



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ
ΚΑΙ ΜΙΑΣ ΝΕΑΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ**

Διπλωματική Εργασία

ΙΩΑΝΝΗ Κ. ΔΟΛΙΑΝΙΤΗ

Επιβλέπων : ΚΥΡΙΑΚΟΣ Χ. ΓΙΑΝΝΑΚΟΓΛΟΥ
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2011

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΚΑΙ ΜΙΑΣ ΝΕΑΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία
ΙΩΑΝΝΗ Κ. ΔΟΛΙΑΝΙΤΗ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2011

Επιβλέπων : ΚΥΡΙΑΚΟΣ Χ. ΓΙΑΝΝΑΚΟΓΛΟΥ
Καθηγητής ΕΜΠ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία και πιστοποίηση μίας μεθόδου-λογισμικού βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας ενός θερμικού ηλεκτροπαραγωγικού σταθμού και η βέλτιστη ανάθεση φορτίου στις μονάδες που τον συγκροτούν. Στόχος είναι η κάλυψη μιας καθορισμένης βραχυπρόθεσμης χρονοσειράς ζήτησης με το ελάχιστο κόστος. Το πρόβλημα αυτό αποτελεί αντικείμενο συνδυαστικής βελτιστοποίησης και για την επίλυση του χρησιμοποιείται η στοχαστική μέθοδος των εξελικτικών αλγορίθμων (Evolutionary Algorithms - EA). Η εργασία προτείνει μία, πρακτικά, νέα μέθοδο σε σύγκριση με τον σχετικό αλγόριθμο της διδακτορικής διατριβής της Δρ. Γεωργοπούλου [52], που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ.

Βασική παραλλαγή είναι η χρήση ακέραια κωδικοποιημένου χρωμοσώματος, αντί δυαδικού, μειώνοντας σημαντικά το μήκος του. Μία 'βάση δεδομένων' βέλτιστης ανάθεσης φορτίου ολοκληρώνεται πριν την εκκίνηση του EA και εφαρμόζεται μόνο σε αποδεκτά ωριαία σενάρια λειτουργίας, σε σενάρια δηλαδή που καλύπτουν τη ζήτηση του δικτύου, περιορίζοντας το πλήθος των συνολικών αξιολογήσεων. Τα νέα αυτά στοιχεία σε συνδυασμό με τη χρήση χρονικής κατάτμησης του ορίζοντα προγραμματισμού επιφέρουν ραγδαία επιτάχυνση της διαδικασίας, απαλείφοντας έτσι το κύριο μειονέκτημα των EA που είναι ο αργός ρυθμός σύγκλισης τους. Αφού προηγηθεί η παρουσίαση της μεθόδου, ο αλγόριθμος δοκιμάζεται σε περιπτώσεις που αφορούν τις αρχικές καταστάσεις των μονάδων, την υπερπαραγωγής ενέργειας και την κάλυψη του ελλείμματος παραγωγής από εξωτερική πηγή. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη και τον περιορισμό της στρεφόμενης εφεδρείας, γίνεται πιστοποίηση σε εφαρμογές από τη βιβλιογραφία ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
LABORATORY OF THERMAL TURBOMACHINES

UNIT COMMITMENT OPTIMIZATION OF THERMAL POWER PLANTS
USING EVOLUTIONARY ALGORITHMS AND
A NEW PARAMETERIZATION

Diploma Thesis
IOANNIS K. DOLIANITIS

February, 2011

Advisor: K.C. GIANNAKOGLU, Professor NTUA

The purpose of this diploma thesis is to develop and assess a method-software for the solution of the unit commitment problem of a thermal power plant, in an optimal way, along with the economic load dispatch problem of the generators that compose it. The aim is to cover a specified short-term load demand at minimum cost. The proposed technique for solving this combinatorial optimization problem is a stochastic population-based method, namely the evolutionary algorithm (EA). This study suggests a, practically, new method compared to the algorithm presented at the PhD thesis of Dr. Georgopoulou [52] and developed at the Lab Of Thermal Turbomachines of NTUA.

A key structural change is the use of integer-coded instead of binary-coded chromosome and, thus the chromosome length is significantly reduced. In addition, the economic load dispatch is completed before the beginning of the EA, by forming a database of possible hour scenarios to use during the optimization, and is applied only for feasible hourly-operating scenarios which leads to a limited number of evaluations. The scheduling horizon is also partitioned in sub-periods which are solved using semi-autonomous EAs. These new features result to a noticeable acceleration of the optimization algorithm eliminating, thus, the main disadvantage of EAs which is their slow convergence. After the current method is thoroughly presented, the algorithm is tested for some cases relating to the initial states of the units, the energy overproduction and a possible energy deficit that needs to be covered by third-party sources. Finally, the assessment of this method is based on test-cases taken from the relevant literature which allows comparison of results.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω στον επιβλέποντα Καθηγητή μου Κυριάκο Χ. Γιαννάκογλου για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το ενδιαφέρον αυτό θέμα, για την υπομονή και τη διάθεση που επέδειξε όλο το διάστημα που με καθοδηγούσε και με επέβλεπε. Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλη την ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών για την άψογη συνεργασία και υποστήριξη και ιδιαίτερα στην Δρ. Βαρβάρα Ασούτη για την συμβολή της στην ανάπτυξη του αλγορίθμου. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διπλωματούχο μηχανολόγο μηχανικό Κωνσταντίνο Τσίακα για την πολύτιμη βοήθειά του κατά το αρχικό στάδιο της ενασχόλησης μου με την διπλωματική μου εργασία. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου, καθώς και όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους για τη συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο τμήμα των Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Περιγραφή του προβλήματος – Ορισμοί – Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	11
1.1	Εισαγωγή.....	11
1.2	Διατύπωση του προβλήματος.....	13
1.2.1	Βασικές μεταβλητές.....	13
1.2.2	Αντικειμενική συνάρτηση.....	14
1.2.3	Περιορισμοί.....	16
1.2.4	Παράδειγμα.....	19
1.3	Μέθοδοι Βελτιστοποίησης Προγράμματος Λειτουργίας Ηλεκτροπαραγωγικών Μονάδων.....	21
1.3.1	Εξαντλητική Απαρίθμηση (Exhaustive Enumeration).....	21
1.3.2	Κατάταξη κατά Σειρά Προτεραιότητας (Priority Listing).....	21
1.3.3	Μέθοδος Χαλάρωσης Lagrange (Lagrangian Relaxation Method).....	22
1.3.4	Δυναμικός Προγραμματισμός (Dynamic Programming).....	22
1.3.5	Διακλάδωση και Περιορισμός (Branch and Bound).....	22
1.3.6	Προσομοιούμενη Ανόπτηση (Simulated Annealing).....	23
1.3.7	Ταμπού Αναζήτηση (Tabu Search).....	24
1.3.8	Βελτιστοποίηση με Αποικίες Μυρμηγκιών (Ant Systems).....	25
1.3.9	Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Network).....	26
1.3.10	Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms).....	27
2	Η Θεωρία των Εξελικτικών Αλγορίθμων.....	29
2.1	Εισαγωγή.....	29
2.2	Εξελικτικοί Αλγόριθμοι.....	29
2.2.1	Ιστορική Αναδρομή.....	29
2.2.2	Βασικά Χαρακτηριστικά.....	30
2.2.3	Περιγραφή ενός Γενικευμένου Εξελικτικού Αλγορίθμου.....	31
2.2.4	Βασικοί Τελεστές Εξελικτικών Αλγορίθμων.....	34
2.2.4.1	Τελεστές Επιλογής Γονέων.....	34
2.2.4.2	Τελεστές Διασταύρωσης.....	36
2.2.4.3	Τελεστές Μετάλλαξης.....	37
3	Σύγχρονες Προσπάθειες και Τεχνικές Επίλυσης του Προβλήματος με Χρήση Εξελικτικών Αλγορίθμων.....	38
3.1	Εισαγωγή.....	38
3.2	Παρουσίαση Σύγχρονων Αλγορίθμων.....	38
3.2.1	Καταναμημένος Γενετικός Αλγόριθμος.....	38
3.2.2	Γενετικός Αλγόριθμος με Χρήση Tabu Αναζήτησης.....	39
3.2.3	Γενετικός Αλγόριθμος με Χρήση Ακέραιας Κωδικοποίησης.....	39

3.2.4	Γενετικός Αλγόριθμος Μεταβλητού Σημείου.....	40
3.2.5	Γενετικός Αλγόριθμος Ντετερμινιστικού Τελεστή Επιλογής Γονέων.....	40
3.2.6	Γενετικός Αλγόριθμος με Χρήση Χαστικής Αναζήτησης.....	40
3.2.7	Διεπίπεδος Εξελικτικός Αλγόριθμος.....	41
3.3	Σχολιασμός.....	43
4	Προτεινόμενη Μέθοδος Βελτιστοποίησης Προγράμματος Λειτουργίας Ηλεκτροπαραγωγικών Μονάδων.....	44
4.1	Εισαγωγή.....	44
4.2	Στόχος της Βελτιστοποίησης και Δεδομένα του Προβλήματος.....	44
4.3	Περιγραφή της Μεθόδου.....	45
4.3.1	Επιλογή των Αποδεκτών Ωριαίων Σεναρίων Λειτουργίας	47
4.3.2	Βέλτιστη Ανάθεση Φορτίου (Economic Load Dispatch Problem)	50
4.3.3	Εξελικτικός Αλγόριθμος Ακέραιας Κωδικοποίησης.....	52
4.3.3.1	Αρχικοποίηση.....	52
4.3.3.2	Χρονικά Κατατεμημένη Βελτιστοποίηση.....	53
4.3.3.3	Τερματισμός.....	53
4.3.3.4	Γεννήτρια Τυχαίων Αριθμών.....	54
4.3.3.5	Πιθανότητα της Μετάλλαξης.....	54
4.3.4	Αξιολόγηση Υποψήφιας Λύσης.....	55
4.3.5	Επιδιόρθωση της Τελικής Λύσης.....	59
4.4	Παραδείγματα.....	60
4.4.1	Παράδειγμα 1 ^ο	60
4.4.2	Παράδειγμα 2 ^ο	63
5	Πιστοποίηση της Προτεινόμενης Μεθόδου - Εφαρμογές.....	69
5.1	Εισαγωγή.....	69
5.2	Εφαρμογή 1 ^η : Πέντε Μονάδες – Προγραμματισμός 3ημέρου.....	69
5.2.1	Περιγραφή του Συστήματος.....	69
5.2.2	Βελτιστοποίηση – Περίπτωση Α : χωρίς απαίτηση στρεφόμενης εφεδρείας.....	76
5.2.3	Βελτιστοποίηση – Περίπτωση Β : η απαίτηση για στρεφόμενη εφεδρεία ισούται με το 10% της ωριαίας ζήτησης.....	84
5.3	Εφαρμογή 2 ^η : Έξι Μονάδες – Προγραμματισμός 7ημέρου.....	91
5.3.1	Περιγραφή του Συστήματος.....	91
5.3.2	Βελτιστοποίηση – Περίπτωση Α : δεν λαμβάνονται υπόψη οι χρονικοί περιορισμοί των μονάδων.....	94
5.3.3	Βελτιστοποίηση – Περίπτωση Β : οι μονάδες υπόκεινται σε χρονικούς περιορισμούς.....	97
6	Ανακεφαλαίωση, Συμπεράσματα, Προτάσεις Βελτίωσης του Αλγορίθμου...105	
7	Βιβλιογραφία108	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΟΡΙΣΜΟΙ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

1.1 Εισαγωγή

Η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί κορυφαίο πολιτικό και οικονομικό θέμα σε παγκόσμιο επίπεδο ύστερα και από την αλματώδη άνοδο των διεθνών τιμών των ενεργειακών πρώτων υλών. Ταυτόχρονα οι διαρκώς αυξανόμενες καταναλωτικές ανάγκες έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ζήτησης ενέργειας στη βιομηχανία, στις μεταφορές, στον οικιακό, εμπορικό, δευτερογενή και τριτογενή τομέα. Τα κυριότερα προβλήματα που προκύπτουν από τα υψηλά ποσοστά κατανάλωσης ενέργειας είναι δύο και συνδέονται άμεσα μεταξύ τους. Το πρώτο είναι το μεγάλο κόστος παραγωγής ενέργειας και το δεύτερο οι εκπομπές ρυπογόνων αερίων που προκαλούν την ατμοσφαιρική ρύπανση και μακροπρόθεσμα τις κλιματικές αλλαγές.

Ως βασική μέθοδος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παραμένει μέχρι σήμερα η καύση γαιανθράκων και υδρογονανθράκων[54,56.58]. Η χρήση των παραπάνω καυσίμων είναι υπεύθυνη για τα περισσότερα περιβαλλοντικά προβλήματα του πλανήτη, όπως είναι για παράδειγμα το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο προκαλείται από την αυξημένη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, αέριο που παράγεται από την καύση άνθρακα, μαζούτ ή λιγνίτη. Επιπλέον, οι γαιάνθρακες είναι καύσιμα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν οικονομικά μόνο σε περιοχές που διαθέτουν κοιτάσματα στο υπέδαφός τους ενώ οι υγροί υδρογονάνθρακες, όπως το αργό πετρέλαιο, η βενζίνη κ.λ.π., παρουσιάζουν μεγάλο κόστος αγοράς, γεγονός που οφείλεται σε γεωπολιτικούς παράγοντες, καθώς και στη διαπίστωση ότι τα αποθέματά τους συνεχώς εξαντλούνται.

Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί έμφαση στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) [55,63-65]. Έτσι βλέπουμε να δημιουργούνται αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα, υδροηλεκτρικά έργα, ενώ παράλληλα αναπτύσσονται τεχνικές αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας αλλά και της βιομάζας. Οι ΑΠΕ δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον πράγμα που είναι και το μεγάλο πλεονέκτημά τους. Στα αρνητικά τους όμως συγκαταλέγονται ο χαμηλός βαθμός απόδοσης τους, η εξάρτησή τους από τις μετεωρολογικές συνθήκες και την τοποθεσία εγκατάστασης, το ιδιαίτερα υψηλό κόστος κτήσης και η χρονικά μεταβαλλόμενη διαθεσιμότητα τους.

Οι κυβερνήσεις λοιπόν πολλών κρατών έχουν επιδοθεί σε μια πρωτόγνωρη προσπάθεια ελέγχου και ανάπτυξης νέων ενεργειακών πηγών, ενώ παράλληλα καταβάλλουν συνεχείς προσπάθειες για μείωση της εξάρτησης των χωρών τους από τις εισαγωγές ενέργειας. Για την Ευρωπαϊκή Ένωση η εξασφάλιση της σταθερότητας εφοδιασμού της με ενέργεια, η μεγαλύτερη αυτάρκεια και η υιοθέτηση εξειδικευμένων πολιτικών μείωσης της σπατάλης ενέργειας βρίσκονται στην κορυφή των θεμάτων που καλείται να λύσει η Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Στην Πράσινη Βίβλο της

Επιτροπής [67] προτείνονται μέσα για τη βελτίωση τόσο των νέων όσο και των υφισταμένων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, καθώς και για τη μείωση των απωλειών στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής. Έτσι, στην Ευρωπαϊκή Ένωση μόνο, υπολογίζεται ότι θα χρειασθούν σχεδόν 1 τρισ. ευρώ για εκσυγχρονισμό των «γερασμένων» μονάδων και κατασκευή νέων, μαζί με τις δαπάνες αναβάθμισης των δικτύων μεταφοράς και διανομής. Οι γιγαντιαίες επενδύσεις αναμένεται να ανεβάσουν αισθητά τους δείκτες ενεργειακών αποδόσεων και να συντελέσουν στην αποτελεσματικότερη προστασία του περιβάλλοντος[1].

Εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί και μέσω εξορθολογισμού του ενεργειακού κόστους, μειώνοντας δηλαδή την ενεργειακή σπατάλη. Τέτοιες προσπάθειες γίνονται τόσο από τις μεγάλες ενεργοβόρες βιομηχανίες, τις επιχειρήσεις διαρκών καταναλωτικών αγαθών, τις επιχειρήσεις με μεγάλα ιδιόκτητα ακίνητα όσο και από τους οικιακούς καταναλωτές. Ωστόσο, και σε αυτήν την περίπτωση, δεν αρκεί απλά να ευαισθητοποιηθεί η κοινή γνώμη αλλά αντίθετα απαιτούνται μεγάλες επενδύσεις.

Η διπλωματική αυτή εργασία επικεντρώνεται σε έναν άλλο τρόπο για να μειωθεί το κόστος παραγωγής ενέργειας, ο οποίος δεν απαιτεί κάποια ιδιαίτερη επένδυση ενώ είναι άμεσα εφαρμόσιμος. Είναι γνωστό ότι η αιτούμενη από ένα δίκτυο ηλεκτρική ισχύς παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση μεταξύ των ωρών αιχμής και μη-αιχμής, επειδή η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας τις καθημερινές είναι υψηλότερη σε σχέση με αυτή του Σαββατοκύριακου ενώ το ίδιο ισχύει και για τις ώρες κατά τη διάρκεια τις μέρας σε σχέση με τις βραδινές. Το πρόβλημα λοιπόν που αντιμετωπίζει ο διαχειριστής του συστήματος είναι να καθορίσει ποιές μονάδες θα είναι ανοιχτές και για πόσο διάστημα ώστε να καλυφθεί η χρονοσειρά ζήτησης που έχει προβλεφθεί για κάθε ώρα του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού. Οι μονάδες αυτές στην πλειονότητα των διασυνδεδεμένων δικτύων είναι αεριοστροβιλικές, ατμοηλεκτρικές ή συνδυασμένου κύκλου [53,56-58].

Αρκετές στρατηγικές λειτουργίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να καλυφθεί η απαιτούμενη ζήτηση ενέργειας, η οποία αλλάζει από ώρα σε ώρα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί μια βέλτιστη ή ‘περίπου βέλτιστη’ στρατηγική η οποία βασίζεται σε οικονομικά κριτήρια. Με άλλα λόγια, αναζητείται το **πρόγραμμα λειτουργίας ενός θερμικού σταθμού** που ικανοποιεί τη ζήτηση ισχύος για συγκεκριμένο ορίζοντα προγραμματισμού με το **ελάχιστο κόστος** μέσω της ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης του καυσίμου. Η μέθοδος της βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται είναι οι **Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms, EA)** [42,59-62]. Στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθεί το πρόβλημα της βελτιστοποίησης και θα γίνει συνοπτική παρουσίαση των μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί για την επίλυσή του.

1.2 Διατύπωση του Προβλήματος

Ως δεδομένα του προβλήματος έχουμε ένα συγκεκριμένο αριθμό μονάδων (K) που συνθέτουν έναν ή περισσότερους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά των μονάδων είναι δεδομένα από τους κατασκευαστές τους (μέγιστη και ελάχιστη δυναμικότητα παραγωγής ενέργειας, ελάχιστοι χρόνοι εκκίνησης/σβέσης και τα σχετικά κόστη, κατανάλωση καυσίμου κ.λ.π.). Με τις υπάρχουσες αυτές μονάδες στόχος είναι να προσδιοριστεί το βέλτιστο πρόγραμμα διαχείρισης τους ώστε να καλυφθεί η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια που προκύπτει μέσα σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο (T ώρες) με τον οικονομικότερο τρόπο. Η διπλωματική αυτή εργασία επικεντρώνει το ενδιαφέρον της σε προβλήματα βελτιστοποίησης προγράμματος λειτουργίας για χρονικό ορίζοντα της τάξης της εβδομάδας· αυτό το διάστημα, εδώ, χαρακτηρίζει την προτεινόμενη μέθοδο ως βελτιστοποίηση βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού. Για συντομία οι μονάδες θα αναφέρονται με το γράμμα u_i , ο δείκτης $i \in [1, K]$ θα δηλώνει την i -οστή μονάδα ενώ ο δείκτης $j \in [1, T]$ την ώρα του χρονικού ορίζοντα (το ελάχιστο χρονικό διάστημα ανάλυσης είναι η μία ώρα).

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι ένα πολυπαραμετρικό πρόβλημα το οποίο χωρίζεται σε δύο διακριτά μέρη.

- Το πρώτο μέρος αφορά τη βέλτιστη ένταξη μονάδων στην παραγωγή και είναι γνωστό ως **Unit Commitment (UC)**. Σε αυτό το στάδιο καθορίζεται για κάθε ώρα ποιες μονάδες θα λειτουργούν, ποιες θα βρίσκονται σε κράτηση και ποιες, και τότε, θα πραγματοποιούν εκκινήσεις και σβέσεις.
- Στο δεύτερο μέρος υπολογίζεται η βέλτιστη ανάθεση φορτίου για κάθε μονάδα που, στο προηγούμενο μέρος, αποφασίστηκε να βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας και για κάθε ώρα (**Economic Load Dispatch, ELD**). Είναι προφανές ότι πρώτα πρέπει να έχει αποφασιστεί ποιες μονάδες θα είναι ανοιχτές την κάθε ώρα και έπειτα να υπολογιστεί το φορτίο της κάθε μίας ξεχωριστά ανάλογα και με τη ζήτηση που πρέπει να καλυφθεί.

1.2.1 Βασικές Μεταβλητές

Οι βασικές μεταβλητές, (οι άγνωστοι, δηλαδή, του προβλήματος βελτιστοποίησης), είναι οι καταστάσεις s (state) και η ισχύς P (power) των μονάδων για κάθε ώρα. Η μεταβλητή s λαμβάνει τις τιμές 0 και 1, όπου η κατάσταση 1 δηλώνει ότι η μονάδα παράγει ενέργεια (κατάσταση ON) ενώ η κατάσταση 0 δηλώνει ότι η μονάδα είτε είναι κλειστή (OFF) είτε ότι βρίσκεται σε μεταβατική φάση, (διαδικασία έναυσης ή σβέσης), αδυνατώντας και σε αυτή την περίπτωση να παράξει εκμεταλλεύσιμο έργο. Πιο αναλυτικά :

- Κατάσταση κανονικής λειτουργίας (ON) : Όταν μία μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας παράγει ενέργεια μεταξύ του τεχνικού της ελαχίστου (P_{\min}) και του τεχνικού της μεγίστου (P_{\max}). Σε αυτήν την περίπτωση και μόνο η μονάδα συνεισφέρει στην κάλυψη της ζήτησης. Άρα, αν $s = 1$ τότε $P \in [P_{\min}, P_{\max}]$ (για κάθε μονάδα, παραλείπεται ο δείκτης της μονάδας).

- **Κατάσταση κράτησης (OFF)** : Όταν μία μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση κράτησης δεν παράγει καθόλου ενέργεια και επομένως η τιμή της ισχύος είναι εξ ορισμού μηδενική. Άρα, αν για μία μονάδα $s = 0$ τότε και $P = 0$.
- **Κατάσταση Έναυσης (STUP – Start Up)** : Όταν μία μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση έναυσης παράγει μία τιμή ισχύος, η οποία είναι μικρότερη από το τεχνικό ελάχιστο της μονάδας. Η κατάσταση αυτή είναι υποχρεωτική μεταβατική κατάσταση και η μονάδα θεωρείται, στο μοντέλο μας, ότι δεν συνεισφέρει στην κάλυψη της ζήτησης του συστήματος, επομένως δεν υπολογίζεται. Ισχύει πάλι ότι $s = 0$ και $P = 0$.
- **Κατάσταση Σβέσης (SHDN- Shut Down)** : Όταν μία μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση σβέσης, όπως και στην περίπτωση της έναυσης, παράγει ισχύ μικρότερη από το τεχνικό της ελάχιστο και θεωρείται ότι δεν συνεισφέρει στην κάλυψη της ζήτησης του συστήματος. Και η κατάσταση αυτή είναι υποχρεωτική μεταβατική κατάσταση των μονάδων που μεσολαβεί ανάμεσα στις καταστάσεις κανονικής λειτουργίας (ON) και κράτησης (OFF). Τέλος και πάλι ισχύει ότι $s = 0$ και $P = 0$.

Σκοπός λοιπόν της βελτιστοποίησης είναι τελικά να καθορίσει τις δύο αυτές μεταβλητές για κάθε μονάδα σε κάθε ώρα του ορίζοντα προγραμματισμού της παραγωγής. Η βέλτιστη λύση προκύπτει από την ελαχιστοποίηση μίας συνάρτησης κόστους η οποία αποτυπώνει το κόστος παραγωγής της ενέργειας.

1.2.2 Συνάρτηση Κόστους

Για την επίλυση κάθε προβλήματος το πρώτο βήμα είναι να επιλεγεί η κατάλληλη **συνάρτηση κόστους (cost function)** ή αλλιώς **συνάρτηση-στόχος**. Όσον αφορά στη λειτουργία ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος μπορούμε, εύλογα, να θεωρήσουμε τρεις βασικούς στόχους :

1. Την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής (καύσιμα, συντήρηση, κόστη εκκίνησης κτλ.)
2. Την ελαχιστοποίηση των εκπομπών (σωματιδίων, αερίων ρύπων) από τις θερμικές μονάδες παραγωγής ενέργειας
3. Τη μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας

Ο τρίτος στόχος συχνά χρησιμοποιείται ως περιορισμός περισσότερο παρά ως κύριος στόχος, επιδιώκεται δηλαδή να παραμείνει η αξιοπιστία και η ασφάλεια πάνω από ένα ορισμένο ελάχιστο επίπεδο. Ο δεύτερος στόχος μπορεί να θεωρηθεί είτε ως περιορισμός είτε ως συνάρτηση κόστους. Συνεπώς, ο κύριος στόχος για τον προγραμματισμό λειτουργίας των μονάδων είναι να ελαχιστοποιηθεί το κόστος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ ικανοποιεί τη ζήτηση του δικτύου. Εάν οι εκπομπές θεωρηθούν επίσης ως στόχος, τότε το πρόβλημα της βελτιστοποίησης είναι δικριτηριακό και ως αποτέλεσμα προκύπτει ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων (στη λογική του μετώπου Pareto¹), και η επιλογή της λύσης που τελικά θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τον χειριστή του συστήματος [3].

¹Το μέτωπο Pareto, προς τιμή του Vilfredo Pareto ιταλού οικονομολόγου, απεικονίζει τις βέλτιστες λύσεις ενός πολυκριτηριακού προβλήματος. Μετακινούμενοι στην επιφάνεια του μετώπου, δεν είναι δυνατή η βελτίωση ενός κριτηρίου χωρίς την επιδείνωση ενός τουλάχιστον άλλου. Οι βέλτιστες αυτές λύσεις καλούνται μη κυριαρχούμενες (non-dominated)[2].

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιδιώκεται η εύρεση του οικονομικότερου προγράμματος λειτουργίας ενός σταθμού και επομένως τη συνάρτηση κόστους αποτελεί το ολικό κόστος λειτουργίας του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής (**Total Operating Cost - TOC**). Στο **TOC** αθροίζονται τα λειτουργικά κόστη (**OC**) για το σύνολο των K μονάδων για το χρονικό διάστημα των T ωρών ενώ προστίθεται και ένας επιπλέον όρος ποινής V , (σχέση 1.1). Σκοπός του όρου της ποινής είναι να αυξήσει το κόστος μίας λύσης όταν παραβιάζεται κάποιος από τους περιορισμούς του συστήματος. Περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται στην ενότητα 1.2.3.

$$TOC = \sum_{j=1}^T \left(\sum_{i=1}^K OC_{i,j} + V_j \right) \quad (1.1)$$

Το λειτουργικό κόστος **OC** εκφράζεται είτε σε ενέργεια καταναλισκόμενου καυσίμου (σε MWh_f, f = fuel) είτε σε χρηματική αξία.

Το λειτουργικό κόστος έχει δύο συνιστώσες :

- Κόστος λόγω της κατανάλωσης του καυσίμου (**Fuel Cost, FC**) όταν μία μονάδα είναι σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας και μόνο (Κατάσταση ON, s=1). Η κατανάλωση του καυσίμου αποδίδεται πολύ συχνά μέσω πολυωνύμων δευτέρου βαθμού ως προς την αποδιδόμενη ισχύ P [3,4,5,6,7]. Στον αλγόριθμο της διδακτορικής διατριβής [52] και της διπλωματικής εργασίας [68] η χρήση πολυωνύμων δευτέρου βαθμού είναι μάλιστα υποχρεωτική λόγω της μεθόδου επίλυσης του προβλήματος της βέλτιστης ανάθεσης φορτίου (χρησιμοποιείται η μέθοδος χαλάρωσης Lagrange). Ενώ και στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιούνται πολυώνυμα δευτέρου βαθμού, πλεονέκτημα του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι ότι μπορεί εύκολα να υποστηρίξει οποιαδήποτε άλλη μαθηματική έκφραση. Ο μαθηματικός τύπος είναι :

$$FC_{i,j} = a_i (P_{i,j})^2 + b_i P_{i,j} + c_i \quad (1.2)$$

Οι συντελεστές του πολυωνύμου a , b , c υπολογίζονται από στοιχεία που παρέχονται από τον κατασκευαστή της μονάδας.

- Κόστος που αντιστοιχεί σε εκκίνηση (**C_{STUP}**) ή σβέση (**C_{SHDN}**) της μονάδας. Τα κόστη αυτά θεωρούνται σταθερά και υπολογίζονται είτε από στοιχεία του κατασκευαστή είτε από παρελθοντικά δεδομένα και χρεώνονται μόνο όταν γίνεται η μετάβαση από κατάσταση λειτουργίας σε σβέση ή το αντίστροφο. Συγκεκριμένα το κόστος εκκίνησης προστίθεται στο ωριαίο κόστος λειτουργίας της 1^{ης} ώρας μετά την ολοκλήρωση της εκκίνησης (STUP) όταν η μονάδα είναι πλέον σε κατάσταση ON (ενώ, δηλαδή, s=1) ενώ το κόστος σβέσης προστίθεται την 1^η ώρα μετά την έναρξη της σβέσης (SHDN) (ενώ, δηλαδή, s=0).

Στο λειτουργικό κόστος θα μπορούσαν να προστεθούν και κάποιες άλλες παράμετροι όπως το κόστος συντήρησης ή η απόσβεση [3,8]. Κάτι τέτοιο θα ήταν αρκετά εύκολο γιατί δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός ως προς την μορφή τους και δεν χρειάζονται ιδιαίτερες τροποποιήσεις στη μεθοδολογία (δεν απαιτείται δηλαδή συγκεκριμένη συνάρτηση ούτε αυτή να είναι συνεχής και παραγωγίσιμη).

1.2.3 Περιορισμοί

Κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης που αφορά στην ένταξη μονάδων στην παραγωγή πρέπει να παράγει ένα πρόγραμμα λειτουργίας το οποίο να ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα. Με άλλα λόγια, οι λύσεις του προβλήματος πρέπει να είναι εφαρμόσιμες, λαμβάνοντας υπόψη ένα μεγάλο αριθμό πρακτικών ζητημάτων, να υπακούουν ή να ικανοποιούν δηλαδή ορισμένους περιορισμούς. Οι περιορισμοί αυτοί κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, τους λειτουργικούς περιορισμούς και τους περιορισμούς που επιβάλλονται από το διαχειριστή του συστήματος και έχουν άμεση σχέση με τη ζήτηση.

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Οι κύριοι λειτουργικοί περιορισμοί αφορούν :

1. Το εύρος παραγωγής ενέργειας των μονάδων (unit generation capability limits)
2. Τους ελάχιστους χρόνους έναυσης, σβέσης και παραμονής σε κράτηση ή λειτουργία (minimum up-time, down-time, ramp time)
3. Τις αρχικές καταστάσεις κάθε μονάδας (initial states) στο $T=0$

Εύρος παραγωγής ενέργειας των μονάδων

Η ενεργειακή παραγωγή κάθε μονάδας που βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας (ON) περιορίζεται από ένα ελάχιστο (P_{\min}) και ένα μέγιστο όριο (P_{\max}) το οποίο καθορίζεται από τον κατασκευαστή. Ισχύει ότι :

$$P_{\min,i} \leq P_{i,j} \leq P_{\max,i} \quad , \forall i \in [1, K], \forall j \in [1, T] \quad (1.3)$$

Ελάχιστοι χρόνοι έναυσης, σβέσης και παραμονής σε κράτηση

Οι καταστάσεις έναυσης και σβέσης, όπως ήδη αναφέρθηκε είναι μεταβατικές καταστάσεις μεταξύ των καταστάσεων κράτησης και κανονικής λειτουργίας ή αντίστροφα. Ανάμεσα στους τεχνικούς περιορισμούς που συνοδεύουν τη λειτουργία των μονάδων παραγωγής ενέργειας είναι και οι ελάχιστοι χρόνοι έναυσης (T_{STUP}) και σβέσης (T_{SHDN}). Είναι αναμενόμενο ότι μία μονάδα που βρίσκεται σε κράτηση χρειάζεται κάποιο χρόνο για να βρεθεί σε θέση να παράγει ξανά το τεχνικό της ελάχιστο (χρόνος για να επιτευχθούν οι απαραίτητες θερμοκρασίες λειτουργίας, να υπερνικηθούν οι αδράνειες κ.λ.π.). Αντίστοιχα, όταν μία μονάδα λειτουργεί κανονικά χρειάζεται κάποιος χρόνος μέχρι να τεθεί σε κατάσταση κράτησης (χρόνος για να επενεργήσει η πέδηση, να γίνει απόρριψη φορτίου κ.λ.π.). Ένας επιπλέον περιορισμός στη λειτουργία των μονάδων είναι ο ελάχιστος χρόνος που μπορεί η μονάδα να παραμείνει σε κατάσταση OFF ($T_{\text{RAMP_OFF}}$) και σε κατάσταση ON ($T_{\text{RAMP_ON}}$).

Αρχικές καταστάσεις μονάδων

Το προτεινόμενο σενάριο λειτουργίας μιας μονάδας u_i οφείλει να σέβεται την αρχική κατάσταση λειτουργίας της, που προηγείται της χρονικής περιόδου έναρξης της βελτιστοποίησης και η οποία ασφαλώς θεωρείται γνωστή.

Λοιποί περιορισμοί

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται και κάποιοι ακόμα τεχνικοί περιορισμοί οι οποίοι, εδώ, δεν λαμβάνονται υπόψη [9,10,11]:

- Περιορισμός για το χρονικό ρυθμό αύξησης ή μείωσης του φορτίου μιας μονάδας (ramp rate).
- Περιορισμός που σχετίζεται με το μέγιστο αριθμό των μονάδων που μπορούν να εκκινήσουν ταυτόχρονα και εξαρτάται από το διαθέσιμο προσωπικό του σταθμού (crew constraint).
- Αναγκαστική λειτουργία κάποιας μονάδας (must run unit), για λόγους αξιοπιστίας ή σε περίπτωση ατμοπαραγωγού όταν απαιτείται παροχή ατμού για χρήση πέρα από την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Στην παρουσιαζόμενη μέθοδο, η προσθήκη οποιουδήποτε από τους παραπάνω περιορισμούς γίνεται, πραγματικά, πολύ εύκολα.

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Οι κύριοι περιορισμοί που επιβάλλονται από το διαχειριστή του συστήματος αφορούν :

1. Την κάλυψη της ζήτησης.
2. Τη στρεφόμενη ή θερμή εφεδρεία (spinning reserve).

Κάλυψη της ζήτησης

Ο βασικότερος περιορισμός που επιβάλλεται από το διαχειριστή του συστήματος είναι η κάλυψη της ζήτησης από όσες μονάδες βρίσκονται σε λειτουργία κάθε ώρα. Αν η ζήτηση κατά την ώρα j συμβολιστεί με το γράμμα d_j τότε προκύπτει η ισότητα - περιορισμός :

$$d_j = \sum_{i=1}^K P_{i,j} , \forall j \in [1, T] \quad (1.4)$$

Σε περίπτωση που μία υποψήφια λύση παράγει ενέργεια μικρότερη της ζήτησης τότε επιβάλλεται ένας όρος ποινής V_j , όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 1.2.2, ο οποίος είναι ανάλογος της παραβίασης της ζήτησης. Σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα ο όρος αυτός ισούται με το κόστος αγοράς ρεύματος από κάποιον άλλο παραγωγό. Αντίθετα, σε ένα απομονωμένο σύστημα, όπου η αδυναμία κάλυψης της ζήτησης θα οδηγούσε σε black-out, ο όρος αυτός λαμβάνει τεχνητά μία αρκετά μεγάλη τιμή.

Επιπρόσθετα, προβλέπεται (χωρίς, βέβαια, ανάλογα με το μοντέλο προσομοίωσης, να είναι απαραίτητο) επιβολή ποινής και σε περίπτωση υπερπαραγωγής, όταν δηλαδή η ζήτηση είναι μικρότερη από το άθροισμα των τεχνικών ελαχίστων όλων των εν λειτουργία μονάδων.

Στρεφόμενη εφεδρεία (spinning reserve)

Ως στρεφόμενη ή θερμή εφεδρεία ορίζεται η αχρησιμοποίητη δυναμικότητα των μονάδων που είναι συγχρονισμένες με το δίκτυο, η οποία μπορεί να ενεργοποιηθεί άμεσα με απόφαση του διαχειριστή του δικτύου [12,13]. Εφεδρεία λοιπόν μπορεί να εξασφαλιστεί είτε από μονάδες αιχμής που βρίσκονται σε κατάσταση κράτησης είτε από μονάδες βάσης που αποδίδουν ισχύ μικρότερη του δυναμικού τους μεγίστου, και επομένως μπορούν να αυξήσουν την παραγωγή τους (σύνολο διαθέσιμων (**Available**, **Av**) μονάδων). Η στρεφόμενη εφεδρεία κρίνεται απαραίτητη για λόγους ασφάλειας, αξιοπιστίας και ποιότητας της ισχύος. Συγκεκριμένα, είναι απαραίτητη καθώς μπορεί να υπάρξει απρόβλεπτη αύξηση της ζήτησης ή ξαφνική βλάβη σε κάποια από τις ΟΝ μονάδες. Σε περιπτώσεις μάλιστα που στην παράγωγη συμμετέχουν και μονάδες ηλιακής ή αιολικής ενέργειας η ανάγκη για στρεφόμενη εφεδρεία γίνεται ακόμη μεγαλύτερη. Η πρακτική που χρησιμοποιείται είναι να ζητείται από το σύστημα να είναι σε θέση να καλύψει τη ζήτηση προσαυξημένη κατά ένα ποσοστό Sr , το οποίο συνήθως κυμαίνεται μεταξύ του 10-20%. Η μαθηματική διατύπωση του περιορισμού παρατίθεται παρακάτω :

$$(1 + Sr) \cdot d_j \leq \sum_{i=1}^{Av} P_{\max i, j}, \forall j \in [1, T] \quad (1.5)$$

όπου Av ο αριθμός των διαθέσιμων μονάδων.

Σε περίπτωση μη ικανοποίησης του παραπάνω περιορισμού επιβάλλεται ποινή μέσω ενός συντελεστή ποινής V_j (**Spinning Reserve Penalty Coefficient, SRPC**) σύμφωνα με τη σχέση (1.6) :

$$V_j = SRPC \cdot \sum_{j=1}^K (1 + Sr) \cdot d_j - \sum_{i=1}^{Av} P_{\max i, j} \quad (1.6)$$

Η τιμή του συντελεστή επιλέγεται από το χρήστη σύμφωνα με το επίπεδο ασφάλειας που θέλει να διατηρήσει.

Εκπομπές αέριων ρύπων

Ένας τελευταίος περιορισμός αφορά στις εκπομπές των αέριων ρύπων. Αν και δεν συμπεριλαμβάνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, εντούτοις λόγω των υφιστάμενων περιβαλλοντικών προβλημάτων ένας τέτοιος περιορισμός είναι πλέον σημαντικός για τον προγραμματισμό λειτουργίας θερμικών σταθμών. Όπως και στα προηγούμενα, σε περίπτωση παραβίασης των ορίων εκπομπής κάποιων αέριων ρύπων θα έπρεπε να επιβάλλεται ποινή στη συνάρτηση κόστους της υποψήφιας λύσης.

1.2.4 Παράδειγμα

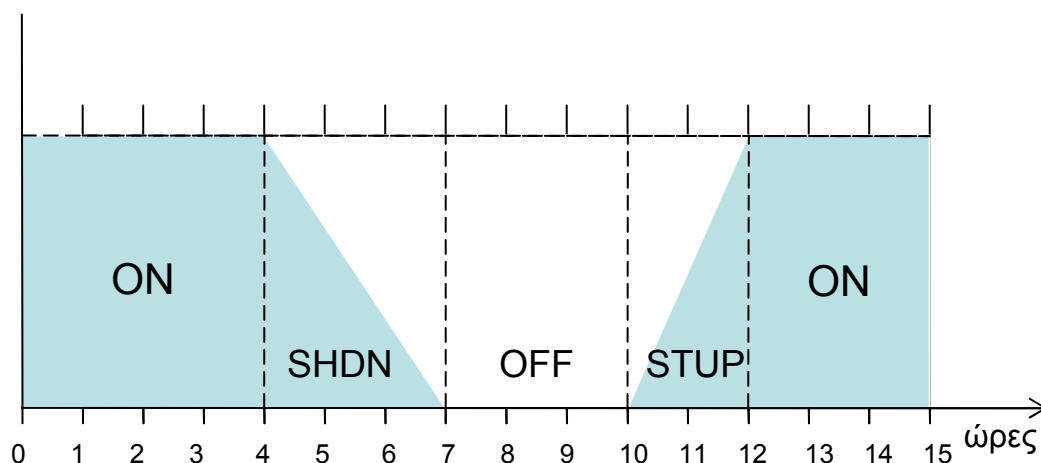
Παρακάτω παρατίθεται ένα σύντομο παράδειγμα για το πως επιδρούν οι λειτουργικοί περιορισμοί στον προγραμματισμό μίας μονάδας. Τονίζεται εδώ ότι το παρακάτω παράδειγμα στοχεύει μόνο στο να γίνει περισσότερο κατανοητός στον αναγνώστη ο τρόπος που γίνεται η χρέωση, δεν αποτελεί δηλαδή πρόβλημα βελτιστοποίησης. Επιπλέον όταν στη συνέχεια αναφερόμαστε σε μία ώρα εννοούμε το διάστημα μεταξύ της δεδομένης ώρας και της προηγούμενης.

Έστω μία μονάδα με τα εξής χαρακτηριστικά :

- χρόνος έναυσης (T_{STUP}) 3h,
- χρόνος σβέσης (T_{SHDN}) 2h
- ελάχιστη παραμονή σε κατάσταση OFF (T_{RAMP_OFF}) 2h.
- ελάχιστη παραμονή σε κατάσταση ON (T_{RAMP_ON}) 1h

Η μονάδα, που αρχικά είναι ανοιχτή μέχρι τη 4^η, ώρα σβήνει και, έπειτα, είναι πάλι ανοιχτή από την 12^η ώρα μέχρι το τέλος του χρονικού ορίζοντα. Στο σχήμα (1.1) παρουσιάζεται η κατάσταση της μονάδας u_i . Σε αυτή τη περίπτωση ο χρόνος που η μονάδα βρίσκεται σε κράτηση είναι 4 ώρες οπότε ικανοποιείται και ο περιορισμός της ελάχιστης παραμονής σε κλειστή κατάσταση που είναι οι 2 ώρες. Στον πίνακα (Π1.1) παρουσιάζονται επιπλέον οι τιμές της μεταβλητής s (state), καθώς και το είδος της χρέωσης για την κάθε ώρα (FC , κατανάλωση καυσίμου, C_{STUP} κόστος έναυσης, C_{SHDN} κόστος σβέσης)

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ S



Σχήμα 1.1

Παρουσιάζεται ένα εφικτό σενάριο λειτουργίας μονάδας u_i η οποία υπόκειται στους περιορισμούς T_{STUP} : 3h, T_{SHDN} : 2h, T_{RAMP_OFF} : 2h, T_{RAMP_ON} : 1h. Στον πίνακα Π1.1 φαίνεται και ο τρόπος χρέωσης για την κάθε ώρα.

h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
s	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
FC	√	√	√	√	—	—	—	—	—	—	—	√	√	√	√
Cshdn	—	—	—	—	√	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cstup	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	√	—	—	—

Πίνακας Π1.1

Παρουσιάζονται οι τιμές της μεταβλητής s (state), καθώς και το είδος της χρέωσης για την κάθε ώρα όπως αυτά προκύπτουν από το σχήμα 1.1 (FC: κατανάλωση καυσίμου, C_{STUP} : κόστος έναυσης, C_{SHDN} : κόστος σβέσης). Όταν γίνεται αναφορά σε μία ώρα εννοείται το διάστημα μεταξύ της δεδομένης ώρας και της προηγούμενης.

1.3 Μέθοδοι Βελτιστοποίησης Προγράμματος Λειτουργίας Ηλεκτροπαραγωγικών Μονάδων

Το πρόβλημα της ένταξης μονάδων στην παραγωγή και της ανάθεσης φορτίου σε αυτές ανήκει στην κατηγορία των σύνθετων προβλημάτων βελτιστοποίησης, επειδή συνδυάζει πολλές παραμέτρους που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και υπόκειται σε πολλούς περιορισμούς. Για την επίλυσή του έχουν προταθεί αρκετές προγραμματιστικές τεχνικές οι οποίες σε συνδυασμό με τη ραγδαία αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των ηλεκτρονικών υπολογιστών μπορούν εύκολα να δώσουν βέλτιστη ή ‘σχεδόν βέλτιστη’ λύση στο πρόβλημα. Οι τεχνικές αυτές χωρίζονται σε αιτιοκρατικές και στοχαστικές.

Μια αιτιοκρατική μέθοδος βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί τη γενικευμένη έννοια της παραγώγου της συνάρτησης κόστους την οποία καλείται είτε να υπολογίσει άμεσα είτε να προσεγγίσει. Αυτό σημαίνει ότι δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια σε κάποιο άλλο πρόβλημα καθώς αλλάζοντας τη συνάρτηση κόστους απαιτούνται αλλαγές και στο λογισμικό βελτιστοποίησης. Ο ρυθμός σύγκλισης είναι σχετικά γρήγορος, υπάρχει όμως ο κίνδυνος εγκλωβισμού της λύσης σε τοπικό ακρότατο.

Αντίθετα οι στοχαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης χειρίζονται στοιχεία τυχαίας ή οργανωμένα τυχαίας αναζήτησης της βέλτιστης λύσης. Έχουν αργό ρυθμό σύγκλισης αλλά μπορούν ευκολότερα να εντοπίσουν το καθολικό ακρότατο. Επιπλέον μπορούν να προσαρμοστούν για να επιλυθούν διαφορετικά προβλήματα χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία [14].

Οι μέθοδοι που συναντώνται συχνότερα στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται παρακάτω.

1.3.1 Εξαντλητική Απαρίθμηση (*Exhaustive Enumeration*)

Η μέθοδος αυτή υπολογίζει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των μονάδων και σαν βέλτιστη λύση επιλέγεται αυτή που εμφανίζει το μικρότερο κόστος και ταυτόχρονα καλύπτει τους περιορισμούς. Παρόλο που η λύση που προκύπτει είναι καθολικά βέλτιστη, η μέθοδος αυτή κρίνεται ως ιδιαίτερα αντισυμβατική μιας και ο χρόνος υπολογισμού της λύσης είναι απαγορευτικά μεγάλος.

1.3.2 Κατάταξη Κατά Σειρά Προτεραιότητας (*Priority Listing*)

Αποτελεί την απλούστερη μέθοδο ένταξης μονάδων στην παραγωγή. Αρχικά κατατάσσει τις μονάδες με αύξουσα σειρά κόστους λειτουργίας και, στη συνέχεια, προσθέτει μία-μία τις μονάδες στην παραγωγή έως ότου να καλυφθεί η ζήτηση της κάθε ώρας. Η λύση που προκύπτει δεν είναι βέλτιστη, εξαιτίας και ορισμένων παραδοχών που αφορούν τα κόστη έναυσης και σβέσης, παρά ταύτα χρησιμοποιείται ευρύτατα λόγω της ευκολίας εφαρμογής της και της γενικότερης απλότητας της [15-17].

1.3.3 Μέθοδος Χαλάρωσης Lagrange (Lagrangian Relaxation Method)

Οι τεχνικές που βασίζονται στη χαλάρωση κατά Lagrange αποτελούν ένα σημαντικό και πολύ διάσημο εργαλείο για την επίλυση διακριτών προβλημάτων βελτιστοποίησης [18,19]. Οι περιορισμοί του προβλήματος ενσωματώνονται στη συνάρτηση κόστους ως ποινές πολλαπλασιαζόμενοι με κατάλληλους όρους, τους πολλαπλασιαστές Lagrange. Στη συνέχεια, με κάποια μέθοδο ελαχιστοποίησης, ελαχιστοποιείται η σχέση (1.7). Σε περίπτωση που κάποιος από τους περιορισμούς παραβιάζεται οι πολλαπλασιαστές Lagrange λαμβάνουν μία διαφορετική τιμή και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία, διαφορετικά ο αλγόριθμος τερματίζει. Η συνάρτηση κόστους μπορεί να γραφεί ως :

$$TOC = \sum_{j=1}^T \left(\sum_{i=1}^K OC_{i,j} + V_j \right) + \sum_{j=1}^T \left(\sum_{i=1}^K \lambda_{i,j} CR_{i,j} \right) \quad (1.7)$$

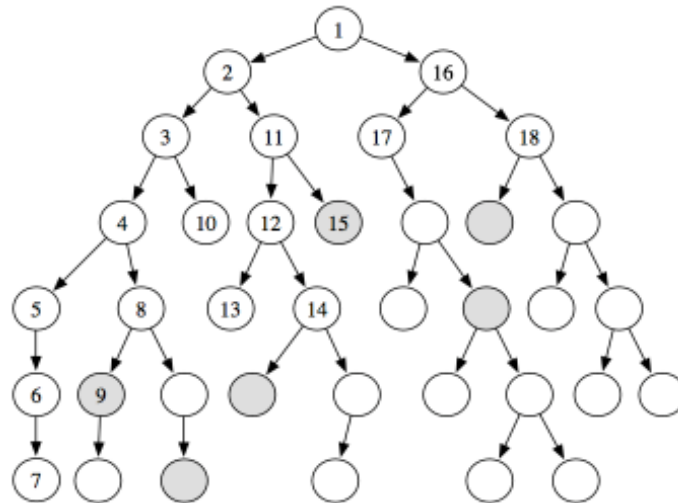
όπου $CR_{i,j}$ οι περιορισμοί και $\lambda_{i,j}$ οι πολλαπλασιαστές Lagrange

1.3.4 Δυναμικός Προγραμματισμός (Dynamic Programming)

Ο δυναμικός προγραμματισμός ήταν από τις πρώτες μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση του βέλτιστου προγράμματος λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων [20-22]. Αρχικά το πρόβλημα αναλύεται σε ωριαία υποπροβλήματα βελτιστοποίησης. Αφού βρεθεί η βέλτιστη λύση μέσω αναδρομικής σχέσης για το υποπρόβλημα που προηγείται χρονικά, στη συνέχεια ο αλγόριθμος προχωρά στην επίλυση του αμέσως επόμενου υποπροβλήματος. Η λύση που προκύπτει δεν είναι η βέλτιστη, όπως και στην περίπτωση της κατάταξης κατά σειρά προτεραιότητας, και επιπλέον, σε συστήματα με πολλές μονάδες η ανάγκη εξέτασης πολλών σεναρίων αυξάνει το υπολογιστικό κόστος.

1.3.5 Διακλάδωση Και Περιορισμός (Branch And Bound)

Οι μέθοδοι διακλάδωσης και περιορισμού (**BnB**) ανήκουν στην κατηγορία του γραμμικού προγραμματισμού και έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία για την εύρεση της βέλτιστης λύσης σε αρκετά προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης [23]. Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός αλγορίθμου της κατηγορίας αυτής είναι η τεχνική διακλάδωσης και η τεχνική περιορισμού.



Σχήμα 1.2

Δενδροδιάγραμμα που αναπαριστά τον τρόπο λειτουργίας της μεθόδου Branch and Bound. Οι γκρι κόμβοι συμβολίζουν τις λύσεις που έχουν αποκλειστεί.

Η τεχνική διακλάδωσης δημιουργεί ένα δέντρο αναζήτησης, οι εσωτερικοί κόμβοι του οποίου αντιπροσωπεύουν υποσύνολα της λύσης του προβλήματος, ενώ τα φύλλα του αντιστοιχούν σε ολοκληρωμένες λύσεις. Η αναζήτηση για τη βέλτιστη λύση του προβλήματος γίνεται από μία τεχνική διάσχισης του δέντρου αναζήτησης, όπως η αναζήτηση πρώτα σε βάθος (depth first search, DFS) ή η αναζήτηση πρώτα σε πλάτος (breadth first search, BFS). Μόλις η αναζήτηση φτάσει σε ένα φύλλο του δέντρου, μια λύση του προβλήματος έχει βρεθεί και υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τη λύση αυτή. Η τεχνική περιορισμού χρησιμοποιεί την καλύτερη τιμή που έχει βρεθεί, ώστε να αποκόπτει κλάδους του δέντρου που δίνουν σίγουρα μεγαλύτερη τιμή στο αποτέλεσμα. Έτσι, η αναζήτηση δε προσπελάζει αυτά τα μέρη του δέντρου και η όλη διαδικασία γίνεται συντομότερη.

1.3.6 Προσομοιούμενη Ανόπτηση (Simulated Annealing)

Η προσομοιούμενη ανόπτηση (simulated annealing – SA) [24,25] είναι μια μέθοδος τοπικής αναζήτησης, η οποία αξιοποιεί την αναλογία που υπάρχει μεταξύ των προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης και των προβλημάτων της στατιστικής μηχανικής (statistical mechanics). Οι πρώτοι που παρατήρησαν την αναλογία ήταν οι S Kirkpatrick, C Gelatt και M Vecchi [26], οι οποίοι τη χρησιμοποίησαν ως μια μέθοδο για να ξεπεράσουν τον εγκλωβισμό σε τοπικά ελάχιστα

Ανόπτηση στη μεταλλουργία ονομάζεται η θερμική κατεργασία στην οποία υποβάλλεται ένα μέταλλο ή κράμα, που έχει υποστεί κάποια κατεργασία, π.χ. σφυρηλάτηση, προκειμένου στη συνέχεια υποβαλλόμενο σε ψύξη να βελτιωθεί η ευκαμψία του και γίνει λιγότερο εύθρυπτο, (τα σωματίδια του μετάλλου φτάνουν σε μία κατάσταση χαμηλής ενέργειας εξαλείφοντας τις υπολειπόμενες εσωτερικές τάσεις).

Η αναλογία μεταξύ των προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης και των φυσικών συστημάτων υψηλής ενέργειας αναδεικνύεται σε δύο επίπεδα :

- Οι λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης αντιστοιχούν στις καταστάσεις του φυσικού συστήματος.
- Οι τιμές της συνάρτησης κόστους του προβλήματος αντιστοιχούν στην ενέργεια των καταστάσεων του φυσικού συστήματος.

Ο αλγόριθμος ξεκινά από μια λύση και αναζητά άλλες καλύτερες σε μια «γειτονιά» της αρχικής, το μέγεθος της οποίας ορίζεται από το χρήστη. Σε κάθε επανάληψη επιλέγεται τυχαία μια νέα λύση στη περιοχή της προηγούμενης, η οποία αξιολογείται και, αν προκύψει καλύτερη από την προηγούμενη, γίνεται αυτόματα αποδεκτή ενώ αν είναι χειρότερη αυτής γίνεται δεκτή με πιθανότητα η οποία είναι αύξουσα συνάρτηση της θερμοκρασίας και φθίνουσα συνάρτηση της επιδείνωσης στη συνάρτηση κόστους. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται υψηλή εξερεύνηση² στις αρχικές επαναλήψεις όπου η θερμοκρασία είναι υψηλή και ο αλγόριθμος μπορεί να ξεφύγει του εγκλωβισμού σε τοπικά ακρότατα αλλά και εκμετάλλευση³ στα τελικά στάδια όσο η θερμοκρασία μειώνεται και ο αλγόριθμος καταλήγει στην περιοχή της βέλτιστης λύσης.

1.3.7 Ταμπού Αναζήτηση (Tabu Search)

Η ταμπού αναζήτηση (tabu search, **TS**) εισήχθη από το Fred Glover [27-29]. Πρόκειται για μια μέθοδο τοπικής αναζήτησης, η οποία προσπαθεί να ξεπεράσει τον εγκλωβισμό σε τοπικά ελάχιστα της αντικειμενικής συνάρτησης. Η μέθοδος αυτή συνήθως δεν χρησιμοποιείται μεμονωμένα αλλά σε συνδυασμό με κάποιον άλλο στοχαστικό αλγόριθμο, τον οποίον και κατευθύνει. Για αυτό τον λόγο άλλωστε καλείται και μεταευρετικός (metaheuristic) αλγόριθμος⁴.

Ένας τρόπος για την επίτευξη του στόχου αυτού είναι η αλλαγή της τεχνικής ενημέρωσης της λύσης. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους βελτίωσης, σε κάθε βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας της επιτρέπεται η επιλογή μιας λύσης όχι μόνο με μικρότερη, αλλά και με μεγαλύτερη τιμή από αυτή της υπάρχουσας λύσης. Στην ταμπού αναζήτηση, βασική ιδέα είναι ο περιορισμός των κατευθύνσεων αναζήτησης σε κάθε βήμα της επανάληψης, ώστε να επιτευχθεί η εύρεση καλής λύσης με αποδοτικό τρόπο. Η μέθοδος «θυμάται» ποιες λύσεις έχουν ήδη αναζητηθεί, ώστε να αναζητήσει τις περισσότερες υποσχόμενες κατευθύνσεις.

Κάθε στοχαστικός αλγόριθμος πρέπει να έχει στη σωστή αναλογία δύο ικανότητες :

²Ικανότητα εξερεύνησης (exploration), ώστε να εξερευνά με τον καλύτερο, και συγχρόνως οικονομικότερο, τρόπο το χώρο των υποψήφιων λύσεων, χωρίς να εγκλωβίζεται εύκολα σε τοπικά βέλτιστες λύσεις.

³Ικανότητα εκμετάλλευσης (exploitation), ώστε να εκμεταλλεύεται με τον καλύτερο τρόπο κάθε πληροφορία που έχει αποκτήσει μέχρι τώρα και με τη βοήθειά της να προσεγγίσει αποδοτικά τη βέλτιστη λύση

⁴Ευρετικές μέθοδοι (heuristic methods): Ευρετική ονομάζεται κάθε μέθοδος επίλυσης προβλημάτων, στην οποία η πορεία προς ένα τελικό αποδεκτό αποτέλεσμα στηρίζεται σε μια σειρά προσεγγιστικών αποτελεσμάτων. Οι ευρετικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την επιτάχυνση της διαδικασίας της επίλυσης, σε βάρος ενδεχομένως της ακρίβειας, και δίνουν ικανοποιητικές λύσεις σε συνδυαστικά προβλήματα όταν μια εξαντλητική αναζήτηση είναι πρακτικά αδύνατη.

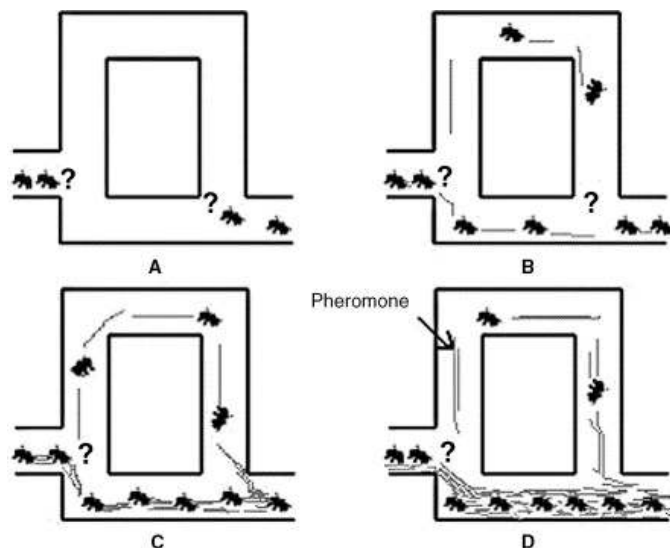
⁵Μεταευρετική (metaheuristic) καλείται μια υπολογιστική μέθοδος βελτιστοποίησης η οποία στην πραγματικότητα δεν γνωρίζει τη φύση του προβλήματος που προσπαθεί να επιλύσει και για το λόγο αυτό μπορεί να προσαρμοστεί σε πολλά και διαφορετικά προβλήματα. Στα θετικά της μεθόδου συγκαταλέγεται το γεγονός ότι δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με μία ευρετική μέθοδο, ενώ στα αρνητικά της ότι χρειάζεται να αξιολογήσει πληθώρα λύσεων, αυξάνοντας τον υπολογιστικό χρόνο. Πολλές μεταευρετικές μέθοδοι εφαρμόζουν κάποια μορφή στοχαστικής βελτιστοποίησης

Τα βασικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα μιας ταμπού αναζήτησης είναι η δομή της γειτονιάς (neighborhood structure), οι κινήσεις (moves), η λίστα ταμπού (tabu list) και το κριτήριο φιλοδοξίας (aspiration criterion) [30]. Μια κίνηση είναι η διαδικασία εύρεσης μιας γειτονικής λύσης δεδομένης μιας υπάρχουσας λύσης. Η λίστα ταμπού περιλαμβάνει ένα σύνολο απαγορευμένων κινήσεων, οι οποίες δεν επιτρέπεται να συμπεριληφθούν στη λύση που αναζητείται. Η λίστα αυτή ενημερώνεται διαρκώς με νέες εισόδους σε αυτήν ή και διαγραφές. Το κριτήριο φιλοδοξίας είναι μια προϋπόθεση, την οποία αν ικανοποιεί μια κίνηση τότε η τελευταία διαγράφεται από τη λίστα ταμπού.

Ο ακριβής τρόπος υλοποίησης του αλγορίθμου TS ποικίλει ανάλογα με το αντιμετωπιζόμενο πρόβλημα και την μέθοδο με την οποία συνδυάζεται. Έχουν προταθεί συνδυασμοί του αλγορίθμου TS με Προσομοιούμενη Ανόπτηση (Faigle & Kern 1989, Kassou 1992, Osman 1993), με Γενετικούς Αλγορίθμους (Norman & Moscato 1991, Glover 1994) και Νευρωνικά Δίκτυα (De Werra & Hertz 1989, Beyer & Ogier 1991).

1.3.8 Βελτιστοποίηση Με Αποικίες Μυρμηγκιών (Ant Systems)

Η μέθοδος αυτή ανήκει στην κατηγορία των αλγορίθμων που εκμεταλλεύονται την *Ευφοΐα Σμήνους (Swarm Intelligence)* [31-33]



Σχήμα 1.3

Στο παραπάνω σκίτσο παρουσιάζεται πως τα πραγματικά μυρμήγκια βρίσκουν το συντομότερο μονοπάτι.(A) Τα μυρμήγκια φτάνουν σε διασταύρωση. (B) Κάποια επιλέγουν την άνω διαδρομή και κάποια την κάτω. (C) Εφόσον τα μυρμήγκια κινούνται με σχεδόν σταθερή ταχύτητα, αυτά που επέλεξαν το συντομότερο δρόμο φτάνουν πιο γρήγορα στον προορισμό τους. (D) Έτσι η φερομόνη συσσωρεύεται με ταχύτερο ρυθμό στην κάτω διαδρομή

Πρόκειται για μεταευρετική τεχνική⁵ στη βελτιστοποίηση συνδυαστικών προβλημάτων και όπως είναι εμφανές από το όνομα της μεθόδου, ανήκει στους πληθυσμιακούς αλγορίθμους καθώς διαχειρίζεται ένα *σμήνος* ατόμων που παρομοιάζονται με κοινωνικά έντομα και συγκεκριμένα μυρμηγκια (βλ. σχήμα 1.3). Ο μηχανισμός βελτιστοποίησης λειτουργεί με τον τρόπο που μια ομάδα μυρμηγκιών αυτό-οργανώνεται κατά την αναζήτηση και συλλογή τροφής, μέσω της «ιχνηθέτησης» των πιο προσοδοφόρων διαδρομών – λύσεων με *φερομόνη*, μια χημική ουσία που εκκρίνεται από κάθε μυρμηγκι και είναι ανιχνεύσιμη από τα υπόλοιπα. Οι ιχνηθετημένες διαδρομές έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να ακολουθηθούν από τις επόμενες γενιές μυρμηγκιών που αναζητούν ακόμα καλύτερες λύσεις.

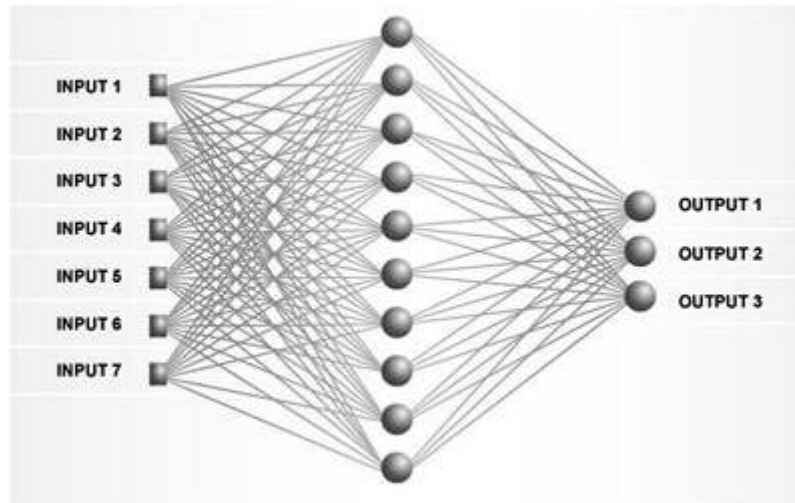
Για να επιτευχθεί η αναλογία μεταξύ ενός προβλήματος συνδυαστικής βελτιστοποίησης και του προβλήματος εντοπισμού τροφής στην αποικία των μυρμηγκιών, χρειάζεται να γίνουν οι εξής αντιστοιχίες:

- Η περιοχή αναζήτησης γύρω από την αποικία των μυρμηγκιών αντιστοιχεί στο σύνολο των εφικτών λύσεων του προβλήματος.
- Η ποσότητα του φαγητού, που ανακαλύπτεται σε κάποια περιοχή, αντιστοιχεί στην τιμή της συνάρτησης κόστους του προβλήματος για την αντίστοιχη λύση.
- Τα μονοπάτια φερομόνης αντιστοιχούν στα στοιχεία μιας δομής δεδομένων που παρέχει ένα είδος προσαρμοσίμης μνήμης στη μέθοδο.
- Τα μυρμηγκια αντιστοιχούν σε συνεργαζόμενους πράκτορες (agents), κάθε ένας από τους οποίους ψάχνει για λύσεις του προβλήματος.

1.3.9 Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks)

Τα Νευρωνικά Δίκτυα μιμούνται, ως προς τη λειτουργία τους, τον εγκέφαλο. Η στοιχειώδης δομική μονάδα του ανθρώπινου εγκεφάλου είναι ο *νευρώνας*, ενώ το πλήθος των νευρώνων είναι της τάξης του 10^{12} , με τον κάθε ένα από αυτούς να αναπτύσσει συνάψεις μέσω των οποίων ανταλλάσσει σήματα με έως και 10000 άλλους. Αν και η λειτουργία του κάθε νευρώνα είναι απλή, η τεράστια πολυπλοκότητα των διασυνδέσεων τους έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ευφυΐας.

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα έχουν δομή αντίστοιχη με τα φυσικά. Οι κόμβοι-νευρώνες διατάσσονται σε τουλάχιστον τρία *επίπεδα* (βλ. σχήμα 1.4). Η πληροφορία ρέοντας από την είσοδο προς την έξοδο του νευρώνα περνάει από μία διαδικασία επεξεργασίας σε κάθε κόμβο από τον οποίο διέρχεται. Η κάθε σύναψη μεταξύ νευρώνων λειτουργεί ως κανάλι επικοινωνίας μέσω του οποίου συλλέγονται στον κάθε νευρώνα σήματα, τα οποία πολλαπλασιάζονται με τον *συντελεστή βαρύτητας* που αντιστοιχεί σε κάθε σύναψη και τελικά αθροίζονται.



Σχήμα 1.4

Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας ενός νευρωνικού δικτύου

Η προσαρμογή του δικτύου σε ένα πρόβλημα γίνεται με μεταβολή των συντελεστών βαρύτητας μέσω μιας διαδικασίας που καλείται *εκπαίδευση*. Πέραν της λειτουργίας των Νευρωνικών Δικτύων ως ανεξάρτητης μεθόδου βελτιστοποίησης ενδιαφέρον παρουσιάζει και η χρησιμότητα τους ως προσεγγιστικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται εναλλακτικά της ακριβούς αλλά χρονοβόρας λύσης [34,35]. Η δυνατότητα αυτή των Νευρωνικών Δικτύων βρίσκει εφαρμογή σε κάθε είδους στοχαστικό αλγόριθμο που απαιτεί μεγάλο πλήθος αξιολογήσεων της συνάρτησης κόστους.

1.3.10 Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms)

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι ανήκουν στην κατηγορία των στοχαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης και βασίζονται στους μηχανισμούς εξέλιξης των ειδών. Σύμφωνα και με τη θεωρία του Δαρβίνου, τα καλύτερα άτομα ενός πληθυσμού έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να οδηγηθούν σε αναπαραγωγή και να διαιωνισθούν. Τα γονίδια λοιπόν αυτών των ατόμων μεταφέρονται στις επόμενες γενιές και μάλιστα ο συνδυασμός καλών χαρακτηριστικών από διαφορετικούς επιτυχημένους γονείς οδηγεί σε απογόνους οι οποίοι, ενδεχομένως, να έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά από αυτά των γονέων.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (genetic algorithms) [4,5,39,45,59] είναι μάλλον η πιο διαδεδομένη κατηγορία εξελικτικών αλγορίθμων. Οι εξελικτικές στρατηγικές (evolution strategies) [60,72] είναι μία λιγότερο χρησιμοποιούμενη τεχνική. Ως τρίτη κατηγορία, αρκετά διαφορετική από τις δύο προηγούμενες αναφέρεται ο γενετικός προγραμματισμός (genetic programming) [41,62] ο οποίος αποτελεί σημαντική παραλλαγή όπου ως άτομα του πληθυσμού χρησιμοποιούνται προγράμματα υπολογιστή.

Στα θετικά των εξελικτικών αλγορίθμων συγκαταλέγεται το γεγονός ότι προσαρμόζονται σε ποικιλία προβλημάτων χωρίς να επηρεάζεται ιδιαίτερα η δομή τους. Επιπλέον δεν διαθέτουν κάποιο περιορισμό ως προς τη μορφή της συνάρτησης κόστους που θα χρησιμοποιηθεί, μπορούν εύκολα να επεκταθούν σε προβλήματα πολλών στόχων και δεν εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα.

Κύριο μειονέκτημά τους είναι ο μεγάλος αριθμός αξιολογήσεων μέχρι να επιτευχθεί η βέλτιστη λύση πράγμα που σημαίνει και αυξημένο υπολογιστικό κόστος. Μείωση του χρόνου σύγκλισης του αλγορίθμου επιτυγχάνεται μέσω παράλληλου προγραμματισμού και χρήσης νευρωνικών δικτύων.

Ο Shemle [36] εφήρμοσε τους ΓΑ στο πρόβλημα της ένταξης μονάδων στην παραγωγή για διάστημα 1-7 ημερών ενώ ο Yang [37] πρότεινε έναν παράλληλο γενετικό αλγόριθμο. Ο Rudolf [38] δημιούργησε έναν ΓΑ με βάση έναν συγκεκριμένο υδροθερμικό σταθμό και ο Swarup [39] διαμόρφωσε μία νέα στρατηγική αναπαράστασης του χρωμοσώματος ώστε να ανταπεξέρχεται καλύτερα σε προβλήματα μεγαλύτερη κλίμακας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε αναλυτική περιγραφή του προβλήματος της ένταξης των μονάδων ενός θερμικού σταθμού στην παραγωγή (unit commitment) και της βέλτιστης ανάθεσης φορτίου σε αυτές (economic load dispatch). Περιγράφηκε η διαδικασία αξιολόγησης της λύσης καθώς και όλοι οι περιορισμοί που συναντώνται στη βιβλιογραφία. Στην παρούσα διπλωματική εργασία η επίλυση του προβλήματος γίνεται μέσω ενός Γενικευμένου Εξελικτικού Αλγορίθμου (ΕΑ). Στο κεφάλαιο αυτό λοιπόν παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας των Εξελικτικών Αλγορίθμων .

2.2 Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

2.2.1 Ιστορική Αναδρομή

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι είναι στοχαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης, που έχουν αναπτυχθεί από τη δεκαετία του 1960. Η έννοια του εξελικτικού προγραμματισμού επινοήθηκε στα μέσα του 1960 από τον Ingo Rechenberg, καθηγητή του πολυτεχνείου του Βερολίνου, στο βιβλίο του 'Εξελικτικές στρατηγικές' (*Evolutionstrategie*). Η επόμενη ανακάλυψη στον τομέα αυτό έγινε το 1966 όταν οι L.J. Fogel, A.J. Owens και M.J. Walsh εισήγαγαν την έννοια του εξελικτικού προγραμματισμού (*evolutionary programming*). Το 1975 ο John Holland με το βιβλίο του *Adaptation in Natural and Artificial Systems* παρουσίασε τους *Γενετικούς Αλγόριθμους (ΓΑ)*, θεσπίζοντας τις βασικές αρχές των εξελικτικών αλγορίθμων. Μέχρι τα μέσα του 1980 οι ΓΑ εφαρμόζονταν σε ένα ευρύ φάσμα θεμάτων , από θεωρητικά μαθηματικά προβλήματα μέχρι και απτά θέματα της μηχανικής. Το 1992 ο John Koza χρησιμοποίησε έναν ΓΑ για να εξελίξει προγράμματα ώστε να εκτελούν συγκεκριμένες διεργασίες. Η μέθοδός του ονομάστηκε Γενετικός Προγραμματισμός (*genetic programming*).

2.2.2 Βασικά Χαρακτηριστικά

Τα τελευταία χρόνια οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (EA) έχουν κερδίσει έδαφος συγκριτικά με άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης χάρις στην κατακόρυφη αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Οι EA δεν έχουν μαθηματικό υπόβαθρο και παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς προσαρμόζονται εύκολα σε κάθε νέο πρόβλημα αρκεί να υπάρχει προγραμματισμένο λογισμικό αξιολόγησης. Επιπλέον, όπως και οι υπόλοιπες στοχαστικές μέθοδοι, δεν εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα, όμως ο εντοπισμός της βέλτιστης λύσης είναι ιδιαίτερα χρονοβόρος επειδή χρειάζεται να αξιολογηθούν πολλές υποψήφιες λύσεις.

Οι EA χειρίζονται πληθυσμούς υποψηφίων λύσεων (population-based method) και όχι μία μόνο λύση σε κάθε γενιά (κύκλο βελτιστοποίησης). Αυτό το χαρακτηριστικό τους δίνει τη δυνατότητα να επιλυθούν πέρα των μονοκριτηριακών και πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης.

Ως εξέλιξη, χαρακτηρίζεται η διαδικασία προσαρμογής ενός συστήματος στο περιβάλλον του. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι είναι υπολογιστικά μοντέλα που βασίζονται στη θεωρία της εξέλιξης. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή τα άτομα που επιβιώνουν και έχουν τις περισσότερες πιθανότητες αναπαραγωγής είναι αυτά που προσαρμόζονται καλύτερα στο περιβάλλον τους [40]. Η λογική αυτή είναι βασισμένη στη θεωρία του Δαρβίνου σχετικά με τις αρχές εξέλιξης των ειδών. Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες εξελικτικών αλγορίθμων. Οι **γενετικοί αλγόριθμοι** (GA - genetic algorithms), οι **στρατηγικές εξέλιξης** (evolution strategies) και ο **γενετικός προγραμματισμός** [59]. Ο γενικευμένος EA που θα περιγραφεί στο σημείο αυτό δανείζεται χαρακτηριστικά από τις δύο πρώτες κατηγορίες. Τα βασικά χαρακτηριστικά επομένως, που πρέπει να εμφανίζει ένας αλγόριθμος για να χαρακτηριστεί ως εξελικτικός είναι τα ακόλουθα:

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

Σημαντικό χαρακτηριστικό των EA είναι η ευκολία με την οποία μπορούν να παραλληλοποιηθούν σε ένα πολυεπεξεργαστικό σύστημα. Κάθε μέλος του πληθυσμού δηλαδή μπορεί να αξιολογείται ανεξάρτητα από τα άλλα στο 'δικό του' επεξεργαστή. Έτσι μειώνεται ο χρόνος αναμονής του μηχανικού και αντισταθμίζεται το γεγονός ότι ο ρυθμός σύγκλισης είναι λιγότερο γρήγορος απ' ό,τι στις αιτιοκρατικές μεθόδους.

2.2.3 Περιγραφή Ενός Γενικευμένου Εξελικτικού Αλγορίθμου

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται ένας **Γενικευμένος Εξελικτικός Αλγόριθμος** [14,49-51]. Τον διέπουν μεικτά χαρακτηριστικά που έχουν ληφθεί από διάφορες κατηγορίες των ΕΑ και αποτελεί τη βάση για το λογισμικό που αναπτύχθηκε εδώ. Κατά τη βασική διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης λύσης, ένας πληθυσμός μ υποψήφια λύσεων (γονείς) εξελίσσεται στον πληθυσμό των λ απογόνων. Από αυτούς τους απογόνους, ύστερα από αξιολόγησή τους επιλέγονται οι καταλληλότεροι με βάση την τιμή της συνάρτησης κόστους ως γονείς, και παράγουν ένα σύνολο απογόνων. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης.

Παραδοσιακά κάθε υποψήφια λύση αναπαρίσταται από μία αλληλουχία δυαδικών ψηφίων η οποία αποκαλείται **χρωμόσωμα** (φυσικά είναι δυνατές και άλλες μορφές κωδικοποίησης)

Σε κάθε γενιά (*generation*, g) ενός ΕΑ υπάρχουν τρία βασικά σύνολα ατόμων :

- Το σύνολο των γονέων $S^{g,\mu}$, με μ μέλη
- Το σύνολο των απογόνων $S^{g,\lambda}$, με λ μέλη
- Το σύνολο των επίλεκτων ή ελίτ $S^{g,e}$, με e μέλη

Το σύνολο $S^{g,e}$ αποθηκεύει τα επίλεκτα-καλύτερα άτομα που έχουν προκύψει από τη έναρξη της διαδικασίας της εξέλιξης μέχρι την τρέχουσα γενιά. Συνεπώς, οποτεδήποτε σταματήσει η εξέλιξη, το $S^{g,e}$ περιέχει την καλύτερη λύση. Επιπλέον, κατά τη δημιουργία των απογόνων, χρησιμοποιούνται πληροφορίες από το $S^{g,e}$ ώστε να ενισχύονται τα καλά χαρακτηριστικά της νέας γενιάς που θα προκύψει. Αυτή η ενίσχυση αποτελεί τον λεγόμενο 'ελιτισμό' στους ΕΑ.

Η μορφή ενός τυπικού ΕΑ συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα :

1. Επιλέγονται οι βασικές παράμετροι του αλγορίθμου (πληθυσμοί γονέων, απογόνων και επίλεκτων, ο τρόπος λειτουργίας της διασταύρωσης και της μετάλλαξης, κ.λ.π.) και αρχικοποιείται ο αλγόριθμος, δηλαδή παράγεται ένα πλήθος $S^{0,\lambda}$ τυχαίων ατόμων. Τονίζεται εδώ ότι υπάρχει η δυνατότητα να εισαχθούν κάποιες λύσεις στην αρχική αυτή γενιά. Σκοπός τους είναι η επιτάχυνση της σύγκλισης του αλγορίθμου, μπορεί όμως και να οδηγήσουν τη λύση σε κάποιο τοπικό ακρότατο.

2. Αξιολογούνται τα λ άτομα του συνόλου $S^{g,\lambda}$ και υπολογίζεται για καθένα από αυτά η αντίστοιχη τιμή της συνάρτησης κόστους. Στο σημείο αυτό γίνεται χρήση του λογισμικού αξιολόγησης και έτσι το βήμα αυτό κατέχει το μεγαλύτερο μέρος του υπολογιστικού κόστους του αλγορίθμου.

3. Ανανεώνεται το σύνολο των επίλεκτων με τα καταλληλότερα μέλη από το σύνολο των απογόνων, με κριτήριο την αντικειμενική συνάρτηση. Αν, μέσα στους απογόνους τις γενιάς, έχουν προκύψει άτομα με τιμή κόστους μικρότερη από αυτή που έχουν τα ήδη υπάρχοντα άτομα στο σύνολο των επίλεκτων, τότε κάποια

από τα αρχικά επίλεκτα άτομα διαγράφονται από το σύνολο αυτό. Διαφορετικά το σύνολο παραμένει ως έχει πράγμα που σημαίνει ότι ο ΕΑ δεν κατάφερε να βελτιώσει τη λύση κατά την τελευταία γενιά. Σχηματικά, η ανανέωση του συνόλου των επίλεκτων παρουσιάζεται στη σχέση (2.1).

$$S^{g+1,e} = T_e(S^{g,\lambda} \cup S^{g,e}) \quad (2.1)$$

Όπου ως T_e συμβολίζεται ο τελεστής εντοπισμού των επίλεκτων

4. Εφαρμόζεται ο τελεστής ελιτισμού T_{e2} , με τον οποίο κάποια άτομα από το σύνολο των επίλεκτων αντικαθιστούν άτομα του συνόλου των απογόνων. Συνήθως τα άτομα που αντικαθίσταται είναι αυτά που εμφανίζουν τη μεγαλύτερη τιμή της συνάρτησης κόστους, χωρίς όμως αυτό να είναι δεσμευτικό καθώς μπορεί να υπάρξει και τυχαία επιλογή. Η εφαρμογή του τελεστή ελιτισμού παρουσιάζεται στη σχέση (2.2).

$$S^{g,\lambda} = T_{e2}(S^{g,\lambda} \cup S^{g+1,e}) \quad (2.2)$$

Επιπλέον με τον ελιτισμό αποφεύγεται μία νέα γενιά να εμφανίσει ως βέλτιστη μία λύση χειρότερη από αυτή της προηγούμενης γενιάς.

5. Εφαρμόζεται ο τελεστής επιλογής γονέων T_μ . Με τον συντελεστή αυτό γίνεται επιλογή των γονέων της επόμενης γενιάς $S^{g+1,\mu}$. Οι γονείς επιλέγονται είτε από το σύνολο των απογόνων της γενιάς g είτε από το σύνολο των απογόνων και από το σύνολο γονέων της γενιάς g . Η διαδικασία της επιλογής γονέων παρουσιάζεται στη σχέση (2.3).

$$S^{g+1,\mu} = T_\mu(S^{g,\mu} \cup S^{g,\lambda}) \quad (2.3)$$

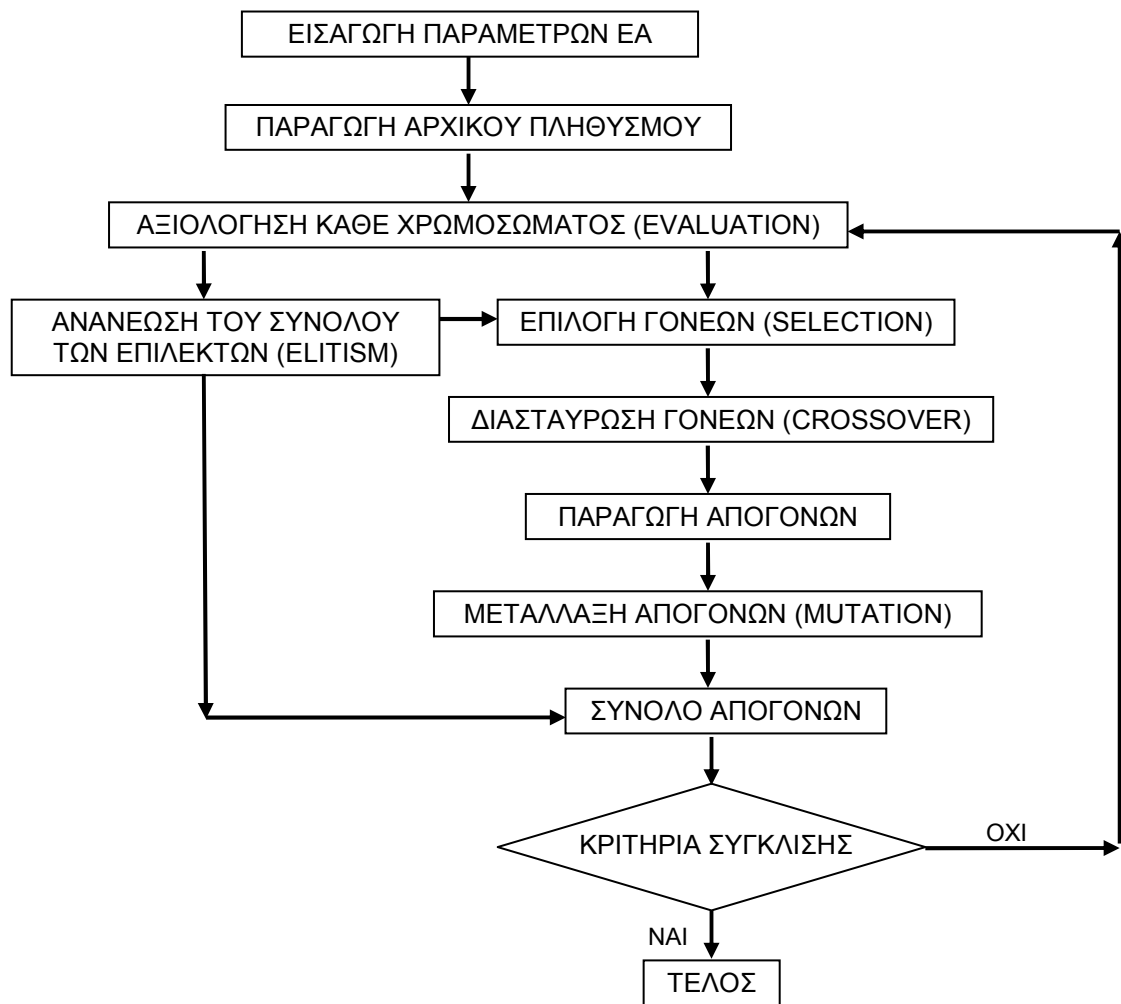
6. Δημιουργείται το σύνολο των απογόνων της επόμενης γενιάς $S^{g+1,\lambda}$. Επιλέγονται ρ γονείς (συνήθως $\rho = 2$ χωρίς αυτό να είναι υποχρεωτικό) από το σύνολο γονέων της γενιάς $g + 1$ (selection). Αν είναι επιθυμητό ο αλγόριθμος να εμφανίζει ισχυρότερα χαρακτηριστικά ελιτισμού υπάρχει και η επιλογή κάποιο από τα ρ άτομα να προέρχεται από το σύνολο των επίλεκτων της γενιάς $g + 1$ που ήδη έχει δημιουργηθεί. Στη συνέχεια, για κάθε σύνολο ρ γονέων που επιλέχθηκαν, εφαρμόζονται διαδοχικά οι τελεστές διασταύρωσης T_r (crossover) και μετάλλαξης T_m (mutation) σχέση (2.4).

$$S^{g+1,\lambda} = T_m(T_r(S^{g+1,\mu} \cup S^{g+1,e})) \quad (2.4)$$

7. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου να επιτευχθεί κάποιο κριτήριο σύγκλισης. Τα κοινότερα χρησιμοποιούμενα είναι :

- Η μη εύρεση νέας καλύτερης λύσης για δεδομένο αριθμό αξιολογήσεων ή γενεών.
- Η ομογενοποίηση του πληθυσμού.
- Η εξάντληση του υπολογιστικού χρόνου, του μέγιστου αριθμού αξιολογήσεων ή του μέγιστου αριθμού γενεών που επέτρεπε ο χρήστης
- Επίτευξη της επιθυμητής τιμής καταλληλότητας/κόστους

Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται διαγραμματικά η λειτουργία ενός Γενικευμένου Εξελικτικού Αλγορίθμου :



Σχήμα 2.1

Διαγραμματική παρουσίαση της λειτουργίας ενός Γενικευμένου Εξελικτικού Αλγορίθμου

2.2.4 Βασικοί Τελεστές Εξελικτικών Αλγορίθμων

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει αναφορά στους τελεστές που χρησιμοποιούνται σε έναν εξελικτικό αλγόριθμο και πιο συγκεκριμένα στους τελεστές επιλογής γονέων, διασταύρωσης και μετάλλαξης. Η λειτουργία των τελεστών ελιτισμού και επιλογής επίλεκτων δεν περιγράφεται μιας και είναι ήδη προφανής.

2.2.4.1 Τελεστές Επιλογής Γονέων

Για λόγους απλούστερης παρουσίασης της λειτουργίας του τελεστή επιλογής γονέων, θεωρούμε ότι ως γονείς της γενιάς $g+1$ μπορούν να επιλεγούν άτομα μόνο από το σύνολο των απογόνων της προηγούμενης γενιάς g .

$$S^{g+1,\mu} = T_{\mu}(S^{g,\lambda}) \quad (2.5)$$

Η επιλογή πρέπει να γίνεται με βάση την τιμή της συνάρτησης στόχου κάθε ατόμου. Τρία σχήματα που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι η **αναλογική επιλογή** (proportional selection/roulette-wheel selection), η **γραμμική κατάταξη** (linear ranking) και η **πιθανοτική επιλογή με διαγωνισμό** (probabilistic tournament selection).

Αναλογική Επιλογή (Proportional Selection/Roulette-Wheel Selection)

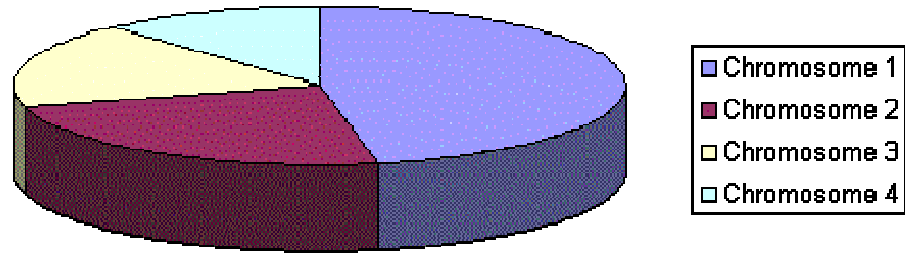
Στην αναλογική επιλογή (βλ. σχήμα 2.2), σε κάθε απόγονο αντιστοιχεί πιθανότητα επιλογής σύμφωνα με τα παρακάτω :

- Για προβλήματα μεγιστοποίησης ισχύει η σχέση 2.6.α
- Για προβλήματα ελαχιστοποίησης ισχύει η σχέση 2.6.β

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j} \quad (2.6.α)$$

$$p_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^N \frac{1}{f_j}} \quad (2.6.β)$$

όπου f_i είναι η τιμή της λύσης του ατόμου I και N ο συνολικός πληθυσμός.



Σχήμα 2.2
Πιθανότητα επιλογής ενός γονέα σύμφωνα με τη μέθοδο της αναλογικής επιλογής
(Roulette-Wheel Selection)

Με τον τρόπο αυτό στους απογόνους που εμφανίζουν καλύτερη τιμή συνάρτησης στόχου αντιστοιχεί μεγαλύτερη πιθανότητα επιλογής. Η τελική επιλογή γίνεται με χρήση γεννήτριας τυχαίων αριθμών, λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανότητες που υπολογίστηκαν. Μειονέκτημα του σχήματος αυτού είναι ότι σε περίπτωση που εμφανιστεί στις πρώτες γενιές ένα άτομο με πολύ καλή τιμή συνάρτησης στόχου, είναι πιθανό να επικρατήσει πρόωρα και να εγκλωβίσει τον αλγόριθμο σε τοπικό ακρότατο.

Γραμμική Κατάταξη (Linear Ranking)

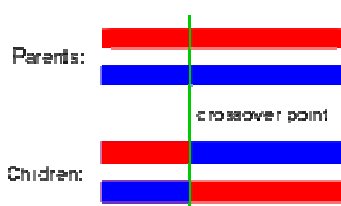
Στην περίπτωση της γραμμικής κατάταξης, οι απόγονοι κατατάσσονται με βάση την τιμή της συνάρτησης στόχου. Σε προβλήματα μεγιστοποίησης τις πρώτες θέσεις καταλαμβάνουν τα άτομα με τις υψηλότερες τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας ενώ σε προβλήματα ελαχιστοποίησης τις πρώτες θέσεις καταλαμβάνουν τα άτομα με τις χαμηλότερες τιμές της συνάρτησης κόστους. Επιλέγονται τα μ καλύτερα άτομα ώστε να εμφανιστούν στο σύνολο γονέων της γενιάς $g+1$, ενώ τα χειρότερα απουσιάζουν.

Πιθανοτική Επιλογή Με Διαγωνισμό (Probabilistic Tournament Selection)

Στην πιθανοτική επιλογή με διαγωνισμό επιλέγονται κάθε φορά k τυχαία άτομα, τα οποία συμμετέχουν σε διαγωνισμό με βάση την τιμή της συνάρτησης στόχου και επιλέγεται το καταλληλότερο για να αποτελέσει έναν ακόμα γονέα της επόμενης γενιάς. Υπάρχει η δυνατότητα ένα άτομο που έχει επιλεγεί ως το καλύτερο σε έναν διαγωνισμό να συμμετάσχει ξανά σε επόμενο διαγωνισμό ή να διαγραφεί από τη λίστα επιλογής. Πολλές φορές, ο διαγωνισμός αποκτά και στοιχεία στοχαστικότητας, επιτρέποντας και στο χειρότερο διαγωνιζόμενο να επιλεγεί με μικρή πιθανότητα.

2.2.4.2 Τελεστές Διασταύρωσης

Στο σημείο αυτό θα περιγραφεί η λειτουργία του τελεστή διασταύρωσης, όπως χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις δυαδικής κωδικοποίησης. Στην περίπτωση διασταύρωσης ενός σημείου (**single-point crossover**) με δύο γονείς για να δημιουργηθούν δύο απόγονοι ο τελεστής διασταύρωσης επιλέγει αρχικά μία τυχαία θέση μεταξύ δύο διαδοχικών δυαδικών ψηφίων του χρωμοσώματος (το σημείο θα είναι το ίδιο και στους δύο γονείς). Αφού έχουν επιλεγεί οι δύο γονείς, για να γίνει η διασταύρωση εναλλάσσονται τα δύο μέρη των χρωμοσωμάτων των γονέων εκατέρωθεν της θέσης διασταύρωσης και προκύπτουν δύο απόγονοι. Ο ένας θα έχει το πρώτο μέρος (πριν τη θέση διασταύρωσης) του πρώτου γονέα και το δεύτερο μέρος (μετά τη θέση διασταύρωσης) του δεύτερου γονέα, ενώ το αντίθετο θα ισχύει για τον δεύτερο απόγονο (βλ. σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3

Διασταύρωση ενός σημείου (single-point crossover) με δύο γονείς για να δημιουργηθούν δύο απόγονοι

Η γενίκευση του τελεστή για διασταύρωση πολλών σημείων προκύπτει άμεσα με την επιλογή περισσότερων της μίας θέσεων διασταύρωσης και εναλλαγή των μερών των χρωμοσωμάτων των δύο γονέων. Η διασταύρωση στους εξελικτικούς αλγορίθμους μπορεί να πραγματοποιείται με κάποια πιθανότητα ώστε να ενισχύεται η στοχαστική φύση του αλγορίθμου. Η πιθανότητα αυτή ονομάζεται πιθανότητα διασταύρωσης P_r και λαμβάνει τιμές λίγο μικρότερες από τη μονάδα και ουσιαστικά σκοπός της είναι να επιτρέπει τη μεταφορά αναλλοίωτων χαρακτηριστικών από τους γονείς στα παιδιά.

Τέλος αναφέρεται ότι υπάρχουν και σχήματα διασταύρωσης που περισσότεροι των δύο γονιών συνδυάζουν τα χρωμοσώματά τους για να δημιουργήσουν απογόνους [42].

2.2.4.3 Τελεστές Μετάλλαξης

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.2.3 στους απογόνους που προκύπτουν από κάθε διασταύρωση εφαρμόζεται ο τελεστής μετάλλαξης. Η μετάλλαξη στοχεύει στην εισαγωγή νέου γενετικού υλικού στον αλγόριθμο, το οποίο δεν υπάρχει στον πληθυσμό των απογόνων. Ο τελεστής αυτός εφαρμόζεται με μία πιθανότητα, όπως και ο τελεστής διασταύρωσης, η οποία ονομάζεται πιθανότητα μετάλλαξης P_m και λαμβάνει μικρές τιμές (συνήθως μικρότερες από 10%). Στην ακέραια κωδικοποίηση, γεννάται ένας τυχαίος αριθμός για κάθε ψηφίο του χρωμοσώματος, και μόνο αν ο τυχαίος αριθμός είναι μικρότερος του P_m συμβαίνει μετάλλαξη. Στη συνέχεια, σε περίπτωση που δοθεί εντολή να γίνει μετάλλαξη σε κάποιο ψηφίο, γεννάται ένας δεύτερος τυχαίος αριθμός με σκοπό να γίνει η επιλογή του ακεραίου που θα αντικαταστήσει το εν λόγω ψηφίο. Για παράδειγμα, στον παρακάτω απόγονο, όπου τα ψηφία λαμβάνουν τιμές από 1 έως 8, έχει επιλεγεί να γίνει μετάλλαξη στο 6^ο ψηφίο και η καινούρια τιμή του να είναι το 8 :

2773**5**2175 → 2773**8**2175

Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται δυαδική κωδικοποίηση η μόνη αλλαγή που μπορεί να γίνει είναι από 0 σε 1 ή από 1 σε 0. Για παράδειγμα, αν στον παρακάτω απόγονο συμβεί μετάλλαξη στο 2^ο ψηφίο το αποτέλεσμα θα είναι :

0**1**110010 → 0**0**110010

Σε έναν ΕΑ η πιθανότητα μετάλλαξης δεν είναι αναγκαίο να παραμένει σταθερή. Είναι σύνηθες μάλιστα να μειώνεται η πιθανότητα της μετάλλαξης με την πάροδο αρκετών γενεών ώστε να επιτρέπεται στον αλγόριθμο να αξιοποιήσει τις υπάρχουσες λύσεις που διαθέτει. Αντίθετα, όταν για πολλές συνεχόμενες γενιές ο αλγόριθμος δεν καταφέρνει να βελτιώσει τη λύση του προβλήματος, επιλέγεται να αυξηθεί η πιθανότητα μετάλλαξης, ώστε με τον τρόπο αυτό να αποφευχθεί η περίπτωση να έχει εγκλωβιστεί ο αλγόριθμος σε τοπικό ακρότατο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Όπως έχει αναφερθεί και στο 1^ο κεφάλαιο, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής. Αρκετές από τις νεότερες αυτές τεχνικές επικεντρώνονται στη μέθοδο των Εξελικτικών Αλγορίθμων. Ένας από τους λόγους που πολλές 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 και της χρήσης μεταπροτύπων [34,35,51] (βλ. νευρωνικά δίκτυα) έχει πλέον ξεπεραστεί. Στην ενότητα αυτή θα περιγραφούν εν συντομία κάποιες τελευταίες προσπάθειες που έχουν γίνει πάνω στο πρόβλημα του καθορισμού του βέλτιστου προγράμματος λειτουργίας.

3.2 Παρουσίαση Σύγχρονων Αλγορίθμων

3.2.1 Κατανεμημένος Γενετικός Αλγόριθμος

Οι Jose Manuel Arroyo και Antonio J.Conejo [43] 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. Οι αλγόριθμοι διόρθωσης παρουσιάζουν δύο πλεονεκτήματα σχετικά με τους αλγόριθμους επιβολής ποινής:

- 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.
- Αποφεύγεται το πρόβλημα του καθορισμού όρων ποινής διαφορετικής φύσης για τους περιορισμούς.

Μειονέκτημα των αλγορίθμων διόρθωσης είναι ότι 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

3.2.2 ΓΑ Με Χρήση Tabu Αναζήτησης

Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στο συνδυασμό των ΓΑ και της tabu αναζήτησης [44]. Το χρωμόσωμα χρησιμοποιεί τόσο δυαδική όσο και δεκαδική κωδικοποίηση. Η συνάρτηση κόστους εκφράζει το ολικό λειτουργικό κόστος χωρίς να περιλαμβάνει όρους ποινής. Το μέρος του αλγορίθμου που χρησιμοποιεί την tabu αναζήτηση δημιουργεί μία μνήμη ώστε να αποφεύγεται ο εγκλωβισμός σε τοπικά ακρότατα που θα οδηγούσε σε πρόωμη σύγκλιση του γενετικού αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση της μεθόδου υπερτερούν αυτών που αποκτήθηκαν είτε από ένα απλό ΓΑ είτε από μια μέθοδο tabu αναζήτησης.

3.2.3 ΓΑ Με Χρήση Ακέραιας Κωδικοποίησης

Οι G. Damousis, A. G. Bakirtzis, P. S. Dokopoulos [45] 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 .

3.2.4 ΓΑ Μεταβλητού Σημείου

Οι Chuangyin Dang και Minqiang Li [46] 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.

3.2.5 ΓΑ Αιτιοκρατικού Τελεστή Επιλογής Γονέων

Η μέθοδος αυτή επιλύει το πρόβλημα της ένταξης μονάδων στην παραγωγή μέσω ΓΑ ο οποίος χρησιμοποιεί έναν ντετερμινιστικό τελεστή επιλογής γονέων και έναν δακτυλιοειδή τελεστή διασταύρωσης, καθώς το χρωμόσωμα έχει μορφή κύκλου [47]. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι με τη χρήση των συγκεκριμένων τελεστών επιτυγχάνεται γρηγορότερη σύγκλιση σε σχέση με έναν κλασικό γενετικό αλγόριθμο.

3.2.6 ΓΑ Με Χρήση Χαοτικής Αναζήτησης

Η μέθοδος αυτή συνδυάζει τους ΓΑ με συστήματα ασαφούς λογικής (Fuzzy System - FS) και χαοτική αναζήτηση (Chaos Search - CS) [48]. Τρία είναι τα κύρια χαρακτηριστικά της μεθόδου :

1. Η χαοτική αναζήτηση αποτρέπει την πρόωμη σύγκλιση του αλγορίθμου
2. Χρησιμοποιούνται κελιά μνήμης που μιμούνται τη λειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος παράγοντας αντισώματα τα οποία εμποδίζουν την επικράτηση μη-αποδεκτών λύσεων
3. Το σύστημα της ασαφούς λογικής επιλέγει την τιμή των τελεστών διασταύρωσης και μετάλλαξης

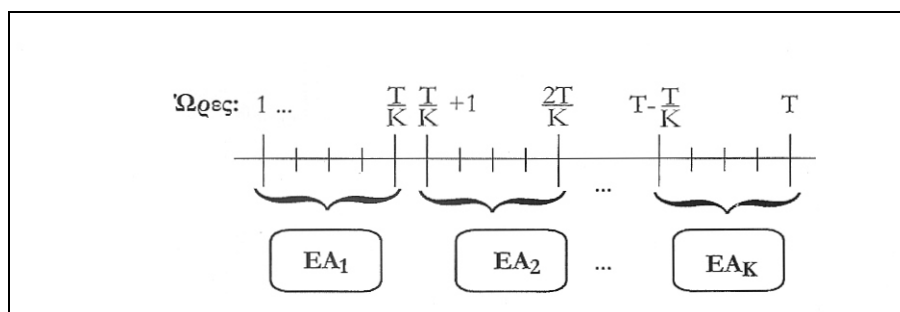
Η μέθοδος παρουσιάζει ταχύτερη σύγκλιση ενώ δεν παγιδεύεται σε τοπικά ακρότατα.

3.2.7 Διεπίπεδος Εξελικτικός Αλγόριθμος (2LEA)

Η μέθοδος που παρουσιάζεται εδώ είναι ένα διεπίπεδο σχήμα το οποίο χωρίζει τη βελτιστοποίηση σε δύο επίπεδα που επικοινωνούν μεταξύ τους. Η μέθοδος αυτή έχει αναπτυχθεί από το Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του Ε.Μ.Π.[49-52].

Το πρώτο επίπεδο ονομάζεται *αδρομερές* και πραγματοποιεί μία ομαδοποίηση των ωρών του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού, ώστε να προκύψει σημαντικά μειωμένο το μήκος χρωμοσώματος που θα διαχειριστεί ο εξελικτικός αλγόριθμος. Στο επίπεδο αυτό δεν λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί που αφορούν στους χρόνους αλλαγής κατάστασης των μονάδων. Για την αρχικοποίηση του εντοπίζεται για κάθε ώρα το βέλτιστο σενάριο λειτουργίας των μονάδων χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα σενάρια των γειτονικών ωρών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος BnB. Όταν ολοκληρωθεί η βελτιστοποίηση του αδρομερούς επιπέδου, το χρωμόσωμα της βέλτιστης λύσης αναπτύσσεται πλήρως και τροποποιείται ώστε να καλύπτονται οι λειτουργικοί περιορισμοί.

Στο δεύτερο επίπεδο, που ονομάζεται *λεπτομερές*, ο εξελικτικός αλγόριθμος χειρίζεται το πλήρες χρωμόσωμα κάθε υποψήφιας λύσης. Το μεγαλύτερο μήκος του χρωμοσώματος καθιστά το υπολογιστικό κόστος του λεπτομερούς επιπέδου αρκετά μεγάλο. Για την επιτάχυνση του λεπτομερούς επιπέδου γίνεται χρήση επαναληπτικής χρονικά κατατετημημένης βελτιστοποίησης. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ο χρονικός ορίζοντας των T ωρών χωρίζεται σε K χρονικά διαστήματα και σε καθένα από αυτά εφαρμόζεται αυτόνομος εξελικτικός αλγόριθμος (σχήμα 3.1). Ωστόσο, επειδή κάθε διάστημα βελτιστοποιείται αυτόνομα, οι λύσεις που προκύπτουν από κάθε ένα από τα διαστήματα όταν συντεθούν για να δημιουργήσουν το πλήρες χρωμόσωμα, είναι πολύ πιθανό να δημιουργήσουν χρωμόσωμα που δεν θα τηρεί τους λειτουργικούς περιορισμούς. Για να αποφευχθεί κάτι τέτοιο, επιβάλλεται στις υποψήφιες λύσεις κάθε διαστήματος ποινή συμβατότητας με την τρέχουσα λύση των γειτονικών διαστημάτων. Η ποινή αυτή προστίθεται στο ολικό κόστος λειτουργίας και, επομένως, καθένας από τους K αυτόνομους εξελικτικούς αλγορίθμους, αναζητά τη λύση με το ελάχιστο άθροισμα ολικού κόστους λειτουργίας και ποινής συμβατότητας.



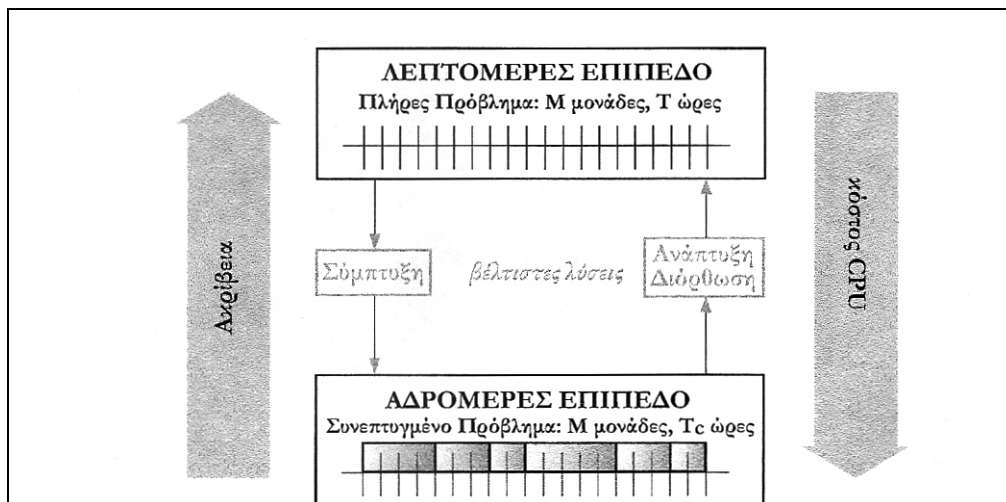
Σχήμα 3.1

Σχηματική παρουσίαση της κατάτμησης του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού σε διαστήματα σε καθένα από τα οποία επενεργεί αυτόνομος εξελικτικός αλγόριθμος (σχήμα από τη διδακτορική διατριβή [52]).

Είναι προφανές ότι το λεπτομερές επίπεδο παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος σε σχέση με το αδρομερές επίπεδο, ενώ το αδρομερές επίπεδο παρουσιάζει μειωμένες δυνατότητες ανίχνευσης της βέλτιστης λύσης σε σχέση με το λεπτομερές. Με τη μεθοδολογία που αναπτύσσεται, το αδρομερές επίπεδο εντοπίζει με χαμηλό υπολογιστικό κόστος μία αρκετά καλή λύση η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για να αρχικοποιήσει το λεπτομερές επίπεδο που θα εντοπίσει τη βέλτιστη. Σε κάποιες παραλλαγές του σχήματος είναι δυνατόν η λύση που προκύπτει από το λεπτομερές επίπεδο να εισαχθεί ξανά στο αδρομερές μειώνοντας έτσι το συνολικό υπολογιστικό κόστος.

Για να είναι εκμεταλλεύσιμη η λύση του αδρομερούς επιπέδου από το λεπτομερές απαιτείται μία μέθοδος μετατροπής του συνεπτυγμένου χρωμοσώματος σε χρωμόσωμα πλήρους μήκους μέσω της διαδικασίας της ανάπτυξης και διόρθωσης του χρωμοσώματος. Αντίστοιχα, για να χρησιμοποιηθεί η λύση του λεπτομερούς επιπέδου από το αδρομερές, είναι αναγκαία μία μέθοδος σύμπτυξης του χρωμοσώματος.

Στο παρακάτω σχήμα (3.2) παρουσιάζεται συνοπτικά η διεπίπεδη δομή του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται και η επικοινωνία μεταξύ των δύο επιπέδων (σχήμα από τη διδακτορική διατριβή [52])



Σχήμα 3.2

Στο σχήμα παρουσιάζεται συνοπτικά η διεπίπεδη δομή του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται και η επικοινωνία μεταξύ των δύο επιπέδων (σχήμα από τη διδακτορική διατριβή [52])

3.3 Σχολιασμός

Όλες οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν μέχρι τώρα εισήγαγαν κάποια καινοτομία στον τρόπο εύρεσης του οικονομικότερου προγράμματος λειτουργίας ενός θερμικού ηλεκτροπαραγωγικού σταθμού. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως εφευρέτη της τον διεπίπεδο εξελικτικό αλγόριθμο που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.2.7. Ο νέος αλγόριθμος αναπτύχθηκε με σκοπό να επιταχυνθεί η διαδικασία και για αυτό το λόγο έχουν εισαχθεί αρκετά νέα στοιχεία. Οι κύριες διαφορές του με τον παραπάνω αλγόριθμο είναι οι εξής :

- Γίνεται χρήση ακέραια κωδικοποιημένου χρωμοσώματος αντί δυαδικού
- Το πρόβλημα της βέλτιστης ανάθεσης φορτίου επιλύεται πριν την έναρξη του εξελικτικού αλγορίθμου αντί αυτό να γίνεται παράλληλα
- Δεν πραγματοποιείται επιδιόρθωση στα μη-εφαρμόσιμα σενάρια λειτουργίας αλλά αντίθετα επιβάλλεται ποινή σε αυτά

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται περιγραφή του νέου αλγορίθμου ενώ στο κεφάλαιο 5 γίνεται η πιστοποίηση του χρησιμοποιώντας υπάρχουσες εφαρμογές από τη βιβλιογραφία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάστηκε το πρόβλημα της βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αναφέρθηκαν όλοι οι περιορισμοί που το συνοδεύουν ενώ ακολούθησε και μία σύντομη περιγραφή των μεθόδων που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για την επίλυση του. Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην επίλυση του με χρήση εξελικτικών αλγορίθμων και ως γλώσσα προγραμματισμού έχει επιλεγεί η Fortran⁶. Στο παρόν κεφάλαιο θα περιγραφεί αναλυτικά η μέθοδος που χρησιμοποιείται και στη συνέχεια θα ακολουθήσουν κάποια μικρά παραδείγματα που δείχνουν πως ανταπεξέρχεται ο αλγόριθμος σε ειδικές καταστάσεις.

4.2 Στόχος της Βελτιστοποίησης και Δεδομένα του Προβλήματος

Κύριος στόχος της βελτιστοποίησης είναι η κάλυψη μίας δοσμένης χρονοσειράς ζήτησης με τον οικονομικότερο τρόπο ενώ, παράλληλα, μπορεί να υπάρχει απαίτηση και για στρεφόμενη εφεδρεία. Τα βασικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο και αφορούν τη λειτουργία των μονάδων όπως και άλλες απαιτήσεις του συστήματος παρουσιάζονται στον πίνακα Π4.1. Σημειώνεται ότι τα κόστη εκκίνησης και σβέσης λαμβάνουν σταθερή τιμή ενώ η συνάρτηση κατανάλωσης καυσίμου αναπαρίσταται με πολυώνυμα δευτέρου βαθμού χωρίς όμως αυτό να είναι περιοριστικό (η συνάρτηση μπορεί να αλλάξει άμεσα αν χρειαστεί).

⁶ Η Fortran είναι γλώσσα προγραμματισμού γενικής χρήσης, ιδιαίτερα κατάλληλη για αριθμητικούς υπολογισμούς και επιστημονικές εφαρμογές. Αρχικά αναπτύχθηκε από την IBM στο Σαν Χοσέ της Καλιφόρνιας το 1950 για επιστημονικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Άρχισε να κυριαρχεί σε αυτόν τον τομέα του προγραμματισμού από νωρίς και βρίσκεται σε συνεχή χρήση για πάνω από μισό αιώνα σε τομείς όπως η αριθμητική πρόγνωση καιρού, η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, η υπολογιστική ρευστομηχανική, η υπολογιστική φυσική και η υπολογιστική χημεία. Παραμένει μια από τις πιο δημοφιλείς γλώσσες στον τομέα των υψηλών επιδόσεων.

K	Αριθμός μονάδων ηλεκτροπαραγωγής
T	Αριθμός ωρών χρονικού ορίζοντα
P _{MIN}	Τεχνικό ελάχιστο
P _{MAX}	Τεχνικό μέγιστο
T _{STUP}	Χρονική διάρκεια έναυσης
T _{SHDN}	Χρονική διάρκεια σβέσης
T _{RAMP ON}	Ελάχιστη χρονική διάρκεια παραμονής σε ανοιχτή κατάσταση
T _{RAMP OFF}	Ελάχιστη χρονική διάρκεια παραμονής σε κράτηση
d _j	Ζήτηση ισχύος για την ώρα j
C _{STUP}	Κόστος εκκίνησης
C _{SHDN}	Κόστος σβέσης
Sr	Ποσοστό προσαύξεσης της ζήτησης λόγω της στρεφόμενης εφεδρείας
SRPC	Συντελεστής ποινής λόγω μη-κάλυψης της στρεφόμενης εφεδρείας
V	Συνάρτηση ποινής λόγω αδυναμίας κάλυψης της ζήτησης
a _i , b _i , c _i	Συντελεστές πολυωνύμου 2 ⁰⁰ βαθμού κατανάλωσης καυσίμου

Πίνακας Π4.1

Παρουσιάζονται τα βασικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο και αφορούν τη λειτουργία των μονάδων καθώς και τις άλλες απαιτήσεις του συστήματος.

4.3 Περιγραφή της Μεθόδου

Η βασική δομή και λειτουργία ενός ΕΑ περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2. Από την περιγραφή αυτή γίνεται σαφές ότι κάθε υποψήφια λύση σε μία γενιά του αλγορίθμου αντιπροσωπεύεται με ένα χρωμόσωμα που απαρτίζεται από τις μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής περιλαμβάνει δύο ειδών μεταβλητές σχεδιασμού. Τις μεταβλητές **κατάστασης s** και τις τιμές της παραγόμενης ηλεκτρικής **ισχύος P** κάθε μονάδας σε κάθε ώρα. Οι μεταβλητές κατάστασης **s** λαμβάνουν τις τιμές 0 και 1, ενώ οι τιμές της παραγόμενης ενέργειας **P** λαμβάνουν πραγματικές τιμές. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι το πρόβλημα ανήκει στην κατηγορία προβλημάτων μικτού προγραμματισμού ακέραιων πραγματικών μεταβλητών.

Σε αντίθεση όμως με τον Γενικευμένο ΕΑ που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χρησιμοποιεί ακέραια αντί για δυαδική κωδικοποίηση του χρωμοσώματος (**integer-coded evolutionary algorithm - ICEA**). Τα ακέραια αυτά ψηφία αντιστοιχούν στο **ωριαίο σενάριο λειτουργίας** το οποίο δηλώνει ποιες μονάδες βρίσκονται σε λειτουργία την κάθε ώρα. Έχοντας δηλαδή **K μονάδες** και 2 πιθανές **καταστάσεις s** για κάθε μονάδα προκύπτουν **2^K πιθανά ωριαία σενάρια λειτουργίας**. Στον πίνακα Π4.2 παρουσιάζεται ένα απλό παράδειγμα με όλα τα δυνατά σενάρια που προκύπτουν για 3 μονάδες. Υπενθυμίζεται ότι μία μονάδα παράγει ωφέλιμη ισχύ όταν s=1 (κατάσταση ON)

α/α ωριαίου σεναρίου	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ s		
	Unit 1	Unit 2	Unit 3
1	0	0	0
2	1	0	0
3	0	1	0
4	1	1	0
5	0	0	1
6	1	0	1
7	0	1	1
8	1	1	1

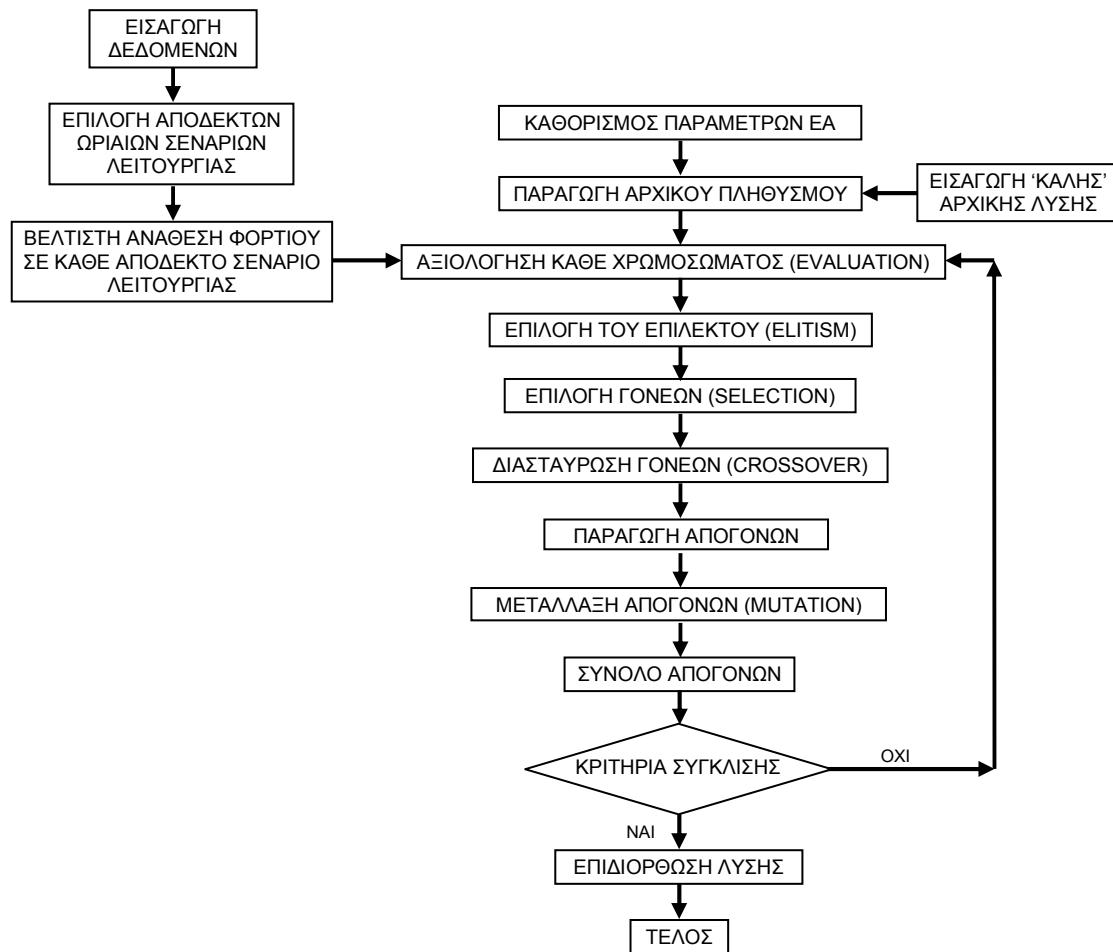
Πίνακας Π4.2

Παρουσιάζονται τα πιθανά ωριαία σενάρια λειτουργίας όταν το σύστημα αποτελείται από 3 μονάδες. Οι τιμές της πρώτης στήλης υποδηλώνουν τις καταστάσεις s όλων των μονάδων του συστήματος. Ο α/α του ωριαίου σεναρίου απορρέει από τη δυαδική (από)κωδικοποίηση.

Με τη χρήση ακέραιων μεταβλητών μειώνεται σημαντικά το μήκος του χρωμοσώματος οδηγώντας ταυτόχρονα και σε μείωση του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου. Το μέγεθος του χρωμοσώματος εξαρτάται μόνο από το μέγεθος του χρονικού ορίζοντα, και συγκεκριμένα το πλήθος των ψηφίων του ισούται με το συνολικό αριθμό των χρονικών βημάτων. Σε όλα τα παραδείγματα που θα ακολουθήσουν το χρονικό βήμα είναι η μία ώρα⁷, κατά την οποία όλες οι μεταβλητές (ζήτηση **d**, ισχύς **P**, κατάσταση **s**, κ.τ.λ.) θεωρείται ότι διατηρούν σταθερή την τιμή τους. Το μέγεθος λοιπόν του χρωμοσώματος θα ισούται με τον αριθμό των ωρών του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού.

Η δομή της μεθόδου παρουσιάζεται συνοπτικά στο σχήμα 4.1 ενώ αναλυτική περιγραφή ακολουθεί στις επόμενες παραγράφους. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος αυτός θα αναφέρεται ως ICEA.

⁷ Όταν αναφερόμαστε σε μία ώρα εννοούμε το διάστημα μεταξύ της δεδομένης ώρας και της προηγούμενης, π.χ. η 7^η ώρα αναπαριστά το χρονικό διάστημα μεταξύ 6^{ης} και 7^{ης} ώρας.



Σχήμα 4.1

Διαγραμματική παρουσίαση του αλγορίθμου για την εύρεση του βέλτιστου προγράμματος λειτουργίας θερμικού σταθμού.

4.3.1 Επιλογή των Αποδεκτών Ωριαίων Σεναρίων Λειτουργίας

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία, σε αντίθεση με τον διεπίπεδο εξελικτικό αλγόριθμο που παρουσιάζεται στην διδακτορική διατριβή[52], αποκλείει εξ αρχής τα ωριαία σενάρια λειτουργίας που δεν είναι εφαρμόσιμα αντί να τα χρεώνει με ποινή όταν αυτά αδυνατούν να καλύψουν τη ζήτηση. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται σημαντικά το πλήθος των υποψήφιων λύσεων μειώνοντας το υπολογιστικό κόστος.

Αρχικά για το κάθε σενάριο λειτουργίας υπολογίζεται η μέγιστη (σχέση 4.1) και η ελάχιστη δυναμικότητα (σχέση 4.2) του συγκεκριμένου συνόλου ανοιχτών μονάδων. Αυτή η μέγιστη και η ελάχιστη δυνατή παραγόμενη ισχύς του κάθε σεναρίου δεν εξαρτάται από τη ζήτηση ηλεκτρικού ρεύματος του δικτύου αλλά από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των μονάδων.

$$P_{MAX,scen} = \sum_{i=1}^K \begin{cases} P_{MAX} & \text{if } s_i = 1 \\ 0 & \text{if } s_i = 0 \end{cases} \quad \forall i \in [1, K], scen \in [1, 2^K] \quad (4.1)$$

$$P_{MIN,scen} = \sum_{i=1}^K \begin{cases} P_{MIN} & \text{if } s_i = 1 \\ 0 & \text{if } s_i = 0 \end{cases} \quad \forall i \in [1, K], scen \in [1, 2^K] \quad (4.2)$$

Στη συνέχεια επιλέγονται όλα τα αποδεκτά (feasible) ωριαία σενάρια λειτουργίας. Δύο είναι οι συνθήκες που κρίνουν την καταλληλότητα του κάθε σεναρίου. Το κάθε σενάριο πρέπει :

1. Να συμφωνεί με τις αρχικές καταστάσεις των μονάδων
2. Να καλύπτει τη ζήτηση ρεύματος για τη δεδομένη ώρα

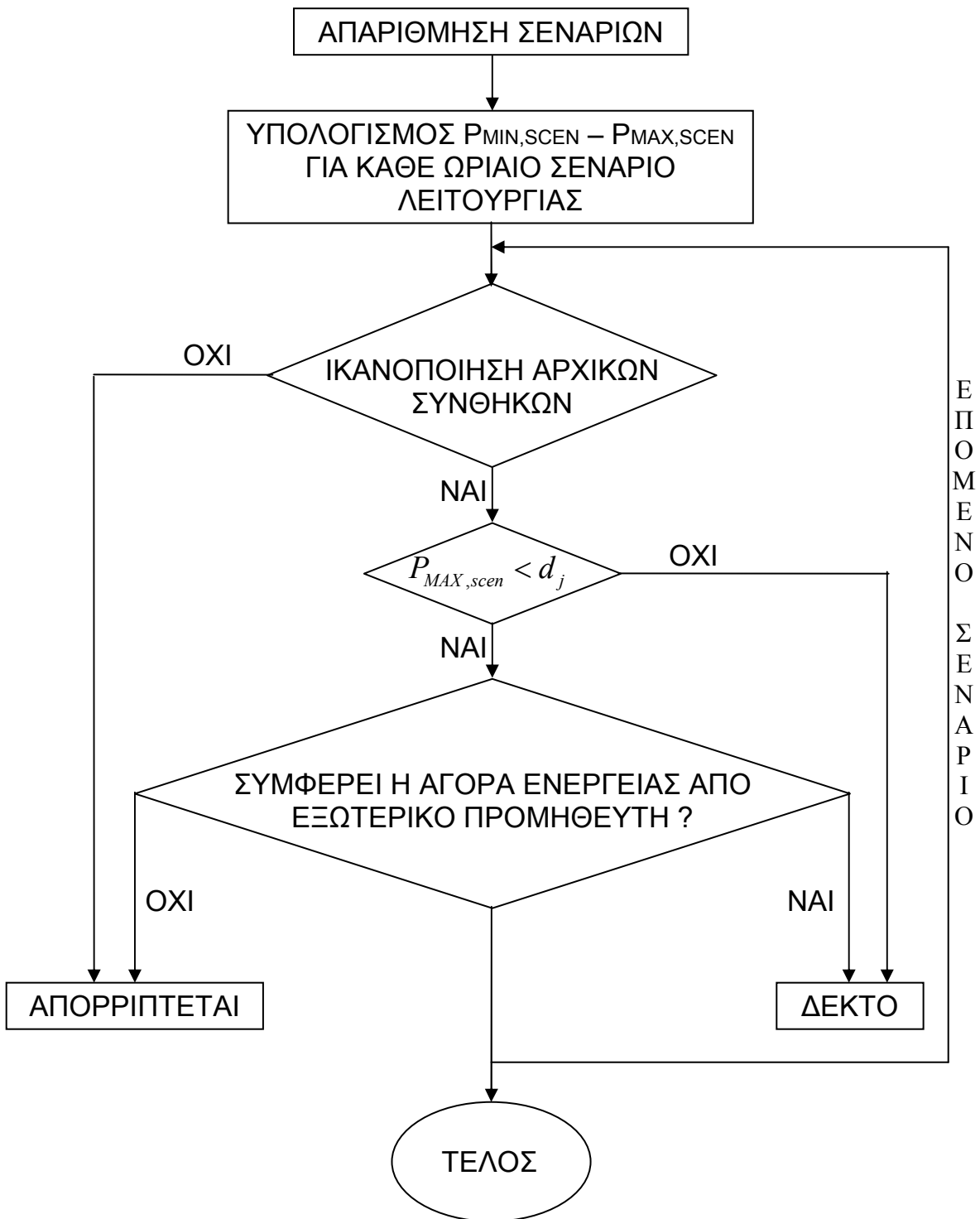
- Συνθήκη 1^η : Εξετάζεται το ιστορικό των μονάδων όπου υπάρχουν συνολικά 3 διαφορετικές περιπτώσεις. Αν μία μονάδα είναι ανοιχτή λαμβάνεται υπόψη και για πόσες ώρες βρισκόταν σε αυτή την κατάσταση. Συνεπώς η μονάδα αυτή δεν δύναται να ξεκινήσει διαδικασία σβέσης αν δεν συμπληρώσει το χρόνο παραμονής της σε κατάσταση ON (T_{RAMP_ON}). Αν μία μονάδα δεν παράγει ενέργεια, βρίσκεται δηλαδή σε κατάσταση σβέσης, κράτησης ή εκκίνησης, πρέπει πάλι να παρέλθει ικανό χρονικό διάστημα έως ότου να μπορέσει να παράξει ωφέλιμη ισχύ ($T_{RAMP_OFF} + T_{STUP} + T_{SHDN}$). Τέλος, το παρελθόν λειτουργίας μιας μονάδας μπορεί να λαμβάνεται και ως ελεύθερο. Αυτό σημαίνει ότι η κατάσταση της μονάδας κατά τις πρώτες ώρες μπορεί να επιλεγεί ελεύθερα, χωρίς να χρειάζεται να υπακούει σε κάποιον περιορισμό που αφορά στη λειτουργία της μονάδας σε ώρες πριν τη έναρξη του ορίζοντα προγραμματισμού.

Γίνονται λοιπόν καταρχήν αποδεκτά μόνο τα ωριαία σενάρια που δεν αντιτίθενται σε κάποιον από τους παραπάνω περιορισμούς.

- Συνθήκη 2^η : Στη συνέχεια εξετάζεται αν η μέγιστη δυνατή παραγόμενη ισχύς του ωριαίου σεναρίου καλύπτει τη ζήτηση. Αν όντως την καλύπτει το σενάριο γίνεται αποδεκτό. Σε περίπτωση που δεν την καλύπτει, αρχικά ελέγχεται αν υπάρχουν μονάδες οι οποίες δεν βρίσκονται σε κατάσταση παραγωγής και δεν περιορίζονται από τις αρχικές τους καταστάσεις, οπότε μπορούν να λειτουργήσουν. Έπειτα συγκρίνεται αν το υπόλοιπο της ζήτησης καλύπτεται οικονομικότερα από τις διαθέσιμες μονάδες ή συμφέρει να εισαχθεί ενέργεια στο σύστημα με αγορά από εξωτερικό προμηθευτή. Το σενάριο θα γίνει αποδεκτό μόνο αν συμφέρει η εισαγωγή ενέργειας.

Στο τέλος τα αποδεκτά σενάρια αποθηκεύονται για κάθε ώρα ξεχωριστά ώστε να ακολουθηθεί η βέλτιστη ανάθεση φορτίου σε αυτά, όπως αυτή περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η παραπάνω διαδικασία υπό μορφή διαγράμματος.



Σχήμα 4.2

Ανάπτυξη της μεθόδου επιλογής των αποδεκτών ωριαίων σεναρίων λειτουργίας των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής.

4.3.2 Βέλτιστη Ανάθεση Φορτίου (Economic Load Dispatch Problem)

Ο αλγόριθμος της διδακτορικής διατριβής[52] υπολογίζει τη βέλτιστη ανάθεση φορτίου των ανοιχτών μονάδων κάθε φορά που ο ΕΑ αξιολογεί μία υποψήφια λύση χρησιμοποιώντας τη μέθοδο χαλάρωσης Lagrange. Αντίθετα στον αλγόριθμο που περιγράφεται εδώ, η βέλτιστη ανάθεση φορτίου προηγείται του ΕΑ και επιτυγχάνεται μέσω της αιτιοκρατικής μεθόδου που περιγράφεται στη συνέχεια.

Για κάθε ένα από τα αποδεκτά ωριαία σενάρια λειτουργίας, τα οποία επιλέχθηκαν σύμφωνα με την πιο πάνω μέθοδο, επιλύεται ένα υποπρόβλημα βελτιστοποίησης στο οποίο διανέμεται η παραγωγή ενέργειας στις διάφορες μονάδες, ώστε να καλυφθεί η ζήτηση με τον οικονομικότερο τρόπο. Η διαδικασία αυτή εκτελείται μόνο μία φορά για κάθε επίπεδο ζήτησης, όπως υπαγορεύεται από την ωριαία ζήτηση, υπολογίζοντας παράλληλα και το κόστος κατανάλωσης καυσίμου για όλα τα σενάρια. Στη συνέχεια, όταν ο ΕΑ αξιολογεί μία υποψήφια λύση ανακαλεί τα αποτελέσματα που προέκυψαν σύμφωνα με τα παρακάτω:

Ξεχωρίζουμε 3 περιπτώσεις :

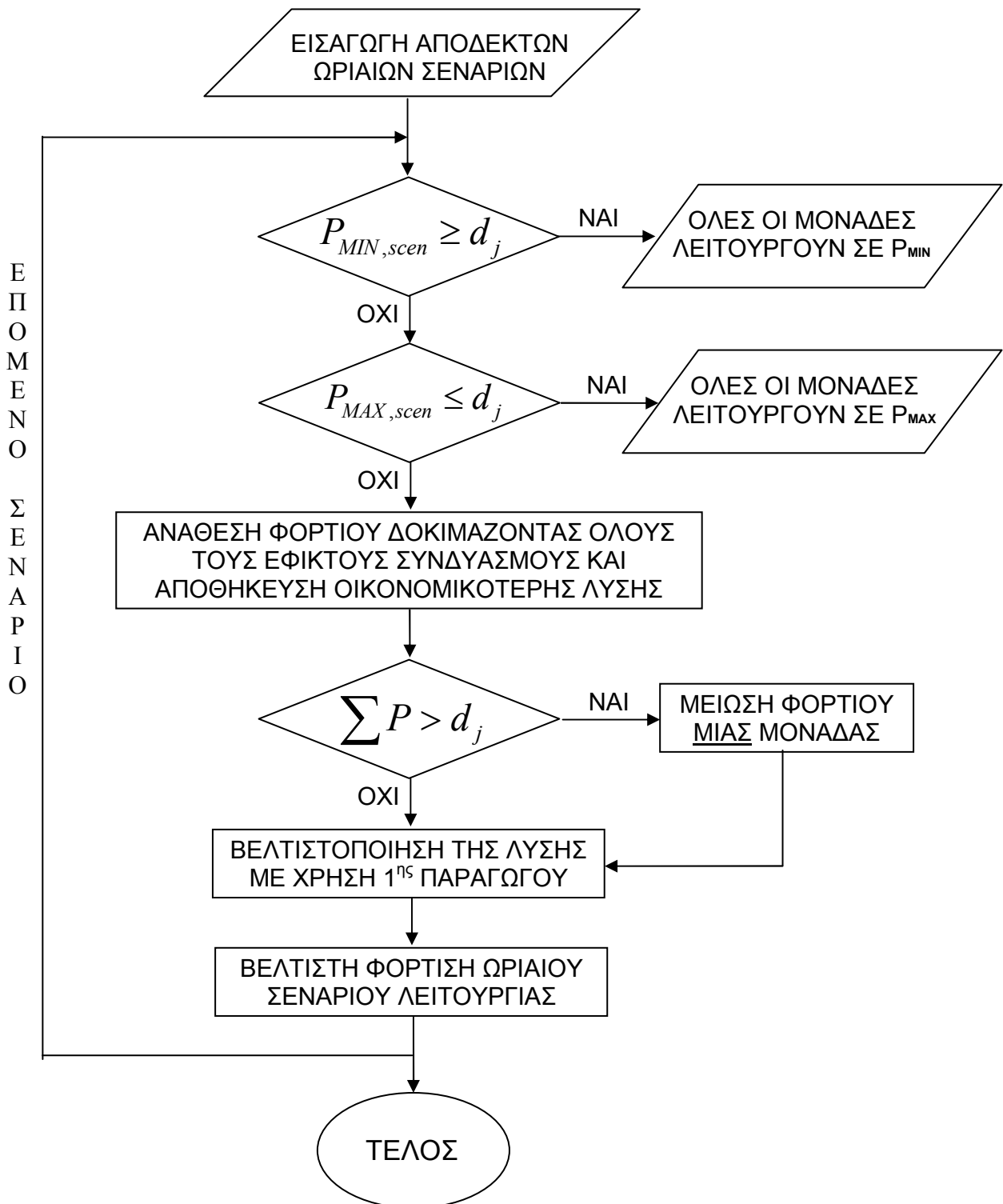
1. Αν $P_{MAX,scen} \leq d_j$ τότε όλες οι μονάδες λειτουργούν στο P_{MAX} τους.
2. Αν $P_{MIN,scen} \geq d_j$ τότε όλες οι μονάδες λειτουργούν στο P_{MIN} τους.
3. Αν $P_{MIN,scen} < d_j < P_{MAX,scen}$ τότε ακολουθείται η εξής διαδικασία :

Για κάθε μονάδα σε κατάσταση λειτουργίας (ON) πραγματοποιείται διακριτοποίηση του φάσματος παραγωγής της, από το τεχνικό ελάχιστο μέχρι το τεχνικό μέγιστο. Ο αριθμός των σημείων της διακριτοποίησης αποφασίζεται εξωτερικά από το χρήστη, (πάντα το πρώτο σημείο αντιστοιχεί στο P_{MIN} και το τελευταίο στο P_{MAX}). Για παράδειγμα, αν σε ένα σενάριο υπάρχουν 3 μονάδες σε κατάσταση ON και έχει επιλεγεί επίπεδο ανάλυσης 10 σημείων για κάθε μία από αυτές, είναι προφανές ότι προκύπτουν 10^3 συνδυασμοί. Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος σε κάθε συνδυασμό εάν μπορεί να καλύψει τη ζήτηση. Για κάθε έναν από αυτούς που όντως την καλύπτουν υπολογίζεται το κόστος κατανάλωσης καυσίμου και στο τέλος αποθηκεύεται η φθηνότερη λύση. Το στάδιο αυτό είναι και το πλέον χρονοβόρο στη διαδικασία της βέλτιστης ανάθεσης φορτίου, ενώ η προσθήκη και άλλων μονάδων αυξάνει εκθετικά τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο.

Η λύση όμως αυτή θα δίνει παραγωγή λίγο μεγαλύτερη από τη ζήτηση, οπότε στο επόμενο βήμα εξετάζεται αν είναι δυνατό να μειωθεί η φόρτιση μίας εκ των μονάδων ώστε η παραγωγή να καλύπτει ακριβώς τη ζήτηση μειώνοντας περαιτέρω το κόστος. Και σε αυτή την περίπτωση γίνεται προσπάθεια η παραγωγή να μειωθεί με τον οικονομικότερο τρόπο.

Τέλος γίνεται βελτίωση της λύσης με βάση την 1^η παράγωγο του πολυωνύμου κατανάλωσης καυσίμου της κάθε μονάδας (βλ. παράγραφο 1.2.1). Πιο συγκεκριμένα, εντοπίζεται η ‘φθηνότερη’ και η ‘ακριβότερη’ μονάδα και εξετάζεται αν συμφέρει η ‘ακριβή’ μονάδα να μειώσει την παραγωγή της κατά ένα μικρό μέρος το οποίο αναλαμβάνει να καλύψει η ‘φθηνή’. Σε περίπτωση που το κόστος παραγωγής προκύψει όντως μικρότερο η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Οι φορτίσεις που έχουν προκύψει αποτελούν και τη βέλτιστη λύση του σεναρίου για τη συγκεκριμένη ώρα, και κατ' επέκταση για τη δεδομένη ζήτηση. Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η παραπάνω διαδικασία με τη μορφή διαγράμματος ροής :



Σχήμα 4.3

Ανάπτυξη της μεθόδου για τη βέλτιστη ανάθεση φορτίου σε κάθε μονάδα που βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας για κάθε εφικτό σενάριο και ώρα του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού.

4.3.3 ΕΑ Ακέραιας Κωδικοποίησης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο εξελικτικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι όμοιος σε μεγάλο βαθμό με τον Γενικευμένο ΕΑ που περιγράφηκε στο 2^ο κεφάλαιο. Βασική διαφορά αποτελεί το γεγονός ότι το χρωμόσωμα συντίθεται από ακέραια ψηφία αντί για δυαδικά, (integer-coded EA, ICEA).

Αρχικά επιλέγονται οι πληθυσμοί των γονέων και των απογόνων, ενώ ο αριθμός των επίλεκτων, (ελίτ), είναι σταθερός και ισούται με τη μονάδα. Επιλέγεται η πιθανότητα διασταύρωσης γονέων (πραγματοποιείται διασταύρωση 3 σημείων, 3-point crossover) καθώς και η πιθανότητα της μετάλλαξης (mutation). Για την επιλογή των γονέων (selection) προτείνονται 2 διαφορετικές τεχνικές : η αναλογική επιλογή (roulette-wheel selection) και η πιθανοτική επιλογή με διαγωνισμό (probabilistic tournament selection)⁸. Σε κάθε περίπτωση όμως, ο επίλεκτος γίνεται αυτόματα και γονέας της επόμενης γενιάς. Η μετάλλαξη λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο όπως και σε ένα δυαδικά κωδικοποιημένο χρωμόσωμα, αντί να πραγματοποιείται όμως μόνο η αλλαγή $0 \longleftrightarrow 1$, το ψηφίο του χρωμοσώματος που μεταλλάσσεται λαμβάνει τιμή που αντιστοιχεί σε κάποιο από τα αποδεκτά ωριαία σενάρια λειτουργίας. Υπάρχει φυσικά η πιθανότητα να επιλεγεί πάλι το ίδιο σενάριο.

Για περισσότερες λεπτομέρειες όσον αφορά τον τρόπο λειτουργίας των ΕΑ ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο κεφάλαιο 2.

4.3.3.1 Αρχικοποίηση

Κατά την αρχικοποίηση του ICEA, όταν δηλαδή παράγονται τυχαία οι απόγονοι που ανήκουν στην πρώτη γενιά, υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής επιπλέον λύσεων. Στην παρούσα εκδοχή του προγράμματος προβλέπεται η εισαγωγή μίας λύσης κατά την οποία σε κάθε ώρα του χρονικού ορίζοντα λειτουργούν οι μονάδες που ελαχιστοποιούν την κατανάλωση καυσίμου της δεδομένης ώρας, βελτιστοποιείται δηλαδή η κάθε ώρα ξεχωριστά. Η λύση αυτή είναι συνήθως μη-αποδεκτή επειδή δεν σέβεται εξαρχής κανέναν λειτουργικό περιορισμό και για το λόγο αυτό λαμβάνει υψηλή ποινή (περισσότερες λεπτομέρειες για τον τρόπο επιβολής της ποινής θα ακολουθήσουν στην επόμενη παράγραφο όπου περιγράφεται ο τρόπος αξιολόγησης των υποψήφιων λύσεων).

⁸ Η πιθανοτική επιλογή με διαγωνισμό διεξάγεται σε ομάδες των τριών. Επιλέγονται δηλαδή κάθε φορά, με τυχαίο τρόπο, 3 άτομα από το σύνολο των απογόνων τα οποία συμμετέχουν σε διαγωνισμό, με βάση την τιμή της συνάρτησης κόστους τους, ώστε να αναδειχθεί ένας γονέας για την επόμενη γενιά. Ο διαγωνισμός όμως διαθέτει και στοιχεία στοχαστικότητας καθώς υπάρχει η πιθανότητα να επιλεγεί η δεύτερη ή και η τρίτη καλύτερη λύση. Συγκεκριμένα η πιθανότητα να αναδειχθεί μία λύση ως γονέας δίνεται από τη σχέση 4.α :

$$p_i = \frac{p \cdot (1 - p)^{i-1}}{\sum_{i=1}^N p \cdot (1 - p)^{i-1}} \quad (4.α)$$

όπου ως i ορίζεται η σειρά κατάταξης της υποψήφιας λύσης (σε $i = 1$ αντιστοιχεί η οικονομικότερη λύση και σε $i = N$ η ακριβότερη) ενώ η τιμή p ορίζεται από το χρήστη ανάλογα με το πόσο θέλει να ενισχύσει ή όχι την πιθανότητα επιλογής των χειρότερων λύσεων. Στις εφαρμογές που ακολουθούν ισχύει ότι $p = 0.85$ οπότε η πιθανότητα επιλογής της 1^{ης}, 2^{ης} και 3^{ης} καλύτερης λύσης είναι αντίστοιχα 85.3%, 12.8% και 1.9%. Σημειώνεται ακόμη ότι, όσα άτομα πάρουν μέρος σε ένα διαγωνισμό έχουν τη δυνατότητα να συμμετάσχουν και σε επόμενους.

Παρά ταύτα αποτελεί μία αρκετά καλή πρώτη λύση και βοηθά στην ταχύτερη σύγκλιση του αλγορίθμου. Για να γίνει η κατάρτιση αυτής της λύσης συγκρίνονται τα κόστη κατανάλωσης καυσίμου όλων των ωριαίων σεναρίων λειτουργίας για την κάθε ώρα, τα οποία έχουν υπολογιστεί κατά τη διαδικασία της βέλτιστης ανάθεσης φορτίου, και στο τέλος αποθηκεύονται τα οικονομικότερα, τα οποία συνθέτουν και το χρωμόσωμα της λύσης.

4.3.3.2 Χρονικά Κατατετημημένη Βελτιστοποίηση

Για την επιτάχυνση του ICEA γίνεται χρήση χρονικά κατατετημημένης βελτιστοποίησης όπως και στον διεπίπεδο εξελικτικό αλγόριθμο (2LEA) που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.2.7. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ο χρονικός ορίζοντας των T ωρών χωρίζεται σε K χρονικά διαστήματα (partitions) και σε καθένα από αυτά εφαρμόζεται αυτόνομος εξελικτικός αλγόριθμος (σχήμα 3.1). Αντίθετα όμως με τον 2LEA δεν αξιολογείται κάθε τμήμα ξεχωριστά αλλά, αξιολογείται η λύση από την αρχή του χρονικού ορίζοντα μέχρι και την ώρα που ορίζει το συγκεκριμένο διάστημα (partition). Μετά το πέρας αυτής της διαδικασίας ο ΕΑ εφαρμόζεται για το σύνολο της λύσης για όσες γενιές ακόμα ορίσει ο χρήστης.

4.3.3.3 Τερματισμός

Μοναδικό κριτήριο σύγκλισης αποτελεί ο μέγιστος αριθμός γενεών που επιτρέπει ο χρήστης. Πριν τον τερματισμό του αλγορίθμου όμως, και ανάλογα με τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αυξήσει τον αριθμό των γενεών αναζητώντας μία λύση μικρότερου κόστους.

Τέλος, όλα τα βασικά δεδομένα που πρέπει να εισαχθούν για να τρέξει ο ICEA παρουσιάζονται στον Πίνακα Π4.3 :

#	Αριθμός για την εκκίνηση της γεννήτριας τυχαίων αριθμών
#	Πληθυσμός συνόλου γονέων (μ)
#	Πληθυσμός συνόλου απογόνων (λ)
#	Πιθανότητα διασταύρωσης
#	Πιθανότητα μετάλλαξης (αρχική τιμή)
#	Πρώτη γενιά όπου αρχίζει να μειώνεται η πιθανότητα της μετάλλαξης
#	Πιθανότητα μετάλλαξης (τελική τιμή)
#	Γενιά πέρα από την οποία η πιθανότητα της μετάλλαξης παραμένει σταθερή και ίση με την τελική της τιμή
#	Πιθανότητα μετάλλαξης (ειδική τιμή)
#	Αριθμός γενεών όπου η βέλτιστη λύση δεν αλλάζει => επιβάλλεται η ειδική τιμή της πιθανότητας μετάλλαξης
#	Μέγιστος αριθμός γενεών
#	Εισαγωγή λύσης με βέλτιστα ωριαία σεναρία λειτουργίας (NAI/OXI)
#	Αριθμός χρονικών καταταμίσεων

Πίνακας Π4.3

Παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία που απαιτούνται για την εκκίνηση του ICEA

Από τον παραπάνω πίνακα υπάρχουν 2 πράγματα που χρήζουν σχολιασμού :

1. η λειτουργία της γεννήτριας τυχαίων αριθμών
2. η διαδικασία της μετάλλαξης.

4.3.3.4 Γεννήτρια Τυχαίων Αριθμών

Ουσιαστικά πρόκειται για μία ψευδογεννήτρια τυχαίων αριθμών [66], η λειτουργία της οποίας είναι να παράγει μία ακολουθία πραγματικών αριθμών (με εύρος 0-1) προσεγγίζοντας τις ιδιότητες ενός συνόλου τυχαίων αριθμών. Η ακολουθία όμως αυτή δεν είναι πραγματικά τυχαία καθώς καθορίζεται εξολοκλήρου από ένα σύνολο αρχικών τιμών. Σε έναν ΕΑ, η ψευδογεννήτρια χρησιμοποιείται κάθε φορά που πρέπει να παρθεί μία απόφαση βάσει κάποιων συγκεκριμένων πιθανοτήτων (διαδικασία επιλογής γονέων, διαδικασία διασταύρωσης, διαδικασία μετάλλαξης). Συνεπώς, όταν αλλάζει ο αριθμός που εκκινεί την ψευδογεννήτρια ο αλγόριθμος μπορεί να παράξει μία αρκετά διαφορετική λύση ως βέλτιστη ή απλά να εντοπίσει την ίδια λύση σε κάποια άλλη γενιά (να εντοπίσει τη βέλτιστη λύση νωρίτερα ή αργότερα).

4.3.3.5 Πιθανότητα της Μετάλλαξης

Όπως γίνεται κατανοητό και από τον παραπάνω πίνακα η τιμή της πιθανότητας μετάλλαξης δεν είναι πάντα σταθερή. Στην αρχή λαμβάνει συνήθως μία αρκετά υψηλή τιμή ώστε να ενισχυθεί η *ικανότητα εξερεύνησης*² του αλγορίθμου και στη συνέχεια μειώνεται γραμμικά έως ότου λάβει μία τελική τιμή. Σε περίπτωση όμως που η καλύτερη λύση δεν βελτιώνεται περαιτέρω για συγκεκριμένο αριθμό γενεών υπάρχει η δυνατότητα να αυξήσουμε πάλι την τιμή της ώστε να αποφύγουμε τον εγκλωβισμό σε κάποιο τοπικό ακρότατο (επιβάλλεται η ειδική τιμή της πιθανότητας μετάλλαξης).

4.3.4 Αξιολόγηση Υποψήφιας Λύσης

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που έχει αναπτυχθεί παραπάνω, όλες οι υποψήφιες λύσεις που συνθέτουν το σύνολο των απογόνων μίας γενιάς πρέπει να περάσουν από το στάδιο της αξιολόγησης. Ο διεπίπεδος εξελικτικός αλγόριθμος της παραγράφου 3.2.7 [52] χρησιμοποιεί υπορουτίνες⁹ διόρθωσης ώστε κάθε υποψήφια λύση να είναι αποδεκτή. Ο παρών αλγόριθμος δεν επιχειρεί να διορθώσει τις λύσεις που παραβιάζουν τους λειτουργικούς περιορισμούς. Αυτό που συμβαίνει, είναι να τις χρεώνει με 'ποινή' αυξάνοντας το κόστος τους. Συνεπώς, είναι αδύνατο ο αλγόριθμος να αναδείξει μία ανεφάρμοστη λύση ως βέλτιστη (κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί σε μία και μόνο περίπτωση η οποία αναλύεται σε επόμενη παράγραφο). Ακόμα όμως και μία τέτοια λύση μπορεί να περιέχει κάποια καλά επιμέρους στοιχεία τα οποία αν περάσουν σε επόμενη γενιά θα βελτιώσουν περαιτέρω το αποτέλεσμα, για αυτό και οι μη-αποδεκτές λύσεις δεν απορρίπτονται εκ προοιμίου.

Η φάση της αξιολόγησης εκκινεί με την εισαγωγή του ακέραια κωδικοποιημένου χρωμοσώματος. Αρχικά αθροίζεται το κόστος κατανάλωσης καυσίμου, για ολόκληρο το χρονικό ορίζοντα, σύμφωνα με τις τιμές που έχουν υπολογιστεί και αποθηκευτεί για το κάθε ένα ωριαίο σενάριο λειτουργίας κατά τη φάση της βέλτιστης ανάθεσης φορτίου. Παράλληλα, το αρχικό χρωμόσωμα μετατρέπεται σε δυαδικό για την κάθε μονάδα ώστε, στη συνέχεια, να αξιολογηθεί το πρόγραμμα λειτουργίας της καθεμιάς ξεχωριστά.

Για την κάθε μονάδα λοιπόν ελέγχεται αν τηρούνται οι περιορισμοί παραμονής σε μία κατάσταση και οι ελάχιστοι χρόνοι έναυσης και σβέσης, (T_{RAMP_ON} , T_{RAMP_OFF} , T_{SHDN} , T_{STUP}). Σε περίπτωση που παραβιάζεται κάποιος από τους παραπάνω λειτουργικούς περιορισμούς, τότε στο κόστος της συγκεκριμένης λύσης προστίθεται και ένας κατάλληλος όρος ποινής.

Ο υπολογισμός της ποινής γίνεται με τον παρακάτω τρόπο :

Ξεκινώντας από την πρώτη ώρα του χρονικού ορίζοντα και προχωρώντας μπροστά στο χρόνο καταμετράται το πλήθος των καταστάσεων $s=0$ που θα έπρεπε να γίνει $s=1$ ώστε η λύση να είναι αποδεκτή. Για κάθε μία από αυτές τις 'παραβιάσεις' χρεώνεται ποινή που ισούται με το κόστος της κατανάλωσης καυσίμου που αντιστοιχεί σε παραγωγή ενέργειας ίσης με το τεχνικό ελάχιστο της μονάδας (P_{MIN}). Στην αξιολόγηση λοιπόν της λύσης, για τις ώρες αυτές, η μονάδα παρουσιάζεται σαν να παρέμεινε ανοιχτή. Δεν διορθώνεται δηλαδή το ίδιο το χρωμόσωμα αλλά η χρέωσή του.

Παράλληλα με την προηγούμενη διαδικασία υπολογίζονται και τα κόστη έναυσης και σβέσης που θα προέκυπταν με βάση τη 'διορθωμένη' λύση. Η ποινή λόγω των παραβιάσεων δίνεται από τη σχέση 4.3 :

⁹ Υπορουτίνα ονομάζεται μία ομάδα εντολών η οποία αντιμετωπίζει ένα συγκεκριμένο πρόβλημα του συνολικού προγράμματος.

$$V_{PMIN} = \sum_{i=1}^K \left[count0_i \cdot [a_i \cdot P_{MIN,i}^2 + b_i \cdot P_{MIN,i} + c_i] \right] \quad (4.3)$$

όπου ως $count0$ ορίζεται το πλήθος των παραβιάσεων για την κάθε μονάδα ξεχωριστά.

Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η παραπάνω διαδικασία παρατίθενται δυο πολύ σύντομα παραδείγματα :

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ Α

Έστω μία μονάδα με τα εξής χαρακτηριστικά :

- χρόνος έναυσης (T_{STUP}) 1h
- χρόνος σβέσης (T_{SHDN}) 1h
- ελάχιστη παραμονή σε κατάσταση OFF (T_{RAMP_OFF}) 2h
- ελάχιστη παραμονή σε κατάσταση ON (T_{RAMP_ON}) 3h

Σύμφωνα με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μονάδας για να είναι εφικτή μία λύση δεν πρέπει να υπάρχουν λιγότερες από 4 συνεχόμενες καταστάσεις $s=0$ ($T_{RAMP_OFF}+T_{SHDN}+T_{STUP}$) και λιγότερες από 3 συνεχόμενες καταστάσεις $s=1$ (T_{RAMP_ON}). Οι παραβιάσεις των λειτουργικών περιορισμών μιας υποψήφιας λύσης επισημαίνονται με αστερίσκο (*) στον Πίνακα Π4.4.

ΩΡΕΣ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Υποψήφια λύση	1	1	1	0*	0*	0*	1	0	0	0	0	0	1	1	0*	0

Πίνακας Π4.4

Στον πίνακα παρουσιάζεται το πρόγραμμα λειτουργίας μίας μονάδας όπως αυτό έχει προκύψει σε κάποιο κύκλο διεργασιών του εξελικτικού αλγορίθμου. Με αστερίσκο(*) επισημαίνονται οι ώρες κατά τις οποίες υπάρχει παραβίαση των λειτουργικών περιορισμών. (ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ Α)

Ποινή χρεώνεται για τις ώρες 4,5,6 καθώς στο χρονικό διάστημα αυτό η μονάδα δεν προλαβαίνει να κλείσει και να επανεκκινήσει. Την 15^η ώρα χρεώνεται ποινή γιατί η μονάδα πρέπει να παραμείνει ανοιχτή για 3 συνεχόμενες ώρες. Αντίθετα, την 8^η ώρα δεν υπάρχει ποινή γιατί παρόλο που η μονάδα παρουσιάζεται ανοιχτή μόνο την 7^η ώρα, στην πραγματικότητα λόγω παραβίασης των περιορισμών τις ώρες 4,5,6, είναι ανοιχτή ολόκληρο το χρονικό διάστημα από την 1^η μέχρι και την 7^η ώρα.

Η μονάδα σβένει συνολικά 2 φορές, πρώτη φορά την 8^η ώρα και δεύτερη φορά την 16^η ώρα, και εκκινεί μία φορά, την 13^η ώρα, σύμφωνα με το ‘διορθωμένο’¹⁰ δυαδικό χρωμόσωμα.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ Β

Η μονάδα έχει τα ίδια λειτουργικά χαρακτηριστικά με αυτά του παραπάνω παραδείγματος. Οι παραβιάσεις των λειτουργικών περιορισμών μιας διαφορετικής υποψήφιας λύσης επισημαίνονται με αστερίσκο (*) στον Πίνακα Π4.5.

ΩΡΕΣ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Υποψήφια λύση	1	1	1	0	0	0	0	1	0*	0*	0*	0*	0*	1	1	1

Πίνακας Π4.5

Στον πίνακα παρουσιάζεται το πρόγραμμα λειτουργίας μίας μονάδας όπως αυτό έχει προκύψει σε κάποιο κύκλο διεργασιών του εξελικτικού αλγορίθμου. Με αστερίσκο(*) επισημαίνονται οι ώρες κατά τις οποίες υπάρχει παραβίαση των λειτουργικών περιορισμών. (ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ Β)

Χρεώνεται ποινή για τις ώρες 9,10 καθώς η μονάδα παραμένει ανοιχτή μόνο για 1 ώρα αντί για 3 ώρες. Στη συνέχεια, υπάρχει ποινή και για τις ώρες 11-13 καθώς στο χρονικό διάστημα αυτό η μονάδα δεν προλαβαίνει να κλείσει και να επανεκκινήσει.

Η μονάδα σβένει μία μόνο φορά, την 3^η ώρα, και εκκινεί μία φορά, την 8^η ώρα, σύμφωνα με το ‘διορθωμένο’¹⁰ δυαδικό χρωμόσωμα.

Αδυναμία Κάλυψης Ζήτησης και Υπερπαραγωγή

Η αποδιδόμενη ισχύς πρέπει να ισούται με την ζήτηση ισχύος για κάθε ώρα της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου. Διαφορετικά επιβάλλεται ποινή στη συνάρτηση κόστους κάθε υποψήφιας λύσης που αδυνατεί να ικανοποιήσει αυτήν την προϋπόθεση:

- Αν $P_j > d_j$ τότε μπορεί (προαιρετικά) να επιβληθεί ποινή από το χρήστη για την πλεονάζουσα παραγωγή (σχέση 4.4).
- Αν $P_j < d_j$, υπάρχει έλλειμμα παραγωγής, οπότε η ποινή αντιστοιχεί είτε στο κόστος κάλυψής του από εξωτερικό προμηθευτή είτε στο κόστος λόγω μερικής διακοπής παροχής ρεύματος. Σε κάθε περίπτωση, ο χρήστης του προγράμματος μπορεί να επιλέξει σύμφωνα με τα δικά του κριτήρια το μέγεθος της ποινής και τον τρόπο επιβολής της ανάλογα με την τιμή του ελλείμματος παραγωγής (σχέση 4.5).

¹⁰ Τα εισαγωγικά δηλώνουν, ακριβώς, ότι η διόρθωση δεν πραγματοποιείται στο ίδιο το χρωμόσωμα, το οποίο δεν αλλάζει, αλλά στην τιμή της συνάρτησης κόστους που του αποδίδεται.

Και στις 2 περιπτώσεις το μέγεθος της ποινής είναι ανάλογο του μεγέθους της υπερπαραγωγής (surplus) ή του ελλείμματος (deficit) αντίστοιχα.

$$surplus = \sum_{j=1}^T \begin{cases} P_{MIN,scen} - d_j & \text{if } P_{MIN,scen} > d_j \\ 0 & \text{if } P_{MIN,scen} \leq d_j \end{cases} \quad (4.4)$$

$$deficit = \sum_{j=1}^T \begin{cases} d_j - P_{MAX,scen} & \text{if } P_{MAX,scen} < d_j \\ 0 & \text{if } P_{MAX,scen} \geq d_j \end{cases} \quad (4.5)$$

όπου οι τιμές των $P_{MIN,scen}$ και $P_{MAX,scen}$ δίνονται από τις σχέσεις (4.2) και (4.1) αντίστοιχα.

Επομένως η ολική ποινή λόγω ελλείμματος ή υπερπαραγωγής ενέργειας δίνεται από τη σχέση 4.6.

$$V_{demand} = deficit \cdot Penalty_{deficit} + surplus \cdot Penalty_{surplus} \quad (4.6)$$

όπου $Penalty_{deficit}$ και $Penalty_{surplus}$ είναι οι συντελεστές ποινής λόγω ελλείμματος και υπερπαραγωγής αντίστοιχα. Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 1.2.3, σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα ο όρος $Penalty_{deficit}$ ισούται με το κόστος αγοράς ρεύματος από κάποιον άλλο παραγωγό ενώ σε ένα απομονωμένο σύστημα, όπου η αδυναμία κάλυψης της ζήτησης θα οδηγούσε σε black-out, ο όρος αυτός λαμβάνει τεχνητά μία αρκετά μεγάλη τιμή. Ο όρος $Penalty_{surplus}$ λαμβάνει συνήθως μία μικρή τιμή ή ακόμη και την τιμή μηδέν ώστε να αγνοηθεί εντελώς αυτή η ποινή.

Στρεφόμενη Εφεδρεία

Ο ορισμός και η χρησιμότητα της στρεφόμενης, ή θερμής, εφεδρείας έχουν περιγραφεί επαρκώς στην παράγραφο 1.2.2. Για να υπολογιστεί η ανάγκη του συστήματος σε στρεφόμενη εφεδρεία προσαυξάνεται η ωριαία ζήτηση κατά ένα ποσοστό ίσο με Sr . Στη συνέχεια αθροίζεται η μέγιστη ισχύς όλων των διαθέσιμων¹¹ μονάδων και αν αυτή αδυνατεί να καλύψει την προσαυξημένη ζήτηση τότε επιβάλλεται ποινή σύμφωνα με τη σχέση 4.7 :

$$V_{SpinRes} = SRPC \cdot \left[\sum_{j=1}^K (1 + Sr) \cdot d_j - \sum_{i=1}^{Av} P_{MAXi,j} \right], \forall j \in [1, T] \quad (4.7)$$

όπου Av ο αριθμός των διαθέσιμων¹¹ μονάδων και $SRPC$ (Spinning Reserve Penalty Coefficient) ο συντελεστής επιβολής της ποινής. Ο συντελεστής αυτός επιλέγεται από τον χρήστη σύμφωνα με το επίπεδο ασφάλειας που θέλει να διατηρήσει.

¹¹ Διαθέσιμες μονάδες: Πρόκειται ουσιαστικά για το σύνολο των ανοιχτών μονάδων και των μονάδων που, ενώ βρίσκονται σε κράτηση, μπορούν να εκκινήσουν άμεσα ($T_{STUP} = 0$).

Συνολικό Κόστος

Αθροίζοντας όλα τα παραπάνω (σχέσεις (4.3), (4.5), (4.7) προκύπτει το συνολικό κόστος της υποψήφιας λύσης, (σχέση 4.8) :

$$TOC = TOC_{Initial} + V_{PMIN} + V_{Demand} + V_{SpinRes} \quad (4.8)$$

όπου το $TOC_{Initial}$ δίνεται από τη σχέση (4.9) :

$$TOC_{Initial} = \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^K (FC) + \sum_{i=1}^K (count_{STUP,i} \cdot C_{STUP,i} + count_{SHDN,i} \cdot C_{SHDN,i}) \quad (4.9)$$

όπου $count_{STUP,i}$ και $count_{SHDN,i}$ είναι το σύνολο των εκκινήσεων και των σβέσεων για την κάθε μονάδα ξεχωριστά και FC , fuel cost, το κόστος κατανάλωσης καυσίμου κατά τη διάρκεια μιας ώρας, (σχέση 1.2).

4.3.5 Επιδιόρθωση της Τελικής Λύσης (post-processing)

Κατά την κατάστροψη του προγράμματος λειτουργίας υπάρχει πάντα το ενδεχόμενο να υπάρξουν ώρες όπου η ζήτηση σε ηλεκτρικό ρεύμα να είναι ιδιαίτερα μικρή. Σε μία τέτοια περίπτωση είναι πιθανό να συμφέρει, ή να είναι αναγκαίο, να διατηρηθούν ανοιχτές κάποιες μονάδες με αποτέλεσμα να προκύπτει υπερπαραγωγή ενέργειας, (θυμίζουμε ότι όταν υπάρχει υπερπαραγωγή όλες οι μονάδες αποδίδουν ισχύ που ισούται με το τεχνικό τους ελάχιστο). Όταν συμβαίνει κάτι τέτοιο η βέλτιστη λύση μπορεί να εμφανίζει ως κλειστή μία μονάδα, για μία ή περισσότερες ώρες, παραβιάζοντας τους λειτουργικούς περιορισμούς της μονάδας. Το παραπάνω μπορεί να συμβεί για το λόγο ότι είτε η μονάδα παρουσιαστεί ως ανοιχτή είτε ως κλειστή το τελικό κόστος της λύσης είναι ακριβώς το ίδιο καθώς, τις ώρες που παραβιάζονται οι λειτουργικοί περιορισμοί, ο αλγόριθμος προσθέτει στο συνολικό κόστος έναν όρο ποινής που ισοδυναμεί με το κόστος λειτουργίας της μονάδας στο P_{MIN} της (η διαδικασία αυτή περιγράφηκε αναλυτικά στην παράγραφο της αξιολόγησης). Συνεπώς, το χρωμόσωμα της τελικής λύσης υπόκειται σε μία διαδικασία επιδιόρθωσης ώστε τα τελικά αποτελέσματα που δίνονται στο χρήστη να εκπληρώνουν τους λειτουργικούς περιορισμούς. Ουσιαστικά πρόκειται για μία επεξεργασία που συμβαίνει μία μόνο φορά μετά το πέρας του ΕΑ (post-processing).

Η συγκεκριμένη υπορουτίνα θα μπορούσε να καλείται για την επιδιόρθωση κάθε λύσης πριν τη φάση της αξιολόγησης, κάτι τέτοιο όμως δεν γίνεται λόγω αύξησης του υπολογιστικού χρόνου. Για την κατανόηση του παραπάνω προβλήματος ο αναγνώστης παραπέμπεται στην παράγραφο 4.4.2 - Παράδειγμα 2^ο.

4.4 Παραδείγματα

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται 2 σύντομα παραδείγματα προγραμματισμού λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων, το 1^ο για χρονικό ορίζοντα 9 ωρών και το 2^ο για χρονικό ορίζοντα 13 ωρών. Υπενθυμίζεται εδώ ότι όταν αναφερόμαστε σε μία ώρα εννοούμε το διάστημα μεταξύ της δεδομένης ώρας και της προηγούμενης και οι τιμές όλων των παραμέτρων (**P**, **s**, **d**) θεωρούνται αμετάβλητες σε αυτό το διάστημα.

4.4.1 Παράδειγμα 1^ο

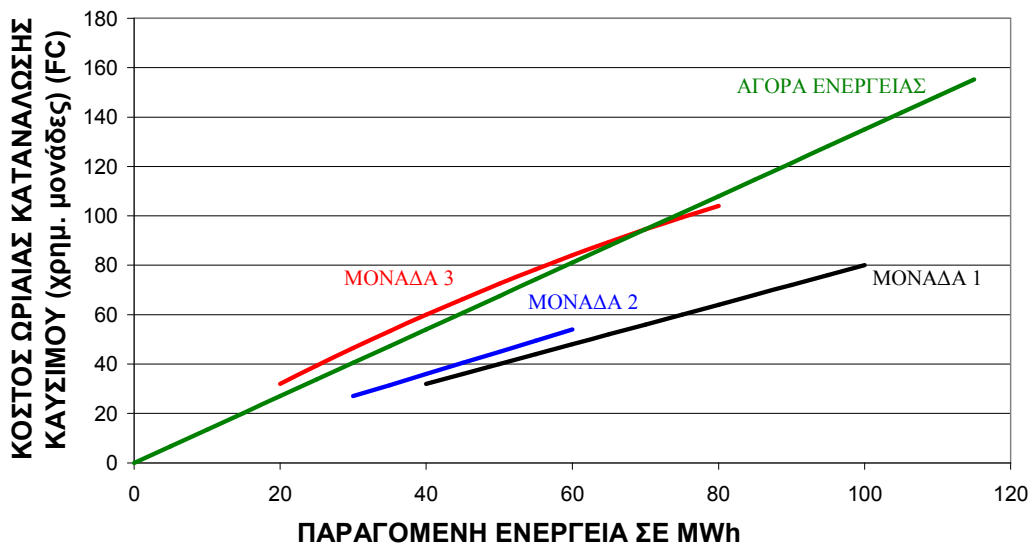
Στο παράδειγμα αυτό θα εξετασθεί η περίπτωση της βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής τριών εικονικών μονάδων για χρονικό ορίζοντα 9 ωρών. Προφανώς πρόκειται για ένα αρκετά απλό πρόβλημα το οποίο θα μπορούσε εύκολα να επιλυθεί ακόμα και χωρίς τη χρήση κάποιας υπολογιστικής μεθόδου. Στόχος του παραδείγματος είναι να παρουσιάσει τη λειτουργία του αλγορίθμου όταν οι μονάδες του σταθμού αδυνατούν να καλύψουν τη ζήτηση και όταν προτιμάται να αγοραστεί ενέργεια από κάποιον εξωτερικό προμηθευτή αντί αυτή να παραχθεί από τις μονάδες του σταθμού. Η βέλτιστη λύση εμφανίζεται, για το δεδομένο αριθμό που εκκινεί τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών, στην 66^η γενιά, ο πληθυσμός του συνόλου των γονέων είναι $\mu = 20$ και ο πληθυσμός του συνόλου των απογόνων είναι $\lambda = 60$ (δεν χρησιμοποιείται χρονική κατάτμηση ούτε εισάγεται κάποια λύση για την αρχικοποίηση του αλγορίθμου).

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του σταθμού παρουσιάζονται στον πίνακα Π4.6 ενώ στο σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η ωριαία κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει της παραγόμενης ισχύος (χρηματικές μονάδες/MW). Οι χρόνοι εκκίνησης, σβέσης και παραμονής σε μία κατάσταση λαμβάνονται ίσοι με μηδέν, τα κόστη εκκίνησης και σβέσης αγνοούνται ενώ το ιστορικό των μονάδων θεωρείται ελεύθερο. Το κόστος αγοράς ενέργειας από εξωτερικό προμηθευτή ορίζεται στις 1.35 χρηματικές μονάδες για κάθε MWh.

	Μονάδα 1 ^η	Μονάδα 2 ^η	Μονάδα 3 ^η
Μέγιστη παραγόμενη ισχύς (MW) (P_{MAX})	100	60	80
Ελάχιστη παραγόμενη ισχύς (MW) (P_{MIN})	40	30	20
Συνάρτηση κόστους κατανάλωσης καυσίμου (FC)	$0.8 \cdot P$	$0.9 \cdot P$	$-0.005 \cdot P^2 + 1.7 \cdot P$

Πίνακας Π4.6

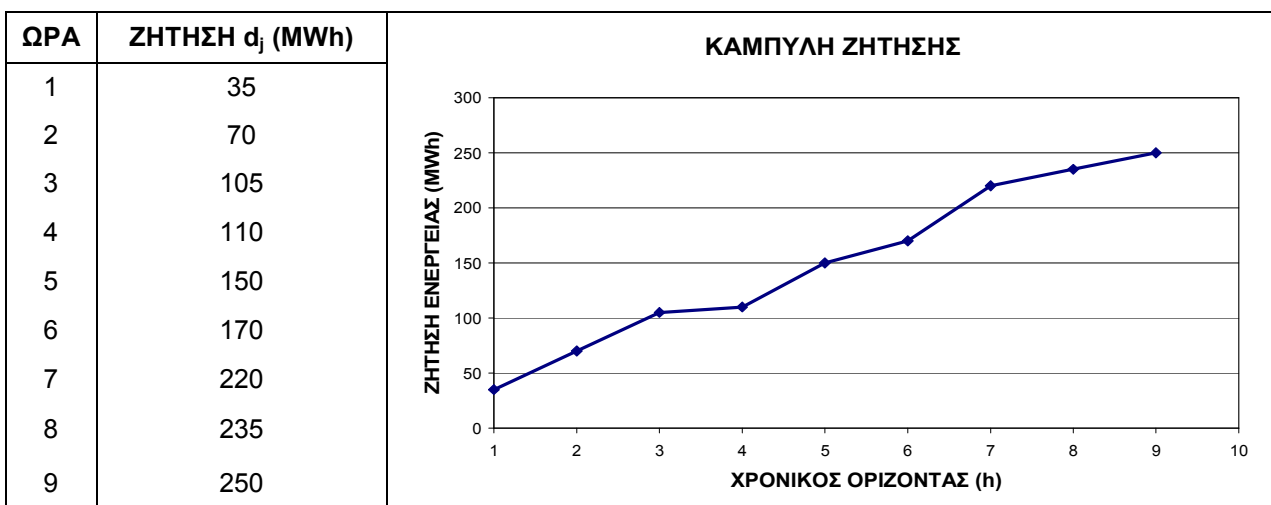
Ο πίνακας περιλαμβάνει τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του σταθμού του Παραδείγματος 4.4.1. Οι χρόνοι εκκίνησης, σβέσης και παραμονής σε μία κατάσταση λαμβάνονται ίσοι με μηδέν, τα κόστη εκκίνησης και σβέσης αγνοούνται ενώ το ιστορικό των μονάδων θεωρείται ελεύθερο. Το κόστος αγοράς ενέργειας από εξωτερικό προμηθευτή ορίζεται στις 1.35 χρηματικές μονάδες για κάθε MWh.



Σχήμα 4.4

Διάγραμμα ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει της παραγόμενης ενέργειας σύμφωνα με τα πολυώνυμα κατανάλωσης των μονάδων του πίνακα Π4.6 του παραδείγματος 4.4.1. Το κόστος αγοράς ενέργειας από εξωτερικό προμηθευτή ορίζεται στις 1.35 χρηματικές μονάδες για κάθε MWh.

Η ζήτηση για τις 9 ώρες του χρονικού ορίζοντα παρουσιάζεται στον πίνακα Π4.7. Η ζήτηση δεν αντιστοιχεί σε κάποια υπάρχον δίκτυο απλά εξυπηρετεί τους στόχους του παραδείγματος.



Πίνακας Π4.7

Χρονοσειρά ζήτησης για χρονικό ορίζοντα 9 ωρών (Παράδειγμα 4.4.1).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου τις ώρες 3,6,7 πραγματοποιείται αγορά ενέργειας από εξωτερικό προμηθευτή. Αυτό συμβαίνει καθώς, όταν οι μονάδες 1 και 2 λειτουργούν ήδη στο P_{MAX} τους, για κάλυψη ζήτησης μέχρι 70 MWh η αγορά ενέργειας είναι οικονομικότερη από τη λειτουργία της μονάδας 3. Τις ώρες αυτές οι μονάδες 1 και 2 λειτουργούν στο τεχνικό τους μέγιστο παράγοντας συνολικά 160 MWh ενώ η υπόλοιπη ζήτηση που πρέπει να καλυφθεί είναι 5, 10 και 60 MWh αντίστοιχα οπότε επιλέγεται η αγορά ενέργειας. Αντίθετα, την 8^η ώρα πρέπει να καλυφθούν επιπλέον 75 MWh οπότε συμφέρει αυτή η ενέργεια να παραχθεί από την μονάδα 3.

Τέλος, την 9^η ώρα είναι αναγκαίο να αγοραστεί ενέργεια (10 MWh) για να καλυφθεί η παραγωγή γιατί όλες οι μονάδες λειτουργούν ήδη στο τεχνικό τους μέγιστο.

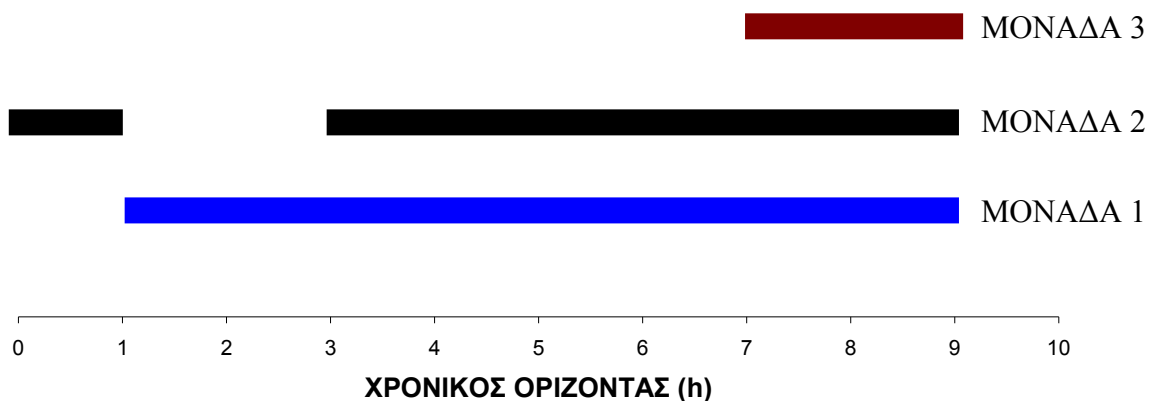
Το ολικό κόστος της λύσης (TOC) είναι 1237.625 χρηματικές μονάδες. 114.75 χρ. μονάδες είναι το κόστος αγοράς ενέργειας και 1122.875 χρ. μονάδες το κόστος παραγωγής από τις μονάδες του σταθμού. Ο πίνακας Π4.8 και το σχήμα 4.5 δίνουν το πρόγραμμα λειτουργίας του σταθμού.

ΩΡΑ	Μονάδα 1		Μονάδα 2		Μονάδα 3		ΩΡΙΑΙΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	ΑΓΟΡΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (MWh)
	s	P (MW)	s	P (MW)	s	P (MW)		
1	0	0	1	35	0	0	3	0
2	1	70	0	0	0	0	2	0
3	1	100	0	0	0	0	2	5
4	1	80	1	30	0	0	4	0
5	1	100	1	50	0	0	4	0
6	1	100	1	60	0	0	4	10
7	1	100	1	60	0	0	4	60
8	1	100	1	60	1	75	8	0
9	1	100	1	60	1	80	8	10

Πίνακας Π4.8

Στον πίνακα παρουσιάζονται οι καταστάσεις s και τα φορτία των 3 μονάδων του σταθμού του Παραδείγματος 4.4.1. Στην προτελευταία στήλη παρουσιάζονται τα ωριαία σενάρια λειτουργίας, τα οποία αποτελούν και το χρωμόσωμα της βέλτιστης λύσης. Η τελευταία στήλη δείχνει το μέγεθος της αγοράς ενέργειας από εξωτερικό προμηθευτή για την κάθε ώρα του χρονικού ορίζοντα.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ



Σχήμα 4.5

Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται η λειτουργία των μονάδων (ON και OFF) του παραδείγματος 4.4.1. Μία μονάδα βρίσκεται σε λειτουργία (ON) τις ώρες που γεμίζει η ράβδος.

4.4.2 Παράδειγμα 2^ο

Στο παράδειγμα αυτό θα εξετασθεί η περίπτωση της βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής τριών εικονικών μονάδων για χρονικό ορίζοντα 13 ωρών. Όπως και το προηγούμενο παράδειγμα έτσι και αυτό είναι αρκετά απλό στη λύση του. Πρώτος στόχος του είναι να παρουσιάσει τη λειτουργία του ICEA όταν οι μονάδες του σταθμού υπόκεινται σε χρονικούς λειτουργικούς περιορισμούς και το ιστορικό τους δεν είναι ελεύθερο. Δεύτερος στόχος του είναι να εξετάσει την περίπτωση εμφάνισης υπερπαραγωγής όπου η τελική βέλτιστη λύση πρέπει να διορθωθεί, για τους λόγους που αναφέρονται στην παράγραφο 4.3.5.

Η βέλτιστη λύση εμφανίζεται στην 95^η γενιά, για το δεδομένο αριθμό που εκκινεί τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών, ο πληθυσμός του συνόλου των γονέων είναι $\mu = 20$ και ο πληθυσμός του συνόλου των απογόνων είναι $\lambda = 60$ (δεν χρησιμοποιείται χρονική κατάτμηση ούτε εισάγεται κάποια λύση για την αρχικοποίηση του αλγορίθμου).

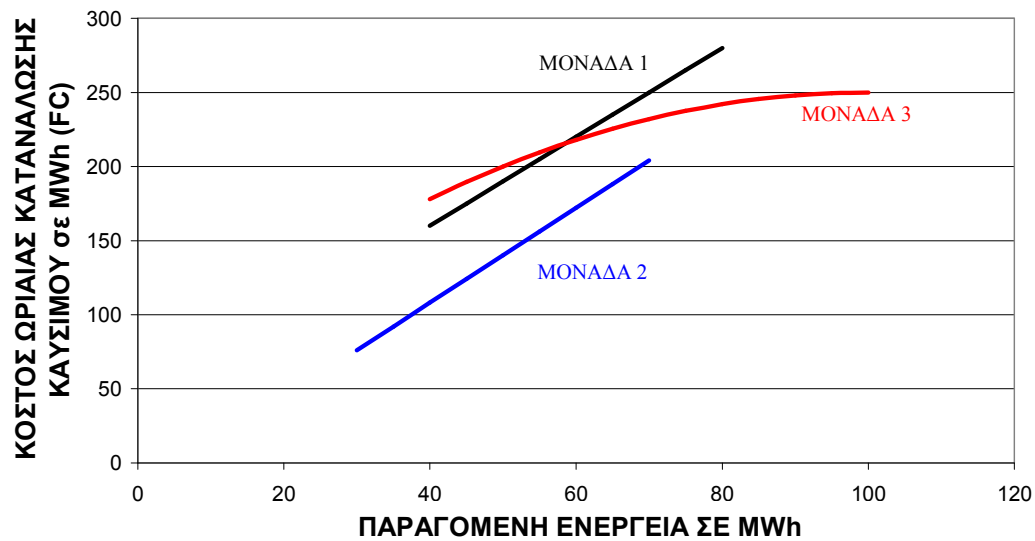
Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του σταθμού παρουσιάζονται στον πίνακα Π4.10 ενώ στο σχήμα 4.6 αποτυπώνονται τα διαγράμματα ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει της παραγόμενης ενέργειας. Το κόστος αγοράς ενέργειας από εξωτερικό προμηθευτή λαμβάνει αρκετά υψηλή ποιμή ώστε να αποφευχθεί η εισαγωγή ενέργειας.

Τέλος η χρονοσειρά της ζήτησης για το χρονικό ορίζοντα των 13 ωρών παρουσιάζεται στον πίνακα Π4.11.

	Μονάδα 1 ^η	Μονάδα 2 ^η	Μονάδα 3 ^η
Μέγιστη παραγόμενη ισχύς (MW) (P_{MAX})	80	70	100
Ελάχιστη παραγόμενη ισχύς (MW) (P_{MIN})	40	30	40
Χρόνος εκκίνησης (hours) (T_{STUP})	0	0	1
Χρόνος σβέσης (hours) (T_{SHDN})	1	0	1
Ελάχιστος χρόνος παραμονής σε κατάσταση ON ($T_{RAMP ON}$)	2	3	4
Ελάχιστος χρόνος παραμονής σε κατάσταση OFF ($T_{RAMP OFF}$)	1	2	1
Κόστος εκκίνησης (MWh) (C_{STUP})	10	10	10
Κόστος σβέσης (MWh) (C_{SHDN})	10	10	10
Συνάρτηση κόστους κατανάλωσης καυσίμου (MWh) (FC)	$3 \cdot P + 40$	$3.2 \cdot P - 20$	$-0.005 \cdot P^2 + 1.7 \cdot P$
Ιστορικό	ON για μία ώρα	ON για 6 ώρες	OFF για 1 ώρα

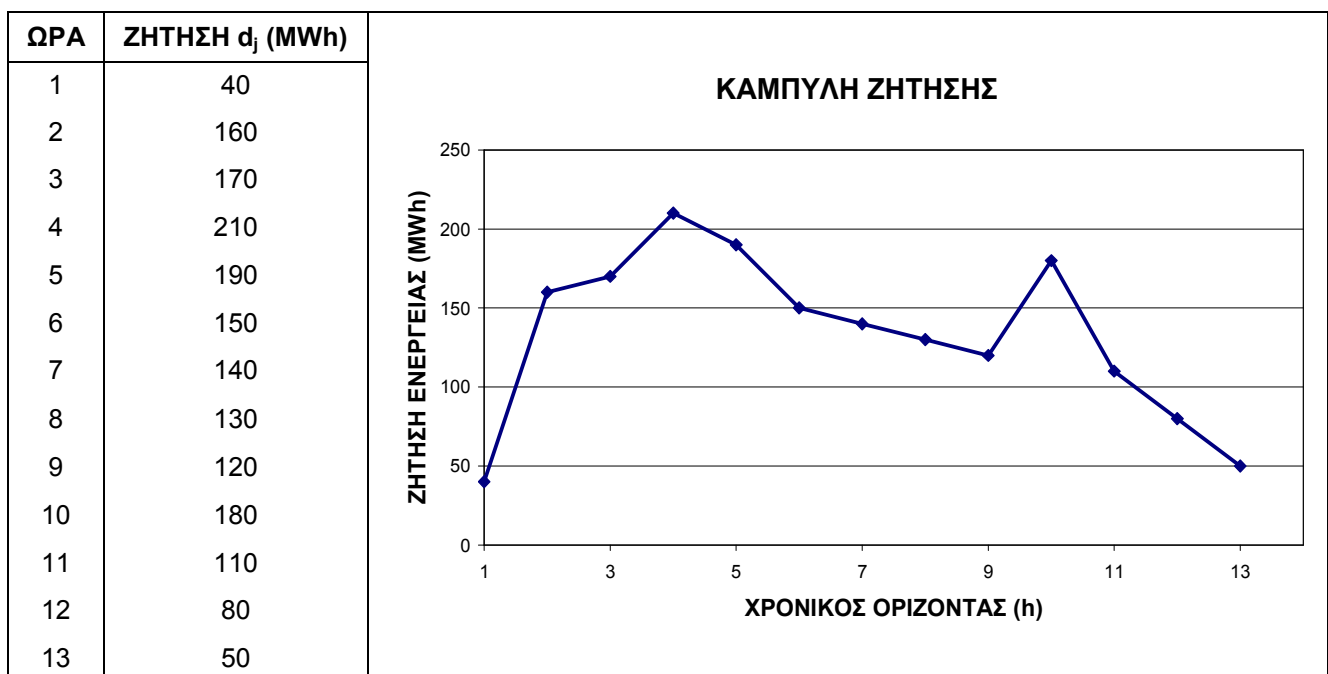
Πίνακας Π4.10

Ο πίνακας περιλαμβάνει τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του σταθμού του Παραδείγματος 4.4.2.



Σχήμα 4.6

Διάγραμμα ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει της παραγόμενης ενέργειας σύμφωνα με τα πολυώνυμα κατανάλωσης των μονάδων του πίνακα Π4.10 του παραδείγματος 4.4.2.



Πίνακας Π4.11

Χρονοσειρά ζήτησης για χρονικό ορίζοντα 13 ωρών (Παράδειγμα 4.4.2).

Η λύση που προτείνεται από τον αλγόριθμο πριν αυτή περάσει από τη φάση της επιδιόρθωσης δίνεται στον πίνακα Π4.11.

Το ολικό κόστος της λύσης (TOC) είναι 5010 εκφρασμένο σε MWh. Από αυτές οι 4863 MWh είναι το κόστος κατανάλωσης του καυσίμου (Fuel Cost, FC), οι 70 MWh είναι τα κόστη λόγω εκκινήσεων και σβέσεων των μονάδων και οι 76 MWh προκύπτουν ως ποινή για την μονάδα 2. Η ποινή αυτή επιβάλλεται καθώς, προσέχοντας το πρόγραμμα λειτουργίας του πίνακα Π4.11, γίνεται αντιληπτό ότι η 2^η μονάδα παραβιάζει το λειτουργικό περιορισμό παραμονής της σε κατάσταση OFF. Η μονάδα παραμένει σε κατάσταση μη παραγωγής ενέργειας, $s = 0$, για μόλις 1 ώρα όταν ισχύει ότι $T_{RAMP_OFF}=2$ h.

ΩΡΑ	Μονάδα 1		Μονάδα 2		Μονάδα 3	
	S	P(MW)	S	P (MW)	s	P (MW)
1	1	40	0*	1	0	0
2	0	0	1	2	1	100
3	0	0	1	3	1	100
4	1	80	1	4	1	100
5	1	60	1	5	1	100
6	0	0	1	6	1	100
7	0	0	1	7	1	100
8	0	0	1	8	1	100
9	0	0	1	9	1	90
10	1	50	1	10	1	100
11	1	80	1	11	0	0
12	1	50	1	12	0	0
13	0	0	1	13	0	0

Πίνακας Π4.11

Στον πίνακα παρουσιάζονται οι καταστάσεις s και τα φορτία των 3 μονάδων του σταθμού του Παραδείγματος 4.4.2 που προκύπτουν σύμφωνα με το χρωμόσωμα της βέλτιστης λύσης, προτού αυτή περάσει από τη φάση της επιδιόρθωσης. Η 2^η μονάδα δεν γίνεται να είναι σβηστή την 1^η ώρα καθώς παραβιάζεται ο ελάχιστος χρόνος παραμονής της σε κατάσταση OFF ($T_{RAMP_OFF} = 2$).

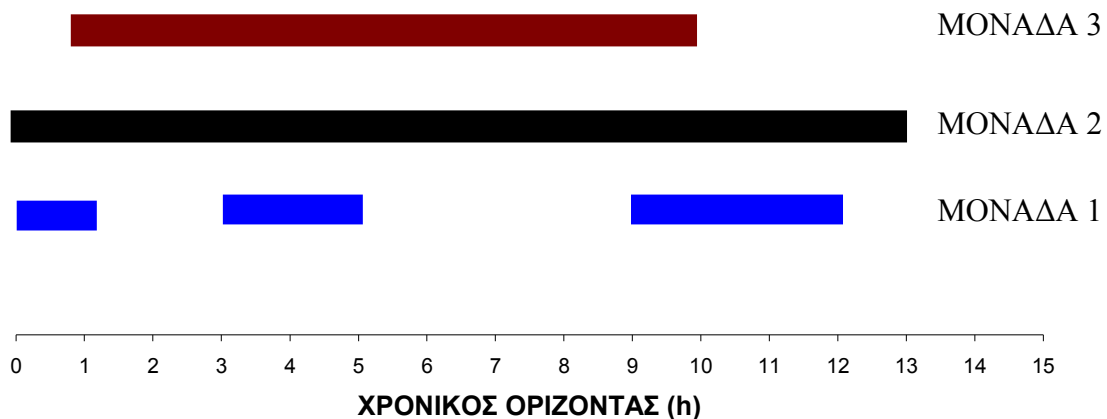
Η λύση του πίνακα Π4.11 στη συνέχεια επιδιορθώνεται, χρησιμοποιώντας την υπορουτίνα επιδιόρθωσης (παράγραφος 4.3.5), δίνοντας τα αποτελέσματα του πίνακα Π4.12 και του σχήματος 4.7. Το ολικό κόστος (TOC) είναι πάλι 5010 MWh, όπου 4940 MWh είναι το κόστος κατανάλωσης του καυσίμου και 70 MWh είναι τα κόστη λόγω εκκινήσεων και σβέσεων. Οι αρχικές συνθήκες τηρούνται κανονικά καθώς την 1^η ώρα η μονάδα 1 παραμένει ανοιχτή και η μονάδα 3 δεν παράγει ενέργεια ευρισκόμενη σε διαδικασία έναυσης (Start-up). Η μονάδα 2 ικανοποιεί όλους τους λειτουργικούς περιορισμούς, ακόμα και αν αυτό οδηγήσει σε υπερπαραγωγή ενέργειας.

ΩΡΑ	Μονάδα 1		Μονάδα 2		Μονάδα 3		Ζήτηση d_j (MWh)	Υπερπαραγωγή (MW)
	s	P(MW)	s	P(MW)	s	P (MW)		
1	1	40	1	30	0	0	40	30
2	0	0	1	60	1	100	160	0
3	0	0	1	70	1	100	170	0
4	1	80	1	30	1	100	210	0
5	1	60	1	30	1	100	190	0
6	0	0	1	50	1	100	150	0
7	0	0	1	40	1	100	140	0
8	0	0	1	30	1	100	130	0
9	0	0	1	30	1	90	120	0
10	1	50	1	30	1	100	180	0
11	1	80	1	30	0	0	110	0
12	1	50	1	30	0	0	80	0
13	0	0	1	50	0	0	50	0

Πίνακας Π4.12

Στον πίνακα παρουσιάζονται οι καταστάσεις s και τα φορτία των 3 μονάδων του σταθμού του Παραδείγματος 4.4.2, αφού η τελική λύση έχει περάσει από τη φάση της διόρθωσης. Στις τελευταίες στήλες παρατίθενται και οι τιμές της ζήτησης και η προκύπτουσα υπερπαραγωγή.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ



Σχήμα 4.7

Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται η λειτουργία των μονάδων (ON και OFF) του παραδείγματος 4.4.2. Μία μονάδα βρίσκεται σε λειτουργία (ON) τις ώρες που γεμίζει η ράβδος.

Σχόλια επί του 2^{ου} Παραδείγματος

Ο αλγόριθμος, (για το δεδομένο αριθμό που εκκίνησε τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών), εμφάνισε στην 95^η γενιά ως βέλτιστη μία μη εφαρμόσιμη λύση (Π.4.11). Όταν η λύση αυτή αξιολογήθηκε και συγκρίθηκε με την έως τότε βέλτιστη λύση της 94^{ης} γενιάς κρίθηκε οικονομικότερη και αποθηκεύτηκε σαν βέλτιστη (elite). Στη συνέχεια, όταν ο αλγόριθμος δημιουργούσε τη λύση του πίνακα Π.4.12, σε όποια επόμενη γενιά και αν συνέβη αυτό, δεν μπορούσε να την αναδείξει ως βέλτιστη καθώς το κόστος της ήταν ακριβώς το ίδιο με αυτό της λύσης που καταλάμβανε τη θέση του επίλεκτου.

Σε περίπτωση βέβαια που η εφαρμόσιμη λύση του πίνακα Π.4.12 δημιουργούταν πρωτύτερα τότε θα ήταν αυτή που θα καταλάμβανε τη θέση του επίλεκτου. Το ποιά λύση θα εντοπιστεί πρώτη εξαρτάται από τον αριθμό που εκκινεί τη ψευδογεννήτρια τυχαίων αριθμών (παράγραφος 4.3.3.4).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ - ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

5.1 Εισαγωγή

Ο κώδικας που δημιουργήθηκε πρέπει να πιστοποιηθεί περαιτέρω. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται εφαρμογές του ακέραια κωδικοποιημένου εξελικτικού αλγορίθμου (ICEA), που περιγράφηκε στο 4^ο κεφάλαιο, σε προβλήματα βελτιστοποίησης προγράμματος λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων με σκοπό την αξιολόγησή του. Συγκεκριμένα εξετάζονται 2 εφαρμογές όπου, η πρώτη έχει ληφθεί από την πτυχιακή εργασία [68] και η δεύτερη από την διδακτορική διατριβή [52] και την εργασία[69].

5.2 Εφαρμογή 1^η : Πέντε Μονάδες – Προγραμματισμός 3ημέρου

Στην εφαρμογή αυτή θα εξετασθεί η περίπτωση της βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής πέντε μονάδων για τρεις ημέρες (72 ώρες). Ο σταθμός αυτός καλείται να καλύψει όλη τη ζήτηση ενός απομονωμένου δικτύου, δεν υπάρχει δηλαδή η δυνατότητα αγοράς ενέργειας από εξωτερικό προμηθευτή. Όλα τα στοιχεία για τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των μονάδων έχουν ληφθεί από την πτυχιακή εργασία [68]. Παρακάτω εξετάζονται 2 διαφορετικές περιπτώσεις, μία για κάλυψη της ζήτησης χωρίς να υπάρχει απαίτηση σε στρεφόμενη εφεδρεία και μία άλλη όπου το μέγεθος της στρεφόμενης εφεδρείας αντιστοιχεί σε επιπρόσθετη δυνατότητα παραγωγής ενέργειας που ισούται κατ' ελάχιστο με το 10% της ωριαίας ζήτησης.

5.2.1 Περιγραφή του Συστήματος

Η μέγιστη δυναμικότητα του σταθμού ανέρχεται στα 362,8MW ηλεκτρικής ισχύος. Ο σταθμός απαρτίζεται από μονάδες βάσεις (heavy duty units) που καλούνται να καλύψουν το κυριότερο μέρος της ζήτησης και μονάδες αιχμής (peak units) που χρησιμοποιούνται για να καλύψουν τις αιχμές της ζήτησης. Οι μονάδες βάσεις είναι τρεις και, πιο συγκεκριμένα, οι δύο είναι αεριοστροβιλικές και η μία συνδυασμένου

κύκλου αεριοστροβίλου – ατμοστροβίλου. Οι μονάδες αιχμής είναι δύο αεριοστροβίλοι παράγωγοι αεροπορικών κινητήρων (aeroderivatives).

Παραδοσιακά, οι μονάδες βάσης παρουσιάζουν μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης από τις μονάδες αιχμής και, για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται για να καλύψουν το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης. Οι μονάδες αιχμής, παρότι παρουσιάζουν συνήθως μικρότερο βαθμό απόδοσης από τις μονάδες βάσης, χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ευελιξία ως προς τους λειτουργικούς περιορισμούς εμφανίζοντας σημαντικά μικρότερους χρόνους έναυσης, σβέσης και αναγκαστικής παραμονής στην ίδια κατάσταση. Στη συγκεκριμένη όμως εφαρμογή όπως θα φανεί και στη συνέχεια οι δύο μονάδες αιχμής παρουσιάζουν καλύτερο βαθμό απόδοσης στο πλήρες φορτίο τους σε σχέση με τις 2 δευτερεύουσες μονάδες βάσεις.

Μονάδες αιχμής

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στο σταθμό χρησιμοποιούνται 2 μονάδες αιχμής :

- Μονάδα 1 LM6000PC Sprint
- Μονάδα 2 LM2500+

Μονάδα 1 (Αιχμής) - Αεριοστροβίλος LM6000PC Sprint

Ο αεριοστροβίλος LM6000PC Sprint είναι ένα μοντέλο της εταιρείας General Electric (GE). Ανήκει στη σειρά αεριοστροβίλων LM της GE και αποτελεί τροποποίηση του βασικού μοντέλου LM6000. Οι αεριοστροβίλοι αυτής της σειράς προέρχονται από αεροπορικούς κινητήρες της ίδια εταιρείας και έχουν δεχτεί τροποποιήσεις για να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή για την κίνηση μηχανικού φορτίου.

Μονάδα 2 (Αιχμής) - Αεριοστροβίλος LM2500+

Ο αεριοστροβίλος LM2500+ είναι ένα μοντέλο της σειράς LM της General Electric (όπως και ο LM6000PC Sprint) και είναι και αυτός, όπως και όλα τα μοντέλα της σειράς αυτής, παράγωγος αεροπορικού κινητήρα. Το βασικό μοντέλο είναι ο αεριοστροβίλος LM2500 ο οποίος βασίζεται στον αεροπορικό κινητήρα CF6-6 της σειράς CF6. Ο κινητήρας αυτός είναι διπλού ρεύματος, μεγάλου λόγου παράκαμψης και χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά στο αεροσκάφος DC-10-10 της McDonnell Douglas.

Μονάδες βάσεις

Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά οι 3 μονάδες βάσεις του σταθμού :

- Μονάδα 3 2xGT8C + ST
- Μονάδες 4,5 V64.3A

Μονάδα 3 (Κύρια Μονάδα Βάσης) – Μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου

Η τρίτη κατά σειρά μονάδα του σταθμού δεν λειτουργεί με βάση τον απλό κύκλο αεριοστρόβιλου, αλλά με βάση το συνδυασμένο κύκλο αεριοστρόβιλου - ατμοστρόβιλου. Η τεχνολογία της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες συνδυασμένου κύκλου είναι νεότερη τεχνολογία και εξελίσσεται ακόμα και σήμερα γιατί προσφέρει αρκετά μεγάλες προοπτικές αύξησης του βαθμού απόδοσης μίας μονάδας. Οι βασικές συνιστώσες της μονάδας είναι οι δύο αεριοστρόβιλοι, ο ατμοστρόβιλος και οι δύο πανομοιότυπες συσκευές ανακόμισης θερμότητας που χρησιμοποιούν ατμό. Οι 2 αεριοστρόβιλοι που χρησιμοποιούνται είναι το μοντέλο GT8C της εταιρείας ABB και πρόκειται για βαρέως τύπου βιομηχανικό αεριοστρόβιλο.

Μονάδες 4 και 5 (Δευτερεύουσες Μονάδες Βάσης) – Αεριοστρόβιλος V64.3A

Στις τελευταίες 2 μονάδες του σταθμού αντιστοιχεί ο αεριοστρόβιλος V64.3A της εταιρείας Ansaldo Energia. Ο αεριοστρόβιλος αυτός είναι βιομηχανικός βαρέως τύπου (σε αντίθεση με τους αεριοστρόβιλους της σειράς LM της General Electric που χρησιμοποιούνται στις δύο πρώτες μονάδες). Οι αεριοστρόβιλοι V64.3A μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε λειτουργία απλού κύκλου όσο και σε λειτουργία συνδυασμένου κύκλου. Στο σταθμό του προβλήματος που μελετάται και οι δύο αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται σε λειτουργία απλού κύκλου.

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των μονάδων παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα Π.5.1. ενώ στο σχήμα 5.1 αποτυπώνονται τα διαγράμματα κατανάλωσης καυσίμου σε συνάρτηση με την παραγόμενη ενέργεια. Σημειώνεται ότι η συνάρτηση κατανάλωσης καυσίμου περιγράφεται από τη σχέση 1.2 :

$$FC_{i,j} = a_i (P_{i,j})^2 + b_i P_{i,j} + c_i$$

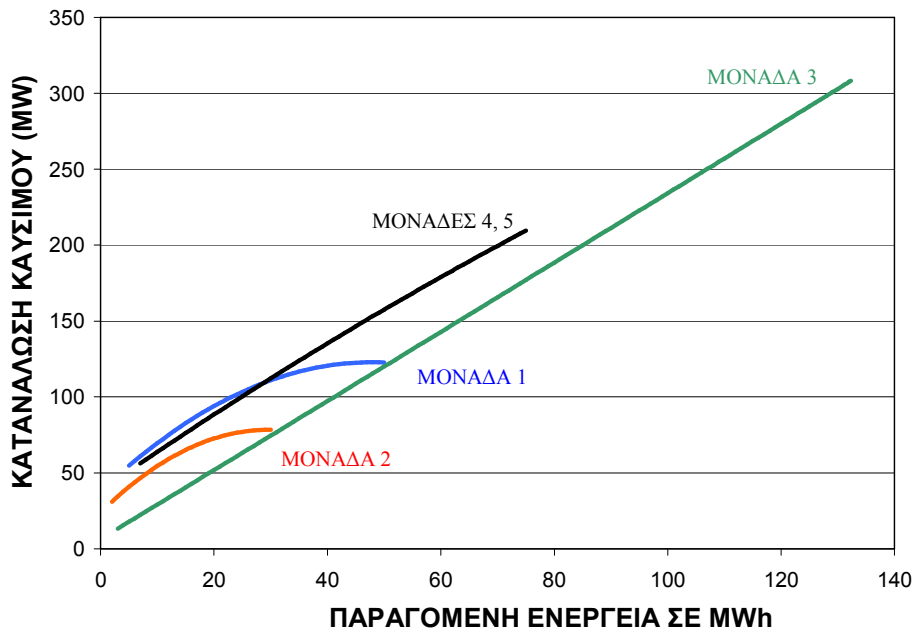
προσαρμόζοντας, ουσιαστικά, στα παραπάνω δευτεροβάθμια πολυώνυμα τα αριθμητικά δεδομένα των μονάδων με αριθμητική παρεμβολή (μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων).

	Μονάδα 1 ^η	Μονάδα 2 ^η	Μονάδα 3 ^η	Μονάδες 4 ^η , 5 ^η
Μέγιστη παραγόμενη ισχύς (MW) (P_{MAX})	50	30.5	132.3	75
Ελάχιστη παραγόμενη ισχύς (MW) (P_{MIN})	5	2	3	7
Χρόνος εκκίνησης (hours) (T_{STUP})	1	1	3	1
Χρόνος σβέσης (hours) (T_{SHDN})	0	0	1	1
Ελάχιστος χρόνος παραμονής σε κατάσταση ON ($T_{RAMP ON}$)	0	0	1	1
Ελάχιστος χρόνος παραμονής σε κατάσταση OFF ($T_{RAMP OFF}$)	0	0	1	1
Κόστος εκκίνησης (MWh) (C_{STUP}) ¹²	14	8.5	278	14
Κόστος σβέσης (MWh) (C_{SHDN})	7	4.5	116	7
Συντελεστής α πολυωνύμου κατανάλωσης καυσίμου	-0.037	-0.062	0.0001	-0.004
Συντελεστής β πολυωνύμου κατανάλωσης καυσίμου	3.546	3.674	2.268	2.584
Συντελεστής γ πολυωνύμου κατανάλωσης καυσίμου	37.875	23.937	6.414	38.326

Πίνακας Π5.1

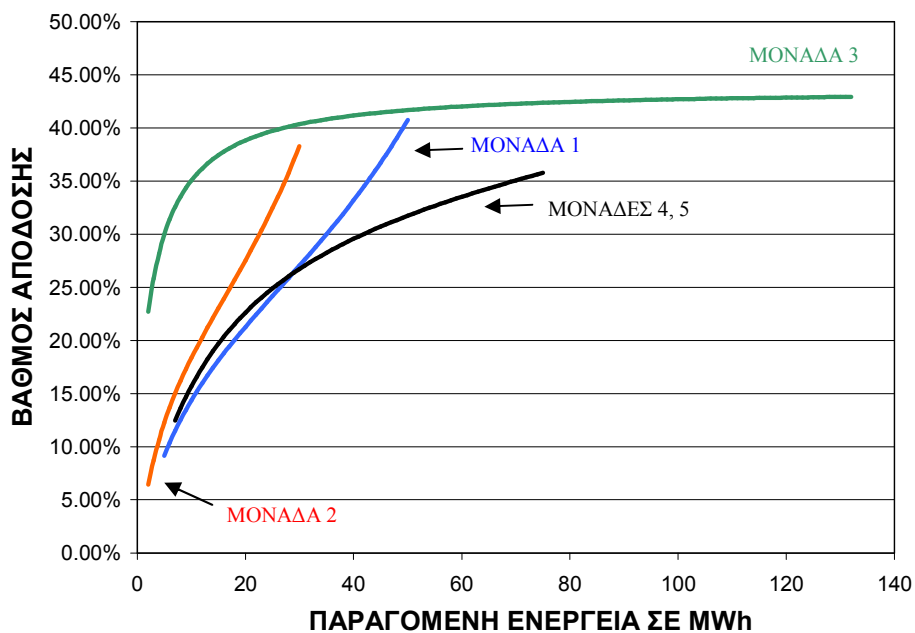
Εφαρμογή 1^η : Ο πίνακας περιλαμβάνει τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του σταθμού που αποτελείται από 5 ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες.

¹² Στην πραγματικότητα το κόστος έναυσης εξαρτάται από τη χρονική διάρκεια που η μονάδα βρισκόταν σε κατάσταση κράτησης. Αν το διάστημα αυτό υπερβαίνει ένα μέγιστο αριθμό ωρών (λειτουργικό χαρακτηριστικό της μονάδας) η έναυση χαρακτηρίζεται ως «ψυχρή» και συνοδεύεται από ένα κόστος «ψυχρής» έναυσης. Αν το διάστημα δεν υπερβαίνει τον μέγιστο αυτό αριθμό ωρών, τότε η έναυση χαρακτηρίζεται ως «θερμή» και συνοδεύεται από ένα κόστος «θερμής» έναυσης. Το κόστος της θερμής έναυσης είναι συνήθως αρκετά μικρότερο από αυτό της ψυχρής, εξαρτάται όμως και από τον τύπο και το μέγεθος της εν λόγω μονάδας. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή τα κόστη ψυχρής και θερμής έναυσης των μονάδων 1,2,4,5 συμπίπτουν. Αντίθετα, για την τρίτη μονάδα ισχύει ότι το κόστος θερμής εκκίνησης είναι 278 (MWh), το κόστος ψυχρής εκκίνησης 464 (MWh) και ο ελάχιστος χρόνος παραμονής σε κατάσταση κράτησης για να θεωρηθεί η εκκίνηση ψυχρή είναι 4 ώρες. Ο αλγόριθμος όμως στην τρέχουσα μορφή του δεν κάνει διαχωρισμό του τύπου της έναυσης και συνεπώς αδυνατεί να αποδώσει και την κατάλληλη χρέωση. Αυτό θα μπορούσε να γίνει αλλά θεωρήθηκε ότι δεν ήταν μέσα στα όρια της εργασίας. Καθώς όμως η μονάδα 3 αποτελεί την κύρια μονάδα βάσης, έχοντας και τον καλύτερο βαθμό απόδοσης σε ολόκληρο το εύρος λειτουργίας της, η παραπάνω διαφοροποίηση δεν θα μας απασχολήσει μιας και η μονάδα αναμένεται να παραμένει ανοιχτή καθ' όλη τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού.



Σχήμα 5.1

Εφαρμογή 1^η : Διάγραμμα ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει της παραγόμενης ισχύος.



Σχήμα 5.2

Εφαρμογή 1^η : Βαθμός απόδοσης των μονάδων συναρτήσει της παραγόμενης ενέργειας.

Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται ο βαθμός απόδοσης της κάθε μονάδας για ολόκληρο το εύρος λειτουργίας της. Κάνοντας ένα σύντομο σχολιασμό, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η 3^η μονάδα διατηρεί τον καλύτερο βαθμό απόδοσης για ολόκληρο το εύρος λειτουργίας της. Η 2^η μονάδα, αν και είναι μονάδα αιχμής, είναι οικονομικότερη από τις δυο δευτερεύουσες μονάδες βάσεις (μονάδες 4,5) επίσης για όλο το φάσμα παραγωγής της ενώ η 1^η μονάδα, και αυτή μονάδα αιχμής, έχει μεν τον χειρότερο βαθμό απόδοσης σε χαμηλό φορτίο, σε πλήρες φορτίο όμως υπερτερεί όλων των μονάδων πλην της 3^{ης}. Καταρτίζοντας λοιπόν το πρόγραμμα λειτουργίας του σταθμού αναμένεται ότι η 3^η μονάδα θα παραμένει συνεχώς ανοιχτή, δικαιολογώντας και το χαρακτηρισμό της ως ‘κύρια μονάδα βάσης’, και ότι οι μονάδες αιχμής θα λειτουργούν σε πλήρες φορτίο γιατί ο βαθμός απόδοσής τους σε χαμηλά φορτία είναι ιδιαίτερα ασύμφορος.

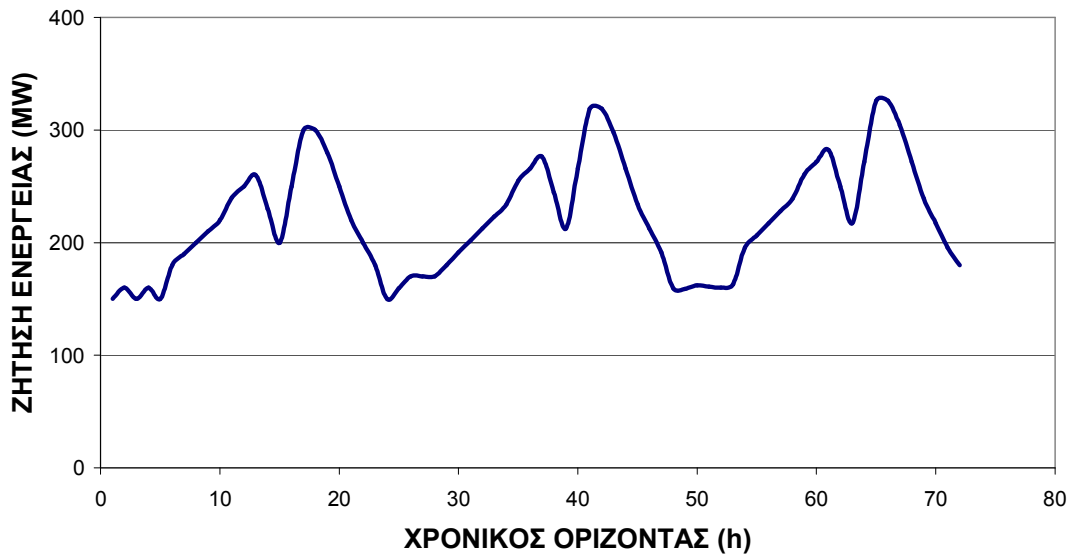
Αρχικές Καταστάσεις Μονάδων

Το παρελθόν όλων των μονάδων λαμβάνεται ελεύθερο με εξαίρεση την τρίτη μονάδα όπου θεωρούμε ότι βρίσκεται σε κατάσταση παραγωγής (ON) κατά τις τελευταίες 8 ώρες πριν από την έναρξη του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού. Αυτό σημαίνει ότι η κατάσταση των μονάδων 1,2,4,5 κατά τις πρώτες ώρες μπορεί να επιλεγεί ελεύθερα, χωρίς να χρειάζεται να υπακούει σε κάποιον περιορισμό που αφορά στη λειτουργία των μονάδων σε ώρες πριν τη έναρξη του ορίζοντα προγραμματισμού.

Χρονοσειρά Ζήτησης

Η κάλυψη της ζήτησης από όσες μονάδες βρίσκονται σε λειτουργία κάθε ώρα αποτελεί τον βασικότερο περιορισμό που επιβάλλεται από το διαχειριστή του συστήματος. Η χρονοσειρά της ζήτησης για το διάστημα των 72 ωρών παρουσιάζεται αναλυτικά στον πίνακα Π5.2, παρατίθεται όμως και το σχήμα 5.3 για καλύτερη εποπτεία.

ΖΗΤΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ 72 ΩΡΕΣ



Σχήμα 5.3

Εφαρμογή 1^η : Διαγραμματική απεικόνιση χρονοσειράς ζήτησης για χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού 72 ωρών.

ΩΡΑ	ΖΗΤΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (MWh)		
	1 ^η Ημέρα	2 ^η Ημέρα	3 ^η Ημέρα
1	150.00	159.45	159.00
2	160.00	170.08	162.00
3	150.00	170.00	161.00
4	160.00	170.08	160.00
5	150.00	180.00	162.99
6	180.00	191.34	195.59
7	190.00	201.97	206.46
8	200.00	212.60	217.32
9	210.00	223.23	228.19
10	220.00	233.86	239.06
11	240.00	255.12	260.79
12	250.00	265.75	271.65
13	260.00	276.38	282.52
14	230.00	244.49	249.92
15	200.00	212.60	217.32
16	250.00	265.75	271.65
17	300.00	318.90	325.98
18	300.00	318.90	325.98
19	280.00	297.64	304.25
20	250.00	265.75	271.65
21	220.00	233.86	239.06
22	200.00	212.60	217.32
23	180.00	191.34	195.59
24	150.00	159.45	180.00

Πίνακας Π5.2

Εφαρμογή 1^η : Χρονοσειρά ζήτησης για χρονικό ορίζοντα 72 ωρών (3 ημέρες)

Σύμφωνα με τον πίνακα Π5.2 και το σχήμα 5.3 βλέπουμε ότι καλύπτονται δύο βασικές απαιτήσεις. Πρώτον οι τιμές της ζήτησης βρίσκονται ανάμεσα στο συνολικό τεχνικό μέγιστο του σταθμού (άθροισμα των τεχνικών μεγίστων) και στο ολικό τεχνικό ελάχιστο του σταθμού (το μικρότερο από όλα τα τεχνικά ελάχιστα). Διαφορετικά η βελτιστοποίηση του προγράμματος δεν θα είχε νόημα γιατί σε κάποιες ώρες ο σταθμός εξ ορισμού δεν θα μπορούσε να καλύψει τη ζήτηση, (πρόκειται για απομονωμένο σύστημα). Δεύτερον η καμπύλη της ζήτησης ακολουθεί τις ανθρώπινες δραστηριότητες εφόσον γύρω στις 7:00 το πρωί αρχίζει να αυξάνεται η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, που φτάνει στο μέγιστο γύρω στο μεσημέρι και πέφτει κατά τη νύχτα, όταν οι ανάγκες για κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι μειωμένες.

5.2.2 Βελτιστοποίηση – Περίπτωση Α : χωρίς απαίτηση στρεφόμενης εφεδρεία

Για τη βελτιστοποίηση του προγράμματος λειτουργίας του παραπάνω θερμικού σταθμού με τη δεδομένη χρονοσειρά ζήτησης, (πίνακας Π5.2), θα χρησιμοποιηθεί ο **ICEA** που περιγράφηκε στο 4^ο κεφάλαιο.

Η διαδικασία ξεκινάει με την επιλογή των αποδεκτών ωριαίων σεναρίων λειτουργίας. Για να αποκλειστούν όσα αδυνατούν να καλύψουν τη ζήτηση λαμβάνεται ιδιαίτερα υψηλή ποινή, ίση με 10000 MWh. Έτσι υπάρχει η βεβαιότητα πως όλα τα ωριαία σενάρια που θα προκριθούν από αυτή τη φάση είναι εφικτά. Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της βέλτιστης ανάθεσης φορτίου στα παραπάνω εφικτά σενάρια όπως αυτή περιγράφηκε στην παράγραφο 4.3.2, όπου επιλέγεται επίπεδο ανάλυσης 10 σημείων για την κάθε μονάδα. Αναφέρεται ότι ο αριθμός των ωριαίων αποδεκτών σεναρίων είναι 825 (όταν ο συνολικός αριθμός ωριαίων σεναρίων, για 5 μονάδες και 72 ώρες, είναι : $2^5 \cdot 72 = 2304$). Οι αριθμοί αυτοί προκύπτουν αθροίζοντας όλους τους πιθανούς συνδυασμούς λειτουργίας των μονάδων για κάθε ώρα ξεχωριστά.

Το επόμενο βήμα είναι να γίνει ο καθορισμός της λειτουργίας του εξελικτικού αλγορίθμου. Στον πίνακα Π5.3 παρουσιάζονται όλα τα βασικά δεδομένα που απαιτούνται για την εκκίνηση και λειτουργία του. Επιπλέον χρησιμοποιείται χρονική κατάτμηση 3^{ων} τμημάτων, (βλ. παράγραφο 4.3.3.2), για κάθε μία ημέρα δηλαδή εφαρμόζεται αυτόνομος εξελικτικός αλγόριθμος και, τέλος, στην 1^η γενιά των απογόνων εισάγεται η λύση που απαρτίζεται από τα οικονομικότερα ωριαία σενάρια λειτουργίας, (παράγραφος 4.3.3.1).

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το ολικό λειτουργικό κόστος, **TOC**, της λύσης που προκύπτει από τη βελτιστοποίηση της κάθε ώρα ξεχωριστά ισούται με **40029.41 MWh**, όπου το κόστος κατανάλωσης καυσίμου είναι 39595.98 MWh, το κόστος λόγω των εκκινήσεων και των σβέσεων των μονάδων είναι 321 MWh και τέλος το κόστος λόγω παραβίασης των λειτουργικών περιορισμών, (κόστος ποινής), είναι 112.43 MWh. Η λύση αυτή είναι μη-εφαρμόσιμη καθώς παραβιάζονται για κάποιες ώρες οι λειτουργικοί περιορισμοί ορισμένων μονάδων (για το λόγο αυτό άλλωστε ο όρος ποινής είναι μη μηδενικός).

20	Πληθυσμός συνόλου γονέων (μ)
60	Πληθυσμός συνόλου απογόνων (λ)
0.90	Πιθανότητα διασταύρωσης
0.10	Πιθανότητα μετάλλαξης (αρχική τιμή)
50	Πρώτη γενιά όπου αρχίζει να μειώνεται η πιθανότητα της μετάλλαξης
0.02	Πιθανότητα μετάλλαξης (τελική τιμή)
4000	Γενιά πέρα από την οποία η πιθανότητα της μετάλλαξης παραμένει σταθερή και ίση με την τελική της τιμή
0.10	Πιθανότητα μετάλλαξης (ειδική τιμή)
400	Αριθμός γενεών όπου η βέλτιστη λύση δεν αλλάζει => επιβάλλεται η ειδική τιμή της πιθανότητας μετάλλαξης
NAI	Εισαγωγή λύσης με βέλτιστα ωριαία σενάρια λειτουργίας (NAI/OXI)
3	Αριθμός χρονικών κατατιμήσεων

Πίνακας Π5.3

Εφαρμογή 1^η (A): Δεδομένα λειτουργίας εξελικτικού αλγορίθμου. Πραγματοποιείται εισαγωγή της λύσης με τα βέλτιστα ωριαία σενάρια λειτουργίας στην 1^η γενιά καθώς επίσης και χρονικά κατατετημημένη βελτιστοποίηση 3^{ων} τμημάτων. Για τον τρόπο επιβολής της μετάλλαξης ο αναγνώστης παραπέμπεται στις παραγράφους 2.2.4.3 και 4.3.3.5.

Στοχαστικότητα Αλγορίθμου Βελτιστοποίησης

Σε προηγούμενες παραγράφους έχει περιγραφεί αναλυτικά η στοχαστική φύση των εξελικτικών αλγορίθμων, η εξάρτησή τους από τις γεννήτριες τυχαίων αριθμών και την πιθανότητα εγκλωβισμού τους σε κάποιο τοπικό ακρότατο. Για τους λόγους αυτούς γίνονται 20 διαφορετικές δοκιμές για την εύρεση της βέλτιστης ένταξης των μονάδων στην παραγωγή και κάθε φορά επιλέγεται άλλη τιμή για τον αριθμό που εκκινεί την ψευδογεννήτρια τυχαίων αριθμών. Ο μέγιστος αριθμός γενιών ανά τμήμα έχει καθοριστεί στις 4000 γενιές. Η κάθε μία λύση υπολογίζεται σε λιγότερο από ένα λεπτό όταν ο 2LEA χρειάζεται περίπου 25 λεπτά. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα Π5.4.

-	Κόστος (MWh)	Το πλήθος των δοκιμών που εμφανίζουν την κάθε λύση :
Καλύτερη λύση	39967.22	17
Χειρότερη λύση	39973.49	3

Πίνακας Π5.4

Εφαρμογή 1^η (A): Κόστος λύσεων για 20 διαφορετικές δοκιμές χρήσης του ICEA με χρονικά κατατετημημένη βελτιστοποίηση 3^{ων} τμημάτων (δεν υπάρχει απαίτηση σε στρεφόμενη εφεδρεία). Ο μέγιστος αριθμός γενεών ανά τμήμα έχει οριστεί στις 4000.

Περιγραφή της Βέλτιστης Λύσης (TOC = 39967.22 MWh)

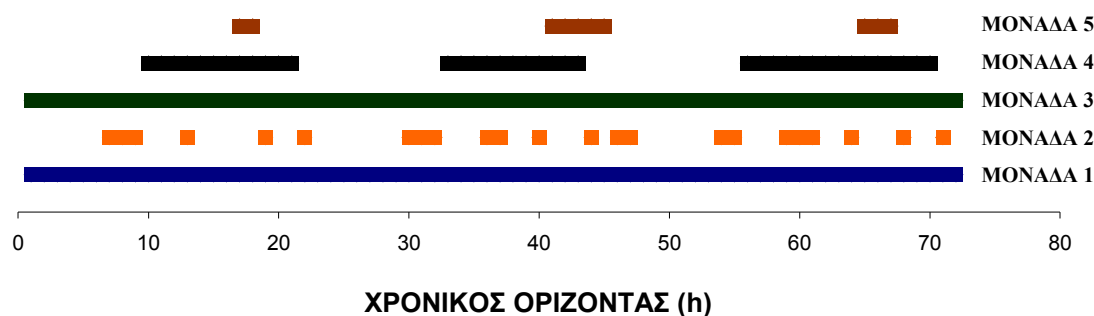
Το ολικό λειτουργικό κόστος ,TOC, της βέλτιστης λύσης ισούται με **39967.22 MWh**, όπου το κόστος κατανάλωσης καυσίμου είναι 39659.22 MWh, το κόστος λόγω των εκκινήσεων και των σβέσεων των μονάδων είναι 308 MWh και τέλος το κόστος λόγω παραβίασης των λειτουργικών περιορισμών, (κόστος ποινής), είναι προφανώς μηδενικό. Στον πίνακα Π.5.5 παρουσιάζονται αναλυτικά οι καταστάσεις s των μονάδων για καθεμιά ώρα του χρονικού ορίζοντα ενώ για καλύτερη εποπτεία παρατίθεται και το σχήμα 5.4.

ΩΡΕΣ (h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Μονάδα 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Μονάδα 2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
Μονάδα 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Μονάδα 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Μονάδα 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
ΩΡΕΣ (h)	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Μονάδα 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Μονάδα 2	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
Μονάδα 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Μονάδα 4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Μονάδα 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
ΩΡΕΣ (h)	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Μονάδα 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Μονάδα 2	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
Μονάδα 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Μονάδα 4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Μονάδα 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0

Πίνακας Π5.5

Εφαρμογή 1^η (Α): Πρόγραμμα λειτουργίας σταθμού 5 μονάδων για χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού 72 ωρών χωρίς απαίτηση σε στρεφόμενη εφεδρεία.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ Εφαρμογή 1η - Περίπτωση Α



Σχήμα 5.4

Εφαρμογή 1^η (Α): Διαγραμματική απεικόνιση προγράμματος λειτουργίας σταθμού 5 μονάδων για χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού 72 ωρών χωρίς απαίτηση σε στρεφόμενη εφεδρεία. Μία μονάδα βρίσκεται σε λειτουργία (ON) τις ώρες που γεμίζει η ράβδος.

Σύμφωνα με το πρόγραμμα λειτουργίας του πίνακα Π5.5 μπορεί να υπολογιστεί το μέσο επίπεδο ισχύος, η μέση φόρτιση και οι συνολικές ώρες λειτουργίας της κάθε μονάδας, (πίνακας Π5.6). Όπως ήταν αναμενόμενο η μονάδα 3 βρίσκεται σε κατάσταση ON καθ' όλη τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα καθώς έχει τον καλύτερο βαθμό απόδοσης σε σύγκριση με όλες τις άλλες μονάδες ακόμα και σε μερικά φορτία. Το μέσο φορτίο λειτουργίας της προκύπτει ίσο με 85.79% , επιτρέποντας στις υπόλοιπες μονάδες να λειτουργούν, σχεδόν πάντοτε, σε πλήρες φορτίο (είναι οικονομικότερο οι 'ακριβότερες' μονάδες να εργάζονται σε πλήρη ισχύ). Συνεπώς οι δύο μονάδες αιχμής λειτουργούν μόνο στο τεχνικό τους μέγιστο επειδή είναι ιδιαίτερα ασύμφορο να λειτουργούν σε μικρότερο φορτίο. Παράδοξο αποτελεί το γεγονός πως η μονάδα 1 λειτουργεί ολόκληρο το 72ωρο, αν και είναι μονάδα που χαρακτηρίζεται ως αιχμής, ενώ οι μονάδες 4 και 5 ενεργοποιούνται λιγότερες ώρες, όταν η ζήτηση είναι υψηλή, παρόλο που αναφέρονται ως μονάδες βάσης.

A/A	Μέσο επίπεδο ισχύος (MW)	Φορτίσεις %	Ώρες Λειτουργίας (h)
Μονάδα 1	50.000	100.00%	72
Μονάδα 2	30.500	100.00%	23
Μονάδα 3	113.503	85.79%	72
Μονάδα 4	73.492	97.99%	38
Μονάδα 5	75.000	100.00%	10

Πίνακας Π5.6

Εφαρμογή 1^η (Α): Στον πίνακα παρουσιάζονται οι φορτίσεις των μονάδων, το μέσο επίπεδο ισχύος τους και οι συνολικές ώρες λειτουργίας τους (δεν υπάρχει απαίτηση σε στρεφόμενη εφεδρεία).

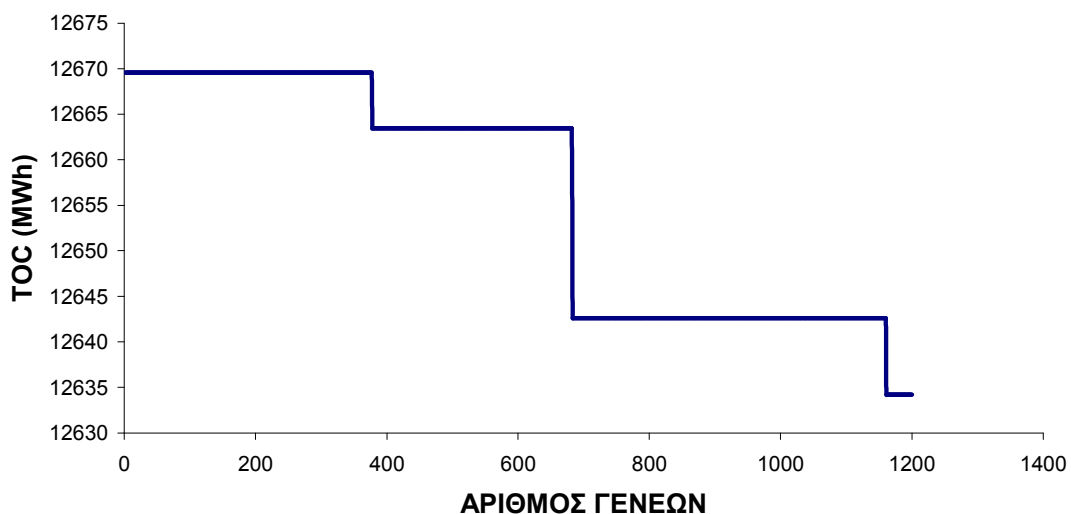
Τελευταίος υπολογισμός για την αξιολόγηση της βέλτιστης λύσης είναι ο συνολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης. Ένας τέτοιος υπολογισμός είναι εύκολος μιας και όλα τα κόστη υπολογίζονται σε MWh. Η συνολική ζήτηση των 72 ωρών είναι 16016.41 MWh και το ολικό κόστος λειτουργίας ίσο με 39967.22 MWh, επομένως ο βαθμός απόδοσης προκύπτει ίσος με (σχέση 5.1):

$$\eta_{(3 \text{ days})} = \frac{\sum_{i=1}^{72} d_i}{TOC} = \frac{16016.41}{39967.22} = 40.07\% \quad (5.1)$$

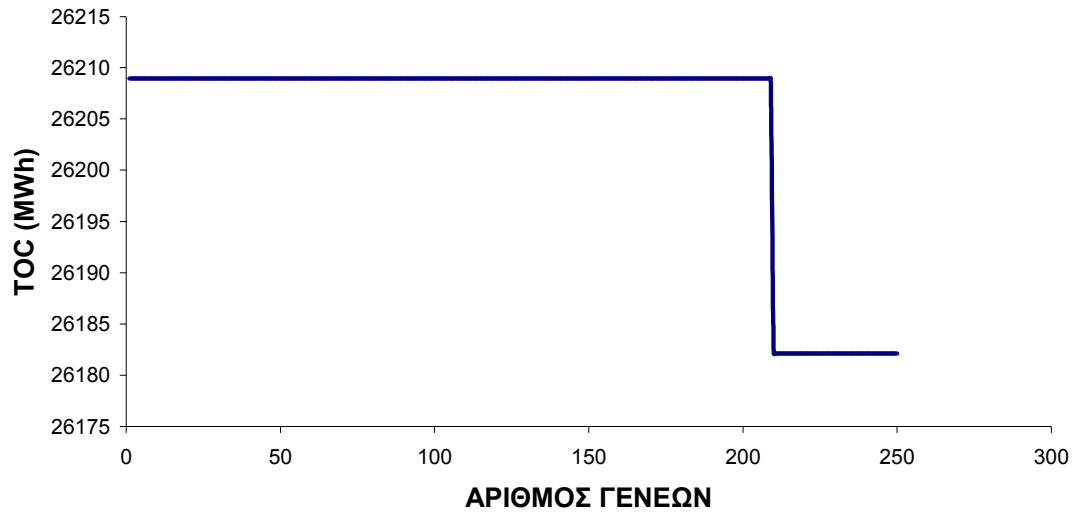
Πορεία Σύγκλισης του ICEA

Για την εύρεση της παραπάνω λύσης έχει χρησιμοποιηθεί χρονικά κατατεμημένη βελτιστοποίηση 3^{ov} τμημάτων. Στο κάθε ένα τμήμα, όπως έχει αναφερθεί, εφαρμόζεται αυτόνομος εξελικτικός αλγόριθμος, η αξιολόγηση της κάθε λύσης όμως πραγματοποιείται από την αρχή του χρονικού ορίζοντα έως την τελευταία ώρα του δεδομένου κάθε φορά τμήματος. Για παράδειγμα, το δεύτερο τμήμα του χρονικού ορίζοντα περιλαμβάνει τις ώρες 25-48, η αξιολόγηση όμως της λύσης γίνεται για τις ώρες 1-48. Στα παρακάτω διαγράμματα, σχήμα 5.5, παρουσιάζεται η πορεία σύγκλισης του ICEA για το κάθε τμήμα ξεχωριστά και στο τελευταίο διάγραμμα η σύγκλιση του ICEA που εφαρμόζεται μετέπειτα για ολόκληρο το χρομόσωμα.

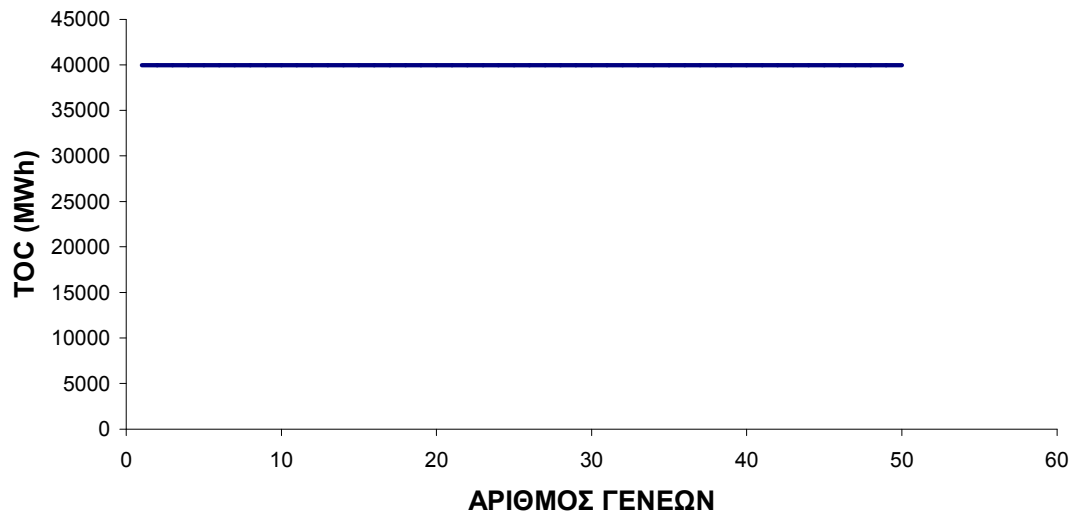
ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (1η ΗΜΕΡΑ)



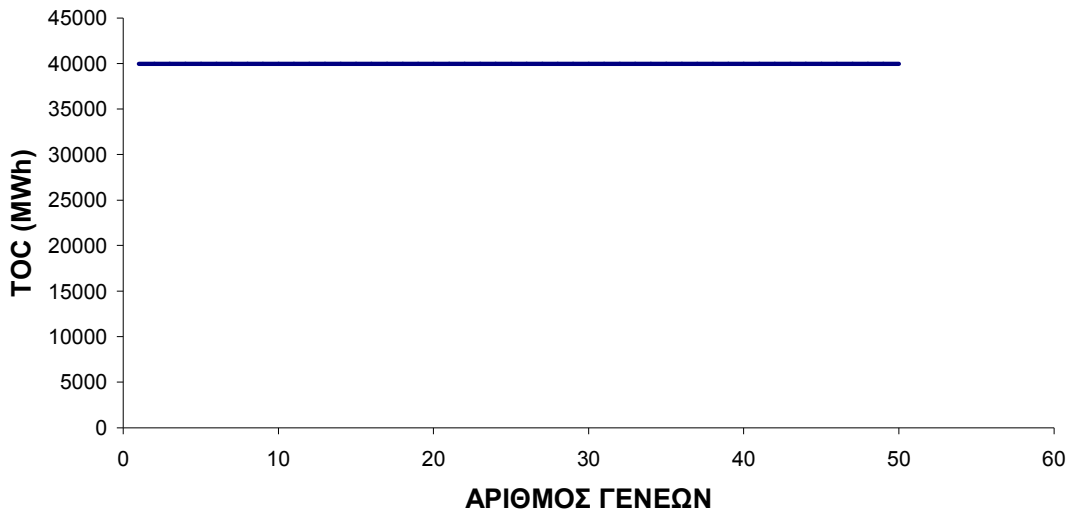
ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (2η ΗΜΕΡΑ)



ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (3η ΗΜΕΡΑ)



ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (ΠΛΗΡΕΣ ΧΡΩΜΟΣΩΜΑ – 72 ΩΡΕΣ)



Σχήμα 5.5

Εφαρμογή 1^η (Α): Πορεία σύγκλισης του χρονικά κατατετημένου ICEA για την περίπτωση όπου δεν υπάρχει απαίτηση σε στρεφόμενη εφεδρεία (3 τμήματα των 24 ωρών).

Στο 1^ο διάγραμμα εφαρμόζεται ο ICEA για τις ώρες 1 – 24 και η αξιολόγηση της λύσης γίνεται για τις ώρες 1 – 24. Η βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 1161^η γενιά με κόστος 12642.58 MWh.

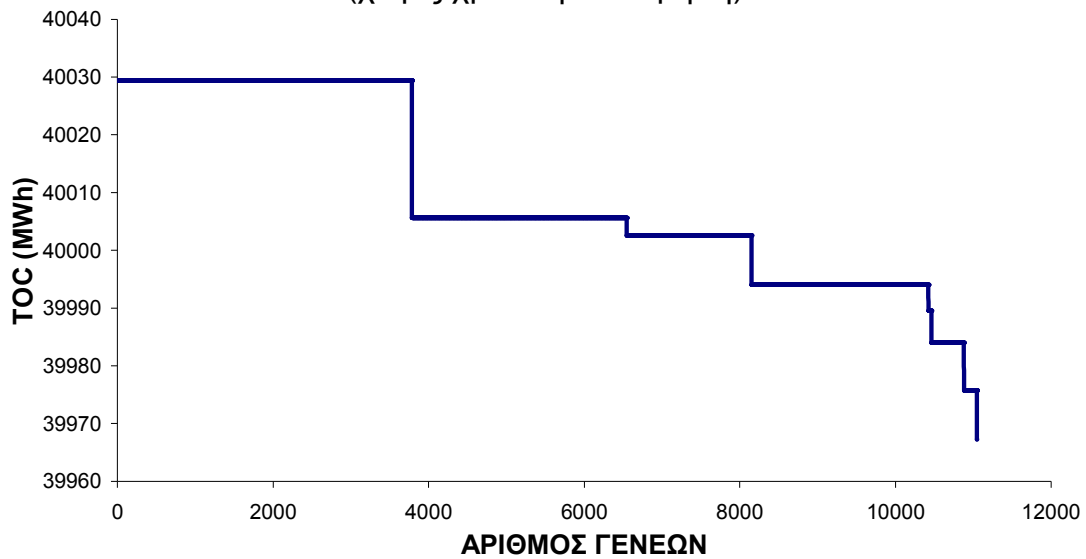
Στο 2^ο διάγραμμα εφαρμόζεται ο ICEA για τις ώρες 25 – 48 και η αξιολόγηση της λύσης γίνεται για τις ώρες 1 – 48. Η βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 210^η γενιά με κόστος 26182.12 MWh.

Στο 3^ο διάγραμμα εφαρμόζεται ο ICEA για τις ώρες 49 – 72 και η αξιολόγηση της λύσης γίνεται για τις ώρες 1 – 72. Η βέλτιστη λύση εντοπίζεται από την 1^η γενιά με κόστος 39967.22 MWh, (δεν αλλάζει δηλαδή η λύση που έχει εισαχθεί στην αρχικοποίηση του αλγορίθμου).

Στο 4^ο διάγραμμα εφαρμόζεται ο ICEA για ολόκληρο το χρονικό ορίζοντα των 72 ωρών. Η βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 1^η γενιά με κόστος 39967.22 MWh, (η λύση δεν επιδέχεται περαιτέρω βελτίωση).

Για να αναδειχθεί το πλεονέκτημα του χρονικά κατατετημένου ICEA στον ταχύτερο εντοπισμό της βέλτιστης λύσης εξετάζεται η εφαρμογή του ICEA χωρίς χρονική κατάτμηση, εξελίσσοντας δηλαδή εξαρχής το πλήρες χρωμόσωμα των 72 ακεραίων. Χρησιμοποιώντας λοιπόν τον ίδιο ακριβώς αλγόριθμο, με τα ίδια δεδομένα, εισάγοντας και τη λύση όπου έχει πραγματοποιηθεί βελτιστοποίηση της κάθε ώρας ξεχωριστά, και πραγματοποιώντας αρκετές δοκιμές, ο ICEA καταφέρνει, στην ταχύτερη δοκιμή, να εντοπίσει την ίδια λύση στην 11049^η γενιά (σχήμα 5.6) καταναλώνοντας πολλαπλάσιο υπολογιστικό χρόνο. Όταν μάλιστα δεν εισάγεται η λύση με τα βέλτιστα ωριαία σενάρια στην πρώτη γενιά των απογόνων ο αλγόριθμος δεν καταφέρνει να εντοπίσει τη βέλτιστη λύση ούτε μετά από 100000 γενιές. Ενδεικτικά αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα Π5.7.

ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ
(χωρίς χρονική κατάτμηση)



Σχήμα 5.6

Εφαρμογή 1^η (Α): Πορεία σύγκλισης του ICEA, χωρίς χρονική κατάτμηση, για την περίπτωση όπου δεν υπάρχει απαίτηση σε στρεφόμενη εφεδρεία.

Δοκιμή	Κόστος (MWh)	Γενιά εντοπισμού της λύσης
1 ^η	39988.43	14803
2 ^η	39990.55	22375
3 ^η	39982.16	32082
4 ^η	39985.45	77935
5 ^η	39986.09	44243

Πίνακας Π5.7

Εφαρμογή 1^η (Α): Κόστος λύσεων για 5 διαφορετικές δοκιμές χρήσης του ICEA όταν δεν χρησιμοποιείται χρονική κατάτμηση ούτε εισάγεται η λύση με τα βέλτιστα ωριαία σενάρια λειτουργίας.

5.2.3 Βελτιστοποίηση – Περίπτωση (B) : η απαίτηση για στρεφόμενη εφεδρεία ισούται με το 10% της ωριαίας ζήτησης

Στην παρούσα περίπτωση θα επιδιωχθεί η βελτιστοποίηση του προγράμματος λειτουργίας του παραπάνω θερμικού σταθμού, (πίνακας Π5.1), με τη δεδομένη χρονοσειρά ζήτησης, (πίνακας Π5.2), χρησιμοποιώντας τον **ICEA** που περιγράφηκε στο 4^ο κεφάλαιο. Ο ICEA εκκινεί υπό τις ίδιες παραμέτρους που περιγράφηκαν στην παράγραφο 5.2.2 και τον πίνακα Π5.3 αλλά ταυτόχρονα προστίθεται ο περιορισμός για ύπαρξη στρεφόμενης εφεδρείας. Συγκεκριμένα οι μονάδες του θερμικού σταθμού πρέπει να μπορούν, κάθε ώρα, να καλύπτουν τη ζήτηση προσαυξημένη κατά ένα ποσοστό $Sr = 10\%$.

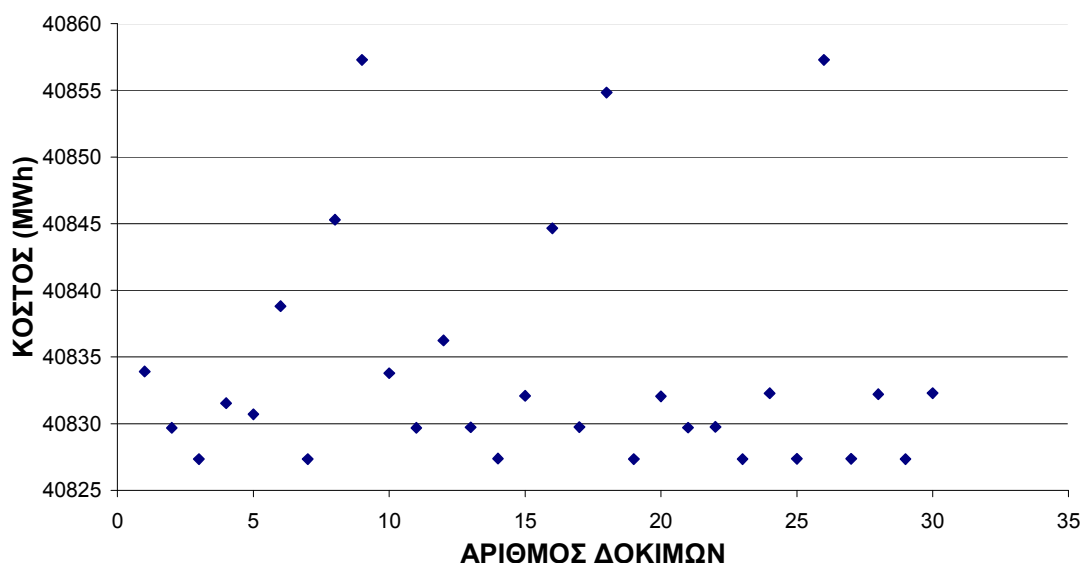
Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 4.3.4, σε περίπτωση που παραβιάζεται ο περιορισμός του μεγέθους της στρεφόμενης εφεδρείας, επιβάλλεται ποινή στην υποψήφια λύση η οποία καθορίζεται από τον συντελεστή **SRPC** (Spinning Reserve Penalty Coefficient). Η τελική ποινή προκύπτει από τη σχέση (4.5) :

$$V_{SpinRes} = SRPC \cdot \left[\sum_{j=1}^K (1 + Sr) \cdot d_j - \sum_{i=1}^{Av} P_{MAXi,j} \right], \forall j \in [1, T] \quad (4.5)$$

όπου Av ο αριθμός των διαθέσιμων μονάδων. Υπενθυμίζεται ότι το σύνολο των διαθέσιμων μονάδων αποτελείται από τις μονάδες που βρίσκονται σε κατάσταση ON και τις μονάδες που, ενώ βρίσκονται σε κράτηση, μπορούν να εκκινήσουν άμεσα ($T_{STUP} = 0$).

Στην εφαρμογή αυτή θα ζητηθεί η κάλυψη σε στρεφόμενη εφεδρεία να είναι απόλυτη, να μην παραβιάζεται δηλαδή ο περιορισμός καμία ώρα ούτε στο ελάχιστο. Για το λόγο αυτό η τιμή του **SRPC** λαμβάνει ιδιαίτερα υψηλή τιμή ίση με 500 MWh. Πραγματοποιώντας 30 δοκιμές με τον χρονικά κατατετημημένο ICEA 3^{ov} τμημάτων, με τον μέγιστο αριθμό γενιών ανά τμήμα να είναι οι 15000 γενιές, προκύπτουν τα αποτελέσματα του παρακάτω σχήματος (5.7) :

ΚΟΣΤΟΣ ΛΥΣΕΩΝ ΓΙΑ 30 ΔΟΚΙΜΕΣ



Σχήμα 5.7

Εφαρμογή 1^η (B): Κόστος λύσεων για 30 διαφορετικές δοκιμές χρήσης του ICEA εφαρμόζοντας χρονικά κατατετημένη βελτιστοποίηση 3^{ωv} τμημάτων, (υπάρχει απαίτηση σε στρεφόμενη εφεδρεία). Παρατηρείται ιδιαίτερα υψηλή διασπορά λύσεων. Ο μέγιστος αριθμός γενεών ανά τμήμα έχει οριστεί στις 15000.

Είναι εμφανές πως ο αλγόριθμος αδυνατεί συχνά να εντοπίσει την ολικά βέλτιστη λύση εξαιτίας του νέου περιορισμού για την στρεφόμενη εφεδρεία που έχει επιβληθεί στο σύστημα. Στον πίνακα Π5.8 παρουσιάζονται τα κόστη της καλύτερης και της χειρότερης λύσης από το σύνολο των 30 δοκιμών.

-	Κόστος (MWh)
Καλύτερη λύση	40827.33
Χειρότερη λύση	40854.83

Πίνακας Π5.8

Εφαρμογή 1^η (B): Παρουσιάζεται το κόστος της καλύτερης και της χειρότερης λύσης από το σύνολο των 30 διαφορετικών δοκιμών χρήσης του ICEA εφαρμόζοντας χρονικά κατατετημένη βελτιστοποίηση 3^{ωv} τμημάτων, (υπάρχει απαίτηση σε στρεφόμενη εφεδρεία). Ο μέγιστος αριθμός γενεών ανά τμήμα έχει οριστεί στις 15000.

Περιγραφή της Βέλτιστης Λύσης (TOC = 40827.33 MWh)

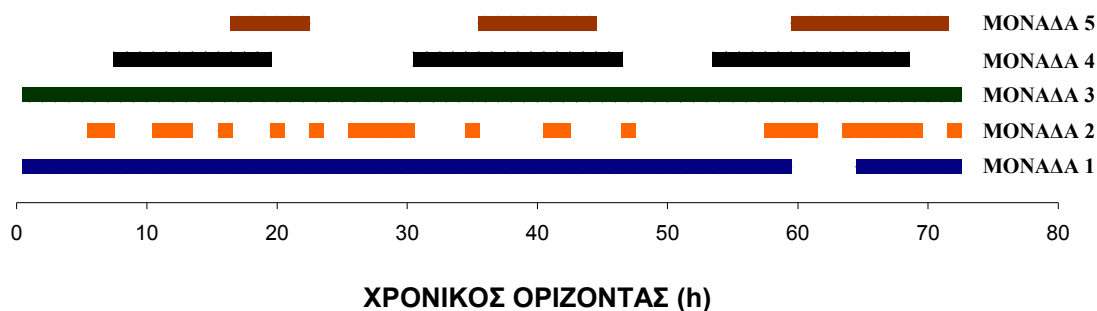
Το ολικό λειτουργικό κόστος, **TOC**, της βέλτιστης λύσης ισούται με **40827.33 MWh**, όπου το κόστος κατανάλωσης καυσίμου είναι 40528.83 MWh, το κόστος λόγω των εκκινήσεων και των σβέσεων των μονάδων είναι 298.5 MWh και τέλος το κόστος λόγω παραβίασης των λειτουργικών περιορισμών ή μη κάλυψης του περιορισμού της στρεφόμενης εφεδρείας, (κόστος ποινής), είναι προφανώς μηδενικό. Παρατηρούμε ότι οι τιμές αυτές είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις τιμές που προέκυψαν χωρίς να λαμβάνεται υπόψη στρεφόμενη εφεδρεία, πράγμα λογικό καθώς η λύση πρέπει πλέον να καλύπτει έναν ακόμα περιορισμό. Επομένως, υποχρεωτικά κάποιες από τις μονάδες θα εργάζονται σε μικρότερη φόρτιση άρα και με μικρότερο βαθμό απόδοσης. Στον πίνακα Π.5.9 παρουσιάζονται αναλυτικά οι καταστάσεις **s** των μονάδων για την κάθε μία ώρα του χρονικού ορίζοντα ενώ, για καλύτερη εποπτεία, παρατίθεται και το σχήμα 5.8.

ΩΡΕΣ (h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Μονάδα 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Μονάδα 2	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
Μονάδα 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Μονάδα 4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Μονάδα 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
ΩΡΕΣ (h)	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Μονάδα 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Μονάδα 2	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0
Μονάδα 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Μονάδα 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Μονάδα 5	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
ΩΡΕΣ (h)	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Μονάδα 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Μονάδα 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
Μονάδα 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Μονάδα 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Μονάδα 5	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

Πίνακας Π5.9

Εφαρμογή 1^η (B): Πρόγραμμα λειτουργίας σταθμού 5 μονάδων για χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού 72 ωρών με περιορισμό στρεφόμενης εφεδρείας.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ
Εφαρμογή 1η - Περίπτωση Β



Σχήμα 5.8

Εφαρμογή 1^η (B): Διαγραμματική απεικόνιση προγράμματος λειτουργίας σταθμού 5 μονάδων για χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού 72 ωρών με περιορισμό στρεφόμενης εφεδρείας. Μία μονάδα βρίσκεται σε λειτουργία (ON) τις ώρες που γεμίζει η ράβδος.

Στη συνέχεια υπολογίζεται το μέσο επίπεδο ισχύος, η μέση φόρτιση και οι συνολικές ώρες λειτουργίας της κάθε μονάδας, (πίνακας Π5.6). Όπως ήταν αναμενόμενο η μονάδα 3 λειτουργεί και πάλι καθόλη τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού, σε αρκετά μικρότερο μέσο φορτίο όμως σε σχέση με την περίπτωση Α όπου δεν απαιτείται στρεφόμενη εφεδρεία. Οι μονάδες 4,5 που χαρακτηρίζονται ως μονάδες βάσεις εργάζονται περισσότερες ώρες αλλά σε μικρότερο φορτίο. Οι μονάδες αιχμής 1 και 2 συνεχίζουν να λειτουργούν μόνο στο τεχνικό τους μέγιστο μιας και είναι ιδιαίτερα ασύμφορο να λειτουργούν σε μικρότερο φορτίο. Συμπερασματικά, αναφέρουμε πως μόνο οι μονάδες βάσεις διατηρούν αχρησιμοποίητη δυναμικότητα και επομένως μόνο αυτές συνεισφέρουν στην κάλυψη της στρεφόμενης εφεδρείας. Οι μονάδες αιχμής (σύμφωνα με το πώς στρογγυλοποιήθηκαν τα δεδομένα τους στο μοντέλο) ακόμα και όταν είναι σε κράτηση δεν συμμετέχουν στην στρεφόμενη εφεδρεία γιατί έχουν μη μηδενικό ελάχιστο χρόνο έναυσης.

A/A	Μέσο επίπεδο ισχύος (MW)	Φορτίσεις %	Ώρες Λειτουργίας (h)
Μονάδα 1	50.000	100.00%	67
Μονάδα 2	30.500	100.00%	28
Μονάδα 3	99.583	75.27%	72
Μονάδα 4	64.691	86.26%	35
Μονάδα 5	67.950	90.60%	35

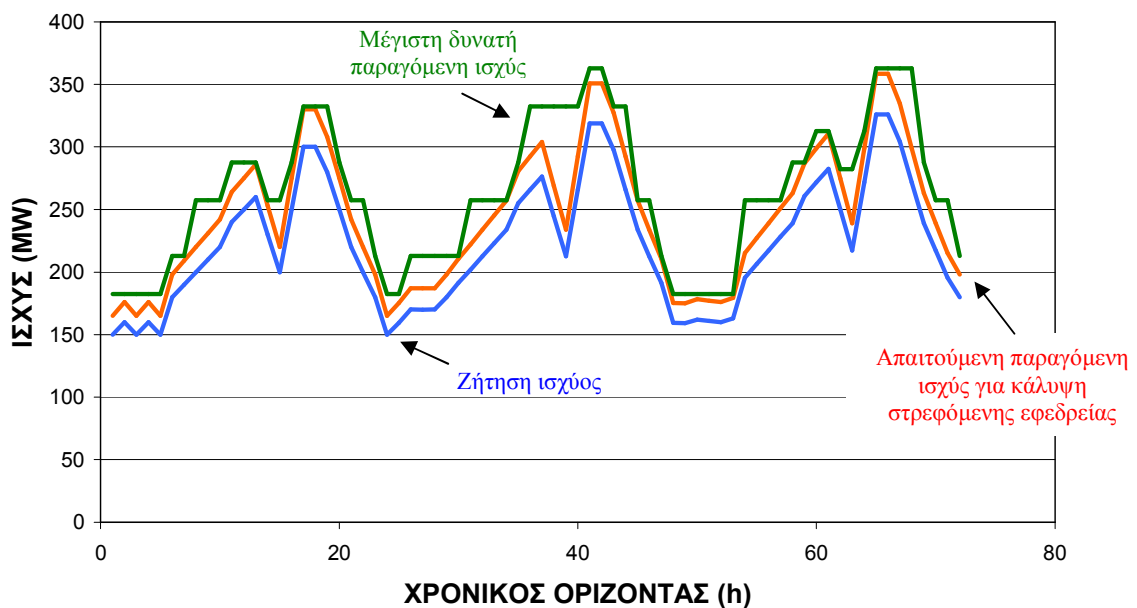
Πίνακας Π5.10

Εφαρμογή 1^η (B): Στον πίνακα παρουσιάζονται οι φορτίσεις των μονάδων, το μέσο επίπεδο ισχύος τους και οι συνολικές ώρες λειτουργίας τους για τις λύσεις της βελτιστοποίησης (περίπτωση με περιορισμό στρεφόμενης εφεδρείας).

Όπως και στην περίπτωση Α και πάλι υπολογίζεται ο συνολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης. Η συνολική ζήτηση των 72 ωρών είναι 16016.41 MWh και το ολικό κόστος λειτουργίας ίσο με 40827.33 MWh, επομένως ο βαθμός απόδοσης δίνεται από τη σχέση 5.2. Φυσικά προκύπτει μικρότερος σε σχέση με την περίπτωση Α καθώς με την προσθήκη του περιορισμού για τη στρεφόμενη εφεδρεία ενισχύεται η ασφάλεια του δικτύου έναντι αιφνίδιων βλαβών και απότομης αύξησης της ζήτησης αλλά αυξάνεται και το λειτουργικό κόστος του σταθμού. Είναι :

$$\eta_{(3 \text{ days})} = \frac{\sum_{i=1}^{72} d_i}{TOC} = \frac{16016.41}{40827.33} = 39.23\% \quad (5.2)$$

Τέλος, στο σχήμα 5.9 δίνεται η καμπύλη του ωριαίου τεχνικού μεγίστου του συνόλου των διαθέσιμων μονάδων ώστε να γίνει σαφές πως καλύπτεται η εφεδρεία. Παρατηρούμε ωστόσο πως για κάποιες ώρες η κάλυψη αυτή είναι οριακή πράγμα που σημαίνει πως αν είχε καθοριστεί υψηλότερη τιμή εφεδρείας η δεδομένη λύση δεν θα ήταν αποδεκτή.



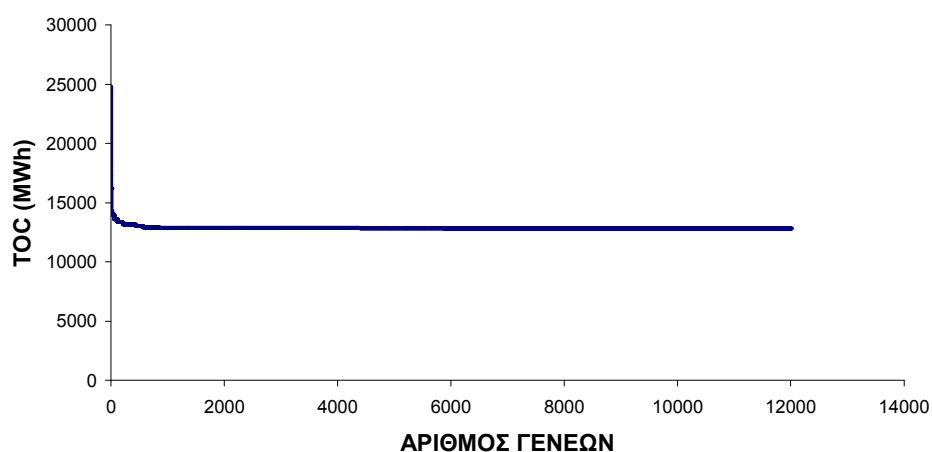
Σχήμα 5.8

Εφαρμογή 1^η (B): Παρουσιάζονται οι καμπύλες της ζήτησης, της απαιτούμενης ισχύος ώστε να καλύπτεται η τιμή της εφεδρείας και τέλος η καμπύλη της μέγιστης δυνατής ωριαίας παραγόμενης ισχύος.

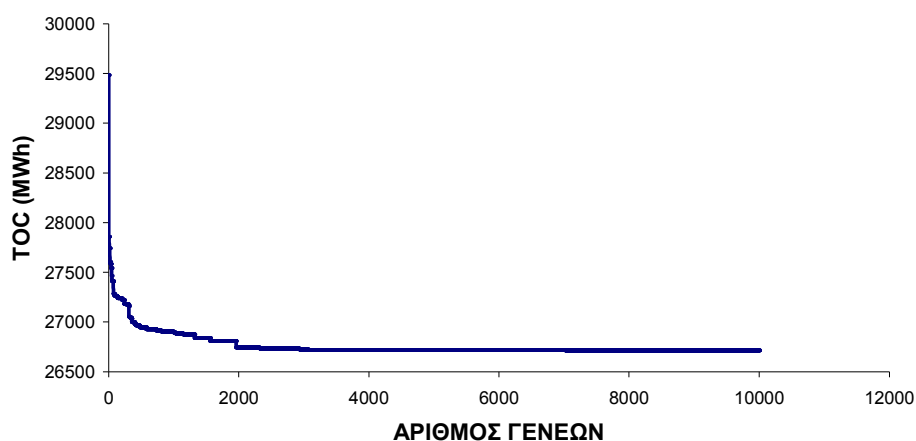
Πορεία Σύγκλισης του ICEA

Για την εύρεση της παραπάνω λύσης έχει χρησιμοποιηθεί χρονικά κατατεταγμένη βελτιστοποίηση 3^{ov} τμημάτων όμοια με την περίπτωση Α. Στα παρακάτω διαγράμματα, σχήμα 5.9 παρουσιάζεται η πορεία της σύγκλισης για το κάθε τμήμα ξεχωριστά και στο τελευταίο διάγραμμα η σύγκλιση του ICEA που εφαρμόζεται μετέπειτα για ολόκληρο το χρωμόσωμα.

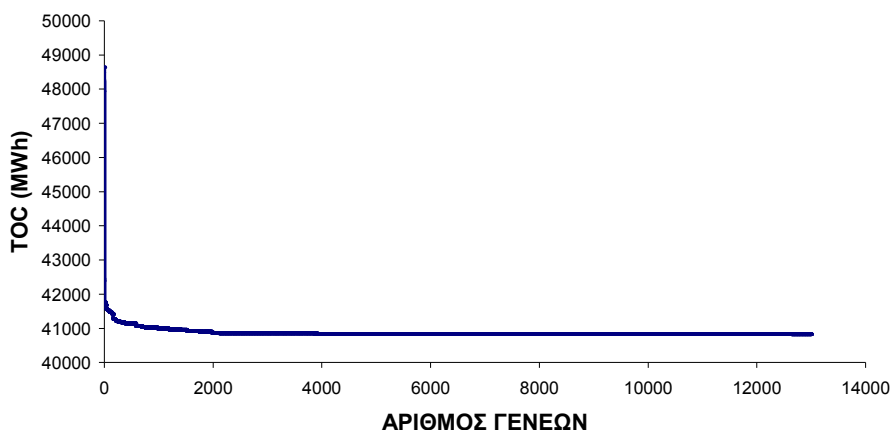
ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (1η ΗΜΕΡΑ)



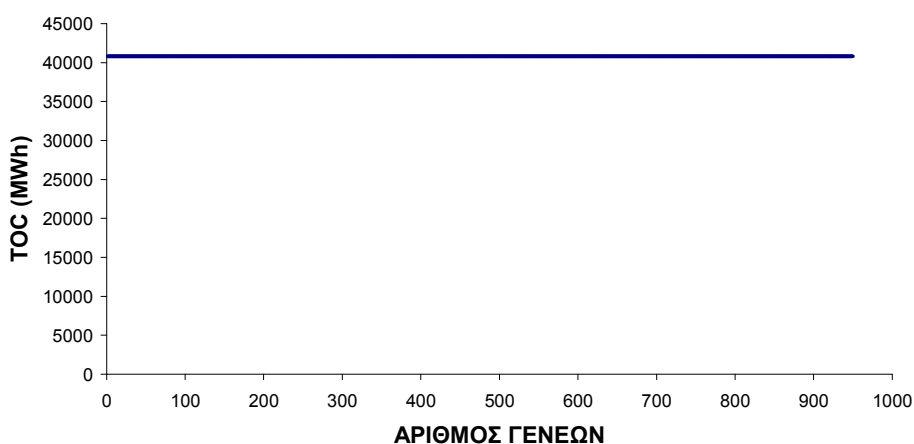
ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (2η ΗΜΕΡΑ)



ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (3η ΗΜΕΡΑ)



ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (ΠΛΗΡΕΣ ΧΡΩΜΟΣΩΜΑ - 72 ΩΡΕΣ)



Σχήμα 5.9

Εφαρμογή 1^η (B): Πορεία σύγκλισης του χρονικά κατατετημένου ICEA για την περίπτωση όπου υπάρχει απαίτηση σε στρεφόμενη εφεδρεία (3 τμήματα των 24 ωρών).

Στο 1^ο διάγραμμα εφαρμόζεται ο ICEA για τις ώρες 1 – 24 και η αξιολόγηση της λύσης γίνεται για τις ώρες 1 – 24. Η βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 11907^η γενιά με κόστος 12824.63 MWh.

Στο 2^ο διάγραμμα εφαρμόζεται ο ICEA για τις ώρες 25 – 48 και η αξιολόγηση της λύσης γίνεται για τις ώρες 1 – 48. Η βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 7015^η γενιά με κόστος 26713.28 MWh.

Στο 3^ο διάγραμμα εφαρμόζεται ο ICEA για τις ώρες 49 – 72 και η αξιολόγηση της λύσης γίνεται για τις ώρες 1 – 72. Η βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 12634^η γενιά με κόστος 40827.33 MWh.

Στο 4^ο διάγραμμα εφαρμόζεται ο ICEA για ολόκληρο το χρονικό ορίζοντα των 72 ωρών. Η βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 1^η γενιά με κόστος 40827.33 MWh, (η λύση δεν επιδέχεται περαιτέρω βελτίωση).

5.3 Εφαρμογή 2^η : Έξι Μονάδες – Προγραμματισμός 7ημέρου

Στην εφαρμογή αυτή θα εξετασθεί η περίπτωση της βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής έξι μονάδων για μία βδομάδα (168 ώρες). Η εφαρμογή αυτή αρχικά χρησιμοποιήθηκε στη δημοσίευση [69] η οποία επιλύει το πρόβλημα μέσω μίας αιτιοκρατικής μεθόδου που συνδυάζει τις τεχνικές του δυναμικού προγραμματισμού και της ένταξης κατά σειρά προτεραιότητας. Έπειτα η ίδια εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε στη διδακτορική διατριβή [52] η οποία παρουσιάζει τον διεπίπεδο εξελικτικό αλγόριθμο της παραγράφου 3.2.7 ώστε να γίνει σύγκριση αποτελεσμάτων. Συντομογραφικά η πρώτη μέθοδος αναφέρεται ως DP και η δεύτερη ως 2LEA. Θα εξεταστούν 2 διαφορετικές περιπτώσεις, στην πρώτη περίπτωση δεν λαμβάνονται υπόψη χρονικοί περιορισμοί ενώ στη δεύτερη περίπτωση η λειτουργία των μονάδων υπόκειται στους χρονικούς περιορισμούς.

5.3.1 Περιγραφή του Συστήματος

Η μέγιστη δυναμικότητα του σταθμού ανέρχεται στα 554 MW ηλεκτρικής ισχύος. Ο σταθμός απαρτίζεται από τρεις μονάδες βάσεις (heavy duty units) και τρεις μονάδες αιχμής (peak units). Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των μονάδων αναφέρονται στον πίνακα Π5.11 ενώ στο σχήμα 5.10 έχουν σχεδιαστεί τα διαγράμματα κατανάλωσης καυσίμου. Επισημαίνεται ότι το κόστος κατανάλωσης καυσίμου, (FC), εκφράζεται σε δολάρια (\$) και είναι γραμμικό ανάλογο της παραγόμενης ενέργειας σύμφωνα με τη σχέση 5.3 :

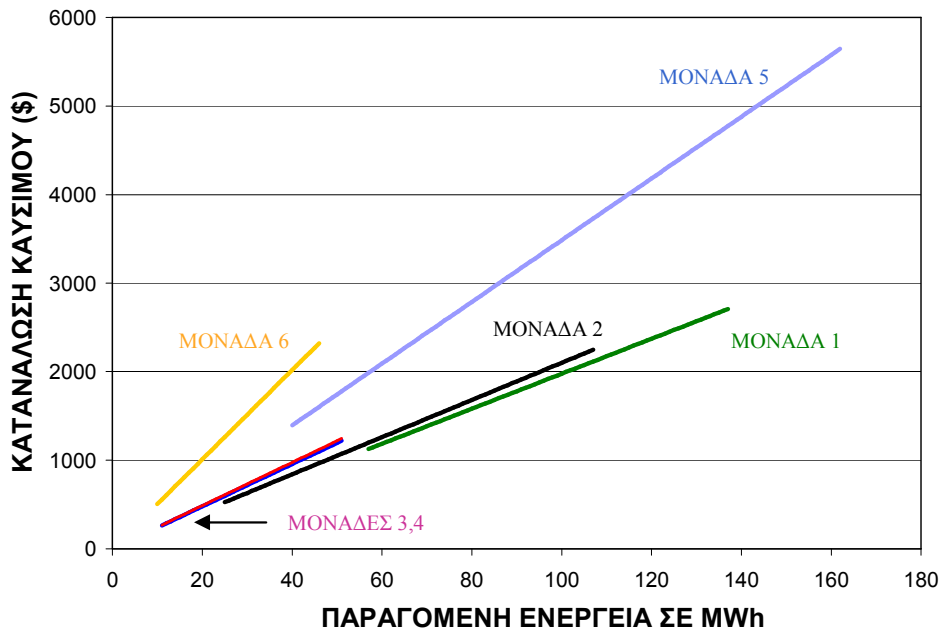
$$FC_{i,j} = b_i \cdot P_{i,j} \quad (5.3)$$

όπου ο συντελεστής b (εκφρασμένος σε \$/MWh) είναι χαρακτηριστικός για τη μονάδα. Τα κόστη εκκίνησης και σβέσης θεωρούνται μηδενικά. Η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια (MWh) για την περίοδο των T = 168 ωρών δίνεται στον πίνακα Π5.12, παρατίθεται όμως και το σχήμα 5.11. Αν η ζήτηση δεν καλύπτεται από την παραγωγή, το έλλειμμα αναπληρώνεται από άλλη πηγή με κόστος 130 \$/MWh. Τέλος το παρελθόν όλων των μονάδων λαμβάνεται ως ελεύθερο.

	Μονάδα 1 ^η	Μονάδα 2 ^η	Μονάδα 3 ^η	Μονάδα 4 ^η	Μονάδα 5 ^η	Μονάδα 6 ^η
Μέγιστη παραγόμενη ισχύς	137	107	51	51	162	46
Ελάχιστη παραγόμενη ισχύς	55.7	25	11	11	40	10
Χρόνος εκκίνησης	22	0	0	0	2	0
Χρόνος σβέσης	0	0	0	0	0	0
Ελάχιστος χρόνος παραμονής σε κατάσταση ON	8	8	6	6	3	0
Ελάχιστος χρόνος παραμονής σε κατάσταση OFF	8	8	6	6	3	0
Συντελεστής b πολυωνύμου κατανάλωσης καυσίμου	19.76	21	23.91	24.39	34.85	50.46

Πίνακας Π5.11

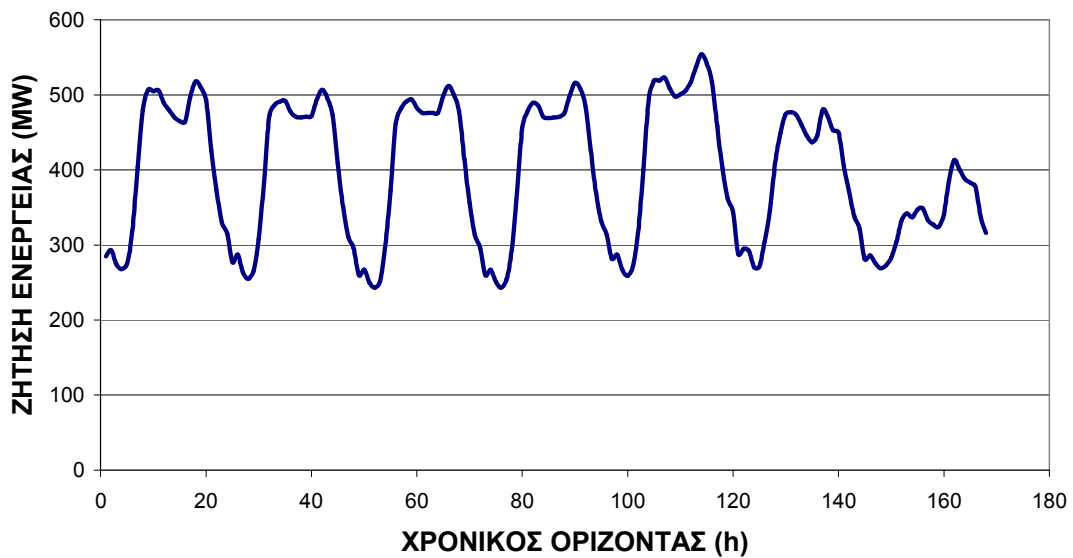
Εφαρμογή 2^η : Ο πίνακας περιλαμβάνει τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του σταθμού που αποτελείται από 6 ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες.



Σχήμα 5.10

Εφαρμογή 2^η : Διάγραμμα ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει της παραγόμενης ισχύος.

ΖΗΤΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ 168 ΩΡΕΣ



Σχήμα 5.11

Εφαρμογή 1^η : Διαγραμματική απεικόνιση χρονοσειράς ζήτησης για χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού 168 ωρών.

ΩΡΑ	ΖΗΤΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (MW)						
	Δευτέρα	Τρίτη	Τετάρτη	Πέμπτη	Παρασκευή	Σάββατο	Κυριακή
1	285	277	260	260	282	288	281
2	293	287	267	267	287	295	286
3	274	263	250	251	267	292	276
4	268	255	243	243	259	270	269
5	275	265	251	254	271	271	273
6	319	308	298	294	317	305	283
7	403	384	372	370	401	346	304
8	480	473	462	456	495	409	333
9	507	487	482	478	519	449	342
10	505	491	491	489	519	474	337
11	506	492	494	486	523	477	347
12	489	478	483	471	509	473	349
13	480	471	476	469	498	460	333
14	470	470	476	470	501	446	327
15	465	471	476	471	506	437	324
16	464	472	476	476	517	446	341
17	497	494	498	499	538	480	387
18	518	507	512	516	554	471	413
19	510	496	501	509	542	453	400
20	493	473	478	485	517	450	388
21	426	409	414	427	458	405	383
22	373	351	356	370	402	372	378
23	330	311	314	331	362	338	337
24	315	296	296	314	344	322	316

Πίνακας Π5.12

Εφαρμογή 1^η : Χρονοσειρά ζήτησης για χρονικό ορίζοντα 168 ωρών (7 ημέρες)

5.3.2 Βελτιστοποίηση – Περίπτωση (Α) : δεν λαμβάνονται υπόψη οι χρονικοί περιορισμοί των μονάδων

Στην παρούσα περίπτωση αναζητείται το οικονομικότερο πρόγραμμα λειτουργίας ενός σταθμού 6 μονάδων, (πίνακας Π5.11), για τη χρονοσειρά ζήτησης του πίνακα Π5.12, χωρίς όμως να λαμβάνονται υπόψη οι χρονικοί περιορισμοί των μονάδων. Επιπλέον, δεδομένου ότι τα κόστη εκκίνησης και σβέσης θεωρούνται μηδενικά, κάθε ώρα μπορεί να βελτιστοποιηθεί ξεχωριστά ως ένα ανεξάρτητο υποπρόβλημα και συνεπώς η χρήση ενός ΕΑ δεν είναι απαραίτητη.

Η διαδικασία ξεκινάει με την επιλογή των αποδεκτών ωριαίων σεναρίων λειτουργίας. Σύμφωνα με τον πίνακα Π5.12 η υψηλότερη ζήτηση προκύπτει την Παρασκευή στις 18.00 και ισούται με 554 MW, όσο ακριβώς είναι και το τεχνικό μέγιστο του σταθμού. Το έλλειμμα ενέργειας χρεώνεται με 130 \$/MWh ενώ η μονάδα με το χειρότερο βαθμό απόδοσης, μονάδα 6, παράγει ενέργεια με κόστος 50.46 \$/MWh. Για τους δύο αυτούς λόγους όλα τα ωριαία σενάρια λειτουργίας που προκρίνονται μέσω της διαδικασίας που περιγράφεται στην παράγραφο 4.3.1 καλύπτουν πλήρως την ζήτηση. Ο αριθμός των αποδεκτών σεναρίων είναι 2501 (όταν ο συνολικός αριθμός ωριαίων σεναρίων, για 6 μονάδες και 168 ώρες, είναι : $2^6 \cdot 168 = 10752$, αθροίζοντας όλους τους πιθανούς συνδυασμούς λειτουργίας των μονάδων για κάθε ώρα ξεχωριστά). Στη συνέχεια καθορίζεται η παραγόμενη ισχύς των μονάδων και για τα 2501 σενάρια σύμφωνα με τη μέθοδο της παραγράφου 4.3.2. Το οικονομικότερο σενάριο λειτουργίας της κάθε ώρας αποθηκεύεται ξεχωριστά και τελικά από το σύνολο αυτών των σεναρίων καταρτίζεται και η τελική λύση, (χρωμόσωμα 168 ακεραίων). Η παραπάνω διαδικασία ολοκληρώνεται σε μερικά δευτερόλεπτα.

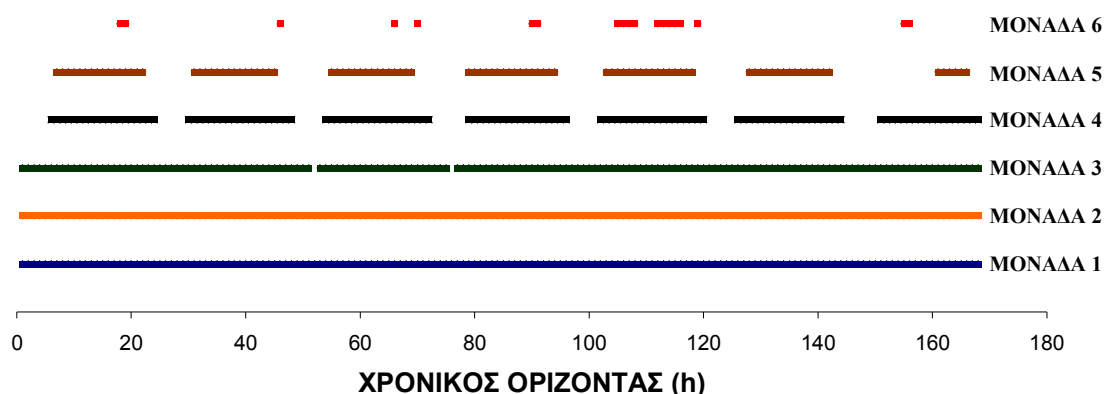
Το ολικό λειτουργικό κόστος της λύσης, **TOC**, ισούται με **1587708.53 \$** και αντιστοιχεί εξ' ολοκλήρου στο κόστος κατανάλωσης καυσίμου. Για να γίνει και η απαραίτητη σύγκριση σημειώνεται ότι και ο 2LEA συνέκλινε στην ίδια ακριβώς λύση χρησιμοποιώντας χρονική κατάτμηση 6 τμημάτων (καταναλώνοντας πολλαπλάσιο υπολογιστικό χρόνο) ενώ η εφαρμογή του αλγορίθμου DP δίνει μία λύση με **TOC = 1588340 \$**. Ο λόγος για τον οποίο ο DP αδυνατεί να εντοπίσει την ολικά βέλτιστη λύση είναι ο ντετερμινιστικός τρόπος με τον οποίο γίνεται η ένταξη των μονάδων στην παραγωγή. Τέλος, εφαρμόζοντας τον ICEA, (ο πληθυσμός του συνόλου των γονέων είναι $\mu = 20$, ο πληθυσμός του συνόλου των απογόνων είναι $\lambda = 60$ και δεν χρησιμοποιείται χρονική κατάτμηση), μπορούμε να εντοπίσουμε την ίδια λύση, το υπολογιστικό κόστος όμως είναι υψηλό καθώς η σύγκλιση, σε αρκετές δοκιμές, επιτυγχάνεται έπειτα από 140000 γενιές. Και από αυτό το παράδειγμα γίνεται φανερό πόσο σημαντική είναι η αρχικοποίηση για την επιτάχυνση του ICEA.

Περιγραφή της Βέλτιστης Λύσης (TOC = 1587708.53 \$)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το ολικό λειτουργικό κόστος, **TOC**, της βέλτιστης λύσης είναι **1587708.53 \$** και ισούται ακριβώς με το κόστος κατανάλωσης καυσίμου, (προφανώς τα κόστη λόγω εκκινήσεων και σβέσεων είναι μηδενικά). Στον πίνακα Π.5.13 παρουσιάζονται αναλυτικά οι καταστάσεις s των μονάδων για την κάθε μία ώρα του χρονικού ορίζοντα ενώ για καλύτερη εποπτεία παρατίθεται και το σχήμα 5.12.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ

Εφαρμογή 1η - Περίπτωση Β



Σχήμα 5.12

Εφαρμογή 2^η (Α): Διαγραμματική απεικόνιση προγράμματος λειτουργίας σταθμού 6 μονάδων για χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού 168 ωρών. Οι μονάδες δεν υπόκεινται σε κανέναν χρονικό περιορισμό. Μία μονάδα βρίσκεται σε λειτουργία (ON) τις ώρες που γεμίζει η ράβδος.

Σύμφωνα με το πρόγραμμα λειτουργίας του πίνακα Π5.13 μπορεί να υπολογιστεί το μέσο επίπεδο ισχύος, η μέση φόρτιση και οι συνολικές ώρες λειτουργίας της κάθε μονάδας, (πίνακας Π5.14). Οι 2 πρώτες μονάδες εργάζονται και τις 168 ώρες, και μάλιστα σε πλήρη ισχύ ενώ και η μονάδα 3 παραμένει μόλις δυο ώρες σε κράτηση, λειτουργεί όμως συχνά σε μερικό φορτίο. Αντίθετα, οι υπόλοιπες μονάδες καλούνται να καλύψουν μόνο τις αιχμές της ζήτησης, λόγω του χαμηλού βαθμού απόδοσής τους, με την μονάδα 6 να εργάζεται μόλις 19 ώρες και πάντα στο τεχνικό της ελάχιστο.

A/A	Μέσο επίπεδο ισχύος (MW)	Φορτίσεις %	Ώρες Λειτουργίας (h)
Μονάδα 1	137.000	100.00%	168
Μονάδα 2	106.861	99.87%	168
Μονάδα 3	45.662	89.53%	166
Μονάδα 4	45.158	88.54%	131
Μονάδα 5	126.696	78.21%	99
Μονάδα 6	10.000	21.74%	19

Πίνακας Π5.14

Εφαρμογή 2^η (Α): Στον πίνακα παρουσιάζονται οι φορτίσεις των μονάδων, το μέσο επίπεδο ισχύος τους και οι συνολικές ώρες λειτουργίας τους για τις λύσεις της βελτιστοποίησης. Οι μονάδες δεν υπόκεινται σε κανέναν χρονικό περιορισμό.

Τέλος, χρήσιμος είναι και ο υπολογισμός του μέσου κόστους παραγωγής μίας MWh, (average operating cost – AOC), που δίνεται από τη σχέση 5.4. Η συνολική ζήτηση των 168 ωρών είναι 66732 MWh και το ολικό κόστος λειτουργίας ίσο με 1587708.53\$.

$$AOC_{(7\text{ days})} = \frac{TOC}{\sum_{i=1}^{72} d_i} = \frac{1587708.53}{66732} = 23.792 \text{ \$ / MWh} \quad (5.4)$$

5.3.3 Βελτιστοποίηση – Περίπτωση (B) : Οι μονάδες υπόκεινται σε χρονικούς περιορισμούς

Αναζητείται και πάλι το οικονομικότερο πρόγραμμα λειτουργίας ενός σταθμού 6 μονάδων, (πίνακας Π5.11), για τη χρονοσειρά ζήτησης του πίνακα Π5.12, αυτή τη φορά όμως οι μονάδες υπόκεινται στους χρονικούς περιορισμούς τους. Ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία που περιγράφηκε για την περίπτωση Α, (καθορισμός αποδεκτών ωριαίων σεναρίων λειτουργίας, βέλτιστη ανάθεση φορτίου - παράγραφος 5.3.2) και στη συνέχεια εκκινεί ο ICEA βάσει των δεδομένων του πίνακα Π5.15. Τονίζεται ότι χρησιμοποιείται χρονική κατάτμηση 7^{ov} τμημάτων, (βλ. παράγραφο 4.3.3.2), εφαρμόζεται δηλαδή αυτόνομος εξελικτικός αλγόριθμος για καθεμιά από τις ημέρες της εβδομάδας. Επιπλέον η λύση που προέκυψε για την περίπτωση Α ως βέλτιστη, εισάγεται τώρα στην 1^η γενιά των απογόνων για την αρχικοποίηση του αλγορίθμου.

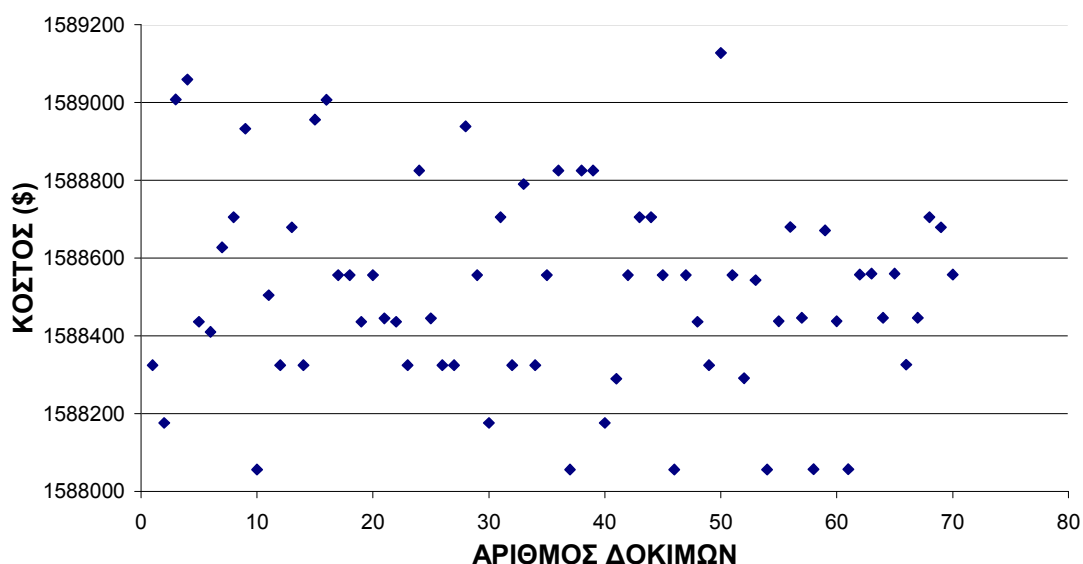
20	Πληθυσμός συνόλου γονέων (μ)
60	Πληθυσμός συνόλου απογόνων (λ)
0.90	Πιθανότητα διασταύρωσης
0.11	Πιθανότητα μετάλλαξης (αρχική τιμή)
50	Πρώτη γενιά όπου αρχίζει να μειώνεται η πιθανότητα της μετάλλαξης
0.02	Πιθανότητα μετάλλαξης (τελική τιμή)
5000	Γενιά πέρα από την οποία η πιθανότητα της μετάλλαξης παραμένει σταθερή και ίση με την τελική της τιμή
0.07	Πιθανότητα μετάλλαξης (ειδική τιμή)
600	Αριθμός γενεών όπου η βέλτιστη λύση δεν αλλάζει => επιβάλλεται η ειδική τιμή της πιθανότητας μετάλλαξης
NAI	Εισαγωγή λύσης με βέλτιστα ωριαία σενάρια λειτουργίας (NAI/OXI)
7	Αριθμός χρονικών κατατμήσεων

Πίνακας Π5.15

Εφαρμογή 2^η : Δεδομένα λειτουργίας εξελικτικού αλγορίθμου. Πραγματοποιείται εισαγωγή της λύσης με τα βέλτιστα ωριαία σενάρια λειτουργίας στην 1^η γενιά καθώς επίσης και χρονικά κατατετημένη βελτιστοποίηση 7 τμημάτων.

Για να παραχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα πραγματοποιούνται 70 δοκιμές με τον χρονικά κατατετημημένο ICEA των 7^{ων} τμημάτων, όπου ο μέγιστος αριθμός γενιών ανά τμήμα είναι οι 4000 γενιές. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα (5.13). Επισημαίνεται ότι παρατηρείται πολύ υψηλή διασπορά λύσεων, πράγμα που σημαίνει πως ο αλγόριθμος συχνά εγκλωβίζεται σε κάποιο τοπικό ακρότατο.

ΚΟΣΤΟΣ ΛΥΣΕΩΝ ΓΙΑ 70 ΔΟΚΙΜΕΣ



Σχήμα 5.13

Εφαρμογή 2^η (B): Κόστος λύσεων για 70 διαφορετικές δοκιμές χρήσης του ICEA εφαρμόζοντας χρονικά κατατετημημένη βελτιστοποίηση 3^{ων} τμημάτων.

Και σε αυτή την περίπτωση ο ICEA εντοπίζει τη βέλτιστη λύση πολύ πιο γρήγορα σε σύγκριση με τον 2LEA (20-30 φορές ταχύτερα κατά μέσο όρο). Η βέλτιστη λύση δίνει $TOC = 1588055.66 \$$, και ταυτίζεται με τη λύση του 2LEA. Αντίθετα ο αλγόριθμος DP και πάλι εμφανίζει χειρότερο αποτέλεσμα με κόστος λειτουργίας 1598948\$.

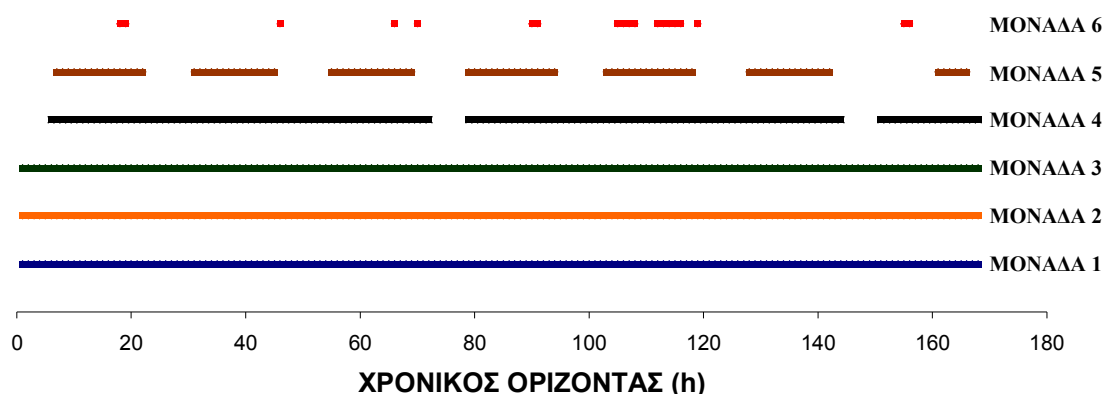
Το αυξημένο αυτό κόστος, σε σχέση με την περίπτωση A, είναι απόρροια των επιπρόσθετων περιορισμών που επιβλήθηκαν. Στην περίπτωση B μία ‘ακριβότερη’ μονάδα πρέπει να παραμείνει σε λειτουργία περισσότερες ώρες, ακόμα και όταν η παραγωγή θα μπορούσε να καλυφθεί οικονομικότερα από τις υπόλοιπες μονάδες, εξαιτίας του ελάχιστου χρόνου παραμονής της σε μία κατάσταση.

Περιγραφή της Βέλτιστης Λύσης (TOC = 1588055.66 \$)

Το ολικό λειτουργικό κόστος, TOC , της βέλτιστης λύσης είναι $1588055.66 \$$ και ισούται ακριβώς με το κόστος κατανάλωσης καυσίμου αφού τα κόστη λόγω εκκινήσεων και σβέσεων θεωρούνται μηδενικά. Στον πίνακα Π.5.16 παρουσιάζονται αναλυτικά οι καταστάσεις s των μονάδων για κάθε ώρα του χρονικού ορίζοντα ενώ, για καλύτερη εποπτεία, παρατίθεται και το σχήμα 5.14.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ

Εφαρμογή 2η - Περίπτωση Β



Σχήμα 5.14

Εφαρμογή 2^η (B): Διαγραμματική απεικόνιση προγράμματος λειτουργίας σταθμού 6 μονάδων για χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού 168 ωρών. Οι μονάδες υπόκεινται στους λειτουργικούς περιορισμούς του πίνακα Π5.11. Μία μονάδα βρίσκεται σε λειτουργία (ON) τις ώρες που γεμίζει η ράβδος.

Σύμφωνα με το πρόγραμμα λειτουργίας του πίνακα Π5.16 υπολογίζεται το μέσο επίπεδο ισχύος, η μέση φόρτιση και οι συνολικές ώρες λειτουργίας της κάθε μονάδας, (πίνακας Π5.14). Σε σύγκριση με την περίπτωση Α, και πάλι οι 2 πρώτες μονάδες παραμένουν όλο χρονικό διάστημα σε κατάσταση ON, ενώ το ίδιο συμβαίνει τώρα και για την 3^η μονάδα. Η μονάδα 4 εργάζεται 20 ώρες επιπλέον, πράγμα που οφείλεται εξολοκλήρου στους χρονικούς περιορισμούς που της επιβάλλονται. Λόγω του γεγονότος αυτού, η μονάδα 4 λειτουργεί σε αρκετά χαμηλότερο φορτίο αυξάνοντας έτσι το ολικό κόστος παραγωγής του σταθμού.

A/A	Μέσο επίπεδο ισχύος (MW)	Φορτίσεις %	Ώρες Λειτουργίας (h)
Μονάδα 1	137.000	100.00%	168
Μονάδα 2	105.958	99.03%	168
Μονάδα 3	44.403	87.06%	168
Μονάδα 4	40.060	78.55%	151
Μονάδα 5	126.696	78.21%	99
Μονάδα 6	10.000	21.74%	19

Πίνακας Π5.16

Εφαρμογή 2^η (B): Στον πίνακα παρουσιάζονται οι φορτίσεις των μονάδων, το μέσο επίπεδο ισχύος τους και οι συνολικές ώρες λειτουργίας τους για τις λύσεις της βελτιστοποίησης. Οι μονάδες υπόκεινται στους λειτουργικούς περιορισμούς του πίνακα Π5.11.

Το μέσο κόστος παραγωγής μίας MWh, (average operating cost – AOC), (σχέση 5.5) εμφανίζεται ελαφρώς αυξημένο σε σύγκριση με την περίπτωση Α, (όπου AOC=23.792\$). Η συνολική ζήτηση των 168 ωρών είναι 66732 MWh και το ολικό κόστος λειτουργίας ίσο με 1588055.66 \$.

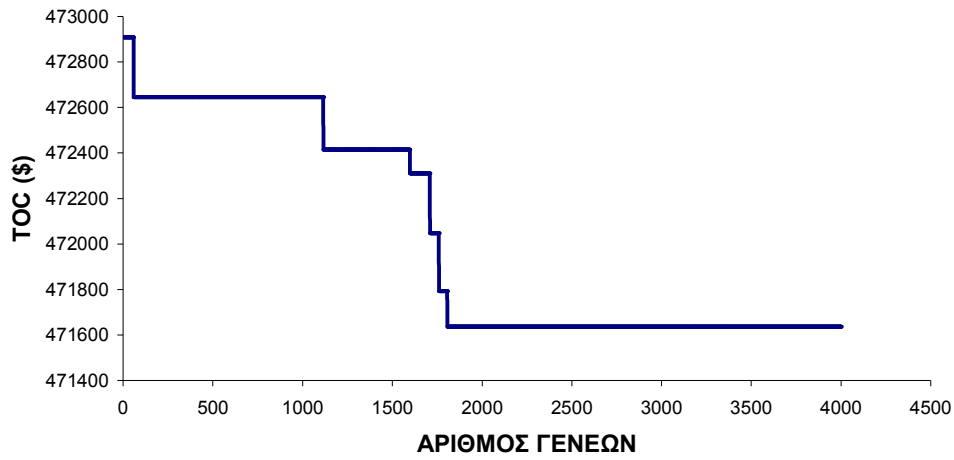
$$AOC_{(7\text{ days})} = \frac{TOC}{\sum_{i=1}^{72} d_i} = \frac{1588055.66}{66732} = 23.798 \text{ \$ / MWh} \quad (5.5)$$

Πορεία Σύγκλισης του ICEA

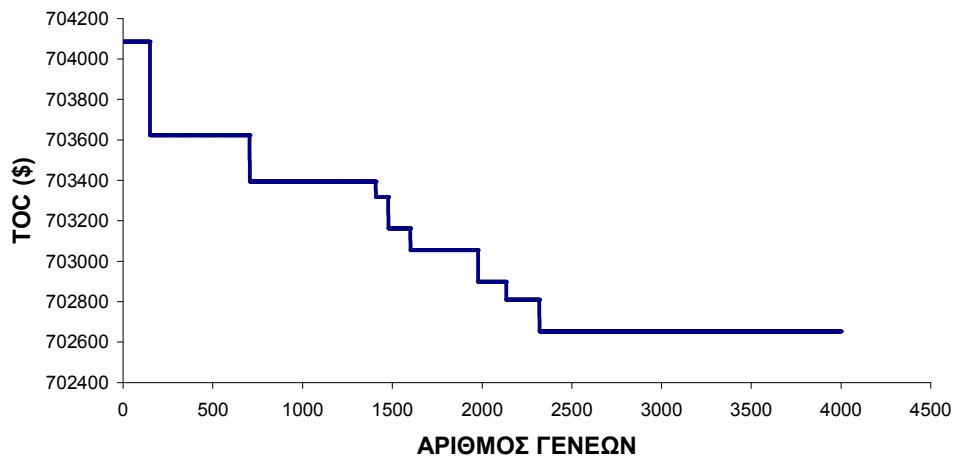
Για την εύρεση της παραπάνω λύσης έχει χρησιμοποιηθεί χρονικά κατατεταγμένη βελτιστοποίηση 7^{ov} τμημάτων. Στα παρακάτω διαγράμματα, σχήμα 5.15 παρουσιάζεται η πορεία της σύγκλισης για το κάθε τμήμα ξεχωριστά και στο τελευταίο διάγραμμα η σύγκλιση του ICEA που εφαρμόζεται μετέπειτα για ολόκληρο το χρωμόσωμα.



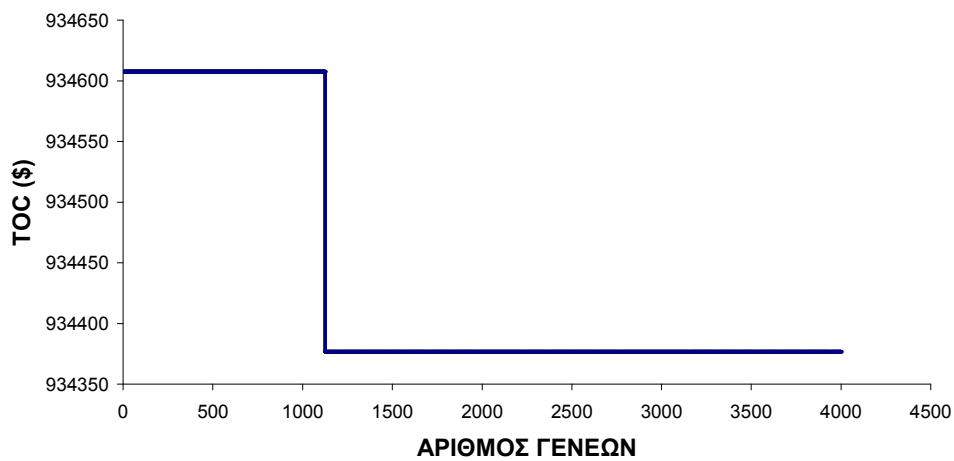
ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (2η ΗΜΕΡΑ)



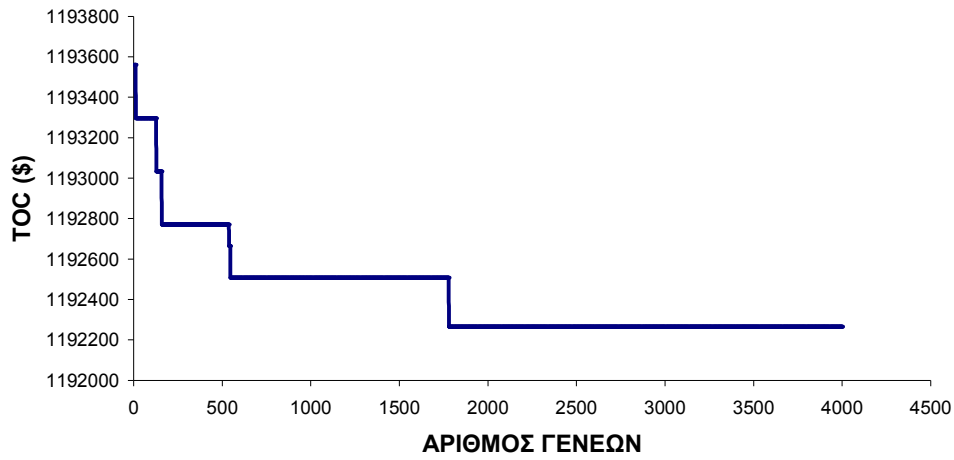
ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (3η ΗΜΕΡΑ)



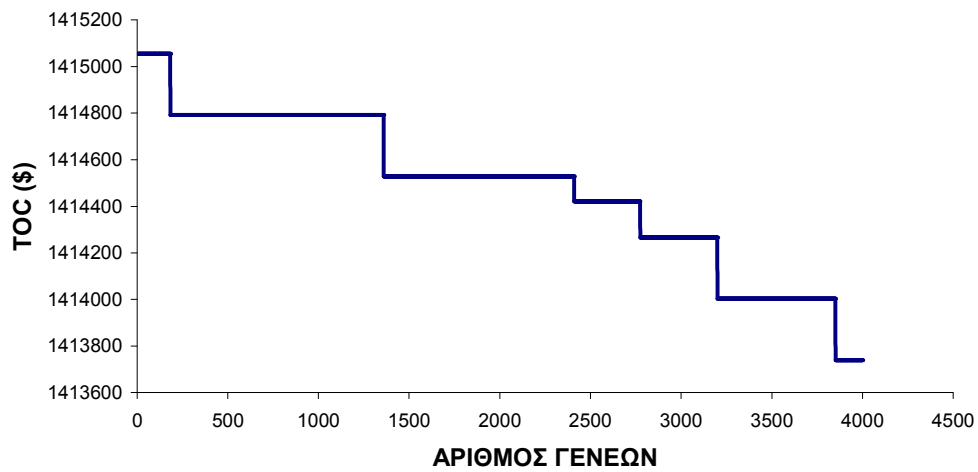
ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (4η ΗΜΕΡΑ)



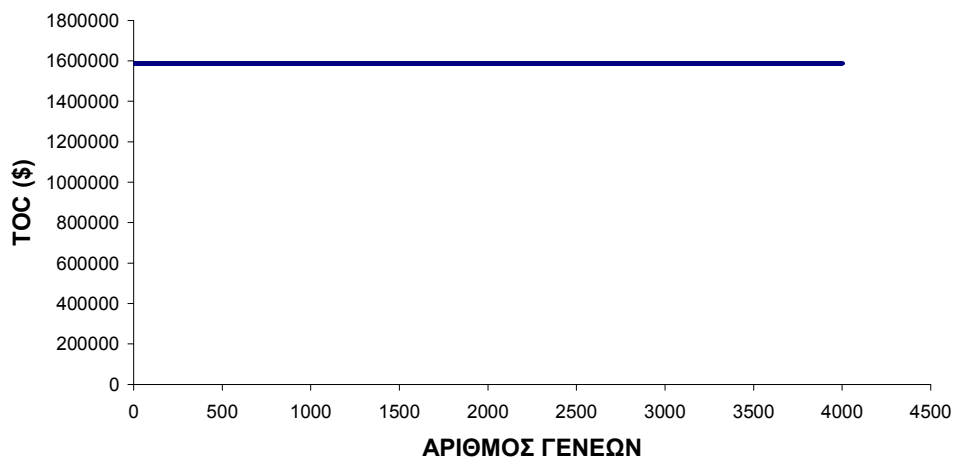
ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (5η ΗΜΕΡΑ)



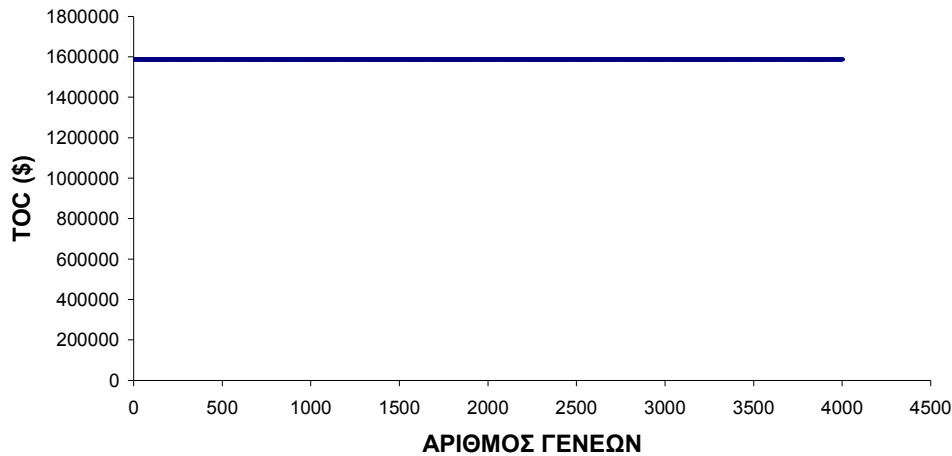
ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (6η ΗΜΕΡΑ)



ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (7η ΗΜΕΡΑ)



ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (ΠΛΗΡΕΣ ΧΡΩΜΟΣΩΜΑ - 168 ΩΡΕΣ)



Σχήμα 5.15

Εφαρμογή 2^η (B): Πορεία σύγκλισης του χρονικά κατατετημένου ICEA για την περίπτωση όπου υπάρχει απαίτηση σε στρεφόμενη εφεδρεία (3 τμήματα των 24 ωρών).

Στο 1^ο διάγραμμα εφαρμόζεται ο ICEA για τις ώρες 1 – 24 και η αξιολόγηση της λύσης γίνεται για τις ώρες 1 – 24. Η βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 1^η γενιά με κόστος 239971.7 MWh, (δεν αλλάζει δηλαδή η λύση που έχει εισαχθεί στην αρχικοποίηση του αλγορίθμου).

Στο 2^ο διάγραμμα εφαρμόζεται ο ICEA για τις ώρες 25 – 48 και η αξιολόγηση της λύσης γίνεται για τις ώρες 1 – 48. Η βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 1807^η γενιά με κόστος 471636.6 MWh.

Στο 3^ο διάγραμμα εφαρμόζεται ο ICEA για τις ώρες 49 – 72 και η αξιολόγηση της λύσης γίνεται για τις ώρες 1 – 72. Η βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 2320^η γενιά με κόστος 702653.5 MWh.

Στο 4^ο διάγραμμα εφαρμόζεται ο ICEA για τις ώρες 73 – 96 και η αξιολόγηση της λύσης γίνεται για τις ώρες 1 – 96. Η βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 1126^η γενιά με κόστος 934376.5 MWh.

Στο 5^ο διάγραμμα εφαρμόζεται ο ICEA για τις ώρες 97 – 120 και η αξιολόγηση της λύσης γίνεται για τις ώρες 1 – 120. Η βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 1780^η γενιά με κόστος 1192265 MWh.

Στο 6^ο διάγραμμα εφαρμόζεται ο ICEA για τις ώρες 121 – 144 και η αξιολόγηση της λύσης γίνεται για τις ώρες 1 – 144. Η βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 3851^η γενιά με κόστος 1413739 MWh.

Στο 7^ο διάγραμμα εφαρμόζεται ο ICEA για τις ώρες 145 – 168 και η αξιολόγηση της λύσης γίνεται για τις ώρες 1 – 168. Η βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 1^η γενιά με κόστος 1588056 MWh, (δεν αλλάζει δηλαδή η λύση που έχει εισαχθεί στην αρχικοποίηση του αλγορίθμου).

Στο 8^ο διάγραμμα εφαρμόζεται ο ICEA για ολόκληρο το χρονικό ορίζοντα των 168 ωρών. Η βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 1^η γενιά με κόστος 1588056 MWh, (η λύση δεν επιδέχεται περαιτέρω βελτίωση).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται το πρόβλημα της βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας ενός θερμικού ηλεκτροπαραγωγικού σταθμού. Το πρόβλημα αναλύεται σε 2 διακριτά μέρη, την ένταξη των μονάδων στην παραγωγή (**Unit Commitment – UC**) και την ανάθεση φορτίου της κάθε μονάδας που βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας (**Economic Load Dispatch – ELD**). Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε βασίζεται στους εξελικτικούς αλγορίθμους (EA) οι οποίοι αποτελούν μία στοχαστική μέθοδο βελτιστοποίησης. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται πλήρης περιγραφή του εξεταζόμενου προβλήματος, του τρόπου αξιολόγησης μίας υποψήφιας λύσης και παρατίθενται όλοι οι πιθανοί περιορισμοί που το συνοδεύουν ενώ στη συνέχεια αναπτύσσονται με συντομία οι δημοφιλέστερες μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία για την επίλυσή του. Στο δεύτερο κεφάλαιο ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση των εξελικτικών αλγορίθμων και στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε σύγχρονες τεχνικές βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων οι οποίες βασίζονται στους EA. Ιδιαίτερη μνεία αποδίδεται στον διεπίπεδο εξελικτικό αλγόριθμο (2LEA) [52] της παραγράφου 3.2.7 καθώς αποτέλεσε τη βάση για τον αλγόριθμο που προτείνεται σε αυτήν την εργασία. Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο νέος ακέραια κωδικοποιημένος εξελικτικός αλγόριθμος (integer-coded EA – ICEA) και τέλος στο 5^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται η πιστοποίησή του πάνω σε υπάρχουσες εφαρμογές από τη βιβλιογραφία.

Ο ICEA διακρίνεται για την υψηλότετη ταχύτητα του στην εύρεση της βέλτιστης λύσης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος για τις εφαρμογές του 5^{ου} κεφαλαίου είναι :

- Εφαρμογή 1A – λιγότερο από 1 λεπτό
- Εφαρμογή 1B – περίπου 1 λεπτό και 30 δευτερόλεπτα
- Εφαρμογή 2A – ο υπολογιστικός χρόνος είναι πραγματικά αμελητέος καθώς δεν απαιτείται η χρήση εξελικτικού αλγορίθμου, η λύση εντοπίζεται από τη βελτιστοποίηση της κάθε ώρας ξεχωριστά
- Εφαρμογή 1B – περίπου 2 λεπτά και 30 δευτερόλεπτα

Οι χρόνοι αυτοί επιτεύχθηκαν σε έναν απλό προσωπικό υπολογιστή σχετικά τελευταίας τεχνολογίας. Το βασικό πρόβλημα όμως που παρατηρείται στην 2^η εφαρμογή είναι ο συχνός εγκλωβισμός του ICEA σε τοπικά ακρότατα όταν ο χρονικός ορίζοντας προγραμματισμού είναι μεγάλος. Τα κύρια στοιχεία του ICEA περιγράφονται παρακάτω :

Ο ICEA χρησιμοποιεί, όπως έχει ειπωθεί, ακέραια κωδικοποίηση χρωμοσώματος αντί δυαδικής μειώνοντας σημαντικά το πλήθος των ψηφίων μιας υποψήφιας λύσης. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η γρηγορότερη εξέλιξη των γενεών, ενώ

μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι, καθώς τα ψηφία του χρωμοσώματος δεν περιορίζονται πλέον μόνο σε δύο τιμές (0 και 1), απαιτείται συνολικά πολύ μεγαλύτερο πλήθος αξιολογήσεων και ταυτόχρονα υπάρχει ο κίνδυνος εγκλωβισμού του ΕΑ σε κάποιο τοπικό ακρότατο.

Κατά την επιλογή των ωριαίων σεναρίων λειτουργίας των μονάδων διαλέγονται μόνο εκείνα που ικανοποιούν τη ζήτηση. Συνεπώς, περιορίζεται ο χώρος αναζήτησης των λύσεων αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου.

Η διαδικασία της ανάθεσης φορτίου των μονάδων πραγματοποιείται μόνο μία φορά και μόνο σε όσα ωριαία σενάρια έχουν κριθεί ως αποδεκτά, χρησιμοποιώντας μία αιτιοκρατική μέθοδο εύρεσης της καθολικά βέλτιστης λύσης. Όταν λοιπόν αξιολογείται η συνάρτηση κόστους μιας υποψήφιας λύσης δεν απαιτείται ο επανυπολογισμός του κόστους κατανάλωσης καυσίμου, αντίθετα πραγματοποιείται μόνο η άθροιση που αφορά τα κόστη λόγω εκκινήσεων και σβέσεων και τα κόστη εξαιτίας των ποινών. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σημαντική επιτάχυνση της διαδικασίας, δεσμεύεται όμως μεγάλο μέρος της μνήμης RAM του υπολογιστή.

Οι λύσεις που παραβιάζουν τους λειτουργικούς περιορισμούς των μονάδων δεν απορρίπτονται, ούτε διορθώνονται, χρεώνονται όμως με ένα επιπρόσθετο κόστος ποινής. Ως αποτέλεσμα, είναι απίθανο ο αλγόριθμος να αναδείξει μία ανεφάρμοστη λύση ως βέλτιστη, μιας και το κόστος της θα είναι υψηλό. Ταυτόχρονα όμως, ο ΕΑ βρίσκεται σε θέση να εκμεταλλευτεί τυχόν καλά στοιχεία της σε επόμενη γενιά.

Τέλος, για την επιτάχυνση του ICEA γίνεται χρήση χρονικά κατατετημένης βελτιστοποίησης. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ο χρονικός ορίζοντας των **T** ωρών χωρίζεται σε **K** χρονικά διαστήματα και σε καθένα από αυτά εφαρμόζεται αυτόνομος εξελικτικός αλγόριθμος.

Νέα στοιχεία

Το αντικείμενο αυτής της εργασίας, πέρα από την παρουσίαση της μεθόδου και την πιστοποίησή της, ήταν η περαιτέρω βελτίωση του αλγορίθμου. Οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν αφορούν :

1. Την επιλογή των ωριαίων σεναρίων λειτουργίας. Συγκεκριμένα ο αλγόριθμος τροποποιήθηκε ώστε να σέβεται τις αρχικές καταστάσεις των μονάδων και μεταβλήθηκε ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζει καταστάσεις ελλείμματος ενέργειας και υπερπαραγωγής.
2. Τη βέλτιστη ανάθεση φορτίου για περιπτώσεις υπερπαραγωγής και ελλείμματος ενέργειας.
3. Τον τρόπο απεικόνισης του ιστορικού των μονάδων, την απεικόνιση δηλαδή της κατάστασης των μονάδων για τις ώρες που προηγούνται του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού.
4. Τον λειτουργικό περιορισμό παραμονής σε ανοιχτή κατάσταση των μονάδων και τον τρόπο επιβολής ποινής για τις ώρες που δεν τον ικανοποιούν.
5. Την ύπαρξη στρεφόμενης εφεδρείας.
6. Την επιδιόρθωση της τελικής λύσης, διαδικασία που ξεκινάει μετά το πέρας του ΕΑ (post-processing), για την περίπτωση που προκύψει, ως βέλτιστη, μία μη-εφαρμόσιμη λύση.

Προτάσεις Βελτίωσης του Αλγορίθμου

Καθώς ο αλγόριθμος ICEA βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο θα μπορούσαν να γίνουν αρκετές προσθήκες ώστε να βελτιωθεί η λειτουργία του.

Αρχικά παρατίθενται ορισμένοι επιπλέον περιορισμοί με την εφαρμογή των οποίων η επίλυση του προβλήματος θα προσεγγίζει περισσότερο την πραγματικότητα ώστε ο αλγόριθμος να χρησιμοποιηθεί σε πιο σύνθετα συστήματα :

- Περιορισμός για το ρυθμό αύξησης ή μείωσης του φορτίου μιας μονάδας (ramp rate).
- Περιορισμός που σχετίζεται με τον μέγιστο αριθμό των μονάδων που επιτρέπεται να εκκινήσουν ταυτόχρονα και εξαρτάται από το διαθέσιμο προσωπικό του σταθμού (crew constraint).
- Αναγκαστική λειτουργία κάποιας μονάδας (must run unit).
- Όριο εκπομπών αέριων ρύπων.

Επιπλέον θα μπορούσαν εύκολα να ενταχθούν στο λειτουργικό κόστος και κάποια επιπρόσθετα οικονομικά μεγέθη όπως το κόστος συντήρησης ή η απόσβεση. Μία τέτοια προσθήκη είναι αρκετά απλή εφόσον ο αλγόριθμος δεν θέτει κανέναν περιορισμό ως προς την μορφή της συνάρτησης κόστους.

Επίσης, όπως και στην διδακτορική διατριβή [52], μπορεί να εξεταστεί η περίπτωση εμφάνισης αιφνίδιων βλαβών, εντάσσοντάς τες στο λογισμικό αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης με τη μέθοδο Monte-Carlo, όπως και η περίπτωση στοχαστικά μεταβαλλόμενης ζήτησης. Έτσι η βελτιστοποίηση είναι δυνατόν να επεκταθεί και σε προβλήματα 2 στόχων, να επιζητείται για παράδειγμα ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση κόστους παραγωγής και κινδύνου αδυναμίας κάλυψης της ζήτησης.

Τέλος πρέπει να αναζητηθεί τρόπος ώστε ο ICEA να μην εγκλωβίζεται σε τοπικά ακρότατα. Μία λύση είναι η υβριδοποίηση της μεθόδου με κάποια από τις τεχνικές της προσομοιούμενης απόκτησης ή της αναζήτησης Tabu. Μία άλλη λύση είναι η χρήση του μοντέλου των απομονωμένων νησιών [70] (island model EA), όπου πολλαπλοί πληθυσμοί εξελίσσονται ταυτόχρονα και παράλληλα ενώ ανά διαστήματα κάποιες λύσεις μεταναστεύουν σε διπλανά 'νησιά'. Η μέθοδος αυτή είναι ικανή να βελτιώσει την ικανότητα εξερεύνησης του αλγορίθμου ενώ μέσω της παραλληλοποίησης της, ώστε κάθε νησί να εξελίσσεται σε διαφορετικό επεξεργαστή, δύναται να επιταχυνθεί όλη η διαδικασία. Προτείνεται ακόμη να γίνει διερεύνηση αν η περιοδική χρήση υπορουτίνας διόρθωσης των μη εφαρμόσιμων λύσεων δύναται να βοηθήσει στη σύγκλιση του αλγορίθμου.

Βιβλιογραφία

1. Ημερίδα με θέμα «Εξοικονόμηση ενέργειας» που πραγματοποιήθηκε την Παρασκευή 3/11/06 από την Ακαδημία Αθηνών και το Ε. Μ. Πολυτεχνείο
2. V.Pareto. «Cours d' Economie Politique», Libraire Droz Geneve, 1964(first edition in 1896)
3. Subir Sen, D. P. Kothari Optimal thermal generating unit commitment: a review, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 20, Issue 7, October 1998, Pages 443-451
4. D. Dasgupta, D.R. McGregor. 'Thermal unit commitment using genetic algorithms'. IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, volume 141, pages 459–465, 1994.
5. H. Chen, X. Wang. 'Cooperative coevolutionary algorithm for unit commitment'. IEEE Transactions on Power Systems, volume 16, pages 128–133, 2002.
6. S.A. Kazarlis, A.G. Bakirtzis, V. Petridis. 'A genetic algorithm solution to the unit commitment problem'. IEEE Transactions on Power Systems, volume 11(1), pages 83–92, 1996.
7. A.H Mantawy, Y.L. AbdelMagid, S.Z. Selim. 'Integrating genetic algorithms, tabu search, and simulated annealing for the unit commitment problem'. IEEE Transactions on Power Systems, volume 14(3), pages 829–836, 1999.
8. N. P. Padhy, 'Unit Commitment – A Bibliographical Survey' IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 2, pp.1196-1205, May 2004
9. Gwo-Ching Liao, Ta-Peng Tsao 'Application embedded chaos search immune genetic algorithm for short-term unit commitment' Electric Power Systems Research, Volume 71, Issue 2, October 2004, Pages 135-144
10. R. Nayak, J. D. Sharma 'A hybrid neural network and simulated annealing approach to the unit commitment problem' Computers & Electrical Engineering, Volume 26, Issue 6, 31 August 2000, Pages 461-477
11. Gwo-Ching Liao, Ta-Peng Tsao 'Using chaos search immune genetic and fuzzy system for short-term unit commitment algorithm' International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 28, Issue 1, January 2006, Pages 1-12
12. Yann REBOURS Daniel KIRSCHEN 'what is spinning reserve' university of manchester 19-09-2005
13. L. Goel, Z. Song, P. Wang 'Well-being analysis of spinning reserve in a bilateral power market' Electric Power Systems Research, Volume 69, Issue 1, April 2004, Pages 37-42
14. Κ. Χ. Γιαννάκογλου. 'Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στην Αεροδυναμική', Εκδόσεις ΕΜΠ (3η Έκδοση), Αθήνα, 2005
15. 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
16. Happ, H. H., Johnson, R. C. and Wright, W. J., Large scale hydrothermal unit commitment method and results. IEEE Transactions on PAS, 1971, 90(3), 1373-1384
17. Lee, F. N., The application of commitment utilization factor (CUF) to thermal unit commitment. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2), 691-698
18. Wang, S. J., Shahidehpour, S. M., Kirschen, D. S. and Irisarri, G. D., Short term generation scheduling with transmission and environmental constraints using an augmented Lagrangian relaxation. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3), 1294-1301
19. Virmani, S., Imhof, K. and Mukherjee, S., 'Implementation of a Lagrangian relaxation based unit commitment problem'. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, Vol, PWRS-4(4), 1373-1379
20. Pang, C. K., Sheble, G. B. and Albuyeh, F., Evaluation of dynamic programming based methods and multiple area representation for thermal unit commitments. IEEE Transactions on PAS, 1981, 100(3), 1212-1218
21. Ouyang, Z. and Shahidehpour, S. M., An intellegent dynamic programming for unit commitment application. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, Vol. PWRS-6(3), 1203-1209
22. 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
23. A. I. 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

24. Suzannah Yin Wa Wong 'An enhanced simulated annealing approach to unit commitment' International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 20, Issue 5, June 1998, pages 359-368
25. Grzegorz Dudek 'Adaptive simulated annealing schedule to the unit commitment problem' Electric Power Systems Research, Volume 80, Issue 4, April 2010, Pages 465-472
26. S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt and M. P. Vecchi, 'Optimization by Simulated Annealing' Science New Series, Vol. 220, No. 4598 (May 13, 1983), pp. 671-680
27. Glover F., "Tabu search – Part I", ORSA Journal on Computing 1, 1989, 190-206
28. F., "Tabu search – Part II", ORSA Journal on Computing 2, 1989, 4-32
29. Glover F., M. Laguna, E. Taillard and D. de Werra, eds., "Tabu search", Annals of Operational Research 41, 1993
30. A. H. Mantawy, Youssef L. Abdel-Magid, Shokri Z. Selim , 'A new genetic-based tabu search algorithm for unit commitment problem' Electric Power Systems Research, Volume 49, Issue 2, 1 March 1999, Pages 71-78
31. M. Dorigo, E. Bonabeau, G. Theraulaz, Ant algorithms and stigmergy, Future Generation Computer Systems 16 (2000) 851-871
32. Sishaj P. Simon, Narayana Prasad Padhy, R.S. Anand 'An ant colony system approach for unit commitment problem' International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 28, Issue 5, June 2006, Pages 315-323
33. Libao Shi, Jin Hao, Jiaqi Zhou, Guoyu Xu 'Ant colony optimization algorithm with random perturbation behavior to the problem of optimal unit commitment with probabilistic spinning reserve determination' Electric Power Systems Research, Volume 69, Issues 2-3, May 2004, Pages 295-303
34. K.C. Giannakoglou - Acceleration of genetic algorithms using artificial neural networks – theoretical background, von Karman Institute LS 2000-07, May 2000
35. K.C. Giannakoglou, A.P. Giotis - Acceleration of genetic algorithms using artificial neural networks – application of the method, von Karman Institute LS 2000-07, May 2000
36. G. B. Sheble et al., "Unit commitment by genetic algorithm with penalty methods and a comparison of Lagrangian search and genetic algorithm economic dispatch example," Int. J. Elect. Power Energy Syst., vol. 18, no. 6, pp. 339–346, Feb. 1996
37. H. Yang, P. Yang, and C. Huang, "A parallel genetic algorithm approach to solving the unit commitment problem: implementation on the transputer networks," IEEE Trans. Power Syst., vol. 12, pp. 661–668, May 1997
38. A. Rudolf and R. Bayrleithner, "A genetic algorithm for solving the unit commitment problem of a hydro-thermal power systems," IEEE Trans. Power Syst., vol. 14, pp. 1460–1468, Nov. 1999
39. K. S. Swarup and S. Yamashiro, "Unit commitment solution methodology using genetic algorithm," IEEE Trans. Power Syst., vol. 17, pp. 87–91, Feb. 2002
40. K. De Jong. 'Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems'. Ph.D. Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, 1975
41. Koza, J.R. (1992), *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, MIT Press
42. L. Davis. Handbook of genetic algorithms, Van Nostrand Reinhold, 1991
43. 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
44. A. H. Mantawya, Youssef L. Abdel-Magida, and Shokri Z. Selimb 'A new genetic-based tabu search algorithm for unit commitment problem' Electric Power Systems Research Volume 49, Issue 2, 1 March 1999, Pages 71-78
45. 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
46. C. Dang, M. Li, "A floating-point genetic algorithm for solving the unit commitment problem", European Journal of Operational Research, Volume 181, Issue 3, 16 September 2007, Pages 1370-1395
47. Boris Pavez-Lazo , Jessica Soto-Cartes 'A deterministic annular crossover genetic algorithm optimisation for the unit commitment problem' Department of Electrical Engineering, La Frontera University, Temuco, Chile
48. Gwo-Ching Liao, Ta-Peng Tsao 'Application embedded chaos search immune genetic algorithm for short-term unit commitment' Electric Power Systems Research, Volume 71, Issue 2, October 2004, Pages 135-144

49. C. A. Georgopoulou, K. C. Giannakoglou, "A two-level method for solving power generating unit commitment problems", Lab. of Thermal Turbomachines, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, NTUA
50. 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
51. C.A. GEORGOPOULOU, K.C. GIANNAKOGLU: Two-Level, Two-Objective Evolutionary Algorithms for Solving Unit Commitment Problems, ", Applied Energy, Volume 86, Issues 7-8, July-August 2009, Pages 1229-1239
52. Διδακτορική διατριβή Χαρίκλειας Γεωργοπούλου, 'Τεχνικές Βελτιστοποίησης για τον Προγραμματισμό Λειτουργίας Αεριο/Ατμοστροβιλικών Μονάδων και το Σχεδιασμό Συνιστωσών τους'
53. Κωνσταντίνος Δ. Ρακόπουλος, καθηγητής Ε.Μ.Π. 'Αρχές βιομηχανικών αεριοστροβίλων' Εκδόσεις Φούντα, Αθήνα, 2001
54. Ε. Κακαράς, Δ. Γιαννακόπουλος, Σ. Καρέλλας, Π. Βουρλιώτης 'Σημειώσεις αντιρρυπαντικής τεχνολογίας θερμικών σταθμών' Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2009
55. Κίμωνας Α. Αντωνόπουλος, καθηγητής Ε.Μ.Π. 'Θερμικά – ηλιακά συστήματα' Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2004
56. Κ. Μαθιουδάκης, καθηγητής Ε.Μ.Π. 'Λειτουργία αεριοστροβίλων και ατμοστροβίλων' Εκδόσεις ΕΜΠ (2η Έκδοση), Αθήνα, 2009
57. Κ.Δ. Παπαηλίου, Κ.Μ. Μαθιουδάκης, Κ.Χ. Γιαννάκογλου 'Εισαγωγή στις θερμικές στροβιλομηχανές' Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2000
58. Ε. Κακαράς, καθηγητής Ε.Μ.Π. 'Θερμοηλεκτρικοί σταθμοί' Εκδόσεις Φούντα, Αθήνα, 2003
59. D. Goldberg, 'Genetic Algorithms in search, Optimization and Machine Learning' ,Addison-Wesley 1989
60. Z. Michalewicz, 'Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs' , IEEE Press 1992
61. D. Fogel 'Evolutionary Computation: Toward a New Philosophy of Machine intelligence
62. Back T. "Evolutionary Algorithms in Theory and Practice. Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms". Oxford University Press
63. <http://www.go-green.com.gr>
64. <http://www.cres.gr>
65. <http://www.aenaon.net>
66. P. Hellekalek 'Good random number generators are (not so) easy to find' Dept. of Mathematics, Salzburg University, Hellbrunner Straße 34 A-5020 Salzburg Austria
67. http://europa.eu/legislation_summaries/energy/
68. Κ. Τσιάκας. 'Μέθοδος προγραμματισμού και υπολογισμού της βέλτιστης ανάθεσης φορτίου σε μονάδες απομονωμένων συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής με πιθανοτικές βλάβες' Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Ρευστών, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών, Αθήνα, 2010
69. M. Mazumdar, L. Chrzan 'Monte Carlo stochastic simulation of electric power generation system production costs under time-dependent constraints', Department of Industrial Engineering, University of Pittsburgh February 1995
70. Eva Sinha , Barbara S. Minsker 'Multiscale island injection genetic algorithms for groundwater remediation' Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois, Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA, December 2005
71. S. O. Orero and M. R. Irving, 'A genetic algorithm for generator scheduling in power systems', *Elect. Power Energy Syst.*, vol. 18, no. 1, pp. 19–26, 1996.
72. G. F. Luger and W. A. Stubblefield, *Artificial Intelligence*. Redwood City, CA: Benjamin Cummings, 1993.