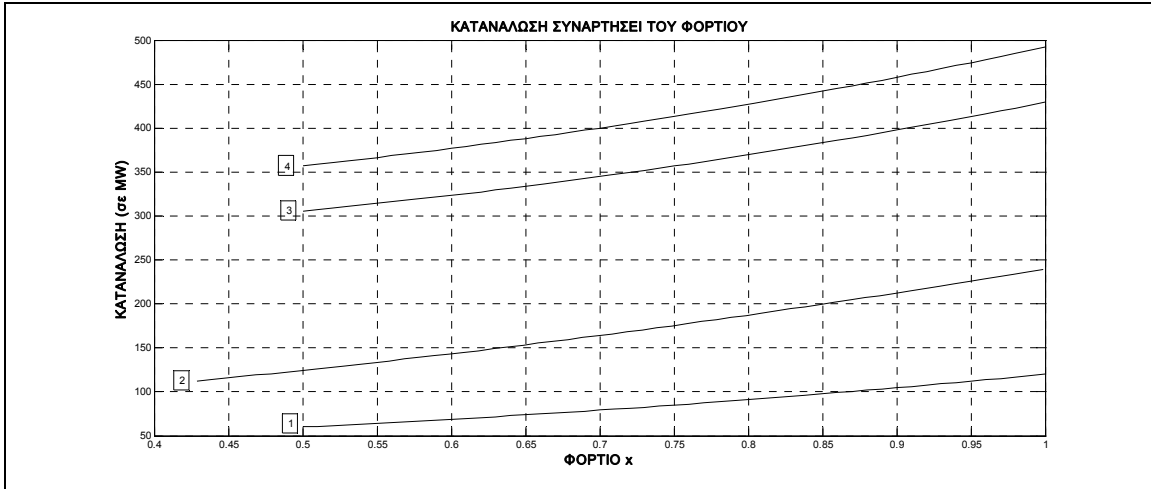


ΣΧΗΜΑ 3.4

### Ανάλυση των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής του παραδείγματος

Στα επόμενα διαγράμματα παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής του εξεταζόμενου παραδείγματος. Ως βαθμός απόδοσης  $\eta$  μία μονάδας ηλεκτροπαραγωγής ορίζεται το κλάσμα της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την ισχύ του καυσίμου.

$$\eta = \frac{\text{ηλεκτρική ισχύς } MW}{\text{ισχύς καυσίμου } MW}$$





## Επισημάνσεις για τις μονάδες

### Μονάδα 1

Για μία ώρα λειτουργίας και φορτίο  $x=1$  η μονάδα καταναλώνει 432 GJ και παράγει 288 GJ. Βαθμός απόδοσης της μονάδας για φορτίο  $x=1$  ίσος με 66,6%.

Για μία ώρα λειτουργίας και φορτίο  $x=0.7$  η μονάδα καταναλώνει 285,12 GJ και παράγει 201,6 GJ. Βαθμός απόδοσης της μονάδας για φορτίο  $x=0.7$  ίσος με 70,7%.

Για μία ώρα λειτουργίας και φορτίο  $x=0.5$  η μονάδα καταναλώνει 216 GJ και παράγει 144 GJ. Βαθμός απόδοσης της μονάδας για φορτίο  $x=0.5$  % ίσος με 66,6%.

Η **μονάδα ηλεκτροπαραγωγής 1** κρίνοντας από τις μεγάλες τιμές του β.α. είναι μία μονάδα συνδυασμένου κύκλου. Η τιμή του β.α. **70,7%** είναι πολύ μεγάλη και δε συναντάται σε πρακτικές εφαρμογές. Ακόμα και σε περιπτώσεις συνδυασμένων κύκλων τελευταίας τεχνολογίας, η μέγιστη τιμή του β.α. φτάνει στο 57% (λ.χ. Αλιβέρι).

Στο πρόβλημα που εξετάζουμε η μεγάλη τιμή αυτή δεν επηρεάζει τη μεθοδολογία και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της.

### Μονάδα 2

Για μία ώρα λειτουργίας και φορτίο  $x=1$  η μονάδα καταναλώνει 864 GJ και παράγει 252 GJ. Βαθμός απόδοσης της μονάδας για φορτίο  $x=1$  ίσος με 29,16%.

Για μία ώρα λειτουργίας και φορτίο  $x=0.7$  η μονάδα καταναλώνει 591,192 GJ και παράγει 176,4 GJ. Βαθμός απόδοσης της μονάδας για φορτίο  $x=0.7$  ίσος με 29,83%.

Για μία ώρα λειτουργίας και φορτίο  $x=0.5$  η μονάδα καταναλώνει 448,2 GJ και παράγει 126 GJ. Βαθμός απόδοσης της μονάδας για φορτίο  $x=0.5$  ίσος με 28,11%.

Η **μονάδα ηλεκτροπαραγωγής 2** κρίνοντας από τις τιμές του β.α. είναι μία αεριοστροβιλική εγκατάσταση.

### Μονάδα 3

Για μία ώρα λειτουργίας και φορτίο  $x = 1$  η μονάδα καταναλώνει 1545,84 GJ και παράγει 360 GJ. Βαθμός απόδοσης της μονάδας για φορτίο  $x = 1$  ίσος με 23,28%.

Για μία ώρα λειτουργίας και φορτίο  $x = 0.7$  η μονάδα καταναλώνει 1241,604 GJ και παράγει 252 GJ. Βαθμός απόδοσης της μονάδας για φορτίο  $x = 0.7$  ίσος με 20,29%.

Για μία ώρα λειτουργίας και φορτίο  $x = 0.5$  η μονάδα καταναλώνει 1099,620 GJ και παράγει 180 GJ. Βαθμός απόδοσης της μονάδας για φορτίο  $x = 0.5$  ίσος με 16,36%.

Η **μονάδα ηλεκτροπαραγωγής 3** κρίνοντας από τις τιμές του β.α. είναι μία αεριοστροβιλική εγκατάσταση.

### Μονάδα 4

Για μία ώρα λειτουργίας και φορτίο 100% η μονάδα καταναλώνει 1771,200 GJ και παράγει 432 GJ. Βαθμός απόδοσης της μονάδας για φορτίο 100% ίσος με 24,39%.

Για μία ώρα λειτουργίας και φορτίο 70% η μονάδα καταναλώνει 1440,72 GJ και παράγει 302,4 GJ. Βαθμός απόδοσης της μονάδας για φορτίο 70% ίσος με 20,98%.

Για μία ώρα λειτουργίας και φορτίο 50% η μονάδα καταναλώνει 1285,20 GJ και παράγει 216 GJ. Βαθμός απόδοσης της μονάδας για φορτίο 50% ίσος με 16,80%.

Η **μονάδα ηλεκτροπαραγωγής 4** κρίνοντας από τις τιμές του β.α. είναι μία αεριοστροβιλική εγκατάσταση.

Στο ΣΧΗΜΑ 3.4 παρουσιάζεται η βέλτιστη λύση του προβλήματος που προκύπτει μετά από ένα τρέξιμο του ΓΑ με τα ακόλουθα δεδομένα εισόδου:

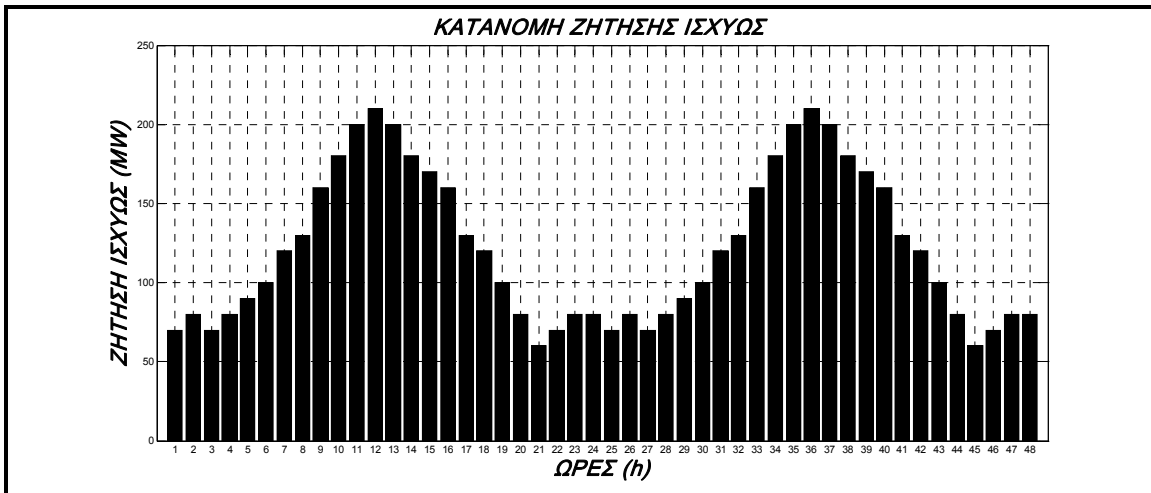
Αριθμός Γονέων: 40

Αριθμός Απογόνων: 50

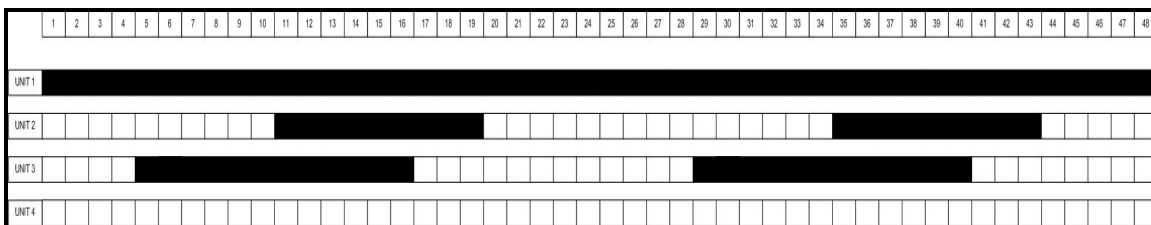
Αριθμός Επιλέκτων: 35

Η βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 375<sup>η</sup> γενιά και το συνολικό κόστος λειτουργίας που προκύπτει είναι 8479 MWh.

Αν η ζήτηση του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 3.3 παρουσιασθεί και την επόμενη ημέρα τότε για το νέο πρόβλημα των 48 ωρών θα έχουμε τη ζήτηση του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 3.5. Το θέμα που θα εξετάσουμε είναι αν μπορεί το πρόγραμμα λειτουργίας που προέκυψε μετά την επίλυση του προβλήματος για το χρονικό διάστημα των 24 ωρών να επαναληφθεί, δηλαδή να δημιουργηθεί το πρόγραμμα λειτουργίας των 48 ωρών του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 3.6. Όσον αφορά την απαιτούμενη ζήτηση το πρόγραμμα λειτουργίας των 48 ωρών, λόγω της επανάληψης του 24-ώρου προγράμματος λειτουργίας και εφόσον και η 24-ωρη ζήτηση είναι περιοδική, θα την καλύπτει. Επισημαίνεται, ότι η βέλτιστη λύση που βρίσκει κανείς για το 24-ωρο πρόβλημα, αν γίνει η προαναφερθείσα προσαρμογή στο 48-ωρο, δεν ταυτίζεται απαραίτητα με τη βέλτιστη λύση που προκύπτει από την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης των 48 ωρών. Οι περιορισμοί των δύο προβλημάτων δεν είναι οι ίδιοι. Άρα οι βέλτιστες λύσεις τους δεν ταυτίζονται αναγκαστικά.



ΣΧΗΜΑ 3.5



ΣΧΗΜΑ 3.6

Ο μόνος περιορισμός που υπάρχει στο ‘κόλλημα’ των δύο ίδιων προγραμμάτων λειτουργίας είναι οι χρόνοι εκκίνησης, κράτησης και παραμονής της κάθε μονάδας σε κατάσταση ON και OFF. Ο περιορισμός που πρέπει να ικανοποιείται σε κάθε περίπτωση είναι ο ακόλουθος:

$$s_i^{(k)} = 0, \forall k \in [j, j + \bar{T}_i + \bar{\bar{T}}_i + T_i], \text{ αν } s_i^{(j-1)} = 1 \text{ και } s_i^{(j)} = 0$$

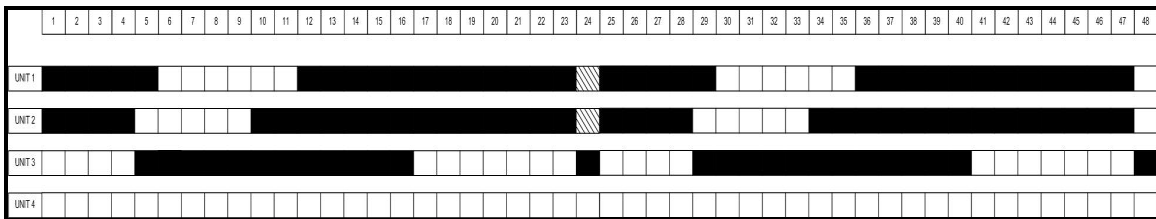
Επειδή όμως ο περιορισμός αυτός ικανοποιείται σε κάθε μεμονωμένο πρόγραμμα λειτουργίας, αρκεί να ελεγχθεί η περιοχή όπου γίνεται η ένωση.

Στο παράδειγμα που εξετάζεται και με τα δεδομένα  $\bar{T}_i$ ,  $\bar{\bar{T}}_i$ ,  $T_i$  γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι τηρείται ο περιορισμός. Το πρόγραμμα αυτό λειτουργίας μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα πρόγραμμα περιοδικής λειτουργίας.

Αντίστοιχα για το παραπάνω πρόβλημα η λύση του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 3.7 δεν τηρεί τον περιορισμό της περιοδικότητας.



ΣΧΗΜΑ 3.7



ΣΧΗΜΑ 3.8

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα έτυχε η βέλτιστη λύση να τηρεί και τον πρόσθετο περιορισμό της περιοδικότητας. Για να επιτυγχάνουμε σε κάθε περίπτωση την επίλυση του περιοδικού προβλήματος, πράγμα που σημαίνει την εύρεση εκείνου του προγράμματος λειτουργίας που ικανοποιεί την ζήτηση ισχύος με το ελάχιστο κόστος ενώ ταυτόχρονα δεν παραβιάζονται οι περιορισμοί λειτουργίας, πρέπει ο υπάρχων αλγόριθμος υπολογισμού να τροποποιηθεί ώστε κάθε πιθανό σενάριο να ελέγχεται ως προς τον νέο περιορισμό της περιοδικότητας και να μας οδηγεί σε χρονικά περιοδικά προγράμματα λειτουργίας.

Το παράδειγμα που εξετάστηκε βοηθάει στην κατανόηση του προβλήματος της περιοδικότητας. Γίνεται σαφές ότι το πρόβλημα ανάγεται στον έλεγχο της τήρησης των χρόνων εκκίνησης, κράτησης και παραμονής σε κατάσταση ON και OFF στην περιοχή της ένωσης των δύο ίδιων προγραμμάτων. Στη συνέχεια προτείνονται δύο μεθοδολογίες για τον έλεγχο του πρόσθετου περιορισμού της περιοδικότητας.

### 3.3.1.2 Τρόποι επίλυσης του προβλήματος της περιοδικότητας

Προτείνονται δύο τρόποι επίλυσης του προβλήματος της περιοδικότητας για ένα πρόβλημα βέλτιστης ανάθεσης φορτίου σε αεριοστροβλικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Ο αλγόριθμος υπολογισμού της συνάρτησης κόστους τροποποιείται με την προσθήκη μίας υπορουτίνας η οποία ελέγχει αν τηρείται ο περιορισμός της περιοδικότητας. Η διαφορά στους δύο τρόπους επίλυσης εντοπίζεται στις ενέργειες που πραγματοποιεί ο κώδικας σε περίπτωση μη-τήρησης της περιοδικότητας. Έτσι διακρίνουμε τους δύο ακόλουθους τρόπους:

- A) Της επιβολής ποινής
- B) Της διόρθωσης του προγράμματος λειτουργίας

#### 3.3.1.2.1 Επίλυση με επιβολή ποινής

Κάθε εξεταζόμενο πρόγραμμα λειτουργίας ελέγχεται ως προς την τήρηση του περιορισμού της περιοδικότητας. Στη συνέχεια, αν κάποια μονάδα του συστήματος παραβιάζει τον περιορισμό, προστίθεται στο ΣΚΛ μία ποσότητα που δρα ως ποινή. Δοκιμάστηκαν δύο τρόποι υπολογισμού της ποσότητας αυτής. Ο πρώτος τρόπος υπολογίζει την ποσότητα αυτή  $PC$  (Penalty Cost) με την ακόλουθη σχέση:

$$PC = \begin{cases} 100000 \cdot e^k, & \text{αν } k \in [1, M] \\ 0, & \text{αν } k = 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

$k$  είναι ο αριθμός των μονάδων που αδυνατούν να λειτουργήσουν περιοδικά. Ο δεύτερος τρόπος υπολογίζει το  $PC$  με την ακόλουθη σχέση:

$$PC = \left( \sum_{i=1}^M C_i \right) \cdot e^k \quad (3.3)$$

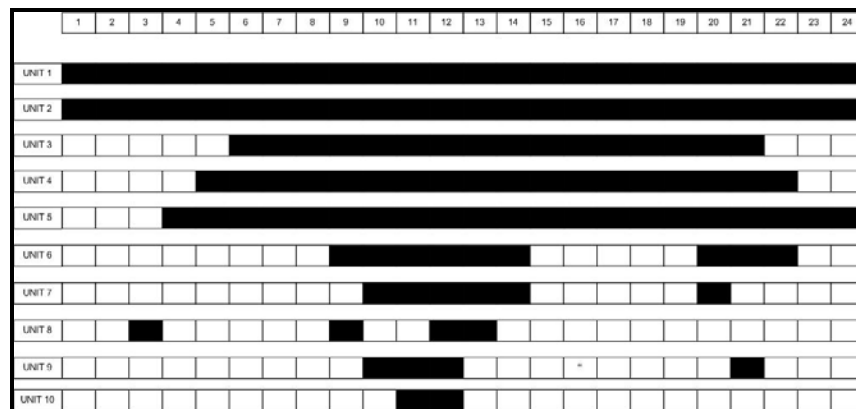
Στην σχέση (3.3)  $C_i = \overline{C_i}$  αν δεν τηρείται η περιοδική λειτουργία για τη μονάδα  $u_i$  και  $C_i = 0$  αν τηρείται.  $k$  είναι ο αριθμός των μονάδων που αδυνατούν να λειτουργήσουν περιοδικά.

### 3.3.1.2.2 Επίλυση με διόρθωση του προγράμματος λειτουργίας

Στην περίπτωση αυτή ο αλγόριθμος, μετά τη διόρθωση του προγράμματος λειτουργίας ώστε να τηρούνται οι χρόνοι εκκίνησης, τερματισμού και παραμονής σε μία κατάσταση κάθε μονάδας  $u_i$ , διορθώνει το πρόγραμμα λειτουργίας (αλλαγή από 0 σε 1), ώστε το προκύπτον πρόγραμμα λειτουργίας να τηρεί τον περιορισμό της περιοδικότητας.

Θα περιγραφεί εν συντομία ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η διόρθωση προγράμματος λειτουργίας ως προς τον περιορισμό της περιοδικότητας.

Έχουμε το πρόγραμμα λειτουργίας του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 3.9 για ένα σύνολο 10 μονάδων ηλεκτροπαραγωγής το οποίο και πρέπει να διορθωθεί.



ΣΧΗΜΑ 3.9

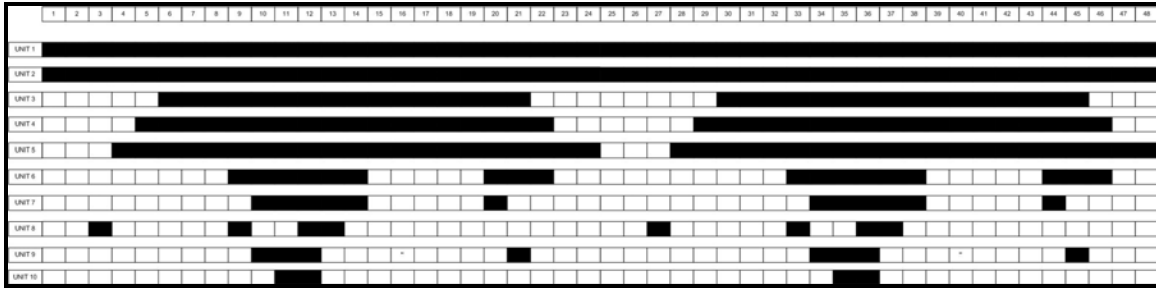
Οι χρόνοι εκκίνησης, τερματισμού και παραμονής σε μία κατάσταση της κάθε μονάδας βρίσκονται στον ΠΙΝΑΚΑ 4.1. Η διαδικασία τροποποίησης του σεναρίου είναι η ακόλουθη:

- 1) Από το υπάρχον πρόγραμμα για την περίοδο των  $N$  ωρών δημιουργείται ένα νέο πρόγραμμα λειτουργίας για μία περίοδο  $2N$  ωρών κατά το ακόλουθο σχήμα:

$$s_i^{j+k} = s_i^j, \quad \forall k \in [1, N], \quad \forall i \in [1, M]$$



Για το παράδειγμα του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 3.9 δημιουργείται το νέο πρόγραμμα λειτουργίας του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 3.10.



ΣΧΗΜΑ 3.10

2) Στη συνέχεια πραγματοποιούνται οι ακόλουθοι έλεγχοι και αντίστοιχες διορθώσεις για κάθε μονάδα  $u_i$  :

- Αν  $s_i^N = 1$  και  $s_i^{N+1} = 1$ , δηλαδή η μονάδα  $u_i$  είναι σε κατάσταση ON τη N και τη N+1 ώρα, δεν πραγματοποιείται διόρθωση του προγράμματος λειτουργίας της μονάδας  $u_i$ .
- Αν  $s_i^N = 1$  και  $s_i^{N+1} = 0$ , δηλαδή την N+1 ώρα ξεκινάει διαδικασία κράτησης SHDN, τότε αρχικά ελέγχεται αν η μονάδα έχει παραμείνει σε κατάσταση ON για τον ελάχιστο χρόνο παραμονής. Αν όχι διορθώνονται οι επόμενες χρονικές στιγμές (0 σε 1). Η τελευταία ώρα που διορθώνεται έστω ότι συμβολίζεται με  $M_i$  (αν δεν υπάρξει διόρθωση  $M_i = N$ ) Έπειτα υπολογίζεται η χρονική περίοδος των  $K_i$  ωρών μετά τη  $M_i$  ώρα για την οποία  $s_i^k = 0, \forall k \in [M_i + 1, M_i + K_i]$ . Ελέγχεται δηλαδή αν επαρκεί ο χρόνος για μία κράτηση, μία εκκίνηση και για μία παραμονή σε κατάσταση OFF. Αν  $K_i < \bar{T}_i + T_i + \bar{T}_i$ , δηλαδή ο χρόνος δεν επαρκεί, τότε η διαδικασία κράτησης ακυρώνεται, δηλαδή πραγματοποιείται η διόρθωση:

$$s_i^k = 1, \forall k \in [M_i + 1, M_i + K_i]$$

Όλα τα '0' του χρονικού διαστήματος  $[N + 1, N + K_i]$  γίνονται '1'.

- Αν  $s_i^N = 0$  και  $s_i^{N+1} = 1$ , δηλαδή την  $N+1$  ώρα ξεκινάει διαδικασία εκκίνησης STUP, τότε αρχικά υπολογίζεται η χρονική περίοδος των  $K_i$  ωρών πριν τη  $(N+1)$  ώρα για την οποία  $s_i^k = 0, \forall k \in [N - K_i + 1, N]$ . Ελέγχεται δηλαδή αν επαρκεί ο χρόνος για μία κράτηση, μία εκκίνηση και για μία παραμονή σε κατάσταση OFF. Αν  $K_i < \bar{T}_i + T_i + \bar{T}_i$   $K_i < \bar{T}_i + T_i + \bar{T}_i$ , δηλαδή ο χρόνος δεν επαρκεί, τότε πραγματοποιείται η ακόλουθη διόρθωση:

$$s_i^k = 1, \forall k \in [(N+1) - K_i, N]$$

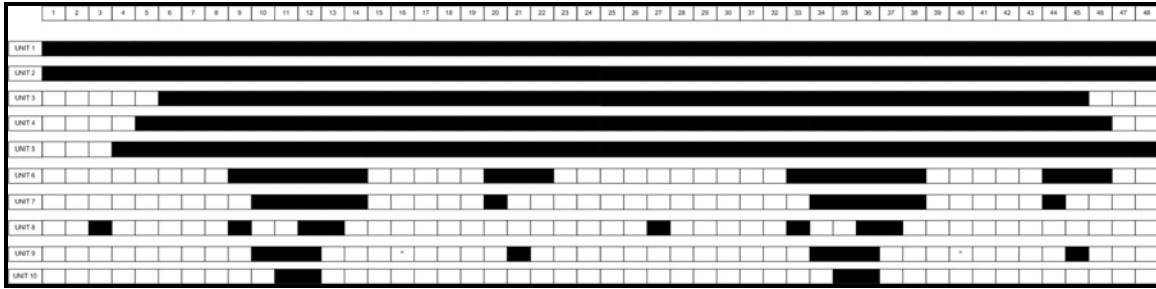
Όλα τα '0' του χρονικού διαστήματος  $[N - K_i + 1, N]$  γίνονται '1'.

- Αν  $s_i^N = 0$  και  $s_i^{N+1} = 0$ , τότε αρχικά υπολογίζεται η χρονική περίοδος των  $K_i'$  ωρών πριν τη  $(N+1)$  ώρα και των  $K_i''$  μετά την  $N$  ώρα για την οποία  $s_i^k = 0, \forall k \in [(N+1) - K_i', N + K_i'']$ . Ελέγχεται δηλαδή αν επαρκεί ο χρόνος για μία κράτηση, μία εκκίνηση και για μία παραμονή σε κατάσταση OFF. Αν  $K_i' + K_i'' < \bar{T}_i + T_i + \bar{T}_i$ , δηλαδή ο χρόνος δεν επαρκεί, τότε πραγματοποιείται η ακόλουθη διόρθωση:

$$s_i^k = 1, \forall k \in [(N+1) - K_i', N + K_i'']$$

Όλα τα '0' του χρονικού διαστήματος  $[(N+1) - K_i', N + K_i'']$  γίνονται '1'.

Με βάση την προαναφερθείσα διαδικασία το πρόγραμμα λειτουργίας των 24 ωρών του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 3.10 τροποποιείται σε αυτό του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 3.11.



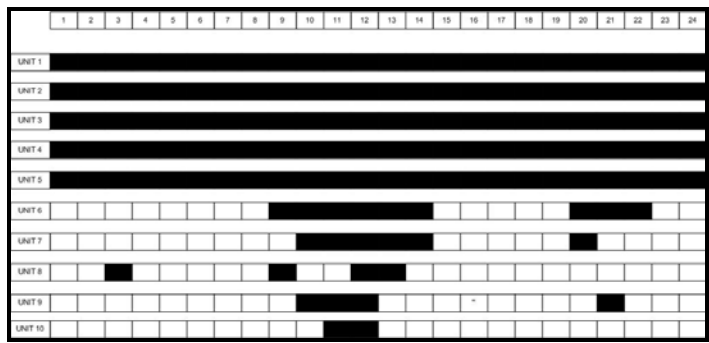
ΣΧΗΜΑ 3.11

- 3) Το τελευταίο στάδιο επεξεργασίας του προγράμματος λειτουργίας περιλαμβάνει τη μετατροπή του προγράμματος λειτουργίας των  $2N$  ωρών σε αυτό των  $N$  ωρών. Αυτό γίνεται με βάση το ακόλουθο σχήμα:

$$s_i^j = \max(s_i^j, s_i^{N+j}), \forall j \in [1, N]$$

Οι μόνες αλλαγές που μπορεί να έχουν γίνει στο πρόγραμμα λειτουργίας είναι από '0' σε '1'. Οι αλλαγές αυτές μπορεί να έχουν γίνει είτε στο χρονικό διάστημα  $[1, N]$ , είτε στο χρονικό διάστημα  $[N+1, 2N]$ , είτε και στα δύο. Για να μεταφερθούν οι αλλαγές (0 σε 1) που έχουν γίνει στο διάστημα  $[N+1, 2N]$  στο διάστημα  $[1, N]$  και να προκύψει το περιοδικό πρόγραμμα λειτουργίας, στην κατάσταση  $s_i^j$ , όπου  $j \in [1, N]$ , εισάγεται το μέγιστο των καταστάσεων  $s_i^j$  και  $s_i^{j+N}$ ,  $j \in [1, N]$ .

Τελικά το πρόγραμμα λειτουργίας του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 3.9 τροποποιείται σε αυτό του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 3.12 το οποίο και τηρεί τον περιορισμό της περιοδικότητας.



ΣΧΗΜΑ 3.12

## 4 Πιστοποίηση – ανάλυση των εξεταζόμενων περιπτώσεων

Ο κώδικας που δημιουργήθηκε πρέπει να πιστοποιηθεί. Η περίπτωση που θα εξεταστεί έχει επιλεγεί από τη βιβλιογραφία [25] και αφορά στο πρόβλημα βελτιστοποίησης ανάθεσης φορτίου για ένα σύνολο 10 αεριοστροβλικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Τα δεδομένα του προβλήματος δίνονται στους ακόλουθους πίνακες. Επιπλέον τονίζεται ότι έχουμε θέσει τη θερμή εφεδρεία ίση με 1,1 ( $SR=1,1$ ). Επίσης αναφέρεται ο χρόνος παραμονής σε κατάσταση ON και OFF (minramp) για όλες τις μονάδες είναι ίσος με 0, δηλαδή αυτό πρακτικά σημαίνει ότι μία μονάδα μπορεί να κλείσει να ανοίξει άμεσα.

	UNIT 1	UNIT 2	UNIT 3	UNIT 4	UNIT 5
<b>Pmax (MW)</b>	455	455	130	130	162
<b>Pmin (MW)</b>	150	150	20	20	25
<b>c (\$/h)</b>	1000	970	700	680	450
<b>b(\$/MWh)</b>	16.19	17.26	16.60	16.50	19.70
<b>a(\$/MW<sup>2</sup>-h)</b>	0.00048	0.00031	0.002	0.00211	0.00398
<b>min up (h)</b>	8	8	5	5	6
<b>min down (h)</b>	7	7	4	4	5
<b>hot start cost (\$)</b>	4500	5000	550	560	900
<b>cold start cost (\$)</b>	9000	10000	1100	1120	1800
<b>cold start hours (h)</b>	5	5	4	4	4
<b>initial status</b>	ON	ON	OFF	OFF	OFF
<b>initial status hours (h)</b>	8	8	5	5	6

	UNIT 6	UNIT 7	UNIT 8	UNIT 9	UNIT 10
<b>Pmax (MW)</b>	80	85	55	55	55
<b>Pmin (MW)</b>	20	25	10	10	10
<b>c (\$/h)</b>	970	480	660	665	970
<b>b(\$/MWh)</b>	22.26	27.74	25.92	27.27	27.79
<b>a(\$/MW<sup>2</sup>-h)</b>	0.00712	0.00079	0.00413	0.00222	0.00173
<b>min up (h)</b>	3	3	1	1	1
<b>min down (h)</b>	2	2	0	0	0
<b>hot start cost (\$)</b>	170	260	30	30	30
<b>cold start cost (\$)</b>	340	520	60	60	60
<b>cold start hours (h)</b>	2	2	0	0	0
<b>initial status</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
<b>initial status hours (h)</b>	3	3	1	1	1

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1

Γίνεται μία σύντομη επεξήγηση των μεγεθών του ΠΙΝΑΚΑ 4.1.  $P_{\max}$  και  $P_{\min}$  είναι αντίστοιχα το μέγιστο και το ελάχιστο ποσό ισχύος (σε MW) που μία μονάδα μπορεί να αποδώσει. Τα **a**, **b**, **c** είναι οι συντελεστές του πολυωνύμου 2<sup>ου</sup> βαθμού μέσω του οποίου υπολογίζεται το ωριαίο κόστος λειτουργίας μίας μονάδας συναρτήσει του φορτίου της. Το κόστος λειτουργίας για την ώρα  $t_j$  δίνεται από τη σχέση:

$$OC_i^j = a_i x_i^{j2} + b_i x_i^j + c_i$$

**min up** είναι ο ελάχιστος χρόνος σε ώρες που απαιτείται για τη διαδικασία εκκίνησης κάθε μονάδας. Αντίστοιχα **min down** είναι ο ελάχιστος χρόνος σε ώρες που απαιτείται για τη διαδικασία κράτησης κάθε μονάδας. Το **hot start cost** είναι το κόστος εκκίνησης για κάθε μονάδα που βρίσκεται σε θερμή κατάσταση. Το **cold start cost** είναι το κόστος εκκίνησης για μία μονάδα που βρίσκεται σε κρύα κατάσταση. Το **cold start hours** είναι οι ώρες που μία μονάδα πρέπει να βρίσκεται σε κατάσταση OFF για να θεωρήσουμε ότι βρίσκεται πλέον σε κρύα κατάσταση. **Initial status** είναι η κατάσταση της μονάδας ακριβώς πριν το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα και **initial status hours** η χρονική διάρκεια για την οποία βρίσκεται ήδη στην κατάσταση αυτή (πριν το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα).

Ωρα	Ζήτηση (MW)	Ωρα	Ζήτηση (MW)
1	700	13	1400
2	750	14	1300
3	850	15	1200
4	950	16	1050
5	1000	17	1000
6	1100	18	1100
7	1150	19	1200
8	1200	20	1400
9	1300	21	1300
10	1400	22	1100
11	1450	23	900
12	1500	24	800

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2

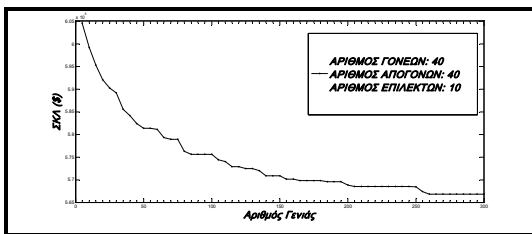
#### Ανάλυση των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής του παραδείγματος

Δεν είναι δυνατή η χάραξη καμπυλών όπως ο βαθμός απόδοσης συναρτήσει του φορτίου ή η κατανάλωση ενέργειας σε μία ώρα συναρτήσει του φορτίου λόγω των συντελεστών του κόστους λειτουργίας (το κόστος προκύπτει σε \$) κάθε μονάδας.

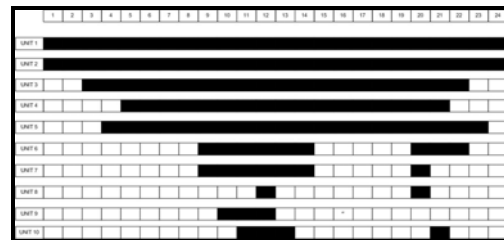
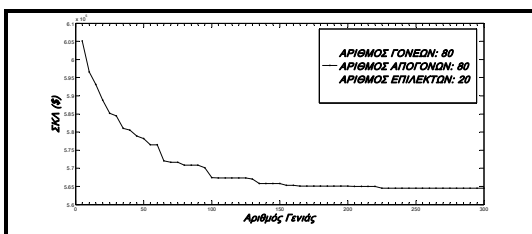
Υποθετικά και χωρίς αυτό να επηρεάζει τα επόμενα μπορούμε να πούμε (κρίνοντας από το μέγεθος και το χρόνο εκκίνησης και κράτησης των μονάδων) ότι οι μονάδες 1 και 2 είναι μονάδες συνδυασμένου κύκλου, ενώ όλες οι υπόλοιπες απλές αεριοστροβλικές μονάδες.

#### 4.1 Περίπτωση χωρίς τον περιορισμό περιοδικότητας

Εξετάζεται η περίπτωση του ΠΙΝΑΚΑ 4.2 χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο περιορισμός της περιοδικότητας. Πραγματοποιήθηκαν 6 τρεξίματα του ΓΑ με διαφορετικούς πληθυσμούς (διαφορετικοί αριθμοί γονεών, απογόνων και επιλέκτων) για να ελεγχθεί αν 1) ο ΓΑ καταφέρνει να εντοπίσει το ολικό ελάχιστο και 2) αν δεν τα καταφέρει να εντοπιστεί μία ‘περίπου βέλτιστη’ λύση και να συγκριθεί το αποτέλεσμα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που έχει υπολογιστεί στη βιβλιογραφία [25]. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται ως ακολούθως:

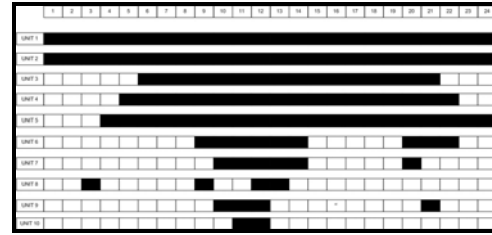
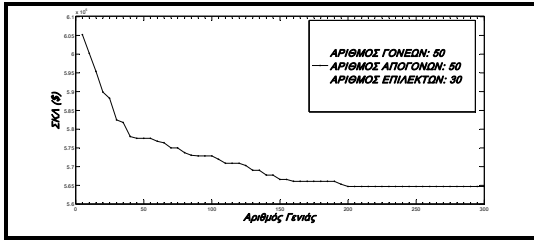


ΣΚΑ: \$ 565948.58

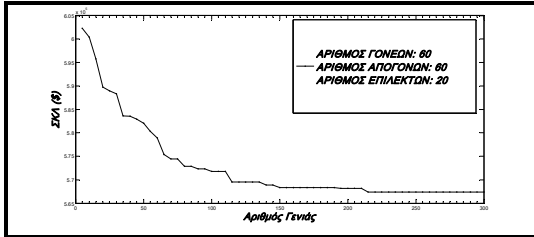


ΣΚΑ: \$ 564529.68

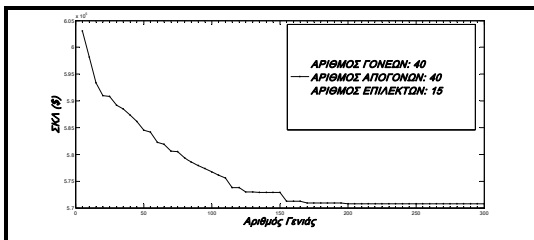




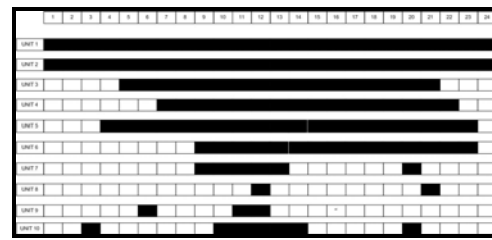
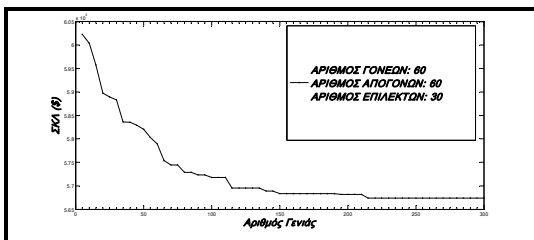
ΣΚΑ: \$ 564641.09



ΣΚΑ: \$ 567367.98



ΣΚΑ: \$ 570257.31

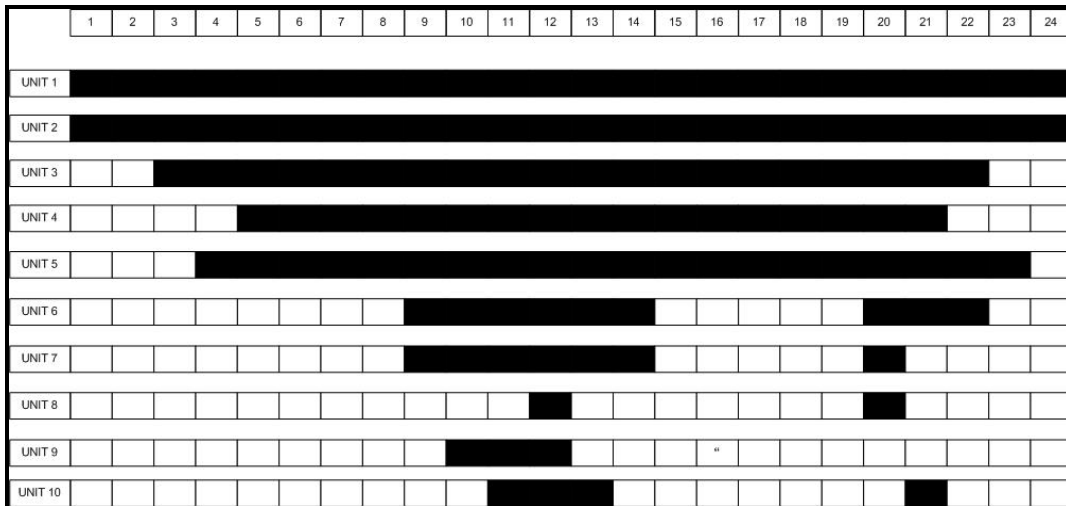


ΣΚΑ: \$ 567367.98

Αυτό που δυστυχώς παρατηρούμε είναι ότι ο ΓΑ εγκλωβίζεται σε τοπικά ακρότατα και οι λύσεις που προκύπτουν για τα διαφορετικά τρεξίματα δεν είναι οι ίδιες.

#### 4.1.1 Ανάλυση τη βέλτιστης λύσης

Το πρόγραμμα λειτουργίας με το ελάχιστο ΣΚΛ είναι αυτό του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 4.1.



**ΣΧΗΜΑ 4.1**

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	700	1	0.5385	0	0	0	0	0	0	0	0
2	750	1	0.6484	0	0	0	0	0	0	0	0
3	850	1	0.5824	1	0	0	0	0	0	0	0
4	950	1	0.7473	1	0	0.1543	0	0	0	0	0
5	1000	1	0.5714	1	1	0.1543	0	0	0	0	0
6	1100	1	0.7912	1	1	0.1543	0	0	0	0	0
7	1150	1	0.9011	1	1	0.1543	0	0	0	0	0
8	1200	1	1	1	1	0.1852	0	0	0	0	0
9	1300	1	1	1	1	0.5247	0.25	0.2941	0	0	0
10	1400	1	1	1	1	1	0.4125	0.2941	0	0.1818	0
11	1450	1	1	1	1	1	0.9125	0.2941	0	0.1818	0.1818
12	1500	1	1	1	1	1	1	0.2941	0.7818	0.1818	0.1818
13	1400	1	1	1	1	1	0.4125	0.2941	0	0	0.1818
14	1300	1	1	1	1	0.5247	0.25	0.2941	0	0	0
15	1200	1	1	1	1	0.1852	0	0	0	0	0
16	1050	1	0.6813	1	1	0.1543	0	0	0	0	0
17	1000	1	0.5714	1	1	0.1543	0	0	0	0	0
18	1100	1	0.7912	1	1	0.1543	0	0	0	0	0
19	1200	1	1	1	1	0.1852	0	0	0	0	0
20	1400	1	1	1	1	1	0.4125	0.2941	0.1818	0	0
21	1300	1	1	1	1	0.6173	0.25	0	0	0	0.1818
22	1100	1	1	1	0	0.2469	0.25	0	0	0	0
23	900	1	0.9231	0	0	0.1543	0	0	0	0	0
24	800	1	0.7582	0	0	0	0	0	0	0	0

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3**

Στον ΠΙΝΑΚΑ 4.3 παρατίθεται το φορτίο της κάθε μονάδας για κάθε ώρα της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου. Όπως είναι και επιθυμητό οι μεγάλες μονάδες, οι μονάδες βάσης, οι οποίες και έχουν το μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας λειτουργούν σε

μεγάλα φορτία. Αντίστοιχα οι μικρότερες μονάδες ενεργοποιούνται για να καλύψουν μικρότερα ποσά ισχύος (αιχμές της ζήτησης) και για αυτό, όπως παρατηρούμε και από τα αποτελέσματα, λειτουργούν σε μικρά φορτία.

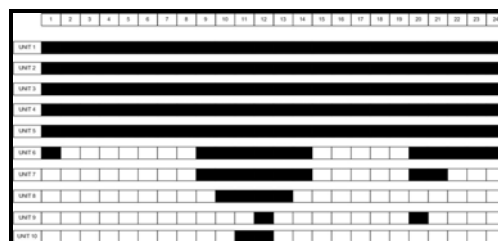
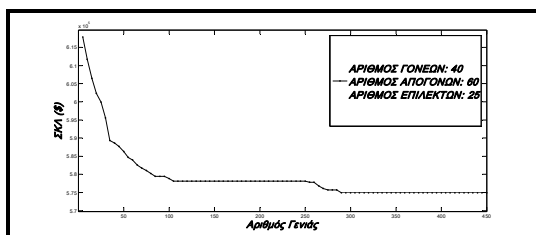
Το ΣΚΛ λειτουργίας που προέκυψε είναι \$ **564,529**. Το ελάχιστο ΣΚΛ για το συγκεκριμένο πρόβλημα που υπάρχει στη βιβλιογραφία είναι \$ **564,093 [25]** .

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ο ΓΑ που χρησιμοποιούμε δυστυχώς δεν καταφέρνει να εντοπίσει το ολικό βέλτιστο αποτέλεσμα και αυτό γιατί ο ΓΑ τερματίζεται πριν το εντοπίσει. Το καλύτερο αποτέλεσμα που βρήκαμε δε διαφέρει πολύ από το καλύτερο αποτέλεσμα της βιβλιογραφίας, πράγμα που σημαίνει ότι με διαφορετικά δεδομένα εισόδου στον ΓΑ ίσως και να πετυχαίναμε τη βέλτιστη λύση γρηγορότερα. Ο εντοπισμός καλύτερης λύσης ξεφεύγει από τα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, η οποία επικεντρώνεται στην επίλυση των επιμέρους προβλημάτων.

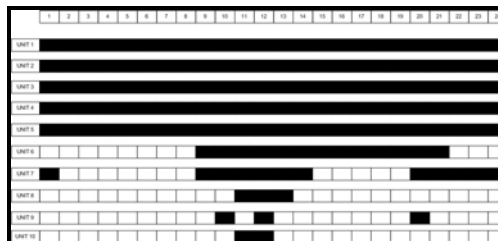
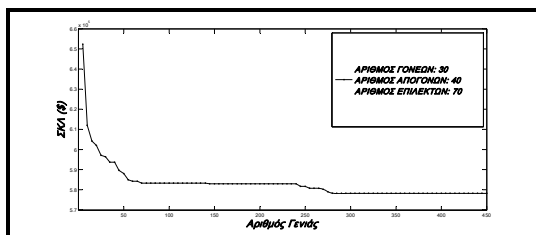
## 4.2 Περίπτωση με τον περιορισμό περιοδικότητας

### 4.2.1 Εύρεση περιοδικής λύσης με επιβολή ποινής PC από τη σχέση (3.2)

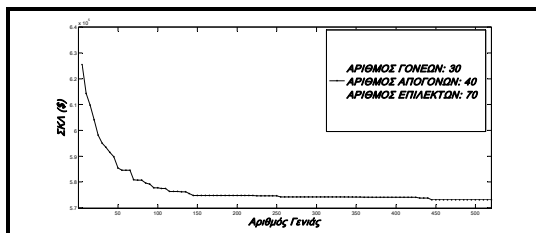
Εξετάζεται η περίπτωση του ΠΙΝΑΚΑ 4.2. Πραγματοποιήθηκαν 6 τρεξίματα του ΓΑ με στόχο την εύρεση περιοδικών λύσεων του προβλήματος. Τα αποτελέσματα και η ανάλυσή τους ακολουθούν.



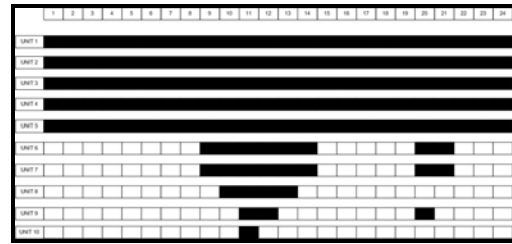
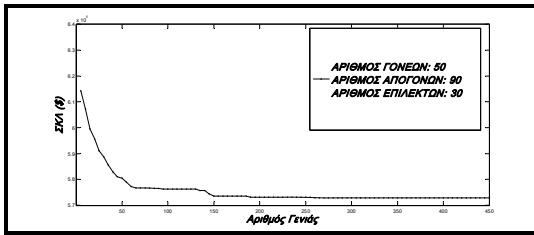
ΣΚΑ: \$ 574,847



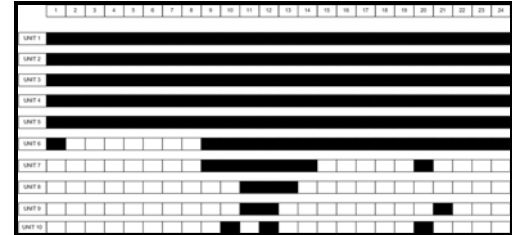
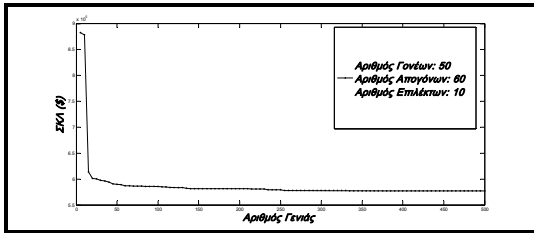
ΣΚΑ: \$ 578,217



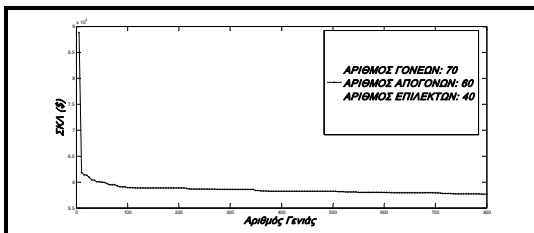
ΣΚΑ: \$ 573,142



ΣΚΛ: \$ 572,759.79



ΣΚΛ: \$ 577,184.21

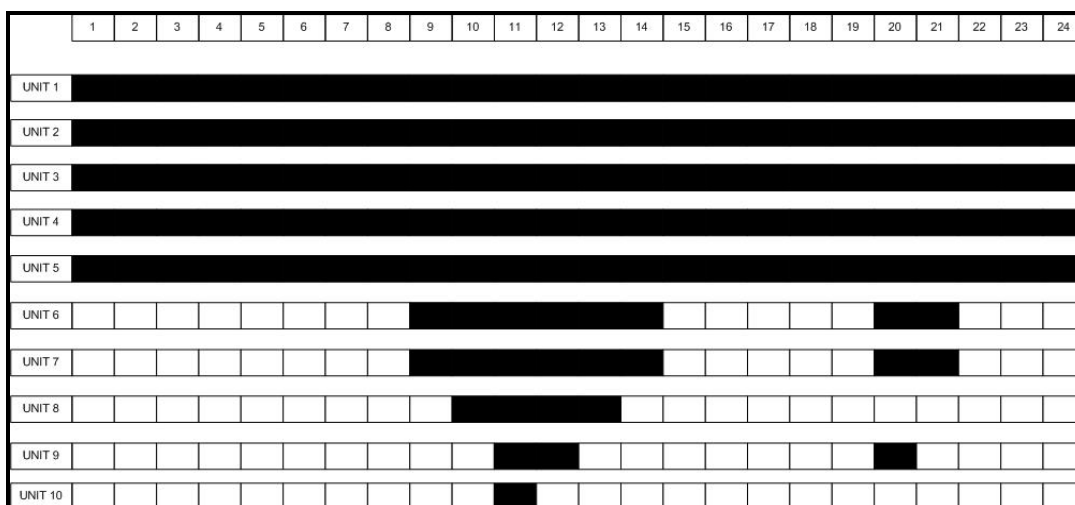


ΣΚΛ: \$ 576,307.06

Ο περιορισμός της περιοδικότητας τηρείται σε όλα τα παραπάνω αποτελέσματα. Όπως είναι αναμενόμενο, με την προσθήκη του νέου περιορισμού παρατηρείται αύξηση του ΣΚΛ. Σε όλα τα προγράμματα λειτουργίας οι ‘μεγάλες’ μονάδες, οι μονάδες βάσης (base units), παραμένουν σε κατάσταση ON σε όλο το χρονικό διάστημα εν αντιθέσει με τα μη περιοδικά προγράμματα λειτουργίας. Αυτό συνεπάγεται λειτουργία σε χαμηλά φορτία τις ώρες μη-αιχμής και αυξημένο κόστος λειτουργίας κατά τις ώρες αυτές.

#### 4.2.2 Ανάλυση της βέλτιστης περιοδικής λύσης

Το πρόγραμμα λειτουργίας με το ελάχιστο ΣΚΛ είναι αυτό του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 4.2 .



ΣΧΗΜΑ 4.2

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	700	1	0.3297	0.1829	0.3556	0.1543	0	0	0	0	0
2	750	1	0.3297	0.3803	0.5428	0.1543	0	0	0	0	0
3	850	1	0.3297	0.7752	0.9171	0.1543	0	0	0	0	0
4	950	1	0.4615	1	1	0.1543	0	0	0	0	0
5	1000	1	0.5714	1	1	0.1543	0	0	0	0	0
6	1100	1	0.7912	1	1	0.1543	0	0	0	0	0
7	1150	1	0.9011	1	1	0.1543	0	0	0	0	0
8	1200	1	1	1	1	0.1852	0	0	0	0	0
9	1300	1	1	1	1	0.5247	0.25	0.2941	0	0	0
10	1400	1	1	1	1	1	0.4125	0.2941	0.1818	0	0
11	1450	1	1	1	1	1	0.9125	0.2941	0.1818	0.1818	0
12	1500	1	1	1	1	1	1	0.2941	0.7818	0.1818	0.1818
13	1400	1	1	1	1	1	0.4125	0.2941	0.1818	0	0
14	1300	1	1	1	1	0.5247	0.25	0.2941	0	0	0
15	1200	1	1	1	1	0.1852	0	0	0	0	0
16	1050	1	0.6813	1	1	0.1543	0	0	0	0	0
17	1000	1	0.5714	1	1	0.1543	0	0	0	0	0
18	1100	1	0.7912	1	1	0.1543	0	0	0	0	0
19	1200	1	1	1	1	0.1852	0	0	0	0	0
20	1400	1	1	1	1	1	0.4125	0.2941	0	0.1818	0
21	1300	1	1	1	1	0.5247	0.25	0.2941	0	0	0
22	1100	1	0.7912	1	1	0.1543	0	0	0	0	0
23	900	1	0.3516	1	1	0.1543	0	0	0	0	0
24	800	1	0.3297	0.5778	0.7299	0.1543	0	0	0	0	0

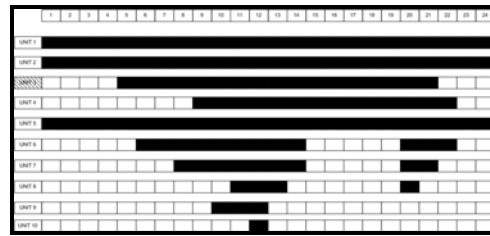
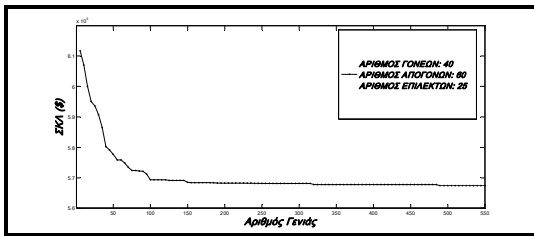
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4

Στον ΠΙΝΑΚΑ 4.4 παρατίθεται το φορτίο της κάθε μονάδας για κάθε ώρα της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου. Όλες οι μεγάλες μονάδες οι οποίες έχουν μεγάλους χρόνους εκκίνησης και τερματισμού παραμένουν ανοιχτές καθ'όλη τη διάρκεια της χρονικής περιόδου. Αυτό οδηγεί σε αυξημένο ΣΚΛ σε σύγκριση με την περίπτωση που δεν επιβάλλεται ο περιορισμός της περιοδικότητας. Το ζητούμενο όμως, που είναι και η εύρεση περιοδικών λύσεων, επιτυγχάνεται. Το αν η βέλτιστη λύση της μεθόδου αυτής είναι και η συνολικά βέλτιστη θα εξεταστεί στη συνέχεια.

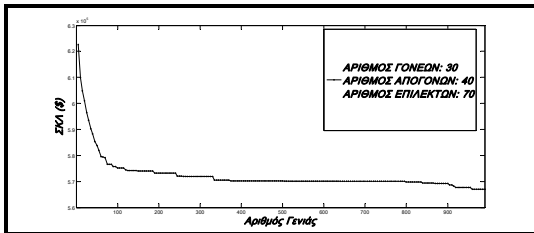
**Το ΣΚΛ λειτουργίας που προέκυψε είναι \$ 572,759.**

### 4.2.3 Εύρεση περιοδικής λύσης με επιβολή ποινής PC από τη σχέση (3.3)

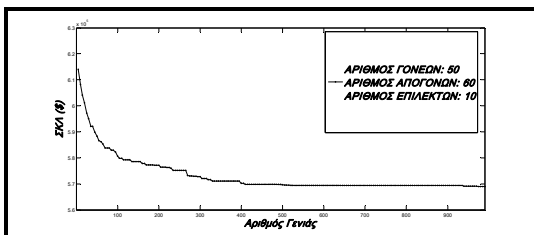
Εξετάζεται η περίπτωση του ΠΙΝΑΚΑ 4.2. Πραγματοποιήθηκαν 6 τρεξίματα του ΓΑ με στόχο την εύρεση περιοδικών λύσεων του προβλήματος. Τα αποτελέσματα και η ανάλυσή τους ακολουθούν.



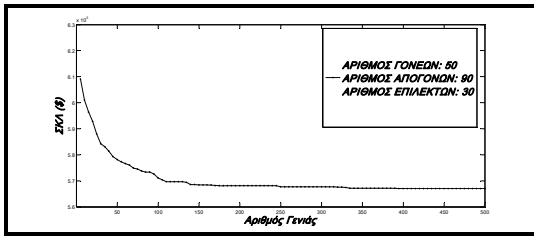
ΣΚΛ: \$ 565,936



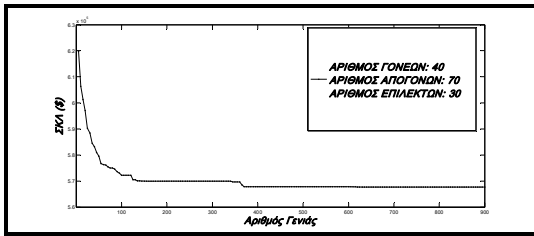
ΣΚΛ: \$ 565,473



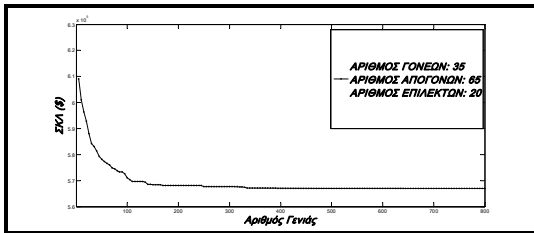
ΣΚΛ: \$ 567,504



**ΣΚΛ: \$ 565,415**



**ΣΚΛ: \$ 566,184**



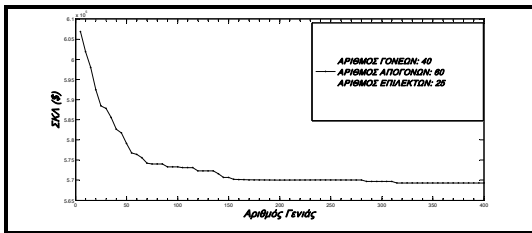
**ΣΚΛ: \$ 565,400**

Ο περιορισμός της περιοδικότητας δεν τηρείται σε κανένα από τα παραπάνω αποτελέσματα. Πάντα μια μονάδα (διαγραμμισμένη μονάδα στα σχήματα) παραβιάζει τον περιορισμό της περιοδικότητας. Παρατηρώντας τα ΣΚΛ και την τιμή της συνάρτησης κόστους μπορεί να διαπιστωθεί ο λόγος για τον οποίο η μέθοδος αυτή αδυνατεί να βρει περιοδικό πρόγραμμα λειτουργίας. Η αδυναμία τήρησης του νέου περιορισμού εντοπίζεται στην μικρή τιμή της ποινής που προστίθεται στην συνάρτηση κόστους του προβλήματος. Η συνάρτηση κόστους ενός περιοδικού προγράμματος, πράγμα που σημαίνει μηδενική ποινή, έχει μεγαλύτερη τιμή από την αντίστοιχη τιμή ενός μη περιοδικού προγράμματος για το οποίο μία μονάδα λειτουργεί απεριοδικά.

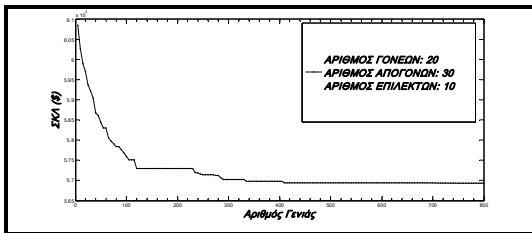


#### 4.2.4 Εύρεση περιοδικής λύσης με διόρθωση του προγράμματος λειτουργίας

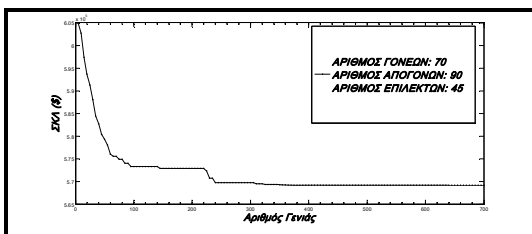
Όπως έχει ήδη αναφερθεί στη συγκεκριμένη περίπτωση το πρόγραμμα λειτουργίας των μονάδων διορθώνεται ώστε να τηρείται ο περιορισμός της περιοδικότητας. Πραγματοποιήθηκαν 10 τρεξίματα και τα αποτελέσματα παρατίθενται ως ακολούθως:



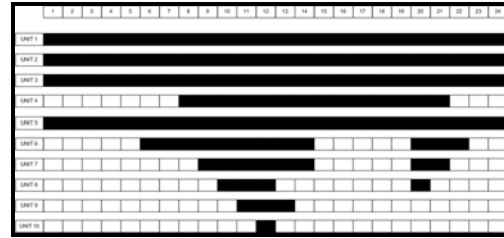
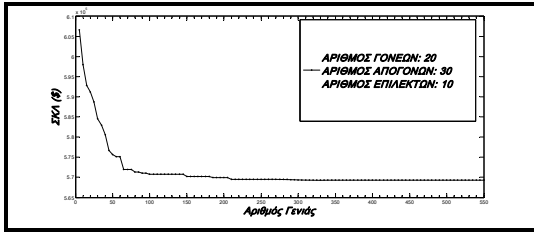
(1)



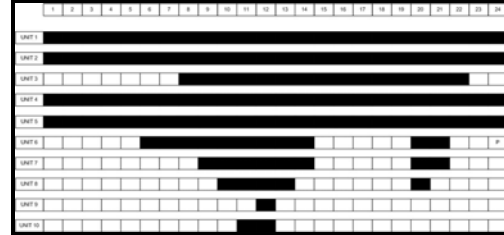
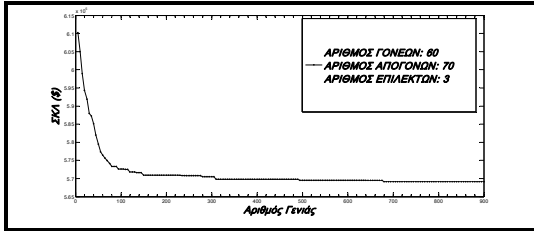
(2)



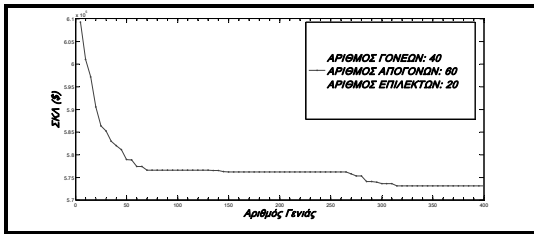
(3)



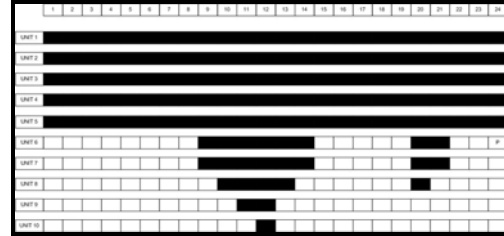
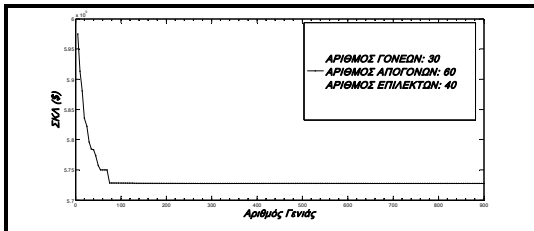
(4)



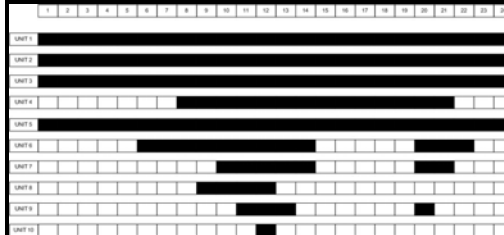
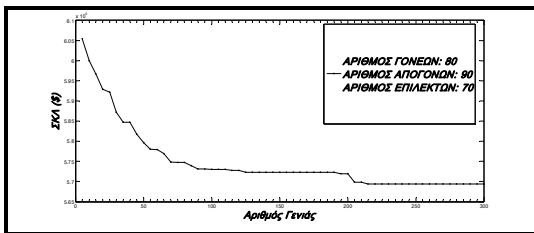
(5)



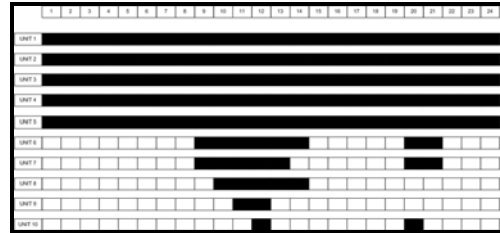
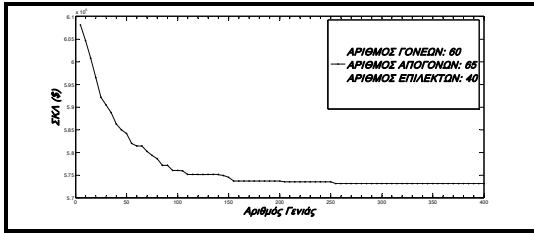
(6)



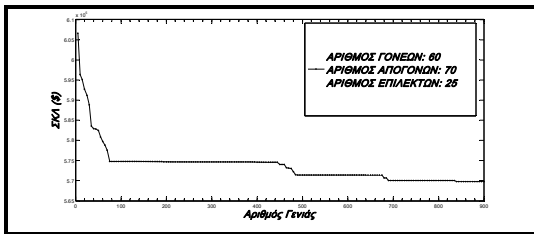
(7)



(8)



(9)



(10)

#### 4.2.4.1 Ανάλυση των αποτελεσμάτων

Στα επόμενα γίνεται χρήση των συμβολισμών ΣΚΛ (Συνολικό Κόστος Λειτουργίας), ΚΚ (Κόστος Καυσίμου) και ΚΑΦ (Κόστος Αλλαγών Φάσης).

(1)

<b>ΣΚΛ</b>	\$569,307.70
<b>ΚΚ</b>	\$565,207.70
<b>ΚΑΦ</b>	\$4,100

Παρατηρούμε ότι το πρόγραμμα λειτουργίας παρουσιάζει περιοδική συμπεριφορά.

(2)

<b>ΣΚΛ</b>	\$569,148.10
<b>ΚΚ</b>	\$564,988.10
<b>ΚΑΦ</b>	\$4,160

Το πρόγραμμα λειτουργίας παρουσιάζει περιοδική συμπεριφορά.

(3)

<b>ΣΚΛ</b>	\$569,326.02
<b>ΚΚ</b>	\$565,226.02
<b>ΚΑΦ</b>	\$4,100

Το πρόγραμμα λειτουργίας παρουσιάζει περιοδική συμπεριφορά.

(4)

<b>ΣΚΛ</b>	\$569,287.40
<b>ΚΚ</b>	\$565,187.40
<b>ΚΑΦ</b>	\$4,100

Το πρόγραμμα λειτουργίας παρουσιάζει περιοδική συμπεριφορά.

(5)

<b>ΣΚΛ</b>	\$569,075.04
<b>ΚΚ</b>	\$564,985.04
<b>ΚΑΦ</b>	\$4,090

Το πρόγραμμα λειτουργίας παρουσιάζει περιοδική συμπεριφορά.

(6)

<b>ΣΚΛ</b>	\$573,095.55
<b>ΚΚ</b>	\$569,265.54
<b>ΚΑΦ</b>	\$3,830

Το πρόγραμμα λειτουργίας παρουσιάζει περιοδική συμπεριφορά.

(7)

<b>ΣΚΛ</b>	\$572,725.02
<b>ΚΚ</b>	\$569,185.02
<b>ΚΑΦ</b>	\$3,540

Το πρόγραμμα λειτουργίας παρουσιάζει περιοδική συμπεριφορά.

(8)

<b>ΣΚΛ</b>	\$569,357.77
<b>ΚΚ</b>	\$565,257.77
<b>ΚΑΦ</b>	\$4,100

Το πρόγραμμα λειτουργίας παρουσιάζει περιοδική συμπεριφορά.

(9)

<b>ΣΚΛ</b>	\$573,065.55
<b>ΚΚ</b>	\$569,265.55
<b>ΚΑΦ</b>	\$3,800

Το πρόγραμμα λειτουργίας παρουσιάζει περιοδική συμπεριφορά.

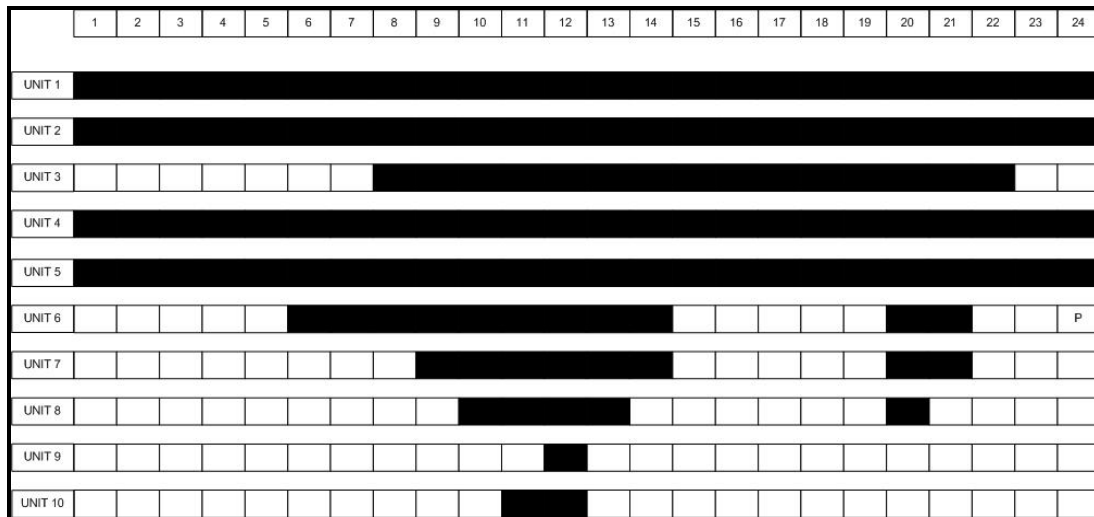
(10)

<b>ΣΚΛ</b>	\$569,763.10
<b>ΚΚ</b>	\$565,493.00
<b>ΚΑΦ</b>	\$4,270

Το πρόγραμμα λειτουργίας παρουσιάζει περιοδική συμπεριφορά.

#### 4.2.5 Ανάλυση της βέλτιστης περιοδικής λύσης

Το πρόγραμμα λειτουργίας με το ελάχιστο ΣΚΛ είναι αυτό του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 4.3 .



ΣΧΗΜΑ 4.3

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	700	1	0.3305	0	0.5318	0.1546	0	0	0	0	0
2	750	1	0.3305	0	0.917	0.1546	0	0	0	0	0
3	850	1	0.5269	0	1	0.1545	0	0	0	0	0
4	950	1	0.7468	0	1	0.1545	0	0	0	0	0
5	1000	1	0.8566	0	1	0.1545	0	0	0	0	0
6	1100	1	1	0	1	0.2446	0.2501	0	0	0	0
7	1150	1	1	0	1	0.5531	0.2501	0	0	0	0
8	1200	1	0.9666	1	1	0.1545	0.25	0	0	0	0
9	1300	1	1	1	1	0.5225	0.2501	0.2942	0	0	0
10	1400	1	1	1	1	1	0.4082	0.2942	0.1819	0	0
11	1450	1	1	1	1	1	0.9082	0.2942	0.1819	0	0.1819
12	1500	1	1	1	1	1	1	0.2942	0.7757	0.1819	0.1819
13	1400	1	1	1	1	1	0.4082	0.2942	0.1819	0	0
14	1300	1	1	1	1	0.5225	0.2501	0.2942	0	0	0
15	1200	1	1	1	1	0.183	0	0	0	0	0
16	1050	1	0.6807	1	1	0.1545	0	0	0	0	0
17	1000	1	0.571	1	1	0.1544	0	0	0	0	0
18	1100	1	0.7908	1	1	0.1544	0	0	0	0	0
19	1200	1	1	1	1	0.183	0	0	0	0	0
20	1400	1	1	1	1	1	0.4082	0.2942	0.1819	0	0
21	1300	1	1	1	1	0.5225	0.2501	0.2942	0	0	0
22	1100	1	0.7908	1	1	0.1544	0	0	0	0	0
23	900	1	0.6369	0	1	0.1545	0	0	0	0	0
24	800	1	0.417	0	1	0.1545	0	0	0	0	0

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5

Στον ΠΙΝΑΚΑ 4.5 παρατίθεται το φορτίο της κάθε μονάδας για κάθε ώρα της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου. Όπως είναι και επιθυμητό οι μεγάλες μονάδες, οι μονάδες βάσης, οι οποίες και έχουν το μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας λειτουργούν σε μεγάλα φορτία. Αντίστοιχα οι μικρότερες μονάδες ενεργοποιούνται για να καλύψουν μικρότερα ποσά ισχύος και για αυτό, όπως παρατηρούμε και από τα αποτελέσματα, λειτουργούν σε μικρά φορτία.

Η μέθοδος της διόρθωσης του προγράμματος λειτουργίας κατάφερε να εντοπίσει το καλύτερο σενάριο με ΣΚΛ \$ **569,075**. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μία από τις μονάδες βάσης σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους δεν παραμένει ενεργή καθ'όλη τη χρονική διάρκεια.

### 4.3 Σύγκριση των μεθόδων

Από τις δύο μεθόδους που δημιουργήθηκαν και δοκιμάστηκαν, μετά από την εξέταση των αποτελεσμάτων, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος της διόρθωσης του προγράμματος λειτουργίας υπερτερεί.

Η μέθοδος της επιβολής ποινής με τη σχέση (3.2) οδηγεί σε περιοδικές λύσεις αλλά με όχι τόσο καλά αποτελέσματα όσον αφορά το ΣΚΛ.

Η μέθοδος της επιβολής ποινή με τη σχέση (3.3) αδυνατεί να βρει περιοδικές λύσεις, λόγω της μικρής τιμής της ποινής που επιβάλλεται στη συνάρτηση κόστους. Απαιτείται μία καλύτερη ρύθμιση της ποινής, δηλαδή της ποσότητας που προστίθεται στη συνάρτηση κόστους, ώστε να καταφέρει η μέθοδος αυτή να εντοπίσει περιοδικά προγράμματα λειτουργίας.

Η μέθοδος της διόρθωσης του προγράμματος λειτουργίας, όχι μόνο βρίσκει περιοδικές λύσεις, όπως είναι και αναμενόμενο, αλλά εντοπίζει και αυτές με το μικρότερο ΣΚΛ. Αν κάποια από αυτές αποτελεί και τη βέλτιστη λύση δε μπορούμε να το γνωρίζουμε διότι τερματίζεται νωρίς ο ΓΑ.

Από την άποψη του υπολογιστικού χρόνου και οι τρεις μέθοδοι παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά. Για το πρόβλημα των 10 μονάδων ηλεκτροπαραγωγής που εξετάστηκε απαιτείται περίπου υπολογιστικός χρόνος μιας ώρας για την παραγωγή και αξιολόγηση 25.000 απογόνων.

## 5 Το πρόβλημα της απότομης αύξησης ζήτησης – τρόποι αντιμετώπισης

### *5.1 Ορισμός του νέου προβλήματος*

Εξετάζεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης δύο στόχων ανάθεσης φορτίου σε αεριοστροβλικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Πρώτος στόχος του προβλήματος είναι η εύρεση του προγράμματος λειτουργίας ενός αριθμού μονάδων ηλεκτροπαραγωγής ώστε να καλυφθεί μία δεδομένη για μία χρονική περίοδο ζήτηση ισχύος με το ελάχιστο κόστος. Ως δεύτερος στόχος τίθεται το κόστος λειτουργίας για το ίδιο διάστημα στην περίπτωση που η ζήτηση ισχύος αυξηθεί κατά μία σταθερή ποσότητα ή κατά ένα ποσοστό της υπάρχουσας.



Το νέο πρόβλημα που τίθεται παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη σύγχρονη βιομηχανία ηλεκτροπαραγωγής. Μία πιθανή λανθασμένη πρόβλεψη της απαιτούμενης από το δίκτυο ισχύος μπορεί να οδηγήσει στην αδυναμία κάλυψής της με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μεγάλο πρόβλημα στην ηλεκτροδότηση. Για να αποφευχθεί μία τέτοια κατάσταση είναι αναγκαίο με το που διαγνωστεί η αδυναμία κάλυψης της απαιτούμενης ισχύος να τροποποιηθεί το πρόγραμμα λειτουργίας των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής ώστε πρώτον να καλυφθεί η διαφορά μεταξύ αποδιδόμενης ισχύος και ζήτησης και δεύτερον να πραγματοποιηθεί αυτή η κάλυψη με το μικρότερο δυνατό κόστος λειτουργίας. Αν οι ήδη εν λειτουργία μονάδες αδυνατούν να καλύψουν τη νέα ζήτηση, μη-λειτουργούσες μονάδες ενεργοποιούνται. Προκύπτει το ερώτημα ποιες όμως από τις ανενεργές μονάδες είναι οι πλέον κατάλληλες ώστε το νέο πρόγραμμα λειτουργίας να είναι και το οικονομικά βέλτιστο.

## 5.2 Επίλυση του προβλήματος – τεχνικές επίλυσης

Οι δύο στόχοι που τίθενται προς βελτιστοποίηση είναι οι ακόλουθοι:

**Πρώτος Στόχος:** Κόστος λειτουργίας ενός συνόλου μονάδων ηλεκτροπαραγωγής για μια κατανομή ζήτησης ισχύος.

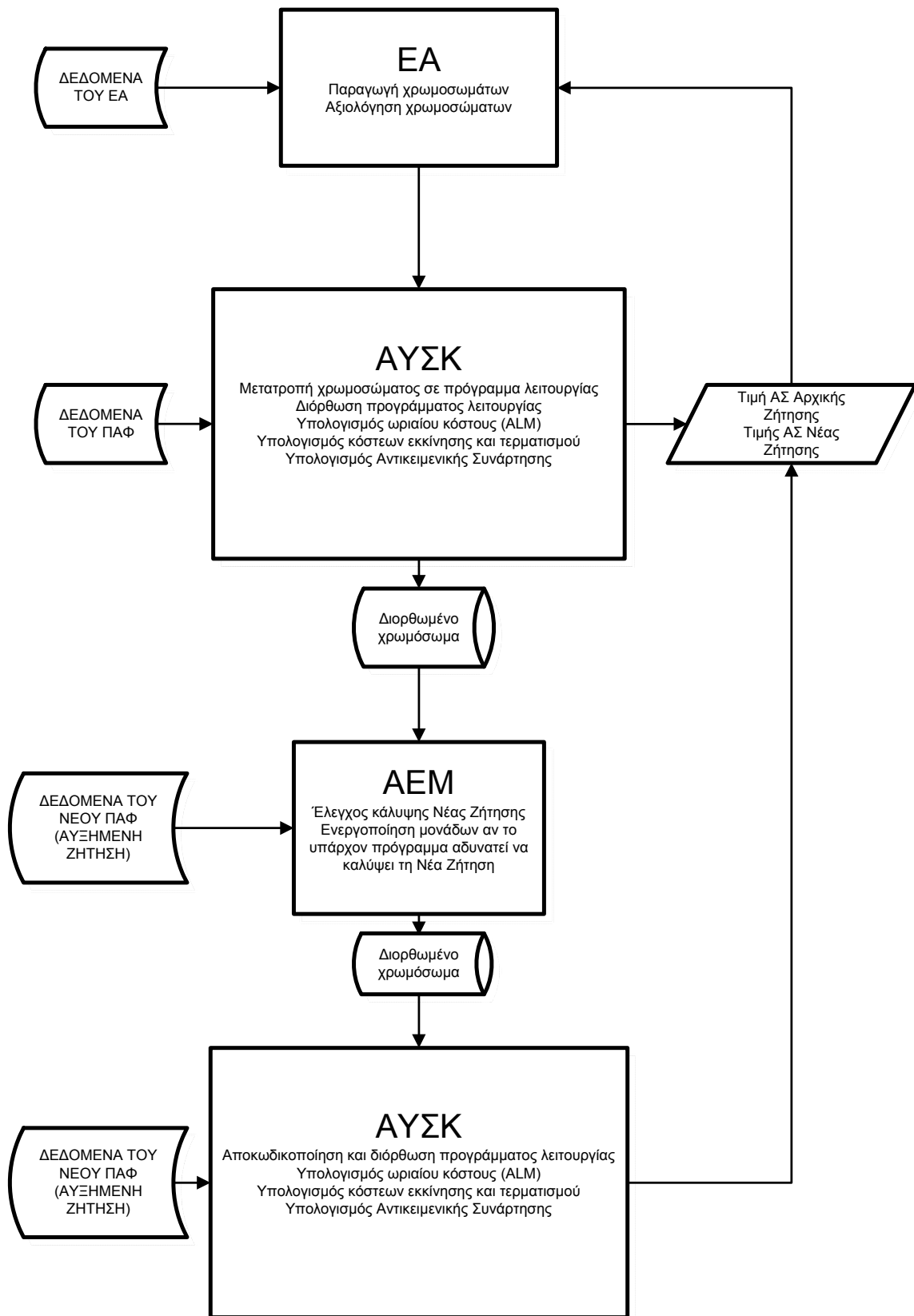
**Δεύτερος Στόχος:** Κόστος λειτουργίας ενός συνόλου μονάδων ηλεκτροπαραγωγής για μια κατάλληλα επαυξημένη κατανομή ζήτησης ισχύος.

### 5.2.1 Περιγραφή

Ο γενετικός αλγόριθμος παράγει χρωμοσώματα (προγράμματα λειτουργίας) τα οποία τροφοδοτούνται στον αλγόριθμο υπολογισμού της τιμής της συνάρτησης κόστους (ΑΥΣΚ). Ο ΑΥΣΚ εν συνεχεία, αφού διορθώσει τα σενάρια αυτά ώστε να τηρούνται οι περιορισμοί λειτουργίας (ελάχιστοι χρόνοι αλλαγής κατάστασης και παραμονής, περιοδικότητα σεναρίου), υπολογίζει το κόστος λειτουργίας και εξάγει το νέο διορθωμένο σενάριο.

Το σενάριο αυτό τροφοδοτείται σε έναν νέο αλγόριθμο (Αλγόριθμος Ενεργοποίησης Μονάδων, ΑΕΜ), ο οποίος ελέγχει αν το σενάριο αυτό μπορεί να καλύψει τη νέα αυξημένη ζήτηση για κάθε ώρα λειτουργίας. Αν οι εν λειτουργία μονάδες αδυνατούν να καλύψουν τη ζήτηση αυτή, μονάδες οι οποίες είναι κλειστές ανοίγουν ώστε να καλυφθεί η διαφορά στη ζήτηση. Το ανανεωμένο σενάριο τροφοδοτείται εκ νέου στον ΑΥΣΚ, ο οποίος υπολογίζει το κόστος λειτουργίας για τη νέα αυξημένη ζήτηση.

Οι παραπάνω διαδικασίες παραπέμπουν στο διάγραμμα ροής του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.10.



ΣΧΗΜΑ 5.1 – Διάγραμμα ροής

### 5.3 Περιγραφή του Αλγορίθμου Ενεργοποίησης Μονάδων και Διόρθωσης του νέου προγράμματος λειτουργίας

#### 5.3.1 Ενεργοποίηση των μονάδων βάσει της μέγιστης παραγόμενης ισχύος

Ο πρώτος αλγόριθμος που δημιουργήθηκε για να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα της απότομης αύξησης ζήτησης βασίζεται στην ενεργοποίηση των μονάδων με μοναδικό κριτήριο τη μέγιστη ισχύ που μπορούν να αποδώσουν στο δίκτυο. Η διαδικασία ενεργοποίησης περιγράφεται παρακάτω.

Η διαδικασία ξεκινά από την πρώτη ώρα του εξεταζόμενου χρονικού διαστήματος. Αρχικά οι μονάδες κατατάσσονται με βάση τη μέγιστη ισχύ που μπορούν να αποδώσουν. Μονάδες που είναι ήδη εν λειτουργία αποκλείονται της κατάταξης αυτής. Εν συνεχεία, υπολογίζεται το μέγιστο ποσό ισχύος που μπορούν να αποδώσουν οι ενεργές μονάδες. Αν το ποσό αυτό αδυνατεί να καλύψει την ζήτηση ισχύος για την ώρα αυτή, επιβάλλεται ενεργοποίηση της μεγαλύτερης από πλευράς ισχύος μονάδας. Αν η ζήτηση και πάλι δεν ικανοποιείται ενεργοποιείται και η επόμενη μονάδα της κατάταξης. Οι μονάδες ανοίγουν διαδοχικά με βάση την κατάταξή τους μέχρι η νέα ζήτηση να δύναται να καλυφθεί. Ακολουθεί διόρθωση του προγράμματος λειτουργίας ώστε να τηρείται ο περιορισμός της παραμονής σε κατάσταση ON. Αφού ενεργοποιήθηκαν οι μονάδες για την ώρα αυτή ο αλγόριθμος πραγματοποιεί τις ίδιες ενέργειες και για τις υπόλοιπες  $(N-1)$  ώρες της εξεταζόμενης περιόδου. Προκύπτει έτσι τελικά ένα νέο πρόγραμμα λειτουργίας (νέο χρωμόσωμα). Ακολουθεί ένα παράδειγμα για την κατανόηση της παραπάνω προτεινόμενης ενεργοποίησης μονάδων.

Το νέο πρόγραμμα λειτουργίας εισάγεται στον ΑΥΣΚ, διορθώνεται εκ νέου και υπολογίζεται η τιμή της συνάρτησης κόστους για την περίπτωση της επαυξημένης ζήτησης ισχύος.

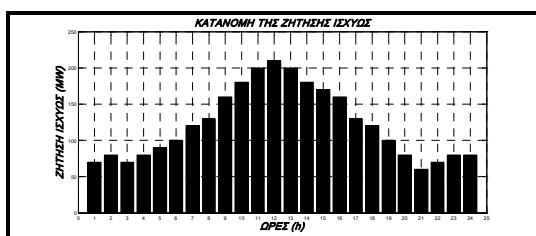
Πρόκειται για έναν απλό και γρήγορο τρόπο επίλυσης του προβλήματος και με αποτελέσματα που όπως θα φανεί στη συνέχεια είναι αρκετά ικανοποιητικά.

### 5.3.1.1 Παράδειγμα

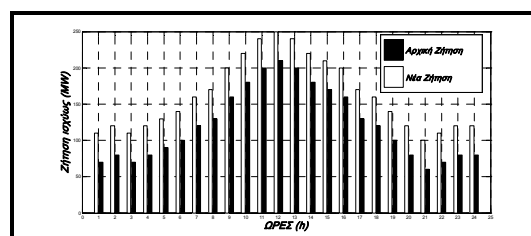
Εξετάζεται η περίπτωση του προγράμματος λειτουργίας των μονάδων του ΠΙΝΑΚΑ 5.1, της αρχικής ζήτησης του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.2 και της επαυξημένης ζήτησης του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.3.

$i$	$P_{\min,i}$	$P_{\max,i}$	$OC_i^{(j)}$	$\bar{C}_i$	$\overline{\overline{C}}_i$	$\bar{T}_i$	$\overline{\overline{T}}_i$	$T_i$	$s_o$
1	20	40	$80x_i^{(j)^2} + 40$	120	100	2	2	1	ON
2	30	70	$108x_i^{(j)^2} + 69x + 63$	180	150	2	2	1	ON
3	50	100	$169x_i^{(j)^2} - 5.6x + 266$	240	200	2	2	1	OFF
4	60	120	$180x_i^{(j)^2} + 312$	240	200	2	2	1	ON

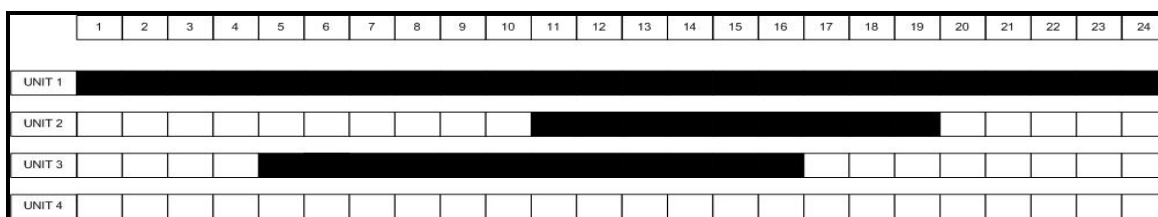
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1



ΣΧΗΜΑ 5.2



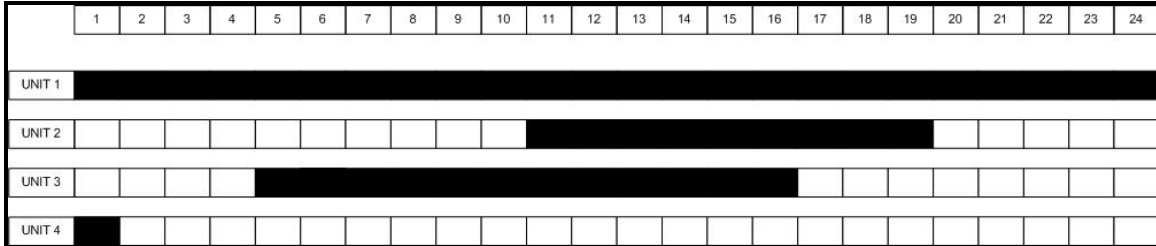
ΣΧΗΜΑ 5.3



ΣΧΗΜΑ 5.4

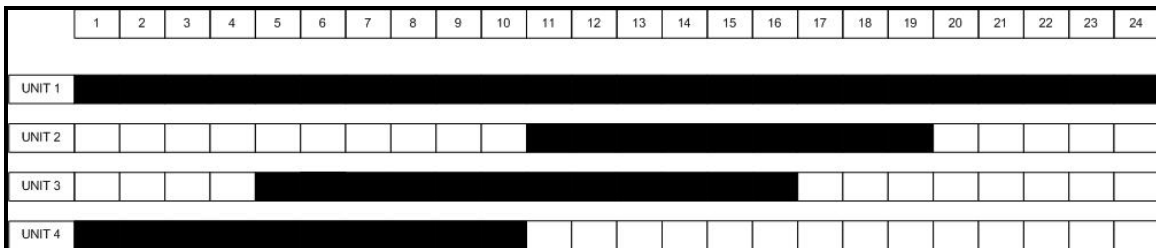
Η ενεργοποίηση των μονάδων θα εφαρμοστεί στο πρόγραμμα λειτουργίας του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.4, το οποίο αποτελεί τη βέλτιστη λύση για την κάλυψη της αρχικής ζήτησης ισχύος. Την πρώτη ώρα λειτουργίας μόνο η 1<sup>η</sup> μονάδα είναι ενεργή. Μόνη της αδυνατεί να καλύψει την νέα επαυξημένη ζήτηση της πρώτης ώρας του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.3. Άρα επιβάλλεται η ενεργοποίηση της μεγαλύτερης ανενεργής μονάδας η οποία και

είναι η 4<sup>η</sup> μονάδα. Μετά την ενεργοποίησή της και διόρθωση του προγράμματος λειτουργίας προκύπτει το πρόγραμμα λειτουργίας του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.5.



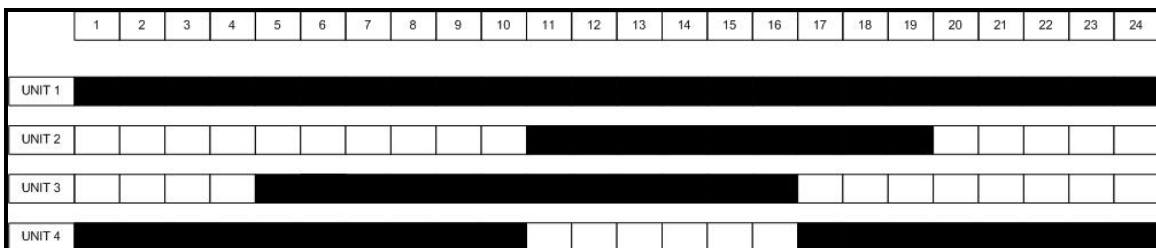
ΣΧΗΜΑ 5.5

Η ζήτηση ισχύος δε δύναται να καλυφθεί μέχρι τη 10<sup>η</sup> ώρα. Διαδοχικά ενεργοποιείται η 4<sup>η</sup> μονάδα και οδηγούμαστε στο πρόγραμμα λειτουργίας του ΣΧΗΜΑ 5.6 .



ΣΧΗΜΑ 5.6

Από την 11<sup>η</sup> έως και την 16<sup>η</sup> ώρα οι ενεργές μονάδες μπορούν να καλύψουν την επαυξημένη ζήτηση, ενώ από την 17<sup>η</sup> και μετά αδυνατούν. Τελικά προκύπτει το τελικό πρόγραμμα λειτουργίας του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.7 με ΣΚΛ: 22,227 MWh.



ΣΧΗΜΑ 5.7

### **5.3.2 Ενεργοποίηση μονάδων με στόχο την ελαχιστοποίηση του ωριαίου κόστους λειτουργίας**

Ο τρόπος αυτός βασίζεται στον υπολογισμό του νέου ωριαίου κόστους λειτουργίας που προκύπτει μετά την ενεργοποίηση μία νέας μονάδας. Ο υπολογισμός αυτός εκτελείται κατά τον ακόλουθο τρόπο.

Κάθε χρωμόσωμα που παράγεται από τον ΓΑ αξιολογείται από τον ΑΥΣΚ. Σε κάθε ώρα κάθε προγράμματος λειτουργίας που εξετάζεται, καλείται η ALM να υπολογίσει το ωριαίο κόστος λειτουργίας και τα αντίστοιχα φορτία των ενεργών μονάδων. Παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια της παραγωγής νέων χρωμοσωμάτων από τον ΓΑ ότι παρουσιάζονται προς επίλυση σχεδόν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί μονάδων που μπορούν να ικανοποιήσουν την αντίστοιχη ωριαία ζήτηση, δηλαδή υπολογίζεται το ωριαίο κόστος για κάθε πιθανό ωριαίο συνδυασμό μονάδων. Αυτή η πληροφορία αποθηκεύεται ώστε να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια από τον ΑΕΜ. Η διαδικασία αποθήκευσης είναι η ακόλουθη.

Αρχικά δημιουργούνται κλάσεις για τη ζήτηση ισχύος. Για κάθε εξεταζόμενη ώρα η αντίστοιχη ζήτηση εντάσσεται σε μία κλάση και για την κλάση αυτή αποθηκεύονται τα ακόλουθα στοιχεία:

- Αριθμός ενεργών μονάδων
- Ένας μονοσήμαντα κωδικοποιημένος αριθμός που καθορίζει ποιες μονάδες είναι εν λειτουργία
- Κόστος λειτουργίας για την συγκεκριμένη κλάση ζήτησης
- Ένας αριθμός που καθορίζει το πόσες φορές έχει προσπελασθεί το υπάρχον ωριαίο πρόγραμμα λειτουργίας

Κάθε φορά που ο ΑΥΣΚ υπολογίζει το ωριαίο κόστος ανατρέχει στο αρχείο που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη κλάση ζήτησης και είτε αποθηκεύει, αν δεν υπάρχει ήδη,

έναν νέο μονοσήμαντο αριθμό μαζί το κόστος λειτουργίας, είτε ανανεώνει το υπάρχον κόστος (μέσος όρος όλων των προηγούμενων και του νέου).

Κατά αυτόν τον τρόπο υπάρχει μια πληροφορία σχετικά με το κόστος κάθε ωριαίου προγράμματος. Τώρα υπάρχει μία πληροφορία η οποία δρα ως κριτήριο για την επιλογή της μονάδας που θα ενεργοποιηθεί.

Για κάθε ώρα λειτουργίας, αν οι εν λειτουργία μονάδες αδυνατούν να καλύψουν τη ζήτηση ισχύος πραγματοποιούνται οι ακόλουθες ενέργειες για κάθε κλειστή μονάδα:

- Ελέγχεται αν η μονάδα αυτή μπορεί να καλύψει το έλλειμμα ισχύος.
- Αν ναι υπολογίζεται το ωριαίο κόστος. Επιπλέον διορθώνεται το πρόγραμμα λειτουργίας της μονάδας ώστε να τηρείται ο χρόνος παραμονής της σε κατάσταση ON. Στο ωριαίο κόστος συνυπολογίζονται πιθανές εκκινήσεις και τερματισμοί μονάδων.

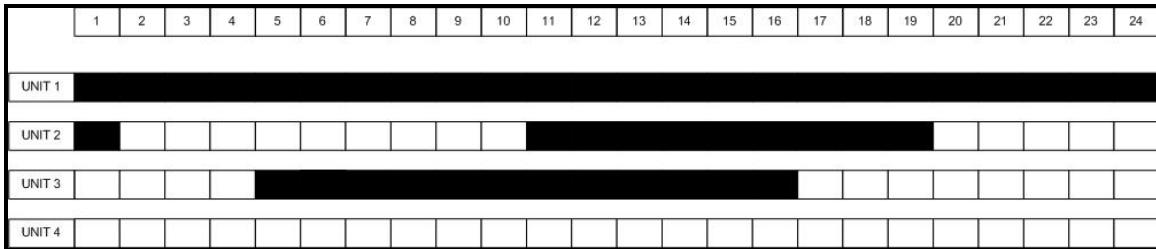
Επιλέγεται η μονάδα που οδηγεί στο μικρότερο ωριαίο κόστος και ακολουθεί διόρθωση του σεναρίου. Αν καμία μονάδα δε μπορεί να καλύψει το έλλειμμα ισχύος, τότε επιλέγεται η κατά αντιστοιχία μεγαλύτερη και ακολουθείται η προαναφερθείσα διαδικασία για τις υπόλοιπες. Τονίζεται ότι η διαδικασία αυτή δεν εγγυάται τη βέλτιστη λύση και αποτελεί μία παραδοχή που κάνουμε για να επιλύσουμε το πρόβλημα. Η επιλογή των μονάδων των οποίων η ενεργοποίηση θα οδηγήσει σε ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους (όχι του ωριαίου κόστους) δεν είναι ένα απλό πρόβλημα. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα νέο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ακολουθεί ένα παράδειγμα για την κατανόηση της προαναφερθείσας προτεινόμενης ενεργοποίησης μονάδων.

### **5.3.2.1 Παράδειγμα**

Εξετάζεται η περίπτωση του προγράμματος λειτουργίας των μονάδων του ΠΙΝΑΚΑ 5.1, της αρχικής ζήτησης του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.2 και της επαυξημένης ζήτησης του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.3. Η ενεργοποίηση των μονάδων θα εφαρμοστεί στο πρόγραμμα λειτουργίας του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.4, το οποίο αποτελεί τη βέλτιστη λύση για την κάλυψη της αρχικής ζήτησης ισχύος.

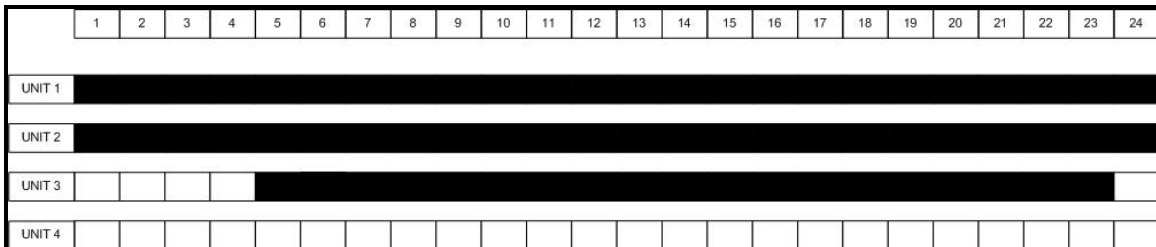


Για την 1<sup>η</sup> ώρα λειτουργίας και οι τρεις ανενεργές μονάδες ικανοποιούν το έλλειμμα ζήτησης ισχύος. Μετά όμως από την ανάλυση του ωριαίου κόστους για κάθε μονάδα προκύπτει ότι η πλέον συμφέρουσα επιλογή είναι η ενεργοποίηση της 2<sup>ης</sup> μονάδας. Ενεργοποιείται η 2<sup>η</sup> μονάδα και καταλήγουμε στο πρόγραμμα λειτουργίας του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.8.



ΣΧΗΜΑ 5.8

Αντίστοιχα και για τις επόμενες ώρες προκύπτει το πρόγραμμα λειτουργίας του ΣΧΗΜΑ 5.9 με ΣΚΛ: 19,780 MWh



ΣΧΗΜΑ 5.9

Στο παράδειγμα αυτό η δεύτερη μέθοδος υπερτερεί ως προς το τελικό αποτέλεσμα της πρώτης. Το ΣΚΛ της δεύτερης μεθόδου είναι μικρότερο από αυτό της πρώτης μεθόδου. Αντί να ενεργοποιηθεί η 4<sup>η</sup> μονάδα ενεργοποιείται η 2<sup>η</sup> που είναι μικρότερη και μπορεί να καλύψει τη διαφορά στη ζήτηση.

### 5.3.3 Πιστοποίηση του νέου αλγορίθμου

#### 5.3.3.1 1<sup>η</sup> ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ

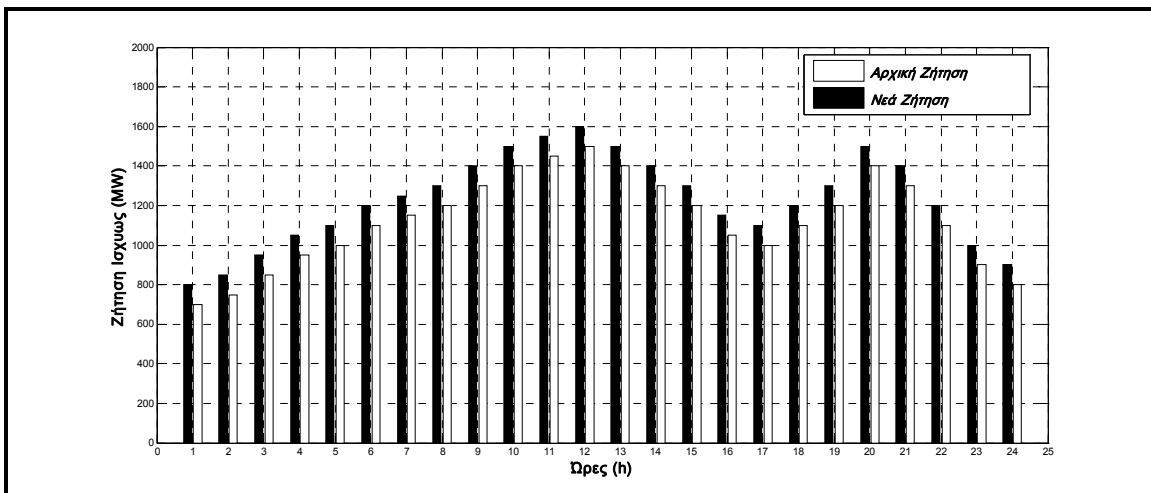
Εξετάζεται η περίπτωση των 10 μονάδων με τα χαρακτηριστικά του ΠΙΝΑΚΑ 4.1. Η αρχική ζήτηση ισχύος είναι αυτή του ΠΙΝΑΚΑ 5.2 και η νέα αυξημένη ζήτηση ισχύος του ΠΙΝΑΚΑ 5.3 αντίστοιχα. Επιπλέον τονίζεται ότι η θερμή εφεδρεία ισούται με 1 ( $SR = 1,0$ ).

Ωρα	Ζήτηση (MW)	Ωρα	Ζήτηση (MW)
1	700	13	1400
2	750	14	1300
3	850	15	1200
4	950	16	1050
5	1000	17	1000
6	1100	18	1100
7	1150	19	1200
8	1200	20	1400
9	1300	21	1300
10	1400	22	1100
11	1450	23	900
12	1500	24	800

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2 – Αρχική Ζήτηση Ισχύος

Ωρα	Ζήτηση (MW)	Ωρα	Ζήτηση (MW)
1	800	13	1500
2	850	14	1400
3	950	15	1300
4	1050	16	1150
5	1100	17	1100
6	1200	18	1200
7	1250	19	1300
8	1300	20	1500
9	1400	21	1400
10	1500	22	1200
11	1550	23	1000
12	1600	24	900

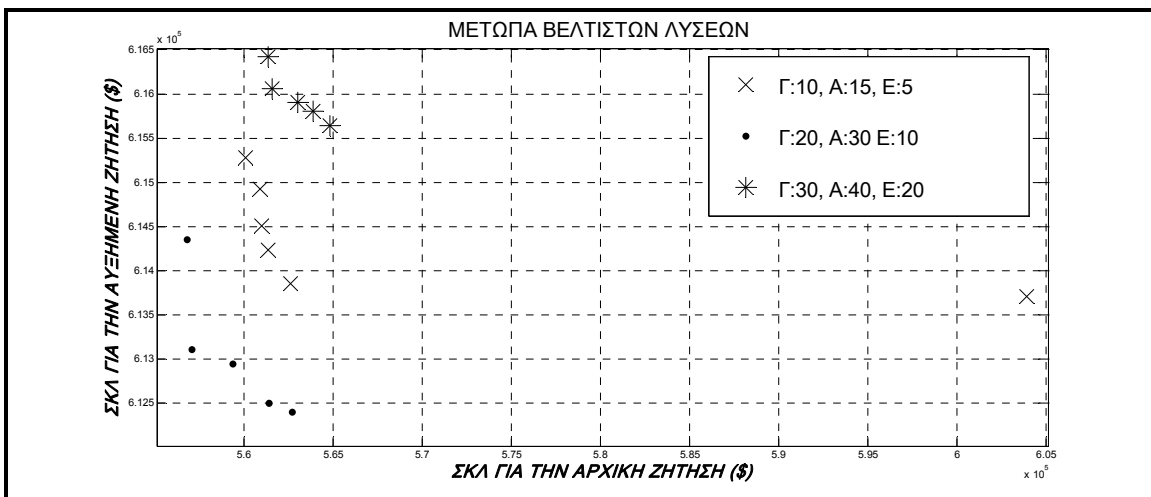
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3 – Νέα Αυξημένη Ζήτηση Ισχύος



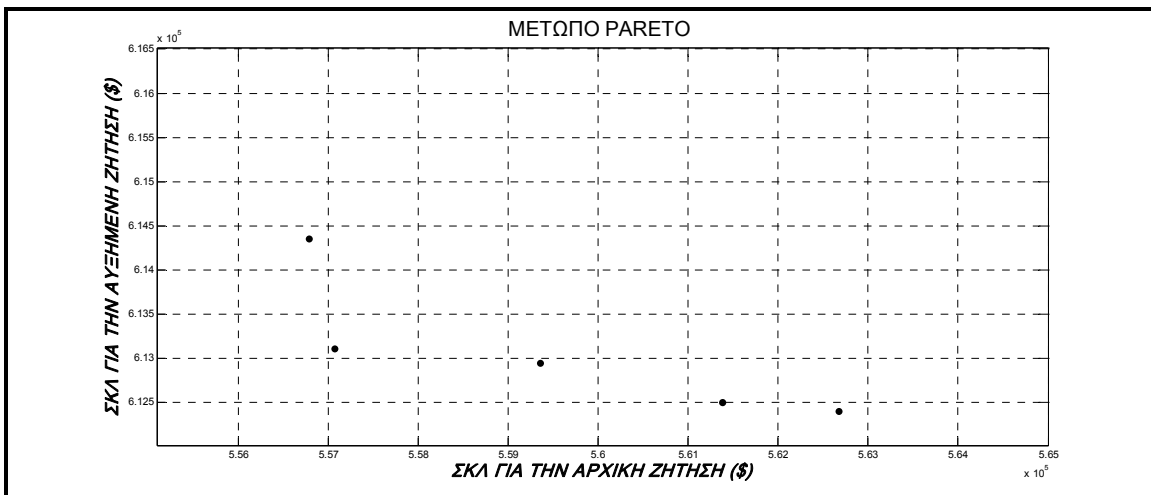
ΣΧΗΜΑ 5.10

### 5.3.3.1.1 Κριτήριο της μέγιστης ισχύος

Πραγματοποιήθηκαν 3 τρεξίματα του ΓΑ με διαφορετικούς πληθυσμούς. Στο ΣΧΗΜΑ 5.11 παρατίθενται τα αντίστοιχα μέτωπα βέλτιστων λύσεων για τα διαφορετικά τρεξίματα και στο ΣΧΗΜΑ 5.12, το μέτωπο PARETO. Στα σχήματα που ακολουθούν με  $\Gamma$  συμβολίζεται ο αριθμός των γονέων, με  $A$  ο αριθμός των απογόνων και με  $E$  ο αριθμός των επιλέκτων.



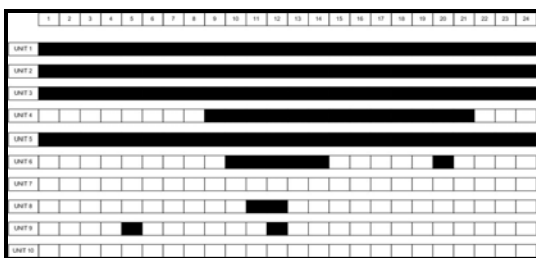
ΣΧΗΜΑ 5.11



ΣΧΗΜΑ 5.12

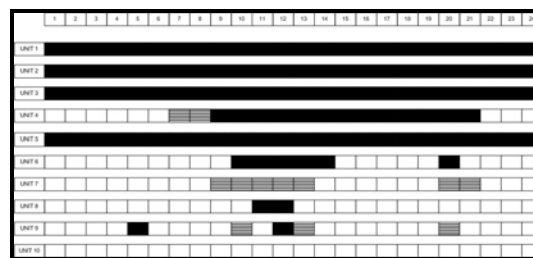
Ακολουθεί η ανάλυση των άκρων του μετώπου PARETO καθώς και μίας ενδιάμεσης λύσης. Επιπλέον θα διαγνωστεί με βάση τα προκύπτοντα προγράμματα λειτουργίας αν ο νέος αλγόριθμος πραγματοποιεί σωστά τις διαδικασίες για τις οποίες είναι αρμόδιος. Στα ακόλουθα παρατίθενται τα δύο διαφορετικά προγράμματα λειτουργίας και αναλύονται τα αποτελέσματα.

Πάνω αριστερά άκρο του PARETO



ΣΧΗΜΑ 5.13

ΣΚΑ: \$ 556,783



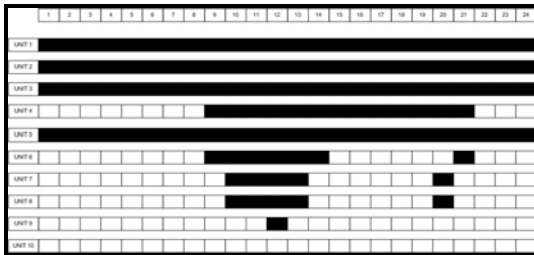
ΣΧΗΜΑ 5.14

ΣΚΑ: \$ 614,356

Στα δύο αυτά προγράμματα λειτουργίας τηρούνται όλοι οι περιορισμοί και επιπλέον έχουμε κάλυψη της απαιτούμενης ισχύος και στις δύο περιπτώσεις. Για τις ώρες που απαιτείται η ενεργοποίηση μονάδων ώστε να καλυφθεί το έλλειμμα ισχύος παρατηρούμε

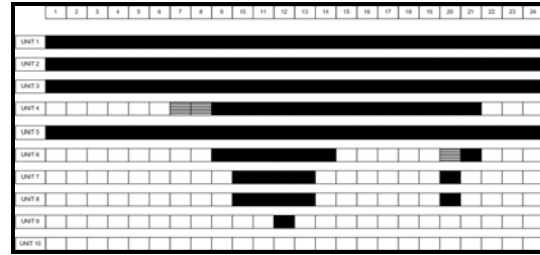
ότι η ενεργοποίηση όντως γίνεται με βάση την κατάταξή τους. Π.χ. την 7<sup>η</sup> ώρα, η μονάδα που ενεργοποιείται είναι η 4<sup>η</sup>, η οποία είναι και η μεγαλύτερη.

**Κάτω δεξιά άκρο του PARETO**



ΣΧΗΜΑ 5.15

ΣΚΛ: \$ 562,671

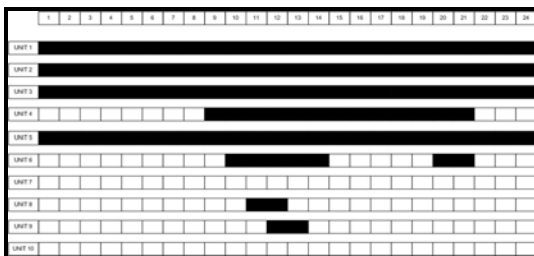


ΣΧΗΜΑ 5.16

ΣΚΛ: \$ 612,404

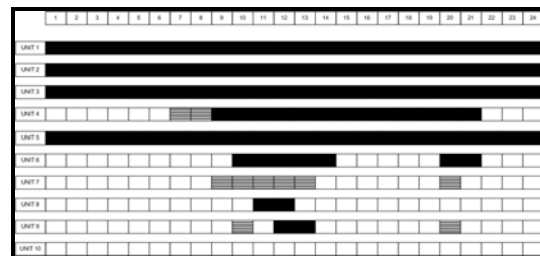
Στα δύο αυτά προγράμματα λειτουργίας τηρούνται όλοι οι περιορισμοί και επιπλέον έχουμε κάλυψη της απαιτούμενης ισχύος και στις δύο περιπτώσεις. Για τις ώρες που απαιτείται η ενεργοποίηση μονάδων ώστε να καλυφθεί το έλλειμμα ισχύος παρατηρούμε ότι η ενεργοποίηση όντως γίνεται με βάση την κατάταξή τους. Π.χ. την 7<sup>η</sup> ώρα, η μονάδα που ενεργοποιείται είναι η 4<sup>η</sup>, η οποία είναι και η μεγαλύτερη.

**Ενδιάμεσο σημείο του PARETO**



ΣΧΗΜΑ 5.17

ΣΚΛ: \$ 557,071



ΣΧΗΜΑ 5.18

ΣΚΛ: \$ 613,107

Η ενεργοποίηση όντως γίνεται με βάση την κατάταξή τους. Π.χ. την 7<sup>η</sup> ώρα, η μονάδα που ενεργοποιείται είναι η 4<sup>η</sup>, η οποία είναι και η μεγαλύτερη. Οι περιορισμοί του

προβλήματος τηρούνται και έχουμε κάλυψη της απαιτούμενης ισχύος σε όλο το χρονικό διάστημα.

### 5.3.3.1.2 Κριτήριο ελαχιστοποίησης ωριαίου κόστους λειτουργίας

Πραγματοποιήθηκαν 3 τρεξίματα του ΓΑ με τους ακόλουθους διαφορετικούς πληθυσμούς:

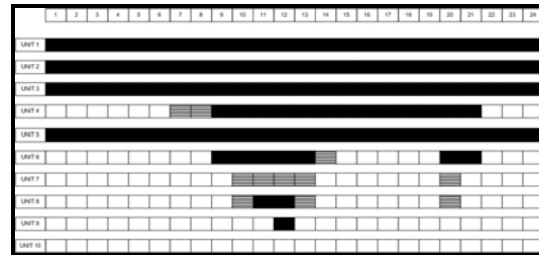
1. Αριθμός Γονέων: 10, Αριθμός Απογόνων: 15, Αριθμός Επιλέκτων: 5
2. Αριθμός Γονέων: 20, Αριθμός Απογόνων: 30, Αριθμός Επιλέκτων: 10
3. Αριθμός Γονέων: 30, Αριθμός Απογόνων: 40, Αριθμός Επιλέκτων: 20

Βρέθηκε βέλτιστη λύση του προβλήματος. Τα προγράμματα λειτουργίας που προέκυψαν καθώς και τα κόστη λειτουργίας ακολουθούν:



ΣΧΗΜΑ 5.19

ΣΚΛ: \$ 556,535.23



ΣΧΗΜΑ 5.20

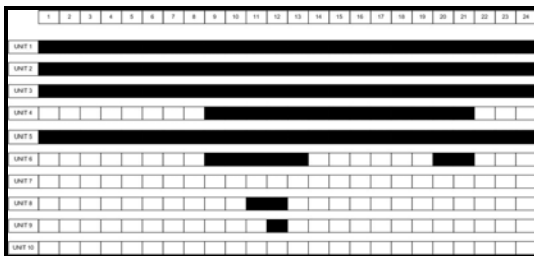
ΣΚΛ: \$ 612404.10

Τηρούνται όλοι οι περιορισμοί και καλύπτεται η ζητούμενη ισχύς. Τα δύο παραπάνω προγράμματα λειτουργίας αποτελούν τη βέλτιστη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης ανάθεσης φορτίου για το εξεταζόμενο παράδειγμα των 2 στόχων. Το πρόγραμμα λειτουργίας για την αυξημένη ζήτηση ενοπίζεται και από τη μέθοδο της μέγιστης ισχύος (ΣΧΗΜΑ 5.16). Όμως το ΣΚΛ για την αρχική ζήτηση προέκυψε μεγαλύτερο.

### 5.3.3.2 Σύγκριση των δύο μεθόδων

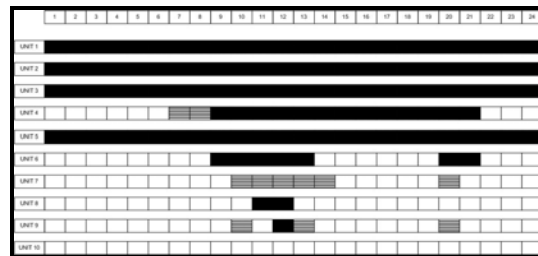
Η σύγκριση των δύο μεθόδων θα βασιστεί στην τροποποίηση που υφίσταται το πρόγραμμα λειτουργίας του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.19 χρησιμοποιώντας αντίστοιχα και τις δύο μεθόδους ενεργοποίησης μονάδων.

Το αποτέλεσμα στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η μέθοδος ενεργοποίησης μονάδων με βάση το ελάχιστο ωριαίο κόστος είναι αυτό του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.20. Κατ'αντιστοιχία το πρόγραμμα λειτουργίας του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.19 εισάγεται στο κώδικα ενεργοποίησης μονάδων με κριτήριο ενεργοποίησης βάσει της μέγιστης ισχύος, κατόπιν διορθώνεται από τον ΑΥΣΚ και προκύπτει το ακόλουθο αποτέλεσμα:



ΣΧΗΜΑ 5.21

ΣΚΛ: \$ 556,535.23



ΣΧΗΜΑ 5.22

ΣΚΛ: \$ 613,017.78

Η μέθοδος (2) παρουσιάζει μικρότερο ΣΚΛ για την κατανομή της αυξημένης ζήτησης ισχύος, πράγμα το οποίο και περιμέναμε. Οι ενεργοποιήσεις που πραγματοποιούνται από τον ΑΕΜ με το κριτήριο της ελαχιστοποίησης του ωριαίου κόστους οδηγούν σε προγράμματα λειτουργίας για την αυξημένη ζήτηση με μικρότερο ΣΚΛ απ'ότι με το κριτήριο της μέγιστης ισχύος.

### 5.3.3.3 2<sup>η</sup> Περίπτωση

Εξετάζεται η περίπτωση των 10 μονάδων με τα χαρακτηριστικά του ΠΙΝΑΚΑ 4.1. Η αρχική ζήτηση ισχύος είναι αυτή του ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4 και η νέα αυξημένη ζήτηση ισχύος του ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5 αντίστοιχα. Η αλλαγή σχετικά με την 1<sup>η</sup> περίπτωση είναι ότι δημιουργήσαμε μία νέα ζήτηση (από την αρχική ζήτηση κάθε ώρας της 1<sup>ης</sup> περίπτωσης αφαιρέσαμε 300 MW) η οποία αποτελεί τη νέα αρχική ζήτηση του προβλήματος. Αυτό έγινε ώστε να ελεγχθεί το πως ανταποκρίνεται ο αλγόριθμος ενεργοποίησης μονάδων όταν υπάρχει μεγαλύτερη, σε σχέση με την 1<sup>η</sup> περίπτωση, διαφορά μεταξύ της αρχικής ζήτησης ισχύος και της νέας αυξημένης ζήτησης ισχύος.

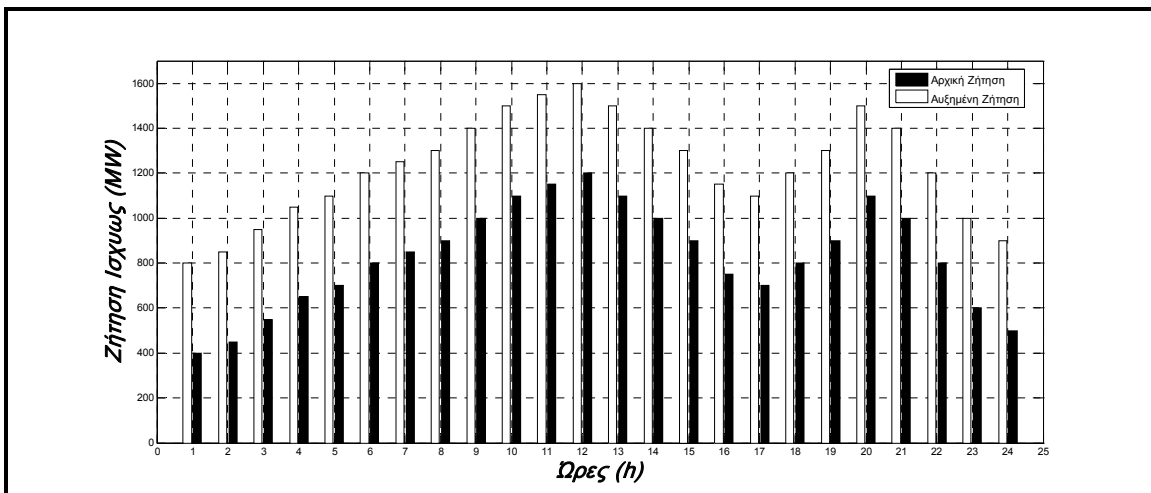
Ωρα	Ζήτηση (MW)	Ωρα	Ζήτηση (MW)
1	400	13	1100
2	450	14	1000
3	550	15	900
4	650	16	750
5	700	17	700
6	800	18	800
7	850	19	900
8	900	20	1100
9	1000	21	1000
10	1100	22	800
11	1150	23	600
12	1200	24	500

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4 - Αρχική Ζήτηση Ισχύος

Ωρα	Ζήτηση (MW)	Ωρα	Ζήτηση (MW)
1	800	13	1500
2	850	14	1400
3	950	15	1300
4	1050	16	1150
5	1100	17	1100
6	1200	18	1200
7	1250	19	1300
8	1300	20	1500
9	1400	21	1400
10	1500	22	1200
11	1550	23	1000
12	1600	24	900

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5 – Νέα Αυξημένη Ζήτηση Ισχύος

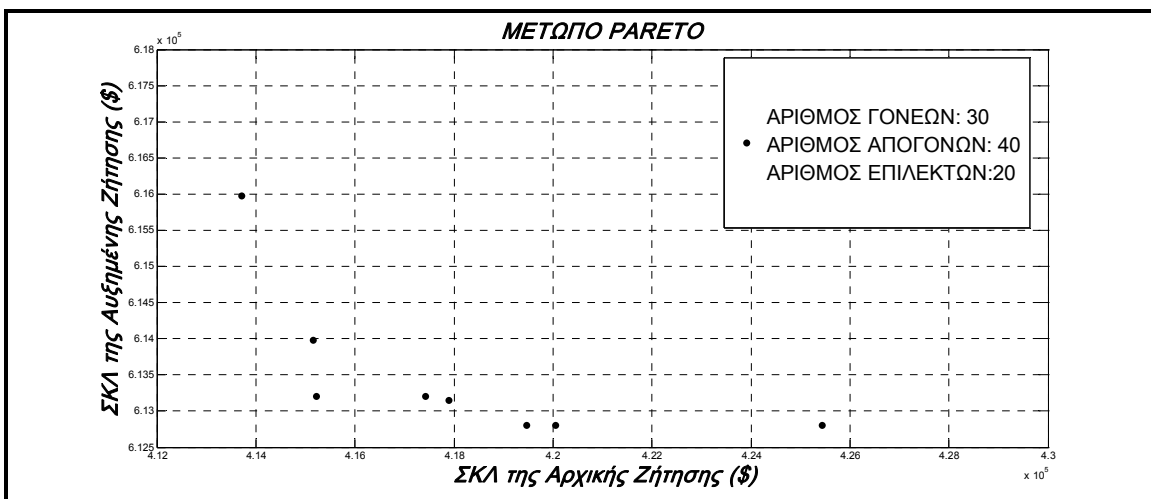




ΣΧΗΜΑ 5.23

### 5.3.3.3.1 Κριτήριο της μέγιστης ισχύος

Πραγματοποιήθηκε ένα τρέξιμο του ΓΑ. Προέκυψε το μέτωπο Pareto του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.24 . Παρατηρούμε ότι το ΣΚΛ για την αυξημένη ζήτηση κυμαίνεται στα επίπεδα της 1<sup>ης</sup> περίπτωσης. Άρα σε πρώτη φάση μπορούμε να πούμε ότι έχουν γίνει σωστά οι απαιτούμενες ενέργειες, δηλαδή ενεργοποιήσεις μονάδων, για την κάλυψη της αυξημένης ζήτησης.



ΣΧΗΜΑ 5.24

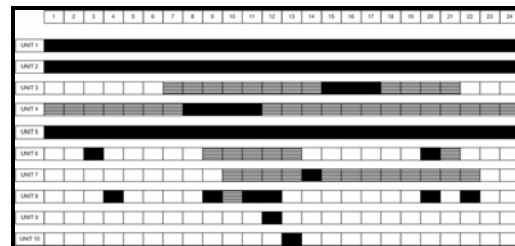
Ακολουθεί η ανάλυση των άκρων του μετώπου PARETO καθώς και μίας ενδιάμεσης λύσης. Επιπλέον θα διαγνωστεί με βάση τα προκύπτοντα προγράμματα λειτουργίας αν ο νέος αλγόριθμος πραγματοποιεί σωστά τις διαδικασίες για τις οποίες δημιουργήθηκε. Στα ακόλουθα παρατίθενται τα δύο διαφορετικά προγράμματα λειτουργίας και αναλύονται τα αποτελέσματα.

**Πάνω αριστερά άκρο του PARETO**



ΣΧΗΜΑ 5.25

ΣΚΛ: \$ 413,112

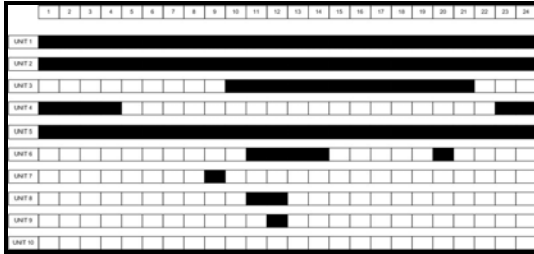


ΣΧΗΜΑ 5.26

ΣΚΛ: \$ 621,127

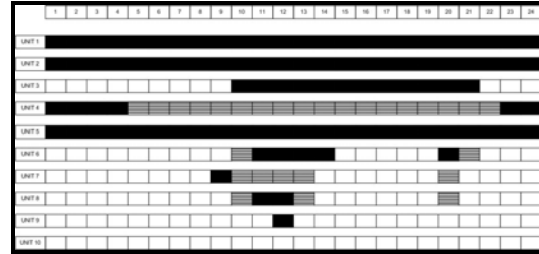
Τηρούνται όλοι οι περιορισμοί και καλύπτεται η ζητούμενη ισχύς και στα δύο προγράμματα λειτουργίας. Η ενεργοποίηση των μονάδων γίνεται με βάση την κατάταξή τους. Όπως είναι αναμενόμενο λόγω της μεγάλης διαφοράς ισχύος που παρουσιάζουν οι δύο κατανομές ζήτησης, υπάρχει και μεγάλη διαφορά στα ΣΚΛ. Το πρόγραμμα λειτουργίας για την αρχική ζήτηση προσφέρει στο σύστημα για την περίοδο των 24 ωρών ενέργεια ίση με 19,900 MWh με συνολικό κόστος \$ 413,112. Αντίστοιχα το πρόγραμμα λειτουργίας για την αυξημένη ζήτηση προσφέρει στο σύστημα για την περίοδο των 24 ωρών ενέργεια ίση με 29.500 MWh με συνολικό κόστος \$ 621,127. Με βάση τις τιμές αυτές μπορούμε να πούμε ότι η αύξηση της ζήτησης οδηγεί και σε μία ανάλογη αύξηση του συνολικού κόστους λειτουργίας.

### Κάτω δεξιά άκρο του PARETO



ΣΧΗΜΑ 5.27

ΣΚΛ: \$ 416,564

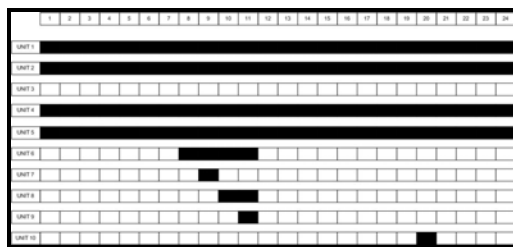


ΣΧΗΜΑ 5.28

ΣΚΛ: \$ 612,556

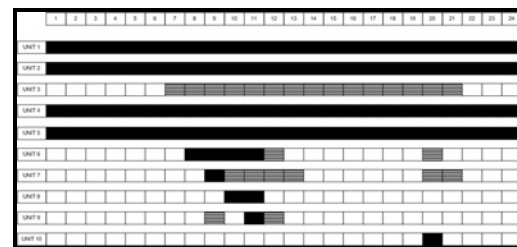
Τηρούνται όλοι οι περιορισμοί και καλύπτεται η ζητούμενη ισχύς και στα δύο προγράμματα λειτουργίας. Η ενεργοποίηση των μονάδων γίνεται με βάση την κατάταξή τους. Όπως είναι αναμενόμενο λόγω της μεγάλης διαφοράς ισχύος που παρουσιάζουν οι δύο κατανομές ζήτησης, υπάρχει και μεγάλη διαφορά στα ΣΚΛ, ανάλογη όμως της προσφοράς ενέργειας στο σύστημα.

### Ενδιάμεση λύση του PARETO



ΣΧΗΜΑ 5.29

ΣΚΛ: \$ 417,424



ΣΧΗΜΑ 5.30

ΣΚΛ: \$ 613,198

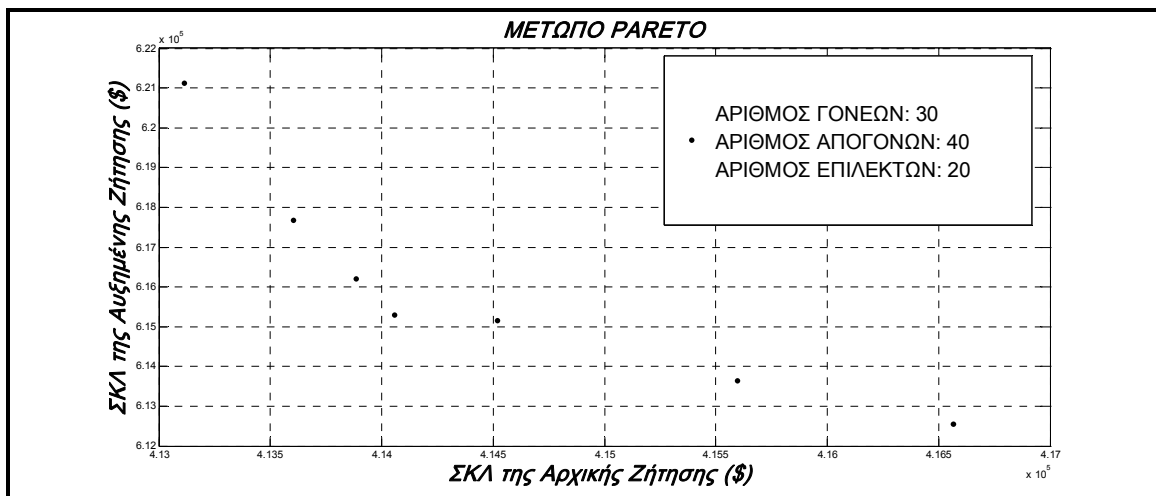
Τηρούνται όλοι οι περιορισμοί και καλύπτεται η ζητούμενη ισχύς και στα δύο προγράμματα λειτουργίας. Η ενεργοποίηση των μονάδων γίνεται με βάση την κατάταξή τους. Όπως είναι αναμενόμενο λόγω της μεγάλης διαφοράς ισχύος που παρουσιάζουν οι

δύο κατανομές ζήτησης, υπάρχει και μεγάλη διαφορά στα ΣΚΛ, ανάλογη όμως της προσφοράς ενέργειας στο σύστημα.

Τα προγράμματα λειτουργίας για την αυξημένη ζήτηση μοιάζουν με αυτά της προηγούμενης περίπτωσης που εξετάστηκε. Πραγματοποιούνται σωστές ενέργειες από τον ΑΕΜ.

### 5.3.3.3.2 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΩΡΙΑΙΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

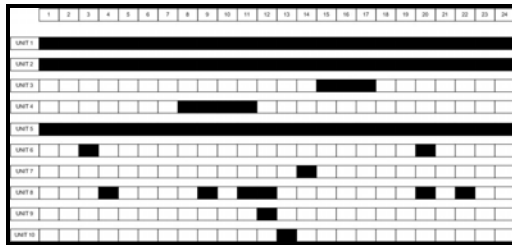
Πραγματοποιήθηκε ένα τρέξιμο του ΓΑ. Προέκυψε το μέτωπο Pareto του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.31.



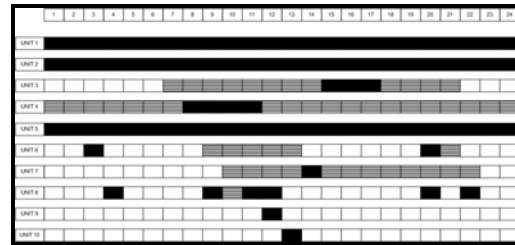
ΣΧΗΜΑ 5.31

Ακολουθεί η ανάλυση των άκρων του μετώπου PARETO καθώς και μίας ενδιάμεσης λύσης. Επιπλέον θα διαγνωστεί με βάση τα προκύπτοντα προγράμματα λειτουργίας αν ο νέος αλγόριθμος πραγματοποιεί σωστά τις διαδικασίες για τις οποίες είναι αρμόδιος. Στα ακόλουθα παρατίθενται τα δύο διαφορετικά προγράμματα λειτουργίας και αναλύονται τα αποτελέσματα.

**Πάνω αριστερά άκρο του PARETO**



ΣΚΛ: \$ 413,112



ΣΚΛ: \$ 621,127

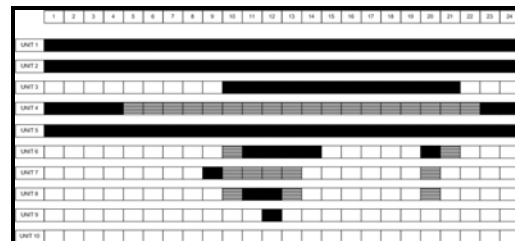
Τηρούνται όλοι οι περιορισμοί και καλύπτεται η ζητούμενη ισχύς. Άμεση ενεργοποίηση της μονάδας βάσης 4 . Η μονάδα βάσης 3 και οι μικρότερες μονάδες 6,7,8 ενεργοποιούνται στην περιοχή της αιχμής ζήτησης.

**Κάτω δεξιά άκρο του PARETO**



ΣΧΗΜΑ 5.32

ΣΚΛ: \$ 416,564

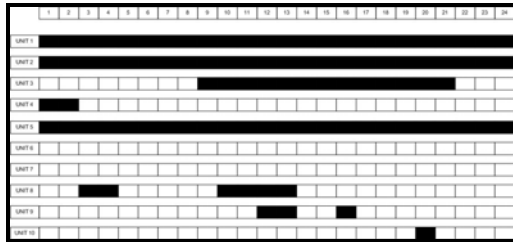


ΣΧΗΜΑ 5.33

ΣΚΛ: \$ 612,556

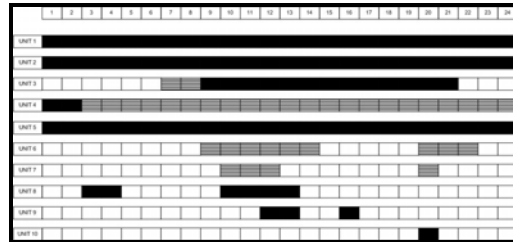
Τηρούνται όλοι οι περιορισμοί και καλύπτεται η ζητούμενη ισχύς. Ενεργοποίηση της μονάδας βάσης 4 και των μονάδες 6,7,8 ενεργοποιούνται στην περιοχή της αιχμής ζήτησης.

Ενδιάμεση λύση του PARETO



ΣΧΗΜΑ 5.34

ΣΚΛ: \$ 414,520



ΣΧΗΜΑ 5.35

ΣΚΛ: \$ 615,149

Τηρούνται όλοι οι περιορισμοί και καλύπτεται η ζητούμενη ισχύς. Ενεργοποίηση της μονάδας βάσης 4 . Η μονάδα βάσης 3 και οι μικρότερες μονάδες 6,7 ενεργοποιούνται στην περιοχή της αιχμής ζήτησης.

### 3<sup>η</sup> Περίπτωση

Θα εξεταστεί επιπλέον και η περίπτωση κατά την οποία η ζήτηση ισχύος αυξάνεται όχι σε όλο το χρονικό διάστημα αλλά σε μεμονωμένες ώρες του, οι οποίες επιλέγονται τυχαία.

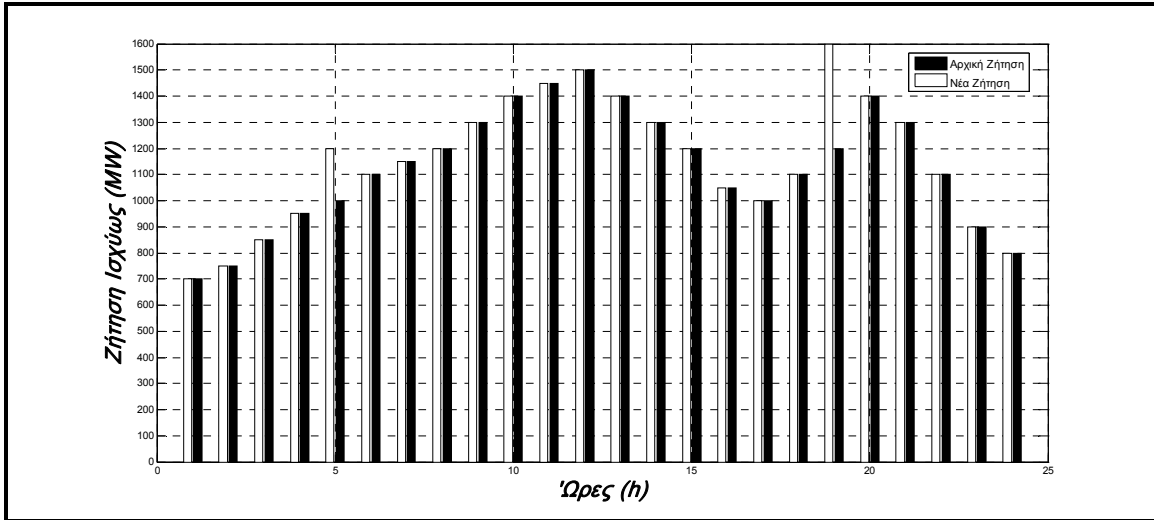
Εξετάζεται η περίπτωση των 10 μονάδων με τα χαρακτηριστικά του ΠΙΝΑΚΑ 4.1. Η αρχική ζήτηση ισχύος είναι αυτή του ΠΙΝΑΚΑ 5.6 και η νέα αυξημένη ζήτηση ισχύος του ΠΙΝΑΚΑ 5.7 αντίστοιχα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε μία αύξηση της ζήτησης ισχύος για την 5<sup>η</sup> ώρα κατά 200 MW και μία αύξηση για την 19<sup>η</sup> ώρα κατά 400 MW.

Ωρα	Ζήτηση (MW)	Ωρα	Ζήτηση (MW)
1	700	13	1400
2	750	14	1300
3	850	15	1200
4	950	16	1050
5	1000	17	1000
6	1100	18	1100
7	1150	19	1200
8	1200	20	1400
9	1300	21	1300
10	1400	22	1100
11	1450	23	900
12	1500	24	800

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6 – Αρχική Ζήτηση Ισχύος

Ωρα	Ζήτηση (MW)	Ωρα	Ζήτηση (MW)
1	700	13	1400
2	750	14	1300
3	850	15	1200
4	950	16	1050
5	1200	17	1000
6	1100	18	1100
7	1150	19	1600
8	1200	20	1400
9	1300	21	1300
10	1400	22	1100
11	1450	23	900
12	1500	24	800

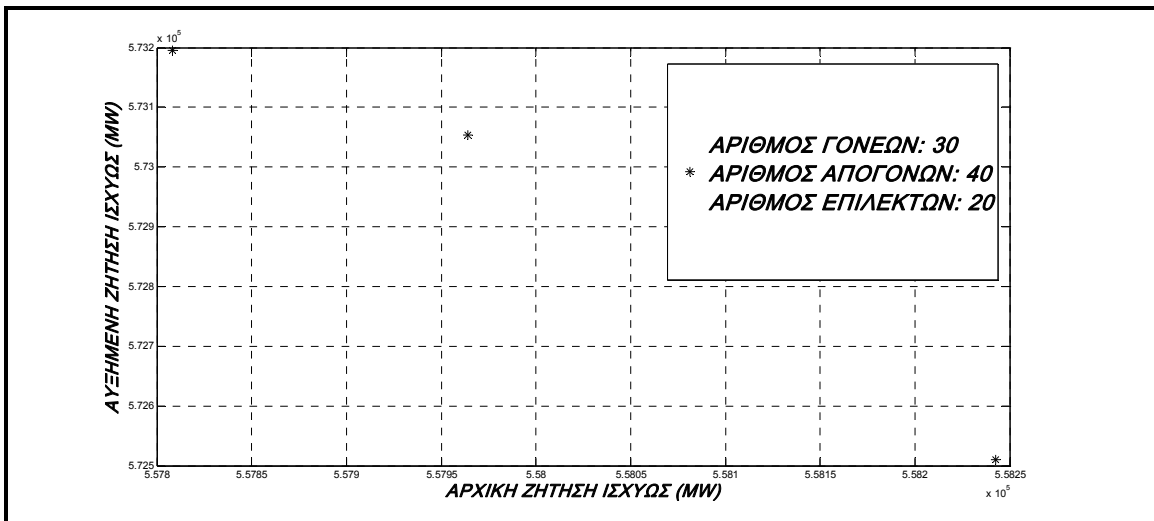
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7 – Νέα Ζήτηση Ισχύος



ΣΧΗΜΑ 5.36

### 5.3.3.3 Κριτήριο της μέγιστης ισχύος

Πραγματοποιήθηκε ένα τρέξιμο του ΓΑ και προέκυψε το Μέτωπο Pareto του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.37.

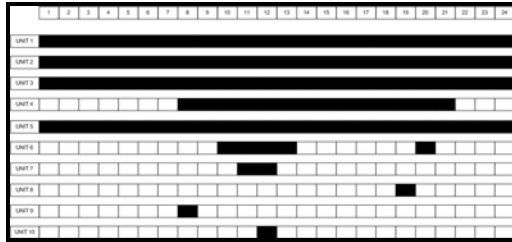


ΣΧΗΜΑ 5.37



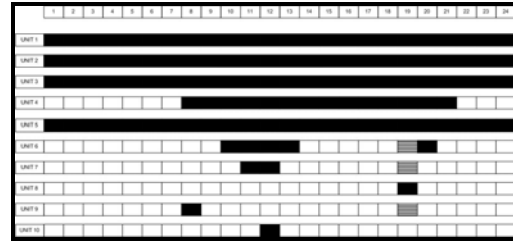
Το μέτωπο Pareto του ΣΧΗΜΑ 5.37 αποτελείται από 3 σημεία των οποίων τα σενάρια λειτουργίας παρουσιάζονται ως ακολούθως.

**Πάνω αριστερά άκρο του PARETO**



**ΣΧΗΜΑ 5.38**

**ΣΚΛ: \$ 557,808**

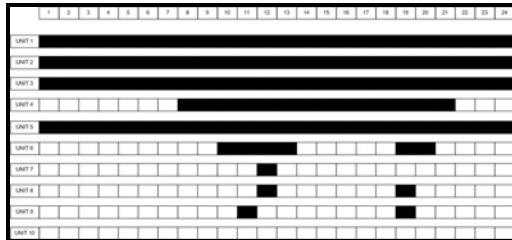


**ΣΧΗΜΑ 5.39**

**ΣΚΛ: \$ 573,195**

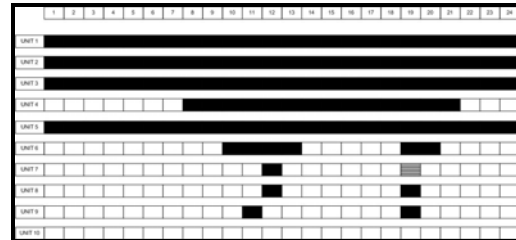
Τηρούνται όλοι οι περιορισμοί και καλύπτεται η ζητούμενη ισχύς. Διαπιστώνουμε ότι η ενεργοποίηση των μονάδων γίνεται με βάση την κατάταξή τους. Συγκεκριμένα την 19<sup>η</sup> ώρα, όπου αυξάνεται η ζήτηση, ενεργοποιούνται οι μονάδες 6,7 και 9. Το πρόγραμμα λειτουργίας για την αρχική ζήτηση προσφέρει στο σύστημα για την περίοδο των 24 ωρών ενέργεια ίση με 27,100 MWh με συνολικό κόστος \$ 557,808. Αντίστοιχα το πρόγραμμα λειτουργίας για την αυξημένη ζήτηση προσφέρει στο σύστημα για την περίοδο των 24 ωρών ενέργεια ίση με 27,700 MWh με συνολικό κόστος \$ 573,195. Με βάση τις τιμές αυτές μπορούμε να πούμε ότι η αύξηση της ζήτησης οδηγεί και σε μία ανάλογη αύξηση του συνολικού κόστους λειτουργίας. Η παρατήρηση αυτή ισχύει και για τα επόμενα σημεία του PARETO.

**Κάτω δεξιά άκρο του PARETO**



**ΣΧΗΜΑ 5.40**

**ΣΚΛ: \$ 558,242**

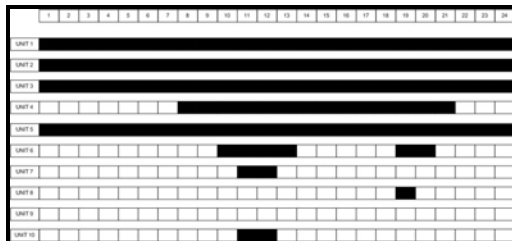


**ΣΧΗΜΑ 5.41**

**ΣΚΛ: \$ 572,510**

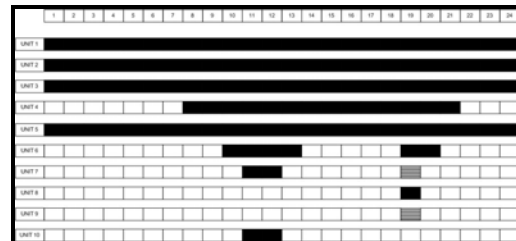
Τηρούνται όλοι οι περιορισμοί και καλύπτεται η ζητούμενη ισχύς. Διαπιστώνουμε ότι η ενεργοποίηση των μονάδων γίνεται βάσει της κατάταξή τους. Την 19<sup>η</sup> ώρα ενεργοποιείται η 7<sup>η</sup> μονάδα ηλεκτροπαραγωγής.

**Ενδιάμεσο σημείο του PARETO**



**ΣΧΗΜΑ 5.42**

**ΣΚΛ: \$ 557,964.04**



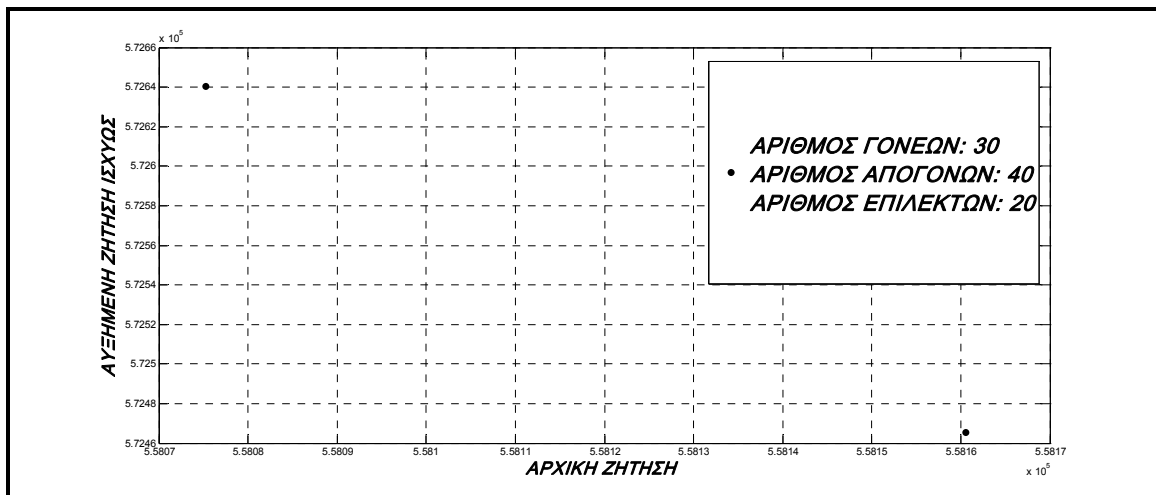
**ΣΧΗΜΑ 5.43**

**ΣΚΛ: \$ 573,054.25**

Τηρούνται όλοι οι περιορισμοί και καλύπτεται η ζητούμενη ισχύς. Διαπιστώνουμε ότι η ενεργοποίηση των μονάδων γίνεται βάσει της κατάταξή τους. Την 19<sup>η</sup> ώρα ενεργοποιούνται οι μονάδες 7 και 9.

#### 5.3.3.3.4 Κριτήριο ελαχιστοποίησης του ωριαίου κόστους λειτουργίας

Πραγματοποιήθηκε ένα τρέξιμο του ΓΑ και προέκυψε το Μέτωπο Pareto του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.44. Πρέπει να τονίσουμε ότι παρουσιάστηκαν και σενάρια λειτουργίας τα οποία παρουσίαζαν καλή συμπεριφορά μόνο ως προς τον ένα στόχο, ενώ ως προς τον άλλο στόχο η μέθοδος ALM αδυνατούσε να βρει λύση (προέκυπτε μεγάλη τιμή της συνάρτησης κόστους λόγω ποινών), καθότι μετά από εξέταση των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε ότι δεν υπήρχε λύση. Το πρόβλημα εντοπίζεται στο γεγονός ότι η ενεργοποίηση μίας μονάδας για μία συγκεκριμένη ώρα είναι πιθανό λόγω των περιορισμών να επιφέρει αλλαγές σε επομένως και προηγούμενες ώρες, δηλαδή να ενεργοποιηθούν μονάδες ακόμα και όταν αυτό δεν είναι απαραίτητο. Στην περίπτωση αυτή μπορεί το  $\sum P_{\min}$  των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής να είναι μεγαλύτερο της ζήτησης ισχύος, οπότε η ALM αδυνατεί να καθορίσει τα φορτία  $x_i^j$  των μονάδων και επιβάλλεται ποινή. Τα σενάρια λειτουργίας αυτά παραλήφθηκαν από το Μέτωπο Pareto.



ΣΧΗΜΑ 5.44 – Μέτωπο Pareto

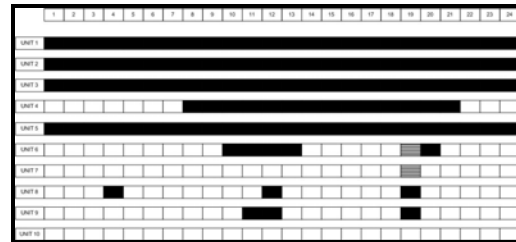
Το μέτωπο Pareto του ΣΧΗΜΑ 5.44 αποτελείται από 2 σημεία των οποίων τα σενάρια λειτουργίας παρουσιάζονται ως ακολούθως.

**Πάνω αριστερά άκρο του PARETO**



ΣΧΗΜΑ 5.45

ΣΚΛ: \$ 558075.23

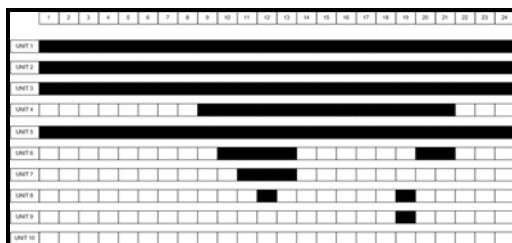


ΣΧΗΜΑ 5.46

ΣΚΛ: \$ 572640.27

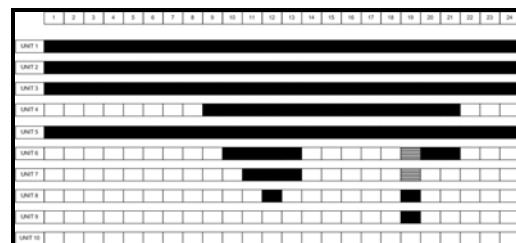
Τηρούνται όλοι οι περιορισμοί και καλύπτεται η ζητούμενη ισχύς. Ενεργοποίηση των μονάδων 6 και 7 την 19<sup>η</sup> ώρα της χρονικής περιόδου.

**Κάτω δεξιά άκρο του PARETO**



ΣΧΗΜΑ 5.47

ΣΚΛ: \$ 558,160.53



ΣΧΗΜΑ 5.48

ΣΚΛ: \$ 572,465.57

Την 19<sup>η</sup> ώρα έχουμε ενεργοποίηση των μονάδων 6 και 7 ώστε να καλυφθεί το έλλειμμα ισχύος. Οι περιορισμοί λειτουργίας τηρούνται.

## 6 Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε το πρόβλημα της βέλτιστης ανάθεσης φορτίου σε αεριοτροβιλικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε με έναν σειριακό ΓΑ του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών του Ε.Μ.Π.. Αρχικά επιλύθηκε το απλό πρόβλημα της εύρεσης του βέλτιστου προγράμματος λειτουργίας για μία δεδομένη ζήτηση ισχύος κάνοντας χρήση του αλγόριθμου υπολογισμού της συνάρτησης κόστους<sup>29</sup>. Στη συνέχεια εξετάσαμε το πρόβλημα της περιοδικότητας, δηλαδή αν το σενάριο λειτουργίας που έχει προκύψει για ένα σύνολο μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και μία δεδομένη ζήτηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην αμέσως επόμενη χρονική περίοδο, η οποία παρουσιάζει την ίδια ζήτηση ισχύος, χωρίς να παραβιαστεί κανένας περιορισμός λειτουργίας. Για την επίλυση

του προβλήματος προτάθηκαν δύο τρόποι αντιμετώπισής του, η μέθοδος της επιβολής ποινής και η μέθοδος της διόρθωσης των προγραμμάτων λειτουργίας. Τέλος εξετάστηκε η περίπτωση της απότομης αύξησης ζήτησης, δηλαδή της επιλογής των μονάδων που πρέπει να ενεργοποιηθούν ώστε να καλυφθεί το έλλειμμα ισχύος που πιθανώς να προκύψει μετά από μία λανθασμένη πρόβλεψη της ζήτησης ισχύος. Για την περίπτωση αυτή προτάθηκαν δύο τρόποι επίλυσης.

Το πρόβλημα της περιοδικότητας αντιμετωπίστηκε με τους ακόλουθους δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος σχετίζεται με την επιβολή ποινής στα προγράμματα λειτουργίας που αδυνατούν να τηρήσουν το νέο περιορισμό. Ο δεύτερος τρόπος ελέγχει το αν τηρείται ο περιορισμός και αν όχι διορθώνεται κατάλληλα το πρόγραμμα λειτουργίας. Και οι δύο τρόποι μας οδήγησαν σε περιοδικά προγράμματα λειτουργίας. Τα ΣΚΛ που προέκυψαν με τη μέθοδο της διόρθωσης είναι καλύτερα από αυτά της μεθόδου επιβολής ποινής. Αυτό που είναι σημαντικό να τονιστεί είναι ότι, για να επιτευχθούν περιοδικά προγράμματα, οι μονάδες βάσης παραμένουν ενεργές για μεγαλύτερο διάστημα και λειτουργούν σε μικρά φορτία κατά τις ώρες που η ζήτηση παραμένει σε χαμηλότερα επίπεδα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ΣΚΛ σε σχέση με ένα μη-περιοδικό πρόγραμμα λειτουργίας. Για το πρόβλημα των 10 μονάδων που εξετάσαμε ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η διαφορά του ΣΚΛ μεταξύ του καλύτερου μη-περιοδικού προγράμματος λειτουργίας και του καλύτερου περιοδικού προγράμματος είναι της τάξης του 0,8%. Το πλεονέκτημα της μεθόδου επιβολής ποινής είναι ο λίγο μικρότερος χρόνος υπολογισμού.

Το πρόβλημα της απότομης αύξησης ζήτησης είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα. Η πολυπλοκότητά του εντοπίζεται στις ενέργειες που πρέπει να γίνουν ώστε να καλυφθεί το έλλειμμα στη ζήτηση. Κάθε φορά που για κάποια ώρα  $t_i$  μία ακόμη μονάδα ενεργοποιείται, δε μεταβάλλεται μόνο η κατανομή των φορτίων για τη συγκεκριμένη ώρα αλλά και για επόμενες και προηγούμενες ώρες ανάλογα με το τι αλλαγές γίνονται στο πρόγραμμα λειτουργίας. Για την εύρεση των βέλτιστων αλλαγών που πρέπει να γίνουν, ώστε το ΣΚΛ του νέου προγράμματος λειτουργίας να είναι το ελάχιστο δυνατό, ουσιαστικά πρέπει να επιλύσουμε ένα νέο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Αντ'αυτού υιοθετήθηκε ένας ντετερμινιστικός τρόπος επίλυσης του προβλήματος.

Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με τους ακόλουθους δύο τρόπους. Πρώτον με την ενεργοποίηση μονάδων βάσει της μέγιστης δυνατότητας ισχύος και δεύτερον βάσει του ελάχιστου ωριαίου κόστους λειτουργίας. Και οι δύο μέθοδοι καταφέρνουν να βρουν περιοδικά προγράμματα λειτουργίας και για την περίπτωση της αρχικής ζήτησης αλλά και για αυτή της επαυξημένης ζήτησης. Η σύγκριση των δύο μεθόδων μπορεί να γίνει μόνο για κάποιο δεδομένο πρόγραμμα το οποίο έχει προκύψει για την αρχική ζήτηση και τίθεται προς επεξεργασία στον Αλγόριθμο Ενεργοποίησης Μονάδων. Ο λόγος είναι ότι, επειδή ο ΓΑ δεν τρέχει επ'άπειρον αλλά τερματίζεται σε κάποια γενιά, οι λύσεις που προκύπτουν για τα διαφορετικά τρεξίματα των δύο μεθόδων δεν συμπίπτουν. Η σύγκριση όσον αφορά την αποτελεσματικότητα των δύο προτεινόμενων μεθόδων δε μπορεί να γίνει πάνω σε διαφορετικά προγράμματα λειτουργίας. Πάντως για ένα δεδομένο πρόγραμμα λειτουργίας οι ενέργειες που πραγματοποιούνται από τη δεύτερη μέθοδο οδηγούν πράγματι σε μικρότερο Συνολικό Κόστος Λειτουργίας.

## 7 Βιβλιογραφία

- Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στην Αεροδυναμική, Κ.Χ. Γιαννάκογλου, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π., Αθήνα 2006, 4<sup>η</sup> Έκδοση
- Λειτουργία Αεριστροβίλων και Ατμοστροβίλων, Κ. Μαθιουδάκης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π., Αθήνα 1997
- Θερμοηλεκτρικοί Σταθμοί, Εμμ. Κ. Κακκαράς, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π. , 2<sup>η</sup> Έκδοση
- Πιθανοτική Ανάλυση της Αξιοπιστίας και Ασφάλειας Λειτουργίας των Απομονωμένων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Διδακτορική Διατριβή Εμμανουήλ Ι. Θαλασσινάκης, Αθήνα, Φεβρουάριος 2008



- C. Dang, M. Li, “A floating-point genetic algorithm for solving the unit commitment problem”, ScienceDirect Europ. Journal of operational Research, pp. 1370-1395, May 2006.
- J. M. Aroyo and A. J. Conejo, “A parallel repair genetic algorithm to solve the unit commitment problem”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 17, pp. 1216-1223, Nov. 2002.
- Bo Lu, M. Shahidehpour, “Short-Term Scheduling of Combined Cycle Units,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 3, Aug. 2004
- H. A. Georgopoulou, K. C. Giannakoglou, “A two-level method for solving power generating unit commitment problems”, IEEE Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, pp. 1326-1331.
- C. A. Georgopoulou, K. C. Giannakoglou, “Solutions to the Unit Commitment Problem Using Evolutionary Algorithms,” CIMNE, Barcelona, Spain 2007
- N. P. Padhy, “Unit Commitment – A Bibliographical Survey,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 2, pp.1196-1205, May 2004
- G. Damousis, A. G. Bakirtzis, P. S. Dokopoulos, “A solution to the unit-commitment problem using integer-coded genetic algorithm,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, NO. 2, pp. 1165-1172, May 2004.
- S. A. Kazarlis, A. G. Bakirtzis, V. Petridis, “A genetic algorithm solution to the unit commitment problem,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 11, pp. 83-92, Feb. 1996.
- [www.desmie.gr](http://www.desmie.gr)

---

<sup>1</sup> R. H. Kerr, J. L. Scheidt, A. J. Fontana, and J.K. Wiley, “Unit commitment,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-85, pp. 417-421, May 1966.

<sup>2</sup> K. Hara, M. Kimura, and N. Honda, “ A method for planning economic unit commitment and maintenance of thermal power systems,” IEEE Trans. Power App. Syst. , vol. PAS-85, pp. 427-436, May 1966.

<sup>3</sup> R. M. Burns and C. A. Gibson , “Optimization of priority lists for a unit commitment program,” in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, 1975.

- 
- <sup>4</sup> F. N. Lee, "Short-term unit commitment-a new method," *IEEE Trans. Power. Syst.*, vol. 3, pp. 421-428, May 1988.
  - <sup>5</sup> R. R. Shoults, S. K. Chang, S. Helmick, and W. M. Grady, "A practical approach to unit commitment, economic dispatch and savings allocation for multiple-area pool operation with import/export constraints," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-99, pp.625-635, Mar./Apr. 1980
  - <sup>6</sup> H. H. Happ, R. C. Johnson, and W. J. Wright, "Large scale hydro-thermal unit commitment-method and results," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-90, pp. 1373-1384, Aug. 1971.
  - <sup>7</sup> T. S. Dillon, K. W. Edwin, H. D. Kochs, and R. J. Taud, "Integer programming approach to the problem of optimal unit commitment with probabilistic reserve determination," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-97, pp. 2154-2166, Nov./Dec. 1978.
  - <sup>8</sup> G. S. Lauer, N. R. Sandell Jr., N. R. Bertsekas, and T. A. Posbergh, "Solution Of large scale optimal unit commitment problems," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-101, pp. 79-96, Jan. 1982.
  - <sup>9</sup> A. J. Cohen. and M. Yoshimura, " A branch-and-bound algorithm for unit commitment," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-102, pp. 444-451, Feb. 1983.
  - <sup>10</sup> M. Madrigal and V. H. Quintana, " An interior-point/cutting-plane method to solve unit commitment problems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, pp. 1022-1027, Aug. 2000.
  - <sup>11</sup> H. Mori and O. Matsuzaki, "Embedding the priority into Tabu search for unit commitment," in *Proc. IEEE Winter Meeting*, 2000.
  - <sup>12</sup> H. Mori and T. Usami, "Unit commitment using tabu search with restricted neighborhood," in *Proc. Intell. Syst. Applicat. Power Syst.*, 1996, pp. 422-427.
  - <sup>13</sup> A. Rajan, C. C. Mohan, and M. R. Manivannan, "Neural based tabu search method for solving unit commitment problem," in *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Power Syst. Manage Contr.*, 2002, pp. 180-185.
  - <sup>14</sup> S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt Jr., M.P. Vecchi, Optimization by simulated annealing, *Science* 220 (4598) (1983) 672-680
  - <sup>15</sup> Cerny, V., "Thermodynamical Approach to the Traveling Salesman Problem: An Efficient Simulation Algorithm", *J. Opt. Theory Appl.*, 45, 1, 41-51, 1985
  - <sup>16</sup> K. P. Wong and Y. W. Wong, "Short term hydro thermal scheduling part I: simulated annealing approach," *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen. Transm. Dist.*, vol. 141, pp.497-501, 1994.
  - <sup>17</sup> U. D. Annakkage, T. Numnonda., and N. C. Pahalawaththa, "Unit commitment by parallel simulated annealing," *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen. Transm. Dist.*, vol. 142, pp. 595-600, 1995.
  - <sup>18</sup> A. H. Mantawy, Y. L. Abdel-MAGid, and S. Z. Selim, " A simulated annealing algorithm for unit commitment," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, pp. 197-204, Feb. 1998.
  - <sup>19</sup> H. Sasaki, M. Watanabe, and R. Yokoyama, "A solution method of unit commitment by artificial neural networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 7, pp. 974-981, Aug. 1992.
  - <sup>20</sup> N. S. Sisworahardjo and A. A. El-Kaib, "Unit commitment using ant colony search algorithm," in *Proc. 2002 Large Eng. Syst. Conf. Power Eng.*, 2002 pp. 2-6
  - <sup>21</sup> J. M. Aroyo and A. J. Conejo, "A parallel repair genetic algorithm to solve the unit commitment problem", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, pp. 1216-1223, Nov. 2002.
  - <sup>22</sup> S. A. Kazarlis, A. G. Bakirtzis, V. Petridis, "A genetic algorithm solution to the unit commitment problem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, pp. 83-92, Feb. 1996.
  - <sup>23</sup> I. G. Damousis, A. G. Bakirtzis, P. S. Dokopoulos, "A solution to the unit-commitment problem using integer-coded genetic algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, NO. 2, pp. 1165-1172, May 2004.
  - <sup>24</sup> K. A. Juste, H. Kita, E. Tanaka, J. Hasegawa, "An evolutionary Programming solution to the unit commitment problem", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, No. 4, pp. 1452-1458, Nov. 1999.
  - <sup>25</sup> C. Dang, M. Li, "A floating-point genetic algorithm for solving the unit commitment problem", *ScienceDirect Europ. Journal of operational Research*, pp. 1370-1395, May 2006.
  - <sup>26</sup> C. A. Georgopoulou, K. C. Giannakoglou, "A two-level method for solving power generating unit commitment problems", *IEEE Power Tech*, 2007 IEEE Lausanne, pp. 1326-1331.

- 
- <sup>27</sup> C. A. GEORGOPOULOU, K.C. GIANNAKOGLU: Solutions to the Unit Commitment Problem using Two-level Evolutionary Algorithms, EUROGEN 2007, Jyvaskyla, Finland, June 11-13, 2007
- <sup>28</sup> C.A. GEORGOPOULOU, K.C. GIANNAKOGLU: Two-Level, Two-Objective Evolutionary Algorithms for Solving Unit Commitment Problems, Applied Energy, to appear, 2008
- <sup>29</sup> Διδακτορική διατριβή Χαρίκλειας Γεωργοπούλου, Τεχνικές Βελτιστοποίησης για τη Σχεδίαση και Λειτουργία Αεριοστροβλικών Μονάδων και Συνιστωσών τους