



**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Ρευστών  
Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών

**ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ  
ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΜΟΝΑΔΕΣ  
ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ  
ΜΕ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΕΣ ΒΛΑΒΕΣ**

Διπλωματική Εργασία

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΤΣΙΑΚΑΣ**

Επιβλέπων : ΚΥΡΙΑΚΟΣ Χ. ΓΙΑΝΝΑΚΟΓΛΟΥ  
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

*Αθήνα, Φεβρουάριος 2010*



# ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΕΣ ΒΛΑΒΕΣ

Διπλωματική Εργασία  
**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΤΣΙΑΚΑΣ**

Επιβλέπων: ΚΥΡΙΑΚΟΣ Χ. ΓΙΑΝΝΑΚΟΓΛΟΥ, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ  
Αθήνα, 2010

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το πρόβλημα της βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας και της ανάθεσης φορτίου σε μονάδες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, για δεδομένη ζήτηση, λαμβάνοντας υπόψη πιθανοτικές βλάβες. Η εργασία βασίζεται και επεκτείνει τη μέθοδο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της σχετικής διδακτορικής διατριβής της Δρ. Χαρίκλειας Γεωργοπούλου [1], στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ. Τα βασικά εργαλεία αυτής της μεθόδου είναι οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (ΕΑ), τα δίκτυα συναρτήσεως ακτινικής βάσης (RBF δίκτυα) και η προσομοίωση Monte-Carlo. Σκοπός της εργασίας είναι να υπάρξει μια μέθοδος εύρεσης βέλτιστων λύσεων στο παραπάνω πρόβλημα απομονωμένων συστημάτων, με ορίζοντα προγραμματισμού της τάξης της εβδομάδας, η οποία θα είναι ιδιαίτερα οικονομική σε υπολογιστικό χρόνο, εκμεταλλευόμενη ένα νέο τρόπο ένταξης προσεγγιστικών προτύπων αξιολόγησης ή μεταπροτύπων - εδώ, τεχνητών νευρωνικών δικτύων - στην, κατά τα άλλα υπολογιστικά ακριβή, εξελικτική βελτιστοποίηση. Στην παρούσα εργασία προτείνονται και διερευνούνται δύο μέθοδοι επιλογής αντιπροσωπευτικών σεναρίων για την εκπαίδευση RBF δικτύων που εφαρμόζονται στην προσομοίωση Monte-Carlo. Επιπλέον, γίνεται εφαρμογή της μεθόδου βελτιστοποίησης σε δύο εικονικά απομονωμένα συστήματα ελληνικών νησιών και αξιολογούνται τα αποτελέσματα.

Στην παρούσα εργασία, μεταξύ άλλων, γίνεται περιγραφή της διεπίπεδης μεθόδου βελτιστοποίησης και του λογισμικού αξιολόγησης που χρησιμοποιείται. Περιγράφεται η δομή των εξελικτικών αλγορίθμων υποβοηθούμενων από μεταπρότυπα, των RBF δικτύων και της προσομοίωσης Monte-Carlo. Τέλος, γίνεται περιγραφή των χαρακτηριστικών των μονάδων των δύο συστημάτων, στα οποία γίνεται εφαρμογή της μεθόδου βελτιστοποίησης, και προσαρμογή των χαρακτηριστικών αυτών στη μέθοδο της βελτιστοποίησης.



## Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Κατ' αρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας κ. Κυριάκο Χ. Γιαννάκογλου, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ, για την υπομονή και τη διάθεση που επέδειξε όλο το διάστημα που με καθοδηγούσε και με επέβλεπε. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Δρ. Χαρίκλεια Γεωργοπούλου, στη διδακτορική διατριβή της οποίας βασίζεται και η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, η οποία με την εμπειρία και τις γνώσεις της ως δημιουργός του λογισμικού της μεθόδου που χρησιμοποιείται συνέβαλε καθοριστικά στην εκπόνηση της εργασίας. Θα ήθελα, επίσης να ευχαριστήσω θερμά τη Δρ. Ελένη Μπονατάκη, υποτομέαρχη της Διεύθυνσης Μελετών Κατασκευών Θερμοηλεκτρικών Έργων της ΔΕΗ για τη συνεργασία της στην παροχή αντιπροσωπευτικών στοιχείων σχετικά με τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά μονάδων που χρησιμοποιούνται στην εγχώρια βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη και τους υποψήφιους διδάκτορες της Μονάδας Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής και Βελτιστοποίησης του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών ΕΜΠ, για τη βοήθειά τους, κυρίως σε πρακτικά θέματα χρήσης λογισμικού.



# Περιεχόμενα

## 1. Εισαγωγή

- 1.1. Η ανάγκη για βελτιστοποίηση του προγράμματος λειτουργίας σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- 1.2. Περιγραφή του βασικού προβλήματος βελτιστοποίησης
  - 1.2.1 Μοντέλο λειτουργίας μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
  - 1.2.2 Ορισμός συνάρτησης στόχου – Ολικό κόστος λειτουργίας
  - 1.2.3 Περιορισμοί του προβλήματος
- 1.3. Διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης με πιθανοτικές βλάβες
  - 1.3.1. Μοντελοποίηση τυχαίων βλαβών
  - 1.3.2. Εκτίμηση του ολικού κόστους λειτουργίας μονάδων με πιθανοτικές βλάβες
- 1.4. Τεχνικές βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- 1.5. Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

## 2. Περιγραφή του Συστήματος

- 2.1. Περιγραφή του δικτύου και της τοποθεσίας του σταθμού
- 2.2. Περιγραφή των μονάδων και υπολογισμός βασικών χαρακτηριστικών τους
- 2.3. Περιγραφή της χρονοσειράς ζήτησης

## 3. Εξελικτικοί Αλγόριθμοι και Προσεγγιστική Προαξιολόγηση

- 3.1. Εξελικτικοί Αλγόριθμοι
- 3.2. Βασική περιγραφή ενός εξελικτικού αλγορίθμου
- 3.3. Βασικοί τελεστές εξελικτικών αλγορίθμων
- 3.4. Εξελικτικοί αλγόριθμοι υποβοηθούμενοι από μεταπρότυπα (Προσεγγιστική Προαξιολόγηση)
- 3.5. Λειτουργία μεταπροτύπου - RBF Νευρωνικά Δίκτυα

#### **4. Επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με εξελικτικούς αλγόριθμους**

- 4.1. Βασικά δεδομένα του προβλήματος και στόχος της βελτιστοποίησης
- 4.2. Επίλυση με εξελικτικούς αλγόριθμους
- 4.3. Βελτιστοποίηση με εξελικτικούς αλγορίθμους λαμβάνοντας υπόψη πιθανοτικές βλάβες
- 4.4. Προσθήκη της μεθόδου Monte-Carlo στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης με διεπίπεδο εξελικτικό αλγόριθμο

#### **5. Επιτάχυνση της βελτιστοποίησης με εξελικτικούς αλγορίθμους λαμβάνοντας υπόψη πιθανοτικές βλάβες**

- 5.1. Ανάγκη διατύπωσης νέας μεθόδου για την επιτάχυνση της βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη πιθανοτικές βλάβες
- 5.2. Μέθοδος δημιουργίας μεταπροτύπου με RBF νευρωνικό δίκτυο
- 5.3. Μέθοδοι επιλογής των αντιπροσωπευτικών σεναρίων
- 5.4. Πρακτικά θέματα και εφαρμογές των μεθόδων επιλογής αντιπροσωπευτικών σεναρίων

#### **6. Εφαρμογές**

- 6.1. Βελτιστοποίηση του προγράμματος λειτουργίας σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δύο μονάδων για χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού μίας εβδομάδας
  - 6.1.1. Περιγραφή του συστήματος
  - 6.1.2. Βελτιστοποίηση
  - 6.1.3. Αξιολόγηση
- 6.2. Βελτιστοποίηση του προγράμματος λειτουργίας σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πέντε μονάδων για χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού τριών ημερών (εικονικό δίκτυο ελληνικού νησιού)
  - 6.2.1. Περιγραφή του συστήματος
  - 6.2.2. Βελτιστοποίηση
  - 6.2.3. Αξιολόγηση



## **7. Επίλογος – Συμπεράσματα**

- 7.1. Ανακεφαλαίωση
- 7.2. Η Προτεινόμενη Μέθοδος, εν συντομία
- 7.3. Νέα στοιχεία
- 7.4. Σχόλια
- 7.5. Γενίκευση και Προτάσεις

## **Παράρτημα Α**

- A.1. Μονάδα 1 – Αεριοστρόβιλος LM6000PC Sprint
- A.2. Μονάδα 2 – Αεριοστρόβιλος LM2500+
- A.3. Μονάδα 3 – Μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου

## **Παράρτημα Β**

- B.1. Κύκλος Carnot
- B.2. Κύκλος Ericsson
- B.3. Κύκλος Clausius - Rankine
- B.4. Κύκλος Joule - Brayton

## **Βιβλιογραφία**



# 1.Εισαγωγή

## 1.1 Η ανάγκη για βελτιστοποίηση του προγράμματος λειτουργίας σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Στις σύγχρονες κοινωνίες η ανάγκη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας είναι όλο και πιο επιτακτική. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία των τελευταίων ετών, η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται συνεχώς.

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η καύση γαιανθράκων και υδρογονανθράκων. Οι συνέπειες της χρήσης των ανωτέρω καυσίμων είναι ήδη γνωστές και, πιο συγκεκριμένα, τα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκαλούνται από την καύση. Επιπλέον, οι γαιάνθρακες είναι καύσιμα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν οικονομικά μόνο σε περιοχές που είναι πλούσιες σε αυτούς στο υπέδαφός τους. Από την άλλη, οι υγροί υδρογονάνθρακες –αργό πετρέλαιο, diesel κ.λ.π.- παρουσιάζουν αρκετά μεγάλο κόστος αγοράς. Αυτό οφείλεται σε γεωπολιτικούς παράγοντες, καθώς και στην διαπίστωση ότι τα κοιτάσματα πετρελαίου συνεχώς εξαντλούνται. Για τους λόγους αυτούς έχει προταθεί η χρήση πολλών εναλλακτικών πηγών ενέργειας, όπως είναι η υδροηλεκτρική, η αιολική, η ηλιακή και η γεωθερμική ενέργεια. Οι μορφές αυτές είναι πολλά υποσχόμενες για το μέλλον, ωστόσο εμφανίζουν ακόμα προβλήματα. Τα κυριότερα είναι η σημαντική εξάρτησή τους από τη τοποθεσία και από μετεωρολογικούς παράγοντες, ο χαμηλός ακόμα βαθμός απόδοσης μετατροπής ενέργειας, η χρονικά μεταβαλλόμενη ( από παράγοντες που δεν καθορίζονται από το διαχειριστή ) διαθεσιμότητά τους, η δυσκολία ένταξής τους σε ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρισμού και το υψηλό κόστος τους. Το υψηλό κόστος τους οφείλεται κυρίως στη νέα τεχνολογία και τον εξοπλισμό που απαιτείται για την εκμετάλλευση αυτών των μορφών ενέργειας.

Από τα προαναφερθέντα εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι σύγχρονες κοινωνίες θα συνεχίσουν να εξαρτώνται από την καύση γαιανθράκων και υδρογονανθράκων για την κάλυψη των αναγκών τους, όμως πρέπει να βρεθούν πιο αποδοτικοί τρόποι για την εκμετάλλευσή τους. Ένας τρόπος είναι η βελτιστοποίηση της καύσης ώστε να παράγονται μικρότερες ποσότητες ρυπαντών και να αυξηθεί ο βαθμός απόδοσης. Ένας άλλος τρόπος που μπορεί να βελτιώσει το βαθμό απόδοσης είναι η βελτίωση των υπόλοιπων συνιστωσών (π.χ. συνιστώσες στροβιλομηχανών, εναλλάκτες θερμότητας κ.λ.π.), πέραν των συσκευών καύσης, που χρησιμοποιούνται στους ατμοηλεκτρικούς, τους αεριοστροβιλικούς και τους σταθμούς παραγωγής Diesel για τη μετατροπή της θερμογόνου δύναμης του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, για να γίνει αυτό απαιτείται η αντικατάσταση (ολική ή μερική ) του υπάρχοντος εξοπλισμού, διαδικασία που εμφανίζει μεγάλο κόστος.

Ένας επιπρόσθετος τρόπος για να μειωθεί η κατανάλωση καυσίμου, και κατ' επέκταση το κόστος λειτουργίας ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς να χρειαστεί αντικατάσταση του εξοπλισμού είναι η βελτιστοποίηση του προγράμματος λειτουργίας. Η βελτιστοποίηση αυτή βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του κόστους καυσίμου (υπολογισμένο σε MWh ) για να καλυφθεί μία συγκεκριμένη χρονοσειρά ζήτησης. Επειδή με τον τρόπο αυτό η μοναδική διαφοροποίηση οφείλεται σε τροποποίηση του προγράμματος λειτουργίας, επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση του κόστους χωρίς να απαιτούνται έξοδα για ανανέωση ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Στα επόμενα το πρόβλημα της βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας για ένα σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα αναφέρεται συντομογραφικά ως UC (από τον αντίστοιχο αγγλικό όρο – unit commitment).

## 1.2 Περιγραφή του βασικού προβλήματος βελτιστοποίησης

Το πρόβλημα αναφέρεται στη βελτιστοποίηση του προγράμματος λειτουργίας ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (unit commitment - UC) με  $M$  μονάδες παραγωγής ενέργειας (σε πρώτη φάση χωρίς να λαμβάνονται υπόψη πιθανοτικές βλάβες). Οι μονάδες μπορεί να είναι αεριοστροβιλικές, ατμοηλεκτρικές, συνδυασμένου κύκλου κ.λ.π. Η βελτιστοποίηση αναφέρεται πάντα σε μία ζήτηση  $N$  ωρών, η οποία πρέπει να καλυφθεί, και αυτή η περίοδος του χρόνου αποτελεί το χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού. Επειδή οι μονάδες παραγωγής υπόκεινται σε κάποιους τεχνικούς περιορισμούς, για τους οποίους λόγος θα γίνει στη συνέχεια, είναι σχεδόν πάντα αδύνατο η παραγωγή να ακολουθεί επακριβώς τη ζήτηση. Επιπλέον, λόγω της πιθανότητας η τιμή της ζήτησης να παρουσιασθεί λίγο μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη, ή λόγω αδυναμίας μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. αιολικά πάρκα) να παράγουν την προβλεπόμενη ενέργεια, πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα οι μονάδες που βρίσκονται σε λειτουργία να μπορούν να παράγουν ενέργεια κατά ένα ποσοστό μεγαλύτερη από αυτή που απαιτεί η ζήτηση του δικτύου. Η τελευταία περίπτωση χαρακτηρίζεται ως περιστρεφόμενη εφεδρεία (spinning reserve) και θα αναλυθεί εκτενέστερα στη συνέχεια. Όλα τα παραπάνω πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης με αποτέλεσμα η τελευταία να περιπλέκεται όλο και περισσότερο.

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης χωρίζεται σε δύο, συνήθως διακριτά, σκέλη. Το δεύτερο σκέλος αφορά στον τρόπο με τον οποίο διανέμεται η παραγωγή ενέργειας για κάθε ώρα στις διάφορες μονάδες, για να καλυφθεί η ζήτηση με τον οικονομικότερο τρόπο (economic load dispatch). Για κάθε μονάδα στο πλαίσιο αυτού του σκέλους της βελτιστοποίησης, ορίζεται η φόρτιση  $x_{i,j}$  της  $i$  μονάδας κατά την ώρα  $j$ . Η φόρτιση κατά την ώρα  $j$  ορίζεται από την ακόλουθη σχέση.

$$x_{i,j} = \frac{P_j^i}{P_{\max}^i}, \quad i = 1, \dots, M, \quad j = 1, \dots, N \quad (1.2.1)$$

Στη σχέση (1.2.1) αναφέρεται ως  $P_j^i$  η παραγωγή της  $i$  μονάδας κατά τη  $j$  ώρα και ως  $P_{\max}^i$  η τεχνικά μέγιστη παραγωγή ενέργειας για την  $i$  μονάδα. Κατά το δεύτερο αυτό σκέλος της βελτιστοποίησης βρίσκονται οι βέλτιστες τιμές  $x_{i,j}$  όλων των μονάδων που λειτουργούν σε κάθε ώρα στο χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού.

Το πρώτο σκέλος της βελτιστοποίησης, καθορίζει σε κάθε ώρα ποιες μονάδες θα λειτουργούν και ποιες όχι προκειμένου να καλυφθεί η ζήτηση για το χρονικό ορίζοντα που μελετάται. Το σκέλος αυτό μέσα σε έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης προηγείται χρονικά του δεύτερου σκέλους. Επομένως για να βελτιστοποιηθεί το πρόγραμμα λειτουργίας ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, επιλέγεται πρώτα η κατάσταση κάθε μονάδας (περισσότερα για τις καταστάσεις των μονάδων στην παράγραφο 1.2.1), επιλύεται ένα υποπρόβλημα βελτιστοποίησης για να βρεθούν οι βέλτιστες φορτίσεις των μονάδων και παράγεται έτσι μία υποψήφια λύση για τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

### 1.2.1 Μοντέλο λειτουργίας μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά μία μονάδας παραγωγής ενέργειας παρέχονται από τον κατασκευαστή και ανάμεσά τους η σημαντικότερη ίσως πληροφορία είναι το τεχνικό μέγιστο και το τεχνικό ελάχιστο της μονάδας, δηλαδή η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή ηλεκτρικής ισχύος που μπορεί να παράγει η μονάδα.

Μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να βρίσκεται σε μία από της ακόλουθες τέσσερις καταστάσεις.

- Κατάσταση κανονικής λειτουργίας (ON): Όταν μία μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας παράγει ενέργεια μεταξύ του τεχνικού της ελαχίστου και του τεχνικού της μεγίστου. Επομένως, όταν μία μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση ON ορίζεται γι' αυτή μία μη-μηδενική τιμή της φόρτισης  $x_{i,j}$ .
- Κατάσταση κράτησης (OFF): Όταν μία μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση κράτησης δεν παράγει καθόλου ενέργεια και επομένως η τιμή της φόρτισης είναι εξ ορισμού μηδενική.
- 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 δεν συνεισφέρει στην κάλυψη της ζήτησης του συστήματος και επομένως δεν υπολογίζεται.
- Κατάσταση Σβέσης (SHDN- Shut Down): Όταν μία μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση σβέσης, όπως και στην περίπτωση που βρίσκεται σε κατάσταση έναυσης παράγει ισχύ μικρότερη από το τεχνικό της ελάχιστο και 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).

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 και σβέσης. Είναι αναμενόμενο ότι μία μονάδα που βρίσκεται σε κράτηση χρειάζεται κάποιο χρόνο για να βρεθεί σε θέση να παράγει το τεχνικό της ελάχιστο (χρόνος για επιτευχθούν οι απαραίτητες θερμοκρασίες λειτουργίας, να υπερνικηθούν οι αδράνειες κ.λ.π.) και 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.). Οι χρόνοι έναυσης ( $T_{STUP}$ ) και σβέσης( $T_{SHDN}$ ) παρέχονται από τον κατασκευαστή. Επιπλέον, ένας ακόμα περιορισμός στη λειτουργία των μονάδων είναι ο ελάχιστος χρόνος που μπορεί η μονάδα να παραμείνει σε κατάσταση ON ή OFF ( $T_{RAMP}$ ). Οι περιορισμοί αυτοί πρέπει να τηρούνται κατά τη βελτιστοποίηση.

Ο απλούστερος τρόπος για να οριστεί η κατάσταση στην οποία βρίσκεται μία μονάδα  $i$  κατά την ώρα  $j$  χρησιμοποιεί δυαδικές μεταβλητές. Η δυαδική μεταβλητή  $s_{i,j}$  παίρνει την τιμή 1 όταν η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας και την τιμή 0 όταν η μονάδα βρίσκεται σε μία από τις υπόλοιπες τρεις καταστάσεις. Για να διακρίνουμε σε ποια από τις τρεις καταστάσεις βρίσκεται η μονάδα  $i$  κατά την ώρα  $j$  όταν η τιμή της μεταβλητής  $s_{i,j}$  είναι μηδέν αρκεί να λάβουμε υπόψη τις τιμές της μεταβλητής  $s$  στην προηγούμενη και την επόμενη ώρα ( $s_{i,j-1}$  και  $s_{i,j+1}$ ). Η συσχέτιση των τιμών της μεταβλητής  $s$  και της κατάστασης της μονάδας παρουσιάζεται αναλυτικά στον πίνακα 1.2.1.1.

<b>Ωρα j</b>	<b>OFF</b>	<b>SHDN</b>	<b>STUP</b>	<b>ON</b>
$s_{i,j-1}$	0	1	0	1
$s_{i,j}$	0	1	0	1
<b>Ωρα j+1</b>	<b>OFF</b>	<b>SHDN</b>	<b>STUP</b>	<b>ON</b>
$s_{i,j}$	0	1	0	1
$s_{i,j+1}$	0	0	1	1

**Πίνακας 1.2.1. 1:** Συσχέτιση καταστάσεων της μονάδας  $i$  με τις τιμές των μεταβλητών  $s_{i,j-1}$ ,  $s_{i,j}$  και  $s_{i,j+1}$ .

### 1.2.2 Ορισμός συνάρτησης στόχου – Ολικό κόστος λειτουργίας

Από τη στιγμή που η βελτιστοποίηση αποσκοπεί στην εύρεση του οικονομικότερου προγράμματος λειτουργίας του σταθμού, βασική συνάρτηση-στόχος του προβλήματος (objective function) είναι το ολικό κόστος λειτουργίας του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής (Total Operating Cost - TOC) του οποίου επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση μέσω μιας μεθόδου βελτιστοποίησης. Στο ολικό κόστος λειτουργίας συμπεριλαμβάνονται τα λειτουργικά κόστη (Operating Cost - OC) όλων των μονάδων για τον ορίζοντα προγραμματισμού ανάλογα με την κατάσταση και τη φόρτισή τους. Βέβαια υπάρχει η ελευθερία να εισαχθούν και άλλες παράμετροι όπως είναι για παράδειγμα η απόσβεση κ.λ.π. αρκεί να ποσοτικοποιηθούν κατάλληλα. Κάτι τέτοιο δεν θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι όμως εύκολο να εισαχθεί στην μεθοδολογία χωρίς να απαιτούνται ιδιαίτερες τροποποιήσεις. Για να ληφθούν υπόψη και οι περιορισμοί του προβλήματος, στη μαθηματική έκφραση του ολικού κόστους λειτουργίας, περιλαμβάνεται για κάθε ώρα και ένας όρος ποινής  $V$  σε περίπτωση μη τήρησης των περιορισμών. Η μαθηματική έκφραση του ολικού κόστους λειτουργίας παρέχεται στην σχέση (1.2.2.1.)

$$TOC = \sum_{j=1}^N \left( \sum_{i=1}^M OC_{i,j} + V_j \right) \quad (1.2.2.1)$$

Για λόγους ευκολίας το λειτουργικό κόστος OC εκφράζεται σε ενέργεια καταναλισκόμενου καυσίμου (σε MWh) χωρίς αυτό να βλάπτει τη γενικότητα του όρου. Στο λειτουργικό κόστος περιλαμβάνεται η κατανάλωση του καυσίμου όταν μία μονάδα είναι σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας, που ορίζεται από ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού της φόρτισης (ή κατ' επέκταση της παραγωγής) της μονάδας, καθώς και η κατανάλωση καυσίμου που αντιστοιχεί στο κόστος μίας έναυσης ή μίας σβέσης, στην περίπτωση που η μονάδα βρίσκεται σε μία από της δύο αυτές καταστάσεις. Αν η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση κράτησης τότε το λειτουργικό της κόστος λαμβάνεται εξ ορισμού μηδενικό. Το κόστος πραγματοποίησης σβέσης ( $C_{SHDN}$ ) θεωρείται σταθερό και παρέχεται από τον κατασκευαστή ή από δεδομένα του παρελθόντος. 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 ( $C_{cSTUP}$ , όπου ο δείκτης c σημαίνει cold). Αν το διάστημα δεν υπερβαίνει τον μέγιστο αυτό αριθμό ωρών τότε η έναυση χαρακτηρίζεται ως «θερμή» και συνοδεύεται από ένα κόστος «θερμής» έναυσης ( $C_{hSTUP}$ , όπου ο δείκτης h σημαίνει hot). Η μαθηματική διατύπωση της τιμής του λειτουργικού κόστους της μονάδας  $i$  κατά την ώρα  $j$  φαίνεται στους τύπους (1.2.2.2α) και (1.2.2.2β).

$$OC_{i,j} = \begin{cases} a_i(x_{i,j})^2 + b_i x_{i,j} + c_i + C_{STUPi,j} & , s_{i,j} = 1 \\ C_{SHDN} & , s_{i,j} = 0 \end{cases} \quad (1.2.2.2\alpha)$$

όπου  $a_i$ ,  $b_i$  και  $c_i$  οι συντελεστές του πολυωνύμου κατανάλωσης-φόρτισης (ή κατανάλωσης παραγόμενης ισχύος αν η φόρτιση αντικατασταθεί με την παραγόμενη ισχύ) της μονάδας  $i$  και  $C_{STUPi,j}$ ,  $C_{SHDN}$  τα κόστη έναυσης και σβέσης όπως ορίζονται από τη σχέση (1.2.2.2β). [1]

$$C_{STUP} = \begin{cases} 0 & , s_{i,j-1} = 1 \\ C_{STUP,i} & , s_{i,j-1} = 0 \end{cases} \quad C_{SHDN} = \begin{cases} 0 & , s_{i,j-1} = 0 \\ C_{SHDN,i} & , s_{i,j-1} = 1 \end{cases} \quad (1.2.2.2\beta)$$

### 1.2.3 Περιορισμοί του προβλήματος

Οι λύσεις που θα προκύψουν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης θα έχουν το ελάχιστο δυνατό κόστος, αλλά πρέπει παράλληλα να ικανοποιούν και ένα σύνολο περιορισμών για να μπορούν να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Οι περιορισμοί αυτοί χωρίζονται σε λειτουργικούς περιορισμούς και περιορισμούς που επιβάλλονται από το διαχειριστή του συστήματος παραγωγής ενέργειας.

#### Λειτουργικοί Περιορισμοί

Οι λειτουργικοί περιορισμοί αφορούν στους ελάχιστους χρόνους έναυσης, σβέσης και παραμονής σε μία κατάσταση. Έτσι κάθε φορά η τιμή της μεταβλητής  $s$  ελέγχεται με βάση την προηγούμενη τιμή της και διορθώνεται με βάση τη σχέση (1.2.3.1).

$$s_{i,j} - s_{i,j-1} = \begin{cases} -1 \Rightarrow s_{i,j+k} = 0, \forall k \in [1, T_{SHDN}] \\ 0 \\ 1 \Rightarrow s_{i,j+k} = 0, \forall k \in [1, T_{STUP}] \end{cases} \quad (1.2.3.1)$$



Επίσης, ένας άλλος λειτουργικός περιορισμός αφορά στην τήρηση των αρχικών συνθηκών, αφού το βέλτιστο πρόγραμμα λειτουργίας πρέπει να ικανοποιεί τις αρχικές συνθήκες όλων των μονάδων για να μπορεί να εφαρμοστεί.

Τέλος, η παραγόμενη ισχύς από μία μονάδα όταν αυτή βρίσκεται σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας (ON) πρέπει να βρίσκεται μέσα στα όρια που καθορίζονται από το τεχνικό ελάχιστο και μέγιστο. Αυτός ο περιορισμός εφαρμόζεται σε κάθε μονάδα που είναι σε κατάσταση ON κατά την επίλυση του υποπροβλήματος της βέλτιστης ανάθεσης φορτίου για κάθε ώρα.

### Περιορισμοί που επιβάλλονται από το διαχειριστή του συστήματος

Ο βασικότερος περιορισμός που επιβάλλεται από το διαχειριστή του συστήματος και αποτελεί βασικό αντικείμενο της βελτιστοποίησης είναι η κάλυψη της ζήτησης του συστήματος. Η ζήτηση σε μία ώρα συμβολίζεται με  $d_j$  και για να μην παραβιάζεται ο συγκεκριμένος περιορισμός πρέπει να ισχύει η ισότητα της σχέσης (1.2.3.2).

$$d_j = \sum_{i=1}^M P_{i,j}, \forall j \in [1, T] \quad (1.2.3.2)$$

Σε περίπτωση που σε κάποια υποψήφια λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης η ζήτηση σε κάποια ώρα  $j$  δεν καλύπτεται ακριβώς τότε επιβάλλεται γι' αυτή την ώρα μία ποινή  $V_j$ , ανάλογη της παραβίασης της ζήτησης, η οποία προστίθεται στο λειτουργικό κόστος της υπόψη ώρας. Αυτό σημαίνει ότι επιβάλλεται ποινή και στις λύσεις που η παραγωγή προκύπτει μεγαλύτερη από τη ζήτηση. Ωστόσω όπως θα φανεί και στη συνέχεια, η μόνη περίπτωση να επιβληθεί ποινή για περίσσεια παραγόμενης ενέργειας είναι η ζήτηση να είναι μικρότερη από το μικρότερο τεχνικό ελάχιστο όλων των μονάδων, κάτι που συμβαίνει ιδιαίτερα σπάνια, όπως θα φανεί και στο κεφάλαιο 2, όπου περιγράφεται η ζήτηση του συστήματος και τα χαρακτηριστικά του.

Ένας ακόμη περιορισμός που επιβάλλεται από το διαχειριστή του συστήματος αφορά στη στρεφόμενη εφεδρεία (spinning reserve). Για να καλυφθούν απότομες αυξήσεις της ζήτησης, απαιτείται μία εφεδρεία των μονάδων σε παραγόμενη ενέργεια. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε ώρα οι μονάδες που είναι σε κατάσταση ON πρέπει να έχουν δυνατότητα επιπλέον παραγωγής ενέργειας πριν φτάσουν στη μέγιστη δυναμικότητα τους. Για να εφαρμοστεί αυτός ο περιορισμός πρέπει το άθροισμα των τεχνικών μεγίστων των μονάδων σε μία ώρα να μπορεί να υπερκαλύπτει τη ζήτηση επαυξημένη κατά ένα ποσοστό  $Sr(\%)$ . Η μαθηματική διατύπωση του περιορισμού παρουσιάζεται στη σχέση (1.2.3.3). Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η στρεφόμενη εφεδρεία είναι σημαντική σε περιπτώσεις που στο σύστημα συμμετέχουν και μονάδες όπως αιολικά πάρκα ή μονάδες ηλιακής ενέργειας. Αυτές η μορφές ενέργειας

χαρακτηρίζονται από στοχαστικότητα κυρίως λόγω μετεωρολογικών παραγόντων. Επίσης, η στρεφόμενη εφεδρεία κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική σε περίπτωση αιφνίδιας βλάβης σε κάποια από της μονάδες που βρίσκονται σε λειτουργία.

$$(1 + Sr)d_j < \sum_{i=1}^M P_{\max,i}, \forall j \in [1, T] \quad (1.2.3.3)$$

Όπως θα φανεί και στο κεφάλαιο 6 στις εφαρμογές, η απαίτηση σε στρεφόμενη εφεδρεία μπορεί να ενταχθεί εύκολα στην αξιολόγηση κάθε λύσης.

### 1.3 Διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης με πιθανοτικές βλάβες

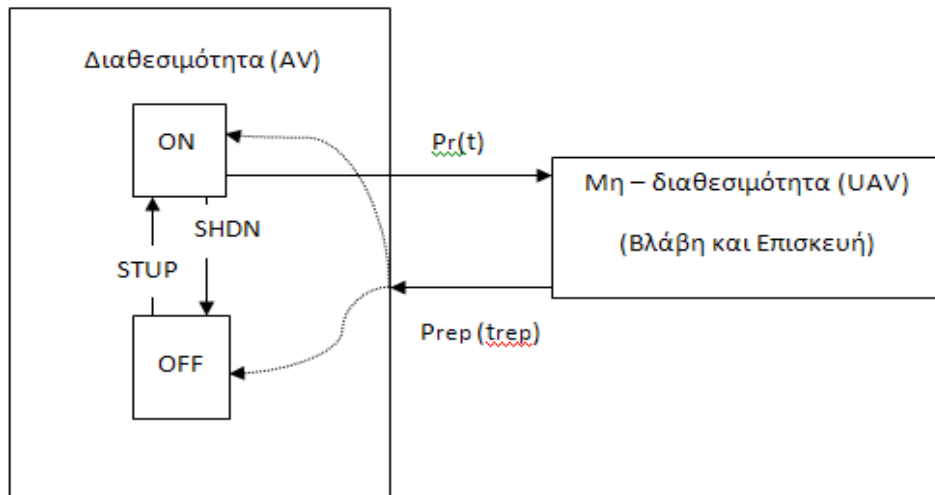
Στην παράγραφο που προηγήθηκε διατυπώθηκε το γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Παρά την εμφανή πολυπλοκότητα του μοντέλου που αναπτύχθηκε, υπάρχει ένα ακόμα σημείο που μένει να καλυφθεί.

Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας έχουν μία καθορισμένη διάρκεια λειτουργίας για την οποία δεν χρειάζεται συντήρηση, η οποία ορίζεται από τον κατασκευαστή της κάθε μονάδας, συνήθως σε ώρες συνεχούς λειτουργίας. Όταν παρέλθει αυτό το χρονικό διάστημα η μονάδα χρειάζεται συντήρηση για να μπορέσει να λειτουργεί χωρίς προβλήματα. Η προγραμματισμένη συντήρηση των μονάδων δεν θα απασχολήσει την παρούσα διπλωματική εργασία αν και η ένταξή τους στη μέθοδο που χρησιμοποιείται γίνεται με σχετική ευκολία. Επιπλέον, είτε λόγω δυσμενών συνθηκών λειτουργίας, είτε λόγω τυχαίων συμβάντων, συχνά εμφανίζονται βλάβες στις μονάδες παραγωγής οι οποίες χαρακτηρίζονται από στοχαστικότητα. Αν μία τυχαία βλάβη εμφανιστεί σε κάποια μονάδα κάποια ώρα στον ορίζοντα προγραμματισμού που αυτή η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση ON τότε αυτόματα η μονάδα τίθεται εκτός λειτουργίας και προχωράει στο στάδιο της επισκευής. Για να καλυφθεί η ζήτηση της συγκεκριμένης ώρας αυξάνεται η ισχύς κάποιας άλλης μονάδας που βρίσκεται σε κατάσταση ON αν αυτό επιτρέπεται από τα αποθέματα σε στρεφόμενη εφεδρεία. Αν αυτό δεν είναι δυνατό τότε θα τεθεί σε λειτουργία κάποια άλλη μονάδα, που όμως λόγω περιορισμών ως προς το χρόνο έναυσης θα αφήσει για κάποιο χρονικό διάστημα ένα μέρος της ζήτησης χωρίς κάλυψη. Επομένως, η αιφνίδια βλάβη μίας μονάδας συνήθως οδηγεί σε αύξηση του λειτουργικού κόστους είτε λόγω χρήσης μίας καθολικά μη-βέλτιστης λύσης στο υποπρόβλημα ανάθεσης φορτίου, είτε λόγω παραβίασης της ζήτησης. Οι βλάβες αυτές αποτελούν τυχαία συμβάντα και συνοδεύονται από αντίστοιχες πιθανότητες. Είναι λοιπόν εμφανής η αξία μίας μεθοδολογίας που θα παρέχει το βέλτιστο πρόγραμμα λειτουργίας λαμβάνοντας υπόψη και πιθανοτικές βλάβες.

#### 1.3.1 Μοντελοποίηση τυχαίων βλαβών

Αρχικά είναι ιδιαίτερα σημαντικό να περιγραφεί ένα μοντέλο τυχαίων βλαβών που να είναι συμβατό με την ήδη αναπτυχθείσα μεθοδολογία και στο οποίο θα βασιστεί η διαδικασία της βελτιστοποίησης. Το μοντέλο που αναπτύσσεται χαρακτηρίζεται από δύο καταστάσεις. Η μία κατάσταση αντιστοιχεί στη βλάβη μίας μονάδας και στον χρόνο που απαιτείται για την επισκευή της βλάβης και είναι η κατάσταση μη-διαθεσιμότητας (Unavailability-UAV). Όταν μία μονάδα δεν βρίσκεται σε διαδικασία επισκευής, τότε είναι διαθέσιμη για παραγωγή ενέργειας και βρίσκεται σε κατάσταση διαθεσιμότητας (Availability-AV). Οι καταστάσεις παραγωγής, κράτησης, έναυσης και σβέσης που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.2.1 εντάσσονται στην κατάσταση διαθεσιμότητας (AV) με τις αντίστοιχες τιμές της μεταβλητής  $s$ . Όταν μία μονάδα

βρίσκεται σε κατάσταση μη διαθεσιμότητας (UAV), τότε η παραγωγή ενέργειας από τη μονάδα είναι αδύνατη και επομένως η αντίστοιχη μεταβλητή κατάστασης  $s$  λαμβάνει εξ ορισμού την τιμή 0. Στο σχήμα 1.3.1.1 παρουσιάζεται το μοντέλο λειτουργίας των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με πιθανοτικές βλάβες. Παρουσιάζεται η διαδικασία μετάβασης από την κατάσταση κράτησης (OFF) στη κατάσταση παραγωγής (ON) και αντιστρόφως μέσω των καταστάσεων έναυσης (STUP) και σβέσης (SHDN) αντίστοιχα. Επίσης, παρουσιάζεται η μετάβαση από την κατάσταση διαθεσιμότητας (AV) στην κατάσταση μη-διαθεσιμότητας (UAV) και αντίστροφα μέσω των πιθανοτήτων  $P_r(t)$  και  $P_{rep}(t_{rep})$  αντίστοιχα. Η πιθανότητες αυτές θα ορισθούν στις επόμενες παραγράφους. Επίσης, στον πίνακα 1.3.1.1 παρουσιάζεται η αντιστοιχία μεταξύ των τιμών της μεταβλητής κατάστασης  $s$  μίας μονάδας και των αντίστοιχων καταστάσεων.



**Σχήμα 1.3.1. 1:** Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται το μοντέλο λειτουργίας μονάδων ηλεκτροπαραγωγής λαμβάνοντας υπόψη πιθανοτικές βλάβες. Παρουσιάζονται επίσης και οι διαδικασίες μετάβασης από τη μία κατάσταση στην άλλη.

	$s = 0$	$s = 1$
Μοντέλο χωρίς βλάβες	OFF, STUP, SHDN	ON
Μοντέλο με βλάβες	OFF, STUP, SHDN, UAV	ON

**Πίνακας 1.3.1. 1:** Αντιστοίχιση μεταξύ των καταστάσεων μίας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής και των τιμών της μεταβλητής κατάστασης  $s$  στο μοντέλο με και χωρίς βλάβες.

### 1.3.1.1 Μετάβαση από τη διαθεσιμότητα στην αστοχία και ορισμός αντίστοιχων πιθανοτήτων

Ο χρόνος για τον οποίο μία μονάδα ηλεκτροπαραγωγής παραμένει σε μία από τις καταστάσεις διαθεσιμότητας – μη-διαθεσιμότητας θεωρούμε ότι ακολουθεί μία συγκεκριμένη κατανομή πιθανότητας. Η πιθανοτική κατανομή που σχετίζεται με την παραμονή μίας μονάδας σε κατάσταση διαθεσιμότητας για χρόνο  $t$ , ονομάζεται αξιοπιστία και η αντίστοιχη πιθανότητα συμβολίζεται με  $P_r(t)$ . Αντίστοιχα, ορίζεται και η πιθανότητα αστοχίας ως το συμπληρωματικό της  $P_r(t)$  και συμβολίζεται με  $P_f(t)$ . Με παρόμοιο τρόπο, ο χρόνος που διαρκεί μία επισκευή  $t_{rep}$  προσδιορίζεται από την πιθανότητα ολοκλήρωσης μίας επισκευής  $P_{rep}(t_{rep})$ . Το στοχαστικό μοντέλο που χρησιμοποιείται διέπεται από τις εξής παραδοχές:

- Η βλάβη αντιμετωπίζεται ως στιγμιαίο συμβάν. Αυτό σημαίνει ότι η μονάδα στην οποία εμφανίζεται βλάβη θα παραμείνει σε κατάσταση UAV για όσο χρόνο διαρκεί η επισκευή της. Επομένως, για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα η τιμή της μεταβλητής κατάστασης  $s$  θα είναι  $s = 0$  και το ίδιο θα ισχύει και για τη φόρτιση και την τιμή παραγόμενης ενέργειας από τη μονάδα ( $x = 0, P = 0$ ).
- Δεχόμαστε ότι βλάβη μπορεί να συμβεί μόνο όταν μία μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας (ON). Οποιαδήποτε άλλη κατάσταση (OFF, STUP, SHDN), λόγω της μηδενικής τιμής της μεταβλητής  $s$  θεωρείται ότι δεν συνεισφέρει στο χρόνο λειτουργίας της μονάδας και επομένως δεν μπορεί να συμβεί βλάβη ενώ η μονάδα βρίσκεται σε κάποια από αυτές τις καταστάσεις. Αυτό αποτελεί μία υπόθεση η οποία δεν είναι επιβεβλημένη. Με ελάχιστες τροποποιήσεις στην παρούσα μέθοδο θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν και οι χρόνοι έναυσης και σβέσης στο συνολικό χρόνο λειτουργίας της μονάδας και επομένως να υπάρχει η πιθανότητα να συμβεί βλάβη και κατά τη διάρκεια των μεταβατικών αυτών καταστάσεων.
- Όταν ολοκληρωθεί η επισκευή μίας μονάδας, αυτή περνά αμέσως σε κατάσταση διαθεσιμότητας και αν απαιτείται από τη ζήτηση μπορεί να τεθεί σε λειτουργία αφού πρώτα περάσει αναγκαστικά από τη μεταβατική κατάσταση έναυσης.

Ορίζεται ως επίπεδο αξιοπιστίας ή αξιοπιστία  $P_r(t)$  μίας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η πιθανότητα λειτουργίας της χωρίς βλάβη για χρονικό διάστημα  $t$ , μετά από την εγκατάστασή της ή μετά από την τελευταία επισκευή της. Στο χρονικό διάστημα  $t$  υπολογίζονται φυσικά μόνο οι ώρες που η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας (ON). Η συμπληρωματική πιθανότητα, όπως

ήδη την ορίσαμε στην αρχή της παραγράφου ονομάζεται πιθανότητα αστοχίας  $P_f(t)$ . Ο χρόνος μέχρι αστοχίας  $t$  όπως αναφέρεται, είναι στοχαστική παράμετρος και ακολουθεί κατανομή πυκνότητας πιθανότητας  $p_f(t)$  (πυκνότητα πιθανότητας εμφάνισης βλαβών). Είναι προφανές ότι η συνάρτηση αθροιστικής πυκνότητας πιθανότητας της  $p_f(t)$  είναι η  $P_f(t)$ , οπότε ισχύει η σχέση (1.3.1.1.1).

$$p_f(t) = \frac{dP_f(t)}{dt} \quad (1.3.1.1.1)$$

Είναι φανερό από τον τρόπο που ορίστηκε ο χρόνος  $t$  ότι δεν ισούται με τον πραγματικό χρόνο  $\tau$ , καθώς στο χρόνο  $t$  προσμετρούνται μόνο οι ώρες που η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας (ON). Επομένως, από το πέρας μίας επισκευής που τοποθετείται χρονικά στην ώρα  $\tau_1$  μέχρι την επόμενη βλάβη που έστω ότι τοποθετείται χρονικά στην ώρα  $\tau_2$ , ισχύει  $t \leq \tau_2 - \tau_1$ , όπου η ισότητα αντιστοιχεί στην περίπτωση συνεχούς λειτουργίας της μονάδας (κατάσταση ON) από την ώρα  $\tau_1$  μέχρι την ώρα  $\tau_2$ .

Για να προσδιορίσουμε μία μέση τιμή του χρόνου μέχρι αστοχία  $t$ , πρέπει να βρεθεί μία μαθηματική έκφραση για το επίπεδο αξιοπιστίας  $P_r(t)$ , ή την πιθανότητα αστοχίας  $P_f(t)$ . Γενικά, όσο αυξάνεται ο χρόνος κανονικής λειτουργίας μίας μονάδας, τόσο θα μειώνεται το επίπεδο αξιοπιστίας και θα αυξάνεται η πιθανότητα αστοχίας. Για να βρεθεί η μαθηματική έκφραση που ζητείται ακολουθούμε τη συλλογιστική πορεία που περιγράφεται στη συνέχεια.

Θεωρούμε ένα δείγμα από  $N_0$  όμοιες μονάδες που εντάσσονται σε πρόγραμμα ηλεκτροπαραγωγής  $\tau$  ωρών μέσα στο οποίο λειτουργούν κανονικά (σε κατάσταση ON) για  $t$  ώρες. Να σημειώσουμε ότι δεν είναι απαραίτητο όλες οι μονάδες του δείγματος να έχουν εκκινήσει (πραγματοποιήσει έναυση) ταυτόχρονα, απαιτείται όμως όλες να έχουν λειτουργήσει για  $t$  ώρες από την τελευταία επισκευή τους και μάλιστα με την ίδια χρονοσειρά φόρτισης. Μετά από  $t$  ώρες κάποιες μονάδες θα λειτουργούν κανονικά, έστω  $N_r(t)$  το πλήθος τους, ενώ οι υπόλοιπες  $N_f(t) = N_0 - N_r(t)$  θα έχουν αστοχήσει τουλάχιστον μία φορά. Με βάση αυτό το παράδειγμα ορίζονται στις σχέσεις (1.3.1.1.2) έως (1.3.1.1.4), το επίπεδο αξιοπιστίας, η πιθανότητα αστοχίας και η πυκνότητα πιθανότητας εμφάνισης βλαβών.

$$P_r(t) = \frac{N_r(t)}{N_0} \quad (1.3.1.1.2)$$

$$P_f(t) = \frac{N_f(t)}{N_0} \quad (1.3.1.1.3)$$

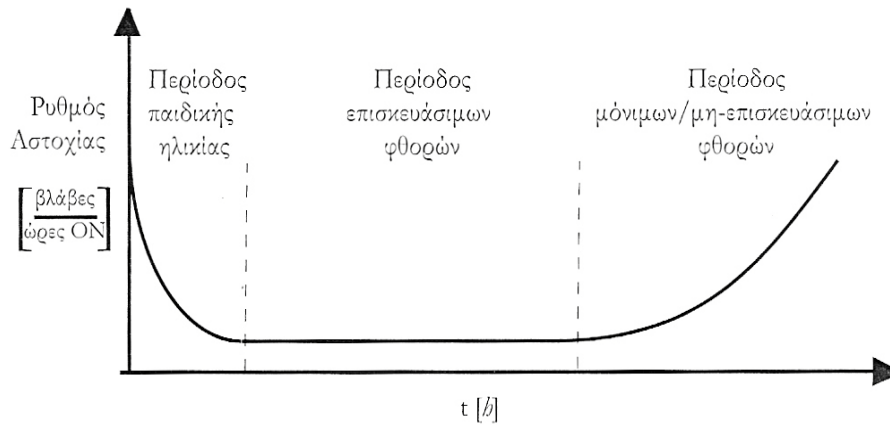
$$p_f(t) = \frac{dP_f(t)}{dt} = \frac{dN_f(t)/dt}{N_0} = \frac{1}{N_r(t)} \cdot \frac{dN_f(t)}{dt} \cdot \frac{N_r(t)}{N_0} = \frac{1}{N_r(t)} \cdot \frac{dN_f(t)}{dt} \cdot P_r(t) \quad (1.3.1.1.4)$$

Στη σχέση (1.3.1.1.4) φαίνεται ότι η πυκνότητα πιθανότητας εμφάνισης βλάβης εξαρτάται από δύο όρους. Ο ένας όρος είναι η συνάρτηση αξιοπιστίας  $P_r(t)$  και ο άλλος είναι ο ρυθμός αστοχίας  $\lambda_f(t)$ , που ορίζεται από τη σχέση (1.3.1.1.5) και ουσιαστικά ποσοτικοποιεί το ρυθμό με τον οποίο συμβαίνουν βλάβες τη χρονική στιγμή  $t$ , ως προς τον τρέχοντα αριθμό μονάδων που δεν υπέστησαν βλάβη μέχρι τη χρονική στιγμή  $t$ .

$$\lambda_f(t) = \frac{dN_f(t)/dt}{N_r(t)} \quad (1.3.1.1.5)$$

Ενδεικτικά, για αρκετές τεχνικές διατάξεις η συνάρτηση του ρυθμού αστοχίας έχει τη μορφή που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.3.1.1.1. Στη σχέση (1.3.1.1.6) ο ρυθμός αστοχίας εκφράζεται ως συνάρτηση της πιθανότητας  $P_r(t)$ . Στην έκφραση αυτή ο πρώτος όρος εξαρτάται από τη μέχρι χρόνου  $t$  πιθανότητα λειτουργίας χωρίς βλάβη, ενώ ο δεύτερος όρος εκφράζει τη μεταβολή της ίδιας πιθανότητας για ένα επιπλέον κλάσμα χρόνου  $dt$ . Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι ο ρυθμός αστοχίας είναι υπό συνθήκη συνάρτηση της πιθανότητας εμφάνισης βλάβης. Με βάση αυτό μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα αστοχίας κατά την επόμενη ώρα από το ρυθμό αστοχίας μέχρι χρόνου λειτουργίας  $t$  αν φυσικά δεν έχει συμβεί βλάβη στο διάστημα αυτό.

$$\lambda_f(t) = -\frac{1}{P_r(t)} \cdot \frac{dP_r(t)}{dt} \quad (1.3.1.1.6)$$



**Σχήμα 1.3.1.1. 1:** Στο σχήμα παρουσιάζεται τυπική μορφή της συνάρτησης του ρυθμού αστοχίας για τις περισσότερες τεχνικές διατάξεις. Στις πρώτες ώρες λειτουργίας εμφανίζονται αρκετές βλάβες που χαρακτηρίζονται ως φαινόμενα παιδικής ηλικίας, μετά η λειτουργία της διάταξης σταθεροποιείται και συμβαίνουν λιγότερες βλάβες, ενώ τέλος όσο ο χρόνος λειτουργίας πλησιάζει τη διάρκεια ζωής της διάταξης συμβαίνουν περισσότερες βλάβες. (σχήμα από τη διδακτορική διατριβή [1]).

Σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, λόγω του υψηλού κόστους κτήσης και της τακτικής επιτήρησης της λειτουργίας τους, τα φαινόμενα «παιδικής ηλικίας» καθώς και βλάβες για μικρά χρονικά διαστήματα λειτουργίας απουσιάζουν. Αυτό σημαίνει ότι για την μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να γίνει η παραδοχή του σταθερού ρυθμού αστοχίας. Αν γίνει αυτή η παραδοχή, η πιθανότητα λειτουργίας της μονάδας για χρόνο  $t$  χωρίς βλάβη υπολογίζεται με ολοκλήρωση της σχέσης (1.3.1.1.6) και δίνεται στη σχέση (1.3.1.1.7). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να ορισθεί και ο μέσος χρόνος μέχρι αστοχίας  $T_f$  από τη σχέση (1.3.1.1.8).

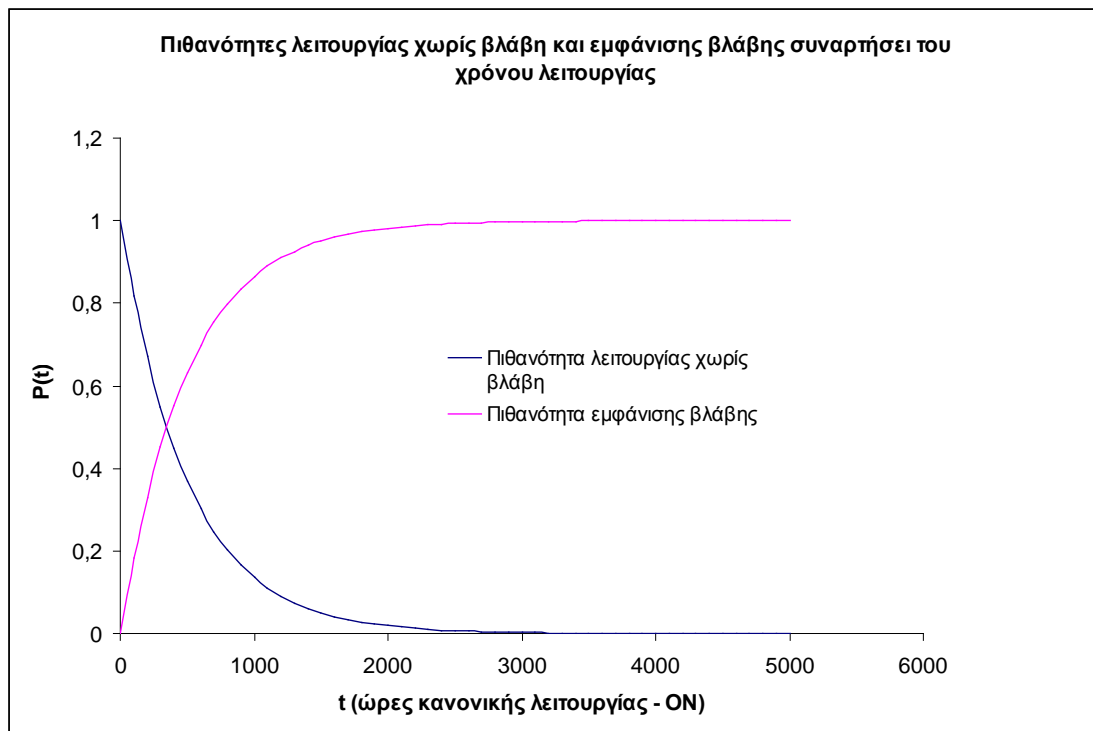
$$P_r(t) = e^{-\lambda_f t} \quad (1.3.1.1.7)$$

$$E(t) = T_f = \int_0^{\infty} t p_f(t) dt = 1/\lambda_f \quad (1.3.1.1.8)$$

Ο μέσος χρόνος μέχρι αστοχίας παρέχει έναν πρακτικό τρόπο προσδιορισμού των πιθανοτήτων και των κατανομών που συνοδεύουν τις πιθανοτικές βλάβες των μονάδων. Αν για παράδειγμα σε μία μονάδα εμφανίζεται μία βλάβη ανά 500 ώρες λειτουργίας, τότε ο μέσος χρόνος μέχρι αστοχίας είναι 500 ώρες και ο ρυθμός αστοχίας βάση τη σχέση (1.3.1.1.8)  $\lambda_f = 1/500 = 0,002 \frac{\text{ώρες μέχρι βλάβης}}{\text{ώρες ON}}$ . Στο

σχήμα 1.3.1.1.2, παρουσιάζονται για το παράδειγμα αυτό οι πιθανότητες αξιοπιστίας και αστοχίας.





**Σχήμα 1.3.1.1. 2:** Στο σχήμα παρουσιάζονται οι συναρτήσεις των πιθανοτήτων λειτουργίας χωρίς βλάβη και αστοχίας για μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με μέσο χρόνο μέχρι αστοχίας 500ώρες.

Η πιθανότητα μία μονάδα να λειτουργεί κανονικά για χρόνο ίσο με το μέσο χρόνο μέχρι αστοχίας προκύπτει από τη σχέση (1.3.1.1.7) ίση με 37%, ανεξάρτητα από τη σταθερή τιμή του ρυθμού αστοχίας. Η αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισης βλάβης είναι 63%. Επομένως, ενδεικτική τιμή του ρυθμού αστοχίας μίας μονάδας είναι ο αντίστροφος του χρόνου λειτουργίας (σε ώρες) για τον οποίο η πιθανότητα εμφάνισης βλάβης αγγίζει το 63%. [1]

### 1.3.1.2 Μετάβαση από την κατάσταση μη-διαθεσιμότητας στη διαθεσιμότητα

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η διάρκεια μίας επισκευής  $t_{rep}$  είναι και αυτή στοχαστική μεταβλητή που ακολουθεί κατανομή με πιθανότητα  $P_{rep}(t_{rep})$ . Η μορφή της κατανομής της πιθανότητας ολοκλήρωσης μίας επισκευής (ή παραμονής σε κατάσταση μη-διαθεσιμότητας UAV) μέσα σε χρόνο  $t_{rep}$ ,  $P_{rep}(t_{rep})$  είναι αντίστοιχη με αυτή της πιθανότητας  $P_r(t)$  και ορίζεται από τη σχέση (1.3.1.2.1). Αυτό σημαίνει ότι σε αντιστοιχία με το ρυθμό αστοχίας ορίζεται ο ρυθμός επισκευής  $\mu_{rep}(t_{rep})$ . Τέλος, μέσω του ρυθμού επισκευής, ορίζεται ο μέσος χρόνος ολοκλήρωσης μίας επισκευής σε αντιστοιχία με το μέσο χρόνο μέχρι αστοχίας, από τη σχέση (1.3.1.2.2).

$$P_{rep}(t_{rep}) = e^{-\mu_{rep} \cdot t} \quad (1.3.1.2.1)$$

$$E(t_{rep}) = T_{rep} = 1/\mu_{rep} \quad (1.3.1.2.2)$$

### 1.3.2 Εκτίμηση του ολικού κόστους λειτουργίας μονάδων με πιθανοτικές βλάβες

Στην περίπτωση που δεν λαμβάνουμε υπόψη στους υπολογισμούς πιθανοτικές βλάβες, ορίστηκε ως συνάρτηση-στόχος (της οποίας η ελαχιστοποίηση είναι το βασικό αντικείμενο της βελτιστοποίησης) μία συνάρτηση του ολικού κόστους λειτουργίας (TOC). Όταν λαμβάνουμε υπόψη και πιθανοτικές βλάβες δεν μπορούμε να ορίσουμε με τον ίδιο τρόπο συνάρτηση ολικού κόστους λειτουργίας γιατί πλέον η διαθεσιμότητα των μονάδων διέπεται από στοχαστικότητα και δεν μπορούμε να ξέρουμε με ακρίβεια υπό ποιες συνθήκες θα εργάζονται οι μονάδες. Για να ξεπεραστεί το εμπόδιο αυτό ορίζεται μία συνάρτηση προβλεπόμενου ολικού κόστους λειτουργίας, που προκύπτει από τις τιμές της συνάρτησης ολικού κόστους λειτουργίας, αλλά λαμβάνει υπόψη και τις πιθανότητες αστοχίας κάποιων μονάδων. Η τιμή αυτή του κόστους λειτουργίας θεωρείται η πιο αντιπροσωπευτική και επιδιώκουμε την ελαχιστοποίησή της. Στη συνέχεια, θα περιγραφούν τρόποι υπολογισμού του προβλεπόμενου ολικού κόστους λειτουργίας ή μέσου ολικού κόστους λειτουργίας (Expected Total Operating Cost -ETOC). Ο πρώτος τρόπος είναι ο ακριβής υπολογισμός του προβλεπόμενου κόστους λειτουργίας, ενώ ο δεύτερος αναφέρεται στην προσομοίωση Monte-Carlo που αποτελεί βασικό εργαλείο της μεθόδου που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

#### 1.3.2.1 Ακριβής μέθοδος υπολογισμού του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας

Για να περιγραφεί σύντομα η ακριβής μέθοδος θα επιλεγεί το απλό παράδειγμα μίας μονάδας, στην οποία ανατίθεται το φορτίο μίας ώρας. Έστω ότι η μέγιστη δυνατή παραγωγή της μονάδας είναι 30MW και το λειτουργικό κόστος καυσίμου της μονάδας είναι 2,3MWh καυσίμου ανά παραγόμενη MWh ηλεκτρικής ενέργειας. Η πιθανότητα αστοχίας της μονάδας λαμβάνεται ίση με  $P_f = 15\%$ . Από τη μονάδα θα ζητηθεί παραγωγή 30MW για μία ώρα. Αν η ζήτηση δεν καλύπτεται από τη μονάδα, θεωρούμε ότι μπορεί να καλυφθεί εναλλακτικά από άλλη πηγή με κόστος 4MWh καυσίμου ανά MWh ηλεκτρικής ενέργειας. Το εκτιμώμενο (προβλεπόμενο) ολικό κόστος λειτουργίας της μονάδας προκύπτει ως  $ETOC = 30 \cdot (0,85 \cdot 2,3 + 0,15 \cdot 4) = 76,65MWh$  καυσίμου.

Από το παράδειγμα που αναφέρθηκε είναι προφανές ότι η ακριβής μέθοδος υπολογισμού του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας απαριθμεί όλα τα πιθανά σενάρια, υπολογίζει το ολικό κόστος λειτουργίας κάθε σεναρίου, το πολλαπλασιάζει με την αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισης αυτού του σεναρίου και υπολογίζει το μέσο ολικό κόστος λειτουργίας αθροίζοντας όλα τα γινόμενα. Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται μεγάλος αριθμός μονάδων, τα πιθανά σενάρια αυξάνουν πολύ σε αριθμό, καθιστώντας τον υπολογισμό όλο και πιο δύσκολο. Αν, επιπλέον, ο χρονικός ορίζοντας προγραμματισμού εκτείνεται σε αρκετές ώρες, ο πολύπλοκος αυτός υπολογισμός πρέπει να γίνει για κάθε ώρα, λαμβάνοντας υπόψη και τις πιθανότητες κάποιες μονάδες να είναι σε επισκευή ή να είναι διαθέσιμες ξανά, οπότε το υπολογιστικό κόστος παρουσιάζεται ακόμα μεγαλύτερο, ενώ ο προγραμματισμός μίας τέτοιας μεθόδου παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα. Για το λόγο αυτό, προκύπτει άμεσα η ανάγκη μίας εναλλακτικής μεθόδου υπολογισμού του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας. [1]

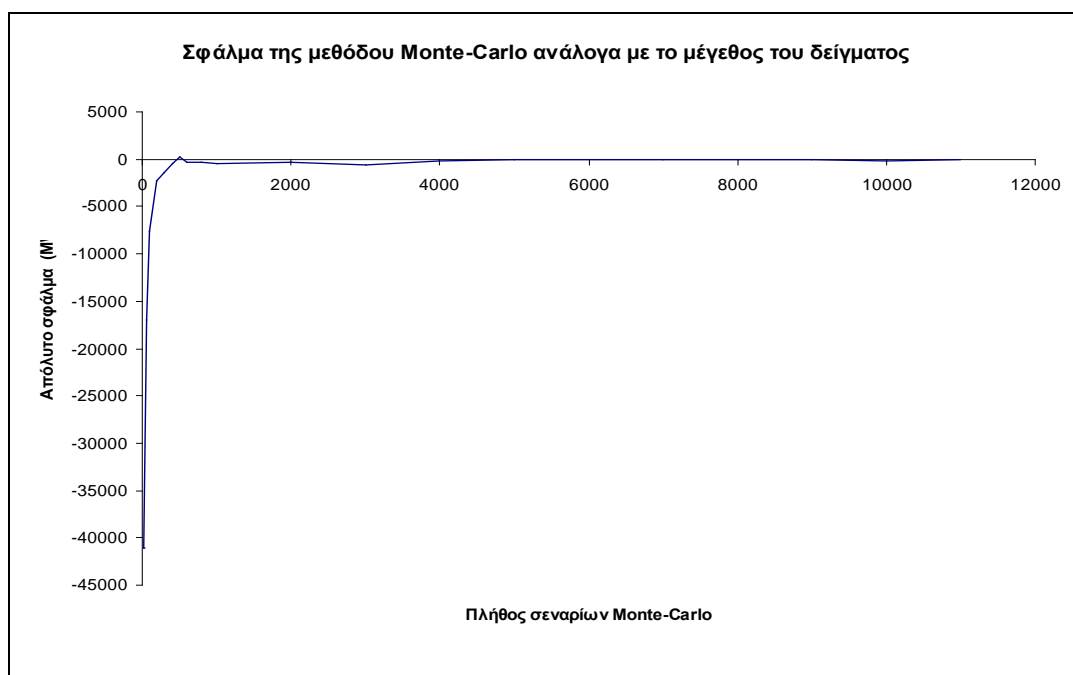
### **1.3.2.2 Χρήση προσομοίωσης Monte-Carlo για τον υπολογισμό του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας**

Μία μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας, προκειμένου να ξεπεραστούν τα προβλήματα που παρουσιάζει η ακριβής μέθοδος, είναι η στοχαστική προσομοίωση Monte-Carlo η οποία προτείνεται και από δημοσιεύσεις [2] και για εφαρμογή στο συγκεκριμένο πρόβλημα [5].

Η μέθοδος Monte-Carlo προβλέπει τη μέση τιμή μίας στοχαστικής μεταβλητής που ακολουθεί γνωστή πιθανοτική κατανομή εκτελώντας δειγματοληψία πιθανών τιμών της μεταβλητής που προκύπτουν από τη γνωστή κατανομή. Με τον ίδιο τρόπο η μέθοδος Monte-Carlo χρησιμοποιείται για να προβλέψει τη μέση τιμή μεγεθών που εξαρτώνται από στοχαστικές μεταβλητές. Στην περίπτωση της λειτουργίας μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με πιθανοτικές βλάβες, δημιουργείται ένα δείγμα πιθανές καταστάσεις διαθεσιμότητας ή μη για ό τις μονάδες και ό τις ώρες του χρονικού ορίζονται προγραμματισμού με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα δείγμα από σενάρια λειτουργίας. Κάθε σενάριο συνοδεύεται από μία τιμή του ολικού κόστους λειτουργίας (Total Operating Cost -TOC), η οποία υπολογίζεται. Το μέσο ολικό κόστος λειτουργίας υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των τιμών αυτών. Η λογική της προσομοίωσης Monte-Carlo είναι ότι τα σενάρια που θεωρούνται πιο πιθανά (με βάση τις πιθανότητες αστοχίας και ολοκλήρωσης μίας επισκευής) θα εμφανιστούν περισσότερες φορές στο δείγμα και έτσι θα διαδραματίσουν πιο σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας.

Από τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε είναι προφανές ότι η προσομοίωση Monte-Carlo προσεγγίζει τόσο καλύτερα την πραγματική τιμή του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του δείγματος. Η εξάρτηση τις τιμής του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας από το μέγεθος του δείγματος, παρουσιάζεται

στο σχήμα 1.3.2.2.1 για την περίπτωση συστήματος δύο μονάδων και ζήτησης μίας ώρας. Στο σχήμα αυτό φαίνεται ότι όσο αυξάνεται το πλήθος των δειγμάτων που χρησιμοποιεί η μέθοδος Monte-Carlo, τόσο μειώνεται το σφάλμα της μεθόδου στην εκτίμηση του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας. Συμπεραίνουμε, επομένως, ότι για να λάβουμε ακριβή αποτελέσματα από τη μέθοδο Monte-Carlo απαιτείται μεγάλο πλήθος δειγμάτων. Το γεγονός αυτό αυξάνει το υπολογιστικό κόστος της μεθόδου. Ωστόσο σε περιπτώσεις αρκετών μονάδων και μεγάλων χρονοσειρών ζήτησης η προσομοίωση Monte-Carlo εμφανίζεται απλούστερη προγραμματιστικά και υπολογιστικά οικονομικότερη από την ακριβή μέθοδο υπολογισμού του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας. Από το σχήμα 1.3.2.2.1 φαίνεται ότι η ακρίβεια της μεθόδου Monte-Carlo είναι ικανοποιητική για μέγεθος δείγματος μεγαλύτερο από περίπου 4000 σενάρια. Αυτός είναι και ο λόγος που θα χρησιμοποιηθεί αυτό το μέγεθος δείγματος στις εφαρμογές που μελετώνται στο κεφάλαιο 6.



**Σχήμα 1.3.2.2. 1:** Στο σχήμα παρουσιάζεται το απόλυτο σφάλμα της μεθόδου Monte-Carlo στην εκτίμηση του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας ενός σταθμού δύο μονάδων για προγραμματισμό 168 ωρών, συναρτήσει του πλήθους των δειγμάτων .

Στην παράγραφο αυτή αναφέρθηκαν οι βασικές αρχές της προσομοίωσης Monte-Carlo και χρησιμοποιήθηκε ως παράδειγμα χρήσης της μεθόδου ο υπολογισμός του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας ενός σταθμού δύο μονάδων για 168 ώρες λειτουργίας. Η προσαρμογή της προσομοίωσης Monte-Carlo και ο αντίστοιχος αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής όταν λαμβάνονται υπόψη πιθανοτικές

βλάβες των μονάδων, περιγράφονται αναλυτικότερα σε αντίστοιχο κεφάλαιο στην συνέχεια της διπλωματικής εργασίας (παράγραφος 4.3 και 4.4). [1]

## **1.4 Τεχνικές βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας**

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει μία σύντομη αναφορά στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος της βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής. Το παρόν πρόβλημα βελτιστοποίησης συνδυάζει πολλές παραμέτρους που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους καθώς και αρκετούς περιορισμούς και η επίλυσή του αποτελεί πολύπλοκη διαδικασία. Για το λόγο αυτό για την επίλυσή του έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές μέθοδοι βελτιστοποίησης, κάθε μία απ' αυτές με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην βελτιστοποίηση χωρίζονται σε αιτιοκρατικές, σε στοχαστικές και σε υβριδικές (με τις τελευταίες να αποτελούν συνδυασμό των δύο προηγούμενων κατηγοριών).

Οι κυριότερες αιτιοκρατικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι η μέθοδος της ένταξης κατά σειρά προτεραιότητας, οι μέθοδοι δυναμικού προγραμματισμού, η μέθοδος χαλάρωσης Lagrange και οι μέθοδοι γραμμικού προγραμματισμού. Οι κυριότερες στοχαστικές μέθοδοι είναι τα έξυπνα συστήματα, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, η ασαφής λογική, η μέθοδος της προσομοιούμενης ανόπτησης και οι εξελικτικοί αλγόριθμοι. Κάποιες από αυτές τις μεθόδους θα αναπτυχθούν εν συντομία στη συνέχεια, και θα σχολιαστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

### **1.4.1 Ένταξη κατά σειρά προτεραιότητας**

Σύμφωνα με τη μέθοδο της ένταξης κατά σειρά προτεραιότητας (Priority List Method), η ένταξη των μονάδων στην ηλεκτροπαραγωγή γίνεται με κριτήριο επιλογής το ειδικό κόστος λειτουργίας κάθε μονάδας στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας της (φόρτιση της μονάδας ίση με τη μονάδα ή 100%), ξεκινώντας από την ένταξη των οικονομικότερων στην παραγωγή και τελειώνοντας με την ένταξη των πιο δαπανηρών. Στη μέθοδο αυτή η επιλογή του σεναρίου λειτουργίας γίνεται ξεκινώντας από τις πρώτες ώρες και βαδίζοντας στις επόμενες. Αυτό σημαίνει ότι επιλέγονται οι μονάδες που θα ενταχθούν στην παραγωγή σε κάθε ώρα, γίνεται διόρθωση ώστε να τηρούνται οι περιορισμοί των χρόνων έναυσης, σβέσης και αδράνειας και ο αλγόριθμος προχωράει στην επόμενη ώρα. Από τον τρόπο που διαχειρίζεται η μέθοδος το πρόβλημα, φαίνεται ότι δεν μπορεί να προβλεφθεί η επίδραση της επιλογής που γίνεται σε κάθε φορά σε επόμενες ώρες, όπως επίσης και η πιθανώς οικονομικότερη επιλογή της λειτουργίας συνδυασμού πλήθους μονάδων σε Είναι προφανές, επομένως, ότι η μέθοδος της ένταξης κατά σειρά προτεραιότητας δεν μπορεί να εντοπίσει το ολικό ελάχιστο της συνάρτησης στόχου (τιμή του κόστους), μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί για να παραχθεί με απλές προγραμματιστικές τεχνικές και χαμηλό κόστος λειτουργίας μία καλή λύση (όχι βέλτιστη), που μπορεί να αποτελέσει αρχικοποίηση για κάποια άλλη μέθοδο βελτιστοποίησης. Εφαρμογές τις μεθόδους καθώς και συνδυασμούς μεθόδων που την περιλαμβάνουν παρουσιάζονται

στις δημοσιεύσεις [3], [4] και [5]. Στην τελευταία από αυτές, προτείνεται μία μέθοδος που χρησιμοποιεί την ένταξη με σειρά προτεραιότητας και λαμβάνει υπόψη της την εμφάνιση τυχαίων βλαβών με χρήση της προσομοίωσης Monte-Carlo.

#### 1.4.2 Δυναμικός Προγραμματισμός

Ο δυναμικός προγραμματισμός είναι μέθοδος βελτιστοποίησης που εφαρμόζεται σε προβλήματα που απαιτούν τη λήψη σύνθετων αποφάσεων. Η διατύπωση της μεθόδου δεν είναι γενική και αλλάζει από πρόβλημα σε πρόβλημα. Στο πρόβλημά μας η σύνθετη απόφαση που πρέπει να ληφθεί αφορά στην εύρεση του βέλτιστου προγράμματος ηλεκτροπαραγωγής  $M$  μονάδων και χρονικό ορίζοντα  $T$  ωρών, λαμβάνοντας υπόψη της ωριαίες καταστάσεις των μονάδων που είναι μεταξύ τους αλληλένδετες. Για να αναπτυχθεί η μέθοδος του δυναμικού προγραμματισμού το πρόβλημα αναλύεται σε ωριαία υποπροβλήματα βελτιστοποίησης, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με μία αναδρομική σχέση. Το κάθε υποπρόβλημα επιλύεται ξεχωριστά και στη συνέχεια μέσω της αναδρομικής σχέσης ο αλγόριθμος προχωρά στην επίλυση του επόμενου χρονικά υποπροβλήματος. Από τη σύντομη περιγραφή της μεθόδου είναι προφανές ότι λαμβάνεται υπόψη η λειτουργία όλων των μονάδων ως σύστημα με περιορισμούς. Ωστόσο η προσθήκη πολλών περιορισμών μπορεί να εγκλωβίσει τη μέθοδο σε τοπικό ακρότατο. Επιπλέον, σε συστήματα αρκετών μονάδων η ανάγκη εξέτασης αρκετών σεναρίων αυξάνει το υπολογιστικό κόστος της μεθόδου. Ένα ακόμη μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αδυναμία επίλυσης δικριτηριακών προβλημάτων.

Στη δημοσίευση [6] πραγματοποιείται σύγκριση τεσσάρων μεθόδων πάνω στο πρόβλημα βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, εκ των οποίων τρεις βασίζονται στο δυναμικό προγραμματισμό. Σε πιο πρόσφατες δημοσιεύσεις όπως οι [7] και η [8], ο δυναμικός προγραμματισμός χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους, ώστε να ελαττωθεί το πλήθος των σεναρίων που εξετάζονται και να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος.

#### 1.4.3 Μέθοδος Χαλάρωσης Lagrange

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αιτιοκρατική και μπορεί να επιλύσει προβλήματα συστημάτων κάποιων μονάδων και λίγων ωρών με αναλυτική προσέγγιση. Βασικό στοιχείο είναι η σύνταξη μίας επαυξημένης συνάρτησης Lagrange ( $L_{TOC}$ ) η οποία θα περιλαμβάνει το τη συνάρτηση κόστος (TOC) και τους περιορισμούς πολλαπλασιασμένους με κατάλληλους πολλαπλασιαστές Lagrange ( $\lambda$ ). Οι περιορισμοί  $CR_{i,j}$  (για την  $i$  μονάδα και την  $j$  ώρα) αναφέρονται σε λειτουργικούς περιορισμούς των μονάδων και περιορισμούς που επιβάλλονται από το σύστημα. Ο

αλγόριθμος της μεθόδου αρχικοποιεί τις τιμές των συντελεστών Lagrange. Στη συνέχεια με κάποια μέθοδο ελαχιστοποίησης, ελαχιστοποιείται η συνάρτηση της σχέσης (1.4.3.1). Αν στην λύση που βρίσκεται οι περιορισμοί ικανοποιούνται, τότε ο αλγόριθμος τερματίζει. Διαφορετικά, ανανεώνονται οι τιμές των συντελεστών και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθούν οι περιορισμοί.

$$L_{TOC} = \sum_{j=1}^T \left( \sum_{i=1}^M OC_{i,j} + V_j \right) + \sum_{j=1}^T \left( \sum_{i=1}^M \lambda_{i,j} CR_{i,j} \right) \quad (1.4.3.1)$$

Η μέθοδος Lagrange προτάθηκε πρώτη φορά στην επίλυση του προβλήματος στη δημοσίευση [9]. Πολλές ακόμα δημοσιεύσεις στοχεύουν στην επιτάχυνση της μεθόδου, προτείνοντας καλύτερες τιμές των συντελεστών. Η μέθοδος αδυνατεί να επιλύσει πολυκριτηριακά προβλήματα, ενώ εμφανίζει μεγάλες δυσκολίες στον χειρισμό προβλημάτων μεγάλων διαστάσεων. Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά της είναι τέτοια που την καθιστούν καλή επιλογή για την επίλυση των υποπροβλημάτων ανάθεσης φορτίου σε κάθε ώρα στο πλαίσιο της μεθόδου που προτείνονται από τη διδακτορική διατριβή [1] και χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

#### 1.4.4 Μέθοδοι γραμμικού προγραμματισμού

Οι τεχνικές που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους (1.4.1, 1.4.2, 1.4.3) διαχωρίζουν το πρόβλημα σε δύο προβλήματα ανάλογα με το είδος των μεταβλητών που εμπλέκονται. Έτσι προκύπτει ένα μη γραμμικό πρόβλημα που διαχειρίζεται ακέραιες μεταβλητές (μεταβλητές κατάστασης των μονάδων  $s$ ) και ένα μη-γραμμικό πρόβλημα που διαχειρίζεται πραγματικές μεταβλητές (φορτίσεις των μονάδων  $x$ ). Μία άλλη κατηγορία μεθόδων βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται είναι οι τεχνικές Ακέραιου Προγραμματισμού (Integer Programming), οι οποίες διαχειρίζονται όλες τις μεταβλητές σαν να ήταν πραγματικές, και αναζητούν τη βέλτιστη λύση στο χώρο όλων των μεταβλητών απόφασης, με τα όρια των ακεραίων μεταβλητών να μειώνονται σταδιακά αποκλείοντας μη αποδεκτές περιοχές τιμών.

Αυτές οι μέθοδοι διαχειρίζονται γραμμικά προβλήματα. Επομένως, η εφαρμογή τους στη επίλυση του προβλήματος εύρεσης του βέλτιστου προγράμματος λειτουργίας ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ένα πρόβλημα που είναι εν γένει μη γραμμικό) απαιτεί τη γραμμικοποίηση του προβλήματος. Για παράδειγμα, για να γραμμικοποιηθεί η συνάρτηση κατανάλωσης καυσίμου – παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (για τη συνάρτηση αυτή γίνεται αναφορά στο κεφάλαιο 2 που δημιουργείται το μοντέλο της λειτουργίας των μονάδων), αρκεί να προσεγγισθεί από μία γραμμική εξίσωση, ή η χρήση δύο γραμμικών εξισώσεων (για να επιτευχθεί καλύτερη προσέγγιση) εμπλέκοντας δύο επιπλέον μεταβλητές. Είναι φανερό ότι η γραμμικοποίηση αυξάνει το πλήθος των εμπλεκόμενων μεταβλητών, γεγονός που



καθιστά τη γραμμική μέθοδο υπολογιστικά δαπανηρή σε εφαρμογή προβλημάτων μεγάλων διαστάσεων (πολλών ωρών και πολλών μονάδων).

Μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους της κατηγορίας αυτής, της οποίας γίνεται χρήση και στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής [1] και χρησιμοποιείται για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η μέθοδος Διάσχισης-Διαχώρισης (Branch and Bound, συντομογραφικά BnB). Η μέθοδος βασίζεται στην τακτική της δένδροειδούς αναζήτησης στο χώρο των ακέραιων λύσεων, δημιουργώντας κόμβους, ώστε να μη χρειαστεί να εξετασθούν όλες οι δυνατές περιπτώσεις και να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος. Η μέθοδος βασίζεται στο πόρισμα ότι η βελτιστοποίηση ενός προβλήματος γραμμικό προγραμματισμού σε ένα χωρίο δίνει την καλύτερη δυνατή λύση από οποιαδήποτε διαδικασία βελτιστοποίησης σε οποιοδήποτε υποχωρίο αυτού. Έτσι, η βελτιστοποίηση ενός προβλήματος μικτών ακέραιων – πραγματικών, αντιμετωπίζοντας όλες τις μεταβλητές ως πραγματικές εντοπίζει καλύτερη λύση συγκριτικά με τη βελτιστοποίηση του ίδιου προβλήματος αν ληφθεί υπόψη η ακεραιότητα έστω και μίας μεταβλητής. Για τη λειτουργία της μεθόδου απαιτείται και μία μέθοδος βελτιστοποίησης η οποία χρησιμοποιείται σε κάθε κόμβο. Στην περίπτωση του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής [1], η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η μέθοδος Simplex.

Έχουν γίνει αρκετές δημοσιεύσεις σχετικά με τη χρήση μεθόδων γραμμικού προγραμματισμού στη βελτιστοποίηση του προγράμματος λειτουργίας μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, όπως οι [10], [11] και [12]. Οι μέθοδοι γραμμικού προγραμματισμού έχουν χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό και με άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης. Επειδή οι μέθοδοι γραμμικού προγραμματισμού μικτών ακεραίων (Mixed Integer Linear Programming - MILP) έχουν εξελχθεί αρκετά, το υπολογιστικό τους κόστος έχει μειωθεί, χωρίς όμως να είναι αμελητέο. Στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας (και αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής [1]), η μέθοδος Διάσχισης-Διαχώρισης χρησιμοποιείται για να αποκτηθεί μία καλή λύση για να αρχικοποιηθεί ο εξελκτικός αλγόριθμος. Τέλος, όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία [1], οι μέθοδοι αυτές στηρίζονται σε μονοκριτηρικές μεθόδους γραμμικού προγραμματισμού (π.χ. Simplex), με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η γενίκευσή τους σε πολυκριτηριακά προβλήματα.

#### **1.4.5 Εξελκτικοί Αλγόριθμοι**

Οι εξελκτικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας μονάδων ηλεκτροπαραγωγής το 1994 [13]. Έκτοτε οι εξελκτικοί αλγόριθμοι έχουν απασχολήσει αρκετά τις

δημοσιεύσεις και τις τεχνικές που προτείνονται για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν συγκριτικά με άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης. Επειδή οι εξελικτικοί αλγόριθμοι είναι η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί κατά κύριο λόγο στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η λειτουργία τους και τα χαρακτηριστικά τους θα αναλυθούν εκτενώς σε αντίστοιχο κεφάλαιο (κεφάλαιο 3). Στο σημείο αυτό θα γίνει αναφορά στην κωδικοποίηση του χρωμοσώματος που χρησιμοποιείται από τον εξελικτικό αλγόριθμο. Το χρωμόσωμα αποτελείται από πλήθος δυαδικών ψηφίων ίσο με το γινόμενο των ωρών προγραμματισμού επί τον αριθμό των μονάδων. Η τιμή κάθε δυαδικού ψηφίου αντιστοιχεί στην τιμή της παραμέτρου κατάστασης  $s$  που αντιστοιχεί στην συγκεκριμένη ώρα και μονάδα που αντιπροσωπεύεται από το δυαδικό αυτό ψηφίο. Οι τιμές των φορτίσεων  $x$  (ή των τιμών της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος  $P$ , όπως χρησιμοποιείται σε αυτή τη διπλωματική εργασία), δεν κωδικοποιούνται στο χρωμόσωμα. Αντιθέτως, η επιλογή τους γίνεται με την επίλυση ενός υποπροβλήματος βελτιστοποίησης σε κάθε ώρα, το οποίο επιλύεται με κάποια αιτιοκρατική μέθοδο βελτιστοποίησης (π.χ. μέθοδος της καθόδου). Στο λογισμικό που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής [1], η επίλυση των ωριαίων αυτών υποπροβλημάτων γίνεται με χρήση της μεθόδου επαυξημένων πολλαπλασιαστών Lagrange (Augmented Lagrange Multipliers - ALM). Με τον τρόπο αυτό αποσυμπλέκονται οι ακέραιες από την πραγματικές μεταβλητές του προβλήματος.

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι προσαρμόζονται εύκολα σε ποικιλία προβλημάτων. Αυτό σημαίνει ότι αν αλλάξουν τα χαρακτηριστικά του συστήματος που μελετάται, ή η συνάρτηση στόχος, ή οι περιορισμοί του προβλήματος, τότε δεν χρειάζεται να επηρεαστεί η δομή του αλγορίθμου. Μάλιστα η δομή των εξελικτικών αλγορίθμων δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη περιορισμών. Επιπλέον, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι δεν θέτουν κανέναν περιορισμό ως προς τη μορφή της συνάρτησης στόχου, ενώ μπορούν εύκολα να επεκταθούν από τη μονοκριτηριακή στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση. Τέλος, το κυριότερο πλεονέκτημα των εξελικτικών αλγορίθμων, πηγάζει από τη στοχαστική τους φύση και είναι η αποφυγή τοπικών ακρότατων. Βέβαια, τα πλεονεκτήματα αυτά συνοδεύονται από ένα βασικό μειονέκτημα, το οποίο είναι το μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Επειδή οι εξελικτικοί αλγόριθμοι αποτελούν πληθυσμιακή μέθοδο, χρειάζεται ένας αρκετά μεγάλος αριθμός αξιολογήσεων μέχρι την εύρεση της βέλτιστης λύσης, και αυτό σημαίνει ότι αυξάνεται σημαντικά το υπολογιστικό κόστος. Κάποιες ενδεικτικές δημοσιεύσεις που αφορούν στη χρήση εξελικτικών αλγορίθμων για τη βελτιστοποίηση του προγράμματος λειτουργίας ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι [14], [15]. Στη δημοσίευση [16], προτείνεται μία διεπίπεδη μέθοδος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί εξελικτικούς αλγόριθμους και τεχνικές γραμμικού προγραμματισμού (MILP), με σκοπό την επιτάχυνση της επίλυσης του προβλήματος.

## 1.5 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Ύστερα από την περιγραφή του προβλήματος, τους βασικούς ορισμούς που το συνοδεύουν και μία σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση, η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στον βασικό της στόχο που είναι η χρήση μία διεπίπεδης μεθόδου βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη πιθανοτικές βλάβες, βασισμένης στους εξελικτικούς αλγορίθμους, όπως προτείνεται από τη διδακτορική διατριβή [1], και η επιτάχυνσή της. Για το σκοπό αυτό θα γίνει περιγραφή του συστήματος (που αποτελεί το βασικότερο δεδομένο για τη μέθοδο βελτιστοποίησης), και μία περιγραφή των εξελικτικών αλγορίθμων ως τεχνικών βελτιστοποίησης, καθώς και της μεθόδου της προσεγγιστικής προαξιολόγησης (Inexact Pre-evaluation, IPE) με σκοπό την επιτάχυνση των τελευταίων. Επίσης, θα γίνει προσαρμογή των τεχνικών αυτών στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη πιθανοτικές βλάβες και θα γίνουν εφαρμογές της μεθόδου σε εικονικά (αλλά πολύ κοντινά στην πραγματικότητα), συστήματα ελληνικών νησιών. Τέλος, θα γίνει αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από τη χρήση της μεθόδου στο πλαίσιο των εφαρμογών.



## 2. Περιγραφή του Συστήματος

Βασικό δεδομένο για τη βελτιστοποίηση του προγράμματος λειτουργίας ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ο ίδιος ο σταθμός και τα χαρακτηριστικά των μονάδων που τον απαρτίζουν. Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς που χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο μονάδες αεριοστρόβιλων, ατμοστρόβιλων και συνδυασμένου κύκλου. Το γεγονός αυτό δεν βλάπτει τη γενικότητα της μεθόδου καθώς θα μπορούσαν στο σταθμό παραγωγής να χρησιμοποιούνται και άλλες μονάδες θερμικών μηχανών, για παράδειγμα μονάδες Diesel, αρκεί να ήταν διαθέσιμα τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά των μονάδων. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και το δίκτυο και η ζήτηση την οποία καλείται να καλύψει ένας σταθμός καθώς οι μονάδες πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να την καλύψουν.

### 2.1 Περιγραφή του δικτύου και της τοποθεσίας του σταθμού

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα επιδιωχθεί η βελτιστοποίηση του τρόπου λειτουργίας ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, ο οποίος αφορά σε ένα απομονωμένο δίκτυο σε κάποιο λ.χ. εικονικό ελληνικό νησί. Παρότι η περίπτωση είναι εικονική, τα δεδομένα τόσο του σταθμού όσο και του συστήματος προσεγγίζουν αρκετά μια ρεαλιστική περίπτωση ελληνικού νησιού. Είναι, λοιπόν, προφανές ότι η μέθοδος που αναπτύσσεται και προτείνεται στην εργασία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε πραγματικές περιπτώσεις (πραγματικούς σταθμούς σε απομονωμένα δίκτυα λ.χ. πραγματικών νησιών) αν κάτι τα αντίστοιχα δεδομένα ήταν γνωστά.

Ένας λόγος που επιλέγεται να μελετηθεί ένα απομονωμένο σύστημα είναι γιατί σε αυτό η διαδικασία βελτιστοποίησης εξυπηρετεί «αυστηρούς» στόχους και περιορισμούς. Για παράδειγμα, αν ο σταθμός ήταν διασυνδεδεμένος με το ηπειρωτικό δίκτυο, τότε σε περίπτωση αιφνίδιας βλάβης δεν ήταν δυνατό να καλυφθεί η ζήτηση κατά τη διάρκεια κάποιας ώρας, θα υπήρχε, ενδεχομένως, η δυνατότητα η ζήτηση αυτή να καλυφθεί με διαφορετικό κόστος από κάποιον άλλο σταθμό μέσω της διαθέσιμης εφεδρείας του. Για να μπορέσουμε να αποφανθούμε αν θα υπήρχε μία τέτοια δυνατότητα θα χρειαζόντουσαν τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά όλων των σταθμών του δικτύου γεγονός που περιπλέκει σημαντικά τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Ένας ακόμα λόγος που επιλέγεται να μελετηθεί ένα απομονωμένο σύστημα είναι ότι σε ένα τέτοιο σύστημα η αξία της βελτιστοποίησης είναι ίσως μεγαλύτερη. Αν λόγω αιφνίδιας βλάβης δεν είναι δυνατό να καλυφθεί η ζήτηση σε ένα απομονωμένο σύστημα, τότε ένα μέρος της ζήτησης δεν θα καλυφθεί καθόλου. Αυτό σημαίνει ότι είναι πολύ σημαντικό σε ένα τέτοιο σύστημα η ζήτηση να καλύπτεται ακόμα και όταν συμβαίνουν αιφνίδιες βλάβες, δυνατότητα που παρέχεται από το βέλτιστο πρόγραμμα λειτουργίας που λαμβάνει υπόψη και πιθανοτικές βλάβες

καθώς και την προβλεπόμενη στρεφόμενη εφεδρεία. Ειδικά σε ότι αφορά στη στρεφόμενη εφεδρεία, πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπόψη στο σύστημα ενός ελληνικού νησιού, λόγω της πολύ συχνής παρουσίας αιολικών πάρκων στα ελληνικά νησιά, η οποία γίνεται όλο και πιο έντονη τα τελευταία χρόνια.

Ο σταθμός του, οποίου το πρόγραμμα λειτουργίας θα βελτιστοποιηθεί, καλείται να καλύψει όλη τη ζήτηση του απομονωμένου δικτύου. 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 ή ενεργοποιούνται για να καλύψουν τη ζήτηση σε περιπτώσεις βλάβης κάποιας από τις μονάδες βάσης. Οι μονάδες βάσεις είναι τρεις και, πιο συγκεκριμένα, οι δύο είναι αεριοστροβλικές και η μία συνδυασμένου κύκλου αεριοστρόβιλου – ατμοστρόβιλου. Οι μονάδες αιχμής είναι δύο αεριοστρόβιλοι παράγωγοι αεροπορικών κινητήρων (aeroderivatives).

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.

## **2.2 Περιγραφή των μονάδων και υπολογισμός βασικών χαρακτηριστικών τους**

### **2.2.1 Μονάδα 1 (Αιχμής) – Αεριοστρόβιλος LM6000PC Sprint**

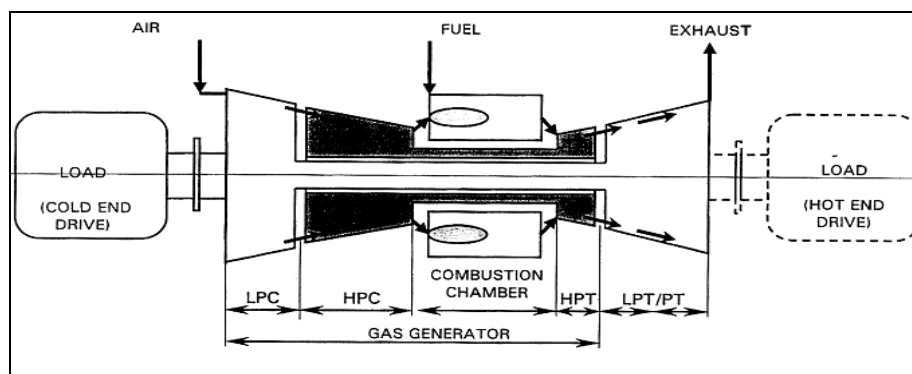
Ο αεριοστρόβιλος LM6000PC Sprint είναι ένα μοντέλο της εταιρείας General Electric (GE) και ανήκει στη σειρά αεριοστροβίλων LM της GE και αποτελεί τροποποίηση του βασικού μοντέλου LM6000. Οι αεριοστρόβιλοι αυτής της σειράς προέρχονται από αεροπορικούς κινητήρες της ίδια εταιρείας και έχουν δεχτεί τροποποιήσεις για να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή για την κίνηση μηχανικού φορτίου. Τα βασικά μοντέλα της σειράς LM παρέχονται στον πίνακα Π.2.2.1.1 (πηγή από φυλλάδια του κατασκευαστή για τα μοντέλα της σειράς LM).

Μοντέλο	Παραγόμενη Ισχύς στο Ονομαστικό Φορτίο
LM500	4,4 MW
LM1600	14 MW
LM2500	23,3 MW
LM2500+	30 MW
LM5000	37,6 MW
LM6000	42 MW

**Πίνακας 2.2.1. 1:** Μοντέλα της σειράς LM και αντίστοιχη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας (δεδομένα από [33] )

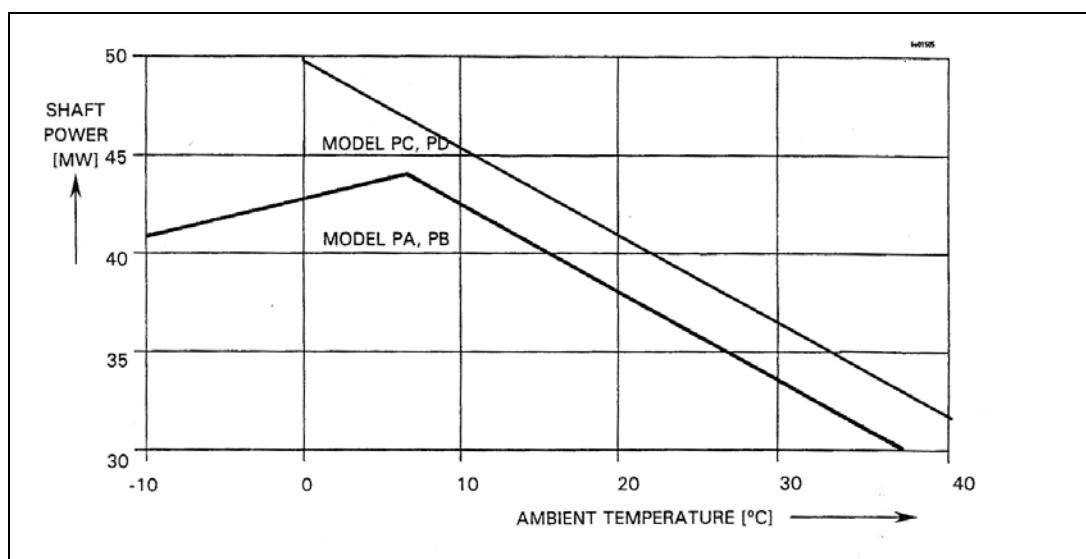
Τα μοντέλα αεριοστρόβιλων της σειράς LM6000 προέρχονται από τη σειρά αεροπορικών κινητήρων CF6. Το κυριότερο μοντέλο της σειράς αυτής είναι το CF6-80C2 που χρησιμοποιείται για την πρόωση μεγάλων επιβατικών αεροσκαφών, όπως το Boeing 747.

Ο αεριοστρόβιλος είναι μορφής διπλού τυμπάνου και αποτελείται από (α) ένα συμπιεστή αξονικής ροής (τμήμα χαμηλής πίεσης) με 5 βαθμίδες που κινείται από το στρόβιλο χαμηλής πίεσης ο οποίος επίσης αποτελεί και το στρόβιλο ισχύος (με την έννοια ότι κινεί και το φορτίο-γεννήτρια) και (β) έναν 14-βάθμιο αξονικό συμπιεστή (τμήμα υψηλής πίεσης) που κινείται από το 2-βάθμιο στρόβιλο υψηλής πίεσης. Ο θάλαμος καύσης είναι δακτυλιοειδούς μορφής Η βασική διάταξη του αεριοστρόβιλου LM6000 φαίνεται στο Σχήμα 2.2.1.1. Περισσότερα για τις συνιστώσες του συγκεκριμένου μοντέλου και για τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του αναφέρονται στο παράρτημα Π-1.



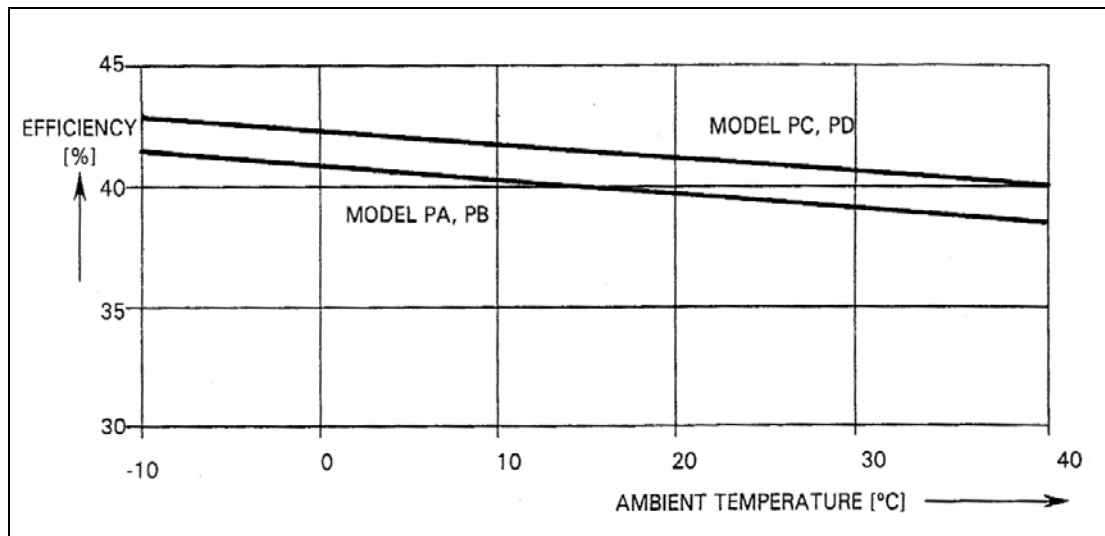
**Σχήμα 2.2.1. 1:** Βασική διάταξη του αεριοστρόβιλου LM6000 (σχήμα από [34])

Η επίδραση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στην παραγόμενη ισχύ και στο βαθμό απόδοσης ενός αεριοστρόβιλου είναι γνωστό ότι είναι ιδιαίτερα σημαντική. Έτσι, στο σχήμα 2.2.1.2, παρουσιάζεται η παραγόμενη ισχύς συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για τον LM6000 και στο σχήμα 2.2.1.3 ο αντίστοιχος βαθμός απόδοσης, όλα για το ονομαστικό σημείο λειτουργίας (base load). Αξίζει να σημειωθεί ότι τα μοντέλα της General Electric με κωδικό LM6000 μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε σε λειτουργία απλού κύκλου αεριοστρόβιλου ή σε λειτουργία συνδυασμένου κύκλου αεριοστρόβιλου-ατμοστρόβιλου. Στο παράδειγμα σταθμού που θα αναπτυχθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία, η λειτουργία του αεριοστρόβιλου LM6000PC Sprint θα είναι απλού κύκλου.



**Σχήμα 2.2.1. 2:** Επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (ambient temperature) στην παραγόμενη ισχύ του αεριοστρόβιλου LM6000 (σχήμα από [34]). Η μία καμπύλη αντιστοιχεί στα μοντέλα PC,PD ενώ η άλλη στα μοντέλα PA,PB.





**Σχήμα 2.2.1. 3:** Επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (ambient temperature) στο βαθμό απόδοσης του αεριοστρόβιλου LM6000 (σχήμα από [34]). Η μία καμπύλη αντιστοιχεί στα μοντέλα PC,PD ενώ η άλλη στα μοντέλα PA,PB.

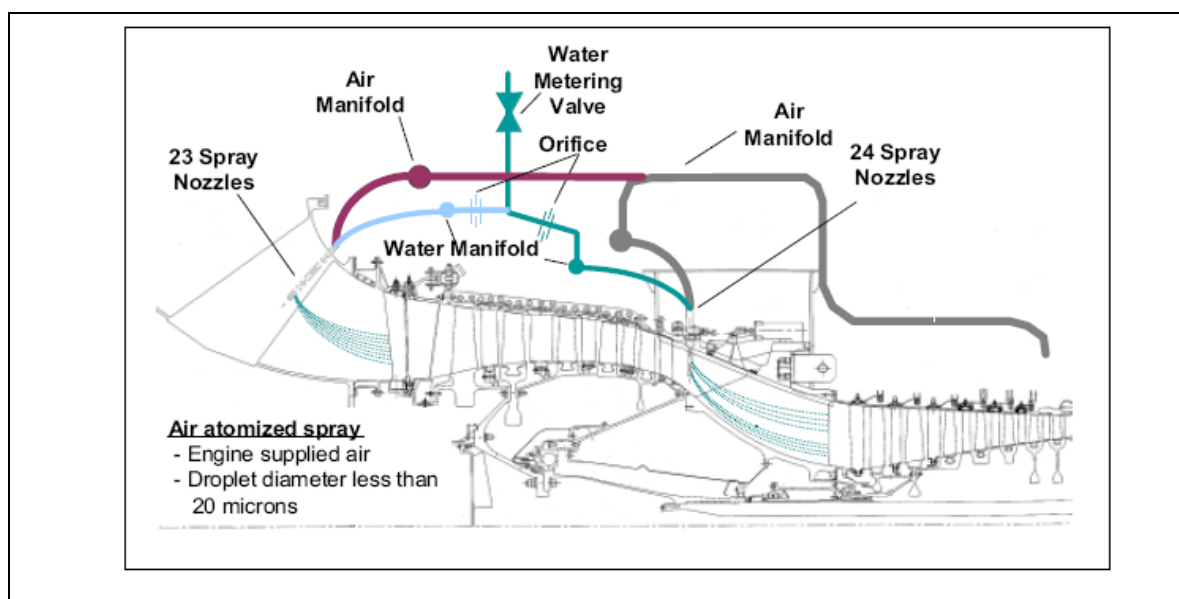
Ο αεριοστρόβιλος LM6000PC είναι βελτίωση του βασικού μοντέλου LM6000 (LM6000PA). Ο LM6000PC χρησιμοποιεί το σύστημα καύσης που χρησιμοποιείται και στο πρώτο μοντέλο της σειράς (δεν χρησιμοποιεί σύστημα ξηρής καύσης χαμηλών εκπομπών – Dry Low Emissions DLE), αλλά παρουσιάζει διαφορές ως προς το βασικό μοντέλο στα ακόλουθα σημεία.

- Παραγωγή μεγαλύτερης ισχύος (είναι εμφανές και από το σχήμα 2.2.1.2).
- Καλύτερο βαθμό απόδοσης (παρουσιάζεται από το σχήμα 2.2.1.3).
- Μεγαλύτερη παροχή αέρα (127kg/s).
- Ελάχιστη μεγαλύτερη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο (838°C).
- Μεγαλύτερη διάμετρο στον στρόβιλο ισχύος.
- Νέες αεροτομές πτερυγίων στις μονάδες 3,4 και 5 του «στρόβιλου ισχύος».
- Νέος σχεδιασμός ατράκτου του στρόβιλου ισχύος για μεγαλύτερη ισχύ.
- Νέος σχεδιασμός του διαχύτη στην έξοδο των καυσαερίων για μεγαλύτερη ροή σε χαμηλές ταχύτητες του αερίου.

Τέλος, το ακριβές μοντέλο αεριοστρόβιλου που χρησιμοποιείται στον εικονικό σταθμό της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι το μοντέλο LM6000PC Sprint το οποίο χρησιμοποιεί και ένα σύστημα ψεκασμού νερού σε μορφή spray μεταξύ του συμπιεστή υψηλής και του συμπιεστή χαμηλής πίεσης. Το σύστημα αυτό της General Electric ονομάζεται Sprint (SPRay INTercooling) και παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2.1.4. Η βασική αρχή λειτουργίας του συστήματος αυτού είναι η ακόλουθη. Ο αέρας που συμπιέζεται στο συμπιεστή υψηλής πίεσης χρησιμοποιείται για ψύξη των πτερυγίων του στρόβιλου υψηλής πίεσης. Επομένως, υπάρχει περιορισμός στη θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του συμπιεστή υψηλής πίεσης. Όταν ψεκάζεται

νερό σε μορφή spray στο συμπιεστή υψηλής πίεσης, τότε η θερμοκρασία εισόδου στο συμπιεστή υψηλής πίεσης είναι μικρότερη και άρα υπάρχει περιθώριο για μεγαλύτερη αύξηση της πίεσης του αέρα. Επομένως, ο αέρας στην έξοδο του συμπιεστή υψηλής πίεσης για την ίδια θερμοκρασία θα έχει μεγαλύτερη πίεση. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται υψηλότερος λόγος πίεσης και καλύτερος βαθμός απόδοσης, ενώ παράγεται και περισσότερη ισχύς από τον αεριοστρόβιλο. Η βελτίωση σε αυτά τα μεγέθη είναι ακόμα πιο αισθητή όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος αυξάνεται γιατί τότε η ψύξη του αέρα πριν από το συμπιεστή υψηλής πίεσης έχει ακόμα μεγαλύτερη επίδραση. Το τελευταίο αυτό χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα επιθυμητό στην περίπτωση ενός ελληνικού νησιού που μελετάται όπου η θερμοκρασία είναι σχεδόν πάντα μεγαλύτερη από αυτή των συνθηκών κατά ISO (15°C) και, ειδικά, το καλοκαίρι που στα νησιά παρουσιάζονται αιχμές στη ζήτηση μεταξύ άλλων και λόγω τουριστικής κίνησης.

Οι πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά και τα συστήματα που χρησιμοποιούνται στον αεριοστρόβιλο LM6000PC Sprint έχουν αντληθεί από φυλλάδια της General Electric (τόσο διαφημιστικά όσο και φυλλάδια εκπαίδευσης) για το συγκεκριμένο μοντέλο. Για αναλυτικότερες πληροφορίες σχετικά με τον αεριοστρόβιλο LM6000PC Sprint ο αναγνώστης παραπέμπεται στο Παράρτημα Α στην παράγραφο που αναφέρεται στο αντίστοιχο μοντέλο.



**Σχήμα 2.2.1. 4:** Βασική διαμόρφωση και λειτουργία του συστήματος ψεκασμού spray νερού Sprint που χρησιμοποιείται στο αεριοστρόβιλο LM6000PC Sprint της General Electric (σχήμα από [33])

Αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.2.2 ότι στη διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι απαραίτητο να υπάρχει διαθέσιμη μία έκφραση για την κατανάλωση καυσίμου ως συνάρτηση της παραγόμενης ισχύος και συγκεκριμένα αναφέρθηκε ότι η συνάρτηση αυτή θα επιλεγεί να είναι πολυώνυμο δευτέρου βαθμού. Ωστόσο σε πρώτη φάση η πληροφορία αυτή δεν είναι διαθέσιμη από τον κατασκευαστή της μονάδας. Διαθέσιμη πληροφορία από τον κατασκευαστή (General Electric για βιομηχανικούς αεριοστρόβιλους παράγωγους αεροπορικών) είναι, όμως, μια συσχέτιση μεταξύ της τιμής της φόρτισης της μονάδας και ενός συντελεστή με τον οποίο πρέπει να πολλαπλασιασθεί η κατανάλωση στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας ώστε να προκύψει η κατανάλωση στο μερικό φορτίο που ζητάμε. Η κατανάλωση στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας, παρότι δεν δίνεται άμεσα από τον κατασκευαστή είναι εύκολο να βρεθεί από την τιμή της παραγόμενης ισχύος στο σημείο αυτό και από την τιμή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου στο σημείο αυτό. Η συσχέτιση αυτή παρουσιάζεται στον πίνακα 2.2.1.2.

Φόρτιση x (%)	Συντελεστής διόρθωσης C της κατανάλωσης του ονομαστικού σημείου λειτουργίας
100	1
80	0,95
60	0,885
40	0,78
20	0,545

**Πίνακας 2.2.1. 2:** Τιμές του συντελεστή διόρθωσης της τιμής της κατανάλωσης καυσίμου στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας (σε MW), ώστε να προκύψει η τιμή της κατανάλωσης καυσίμου στα σημεία που αντιστοιχούν στις παραπάνω τιμές της φόρτισης (δεδομένα από[35]).

Η λογική που θα ακολουθηθεί για να καταλήξουμε σε ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού που να δίνει την κατανάλωση σε κάθε σημείο λειτουργίας (πάντα μεταξύ του τεχνικού μεγίστου και του τεχνικού ελαχίστου της μονάδας) συναρτήσει της παραγόμενης ισχύος είναι η εξής:

Σε κάθε ένα από τα πέντε διαθέσιμα σημεία του πίνακα 2.2.1.2 υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς (P) και η κατανάλωση καυσίμου (FC). Η κατανάλωση καυσίμου στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας ( $FC_{base}$ ) λαμβάνεται με βάση την τιμή της παραγόμενης ισχύος  $P_{base}$  και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου ( $q_{base}$ ) στο σημείο αυτό με βάση τη σχέση 2.2.1. Από τις τιμές αυτές υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς και η κατανάλωση καυσίμου στα μερικά φορτία μέσω των σχέσεων 2.2.2 και 2.2.3 αντίστοιχα. Ο βαθμός απόδοσης  $\eta_{th}$  σε κάθε σημείο προκύπτει από τη σχέση 2.2.4. Στη συνέχεια, γίνεται προσέγγιση της καμπύλης, μεταξύ των πέντε σημείων που θα προκύψουν, με ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού και η συνάρτηση που προκύπτει

είναι το ζητούμενο πολώνυμο κατανάλωσης καυσίμου. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2.1.3 και τα σημεία μαζί με το πολώνυμο προσέγγισης στο σχήμα 2.2.1.5. Να σημειωθεί ότι η αριθμητική προσέγγιση πραγματοποιείται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

$$FC = q \cdot P \Rightarrow FC_{base} = q_{base} \cdot P_{base} \quad (2.2.1)$$

$$P = x \cdot P_{base} \quad (2.2.2)$$

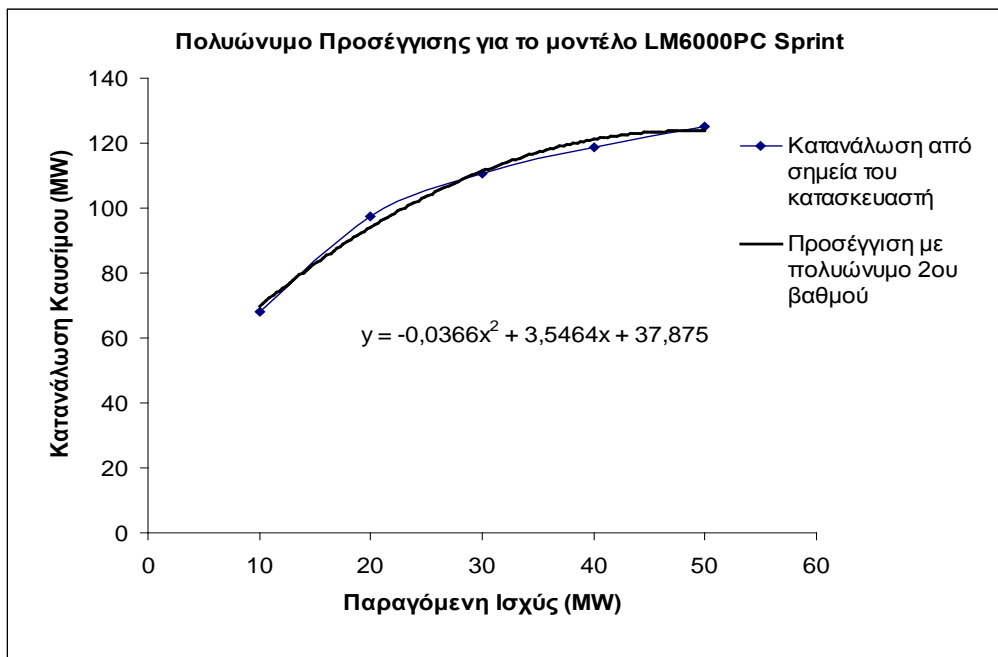
$$FC = C \cdot FC_{base} \quad (2.2.3)$$

$$\eta_{th} = \frac{P}{FC} \quad (2.2.4)$$

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι όσο η φόρτιση της μονάδας απομακρύνεται από το ονομαστικό σημείο λειτουργίας της τόσο ο βαθμός απόδοσης μειώνεται, γεγονός που είναι αναμενόμενο γιατί οι συνιστώσες στροβιλομηχανών και κατ' επέκταση όλη η μονάδα λειτουργούν σε συνθήκες αρκετά διαφορετικές από αυτές για τις οποίες έχουν σχεδιαστεί. Παρατηρούμε ότι, όπως είναι γνωστό, όσο απομακρυνόμαστε από το ονομαστικό σημείο τόσο πιο απότομη είναι η πτώση του βαθμού απόδοσης

Φόρτιση (%)	Παραγόμενη Ισχύς P(MW)	Κατανάλωση Καυσίμου FC(MW)	Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου q(kJ/kJe)	Βαθμός Απόδοσης $\eta_{th}$
100	50	125	2,50	0,4000
80	40	118,750	2,96	0,3368
60	30	110,625	3,68	0,2711
40	20	97,500	4,80	0,2051
20	10	68,125	6,81	0,1468

**Πίνακας 2.2.1. 3:** Αποτελέσματα υπολογισμών για τα βασικά χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου σε μερικά φορτία για τον αεριοστρόβιλο LM6000PC Sprint



**Σχήμα 2.2.1. 5:** Στο σχήμα αυτό παρουσιάζονται τα σημεία όπως προκύπτουν από τα δεδομένα από [35] και η προσέγγιση της συνάρτησης κατανάλωσης καυσίμου – παραγόμενης ισχύος με πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 1.2.3 οι λειτουργικοί περιορισμοί του συστήματος είναι ιδιαίτερα σημαντικά δεδομένα για τη διαδικασία βελτιστοποίησης που παρουσιάζεται στη διπλωματική εργασία. Ο λειτουργικός περιορισμός για τήρηση του τεχνικού μεγίστου και ελαχίστου των μονάδων καλύπτεται από τα χαρακτηριστικά που ήδη αναφέρθηκαν. Ο λειτουργικός περιορισμός που αφορά στους χρόνους έναυσης, σβέσης και παραμονής σε μία κατάσταση καθορίζεται επίσης από αντίστοιχα χαρακτηριστικά της μονάδας. Τα χαρακτηριστικά αυτά για τον αεριοστρόβιλο LM6000PC Sprint δεν είναι ακριβώς γνωστά αλλά μπορούμε να τα ορίσουμε σε πρώτη προσέγγιση όπως γίνεται ακολούθως:

1. Ο αεριοστρόβιλος LM6000PC Sprint, για το σύστημα που μελετάμε, αποτελεί μονάδα αιχμής. Για το λόγο αυτό, ο ελάχιστος χρόνος έναυσης προβλέπεται να είναι ένα διάστημα λίγων λεπτών (10-15 min). Ωστόσο, επειδή στην επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται ως βασική μονάδα χρόνου η μία ώρα (1h), θα δεχτούμε προσεγγιστικά ότι ο χρόνος έναυσης του αεριοστρόβιλου, δηλαδή ο χρόνος μέχρι η μηχανή να βρίσκεται σε θέση να παράγει το τεχνικό της ελάχιστο κυμαίνεται σε μία ώρα (1h).
2. Ο ελάχιστος χρόνος σβέσης λαμβάνεται κατά σύμβαση (και λόγω έλλειψης αναλυτικότερων δεδομένων) περίπου στο μισό του χρόνου εκκίνησης. Επειδή για την εν λόγω μονάδα επιλέξαμε ελάχιστο χρόνο εκκίνησης ίσο με 1h ο ελάχιστος χρόνος σβέσης θα προέκυπτε κλάσμα της ώρας και δεν θα ήταν αποδεκτός για την επίλυση του προβλήματος. Για το λόγο αυτό επιλέγεται ελάχιστος χρόνος σβέσης μηδενικός. Άλλωστε, υπάρχει κάποιο περιθώριο

χρόνο καθώς ο ελάχιστος χρόνος εκκίνησης δεχθήκαμε ότι είναι 1h ενώ στην πράξη είναι αρκετά μικρότερος.

3. Ο ελάχιστος χρόνος παραμονής σε μία κατάσταση λαμβάνεται μηδενικός για τη συγκεκριμένη μονάδα. Αυτό συμβαίνει γιατί ο αεριοστρόβιλος αυτός είναι παράγωγος αεροπορικού κινητήρα και ανάμεσα στις προδιαγραφές ενός αεροπορικού κινητήρα είναι η δυνατότητα άμεσης εκκίνησης και άμεσης σβέσης.

Σε ότι αφορά σε στοιχεία σχετικά με την ανάγκη συντήρησης των μονάδων θα δεχθούμε ότι ο μέγιστος αριθμός ωρών λειτουργίας μεταξύ δύο προγραμματισμένων επισκευών είναι ίσος με 12000 ώρες. Εξάλλου, επειδή κάνουμε βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό, εκτός από την προφανή ειδική περίπτωση, αυτός ο χρόνος δεν ενδιαφέρει ουσιαστικά και στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας δε θα χρησιμοποιηθεί.

Τέλος, πρέπει να ορισθούν κάποια ακόμα στοιχεία που αφορούν τα κόστη που συνοδεύουν τη λειτουργία της μονάδας πέρα από το κόστος καυσίμου. Το κόστος εκκίνησης λαμβάνεται σε 14MWh ανά έναυση και είναι ίδιο είτε η έναυση θεωρείται θερμή είτε ψυχρή, χαρακτηριστικό επίσης αναμενόμενο αφού αναφερόμαστε σε μονάδα αιχμής. Για τυπικούς, επομένως και μόνο λόγους χρειάζεται να ορισθεί ένας αριθμός ωρών λειτουργίας που πρέπει η μονάδα να βρίσκεται σε κατάσταση κράτησης πριν εκκινήσει για να θεωρηθεί η έναυση ψυχρή και ο αριθμός αυτός λαμβάνεται ίσος με 5 ώρες. Το τελευταίο δεδομένου που απαιτείται για τη μονάδα είναι το κόστος σβέσης το οποίο επίσης δεν είναι γνωστό επακριβώς από τον κατασκευαστή και λαμβάνεται ίσο προσεγγιστικά με το μισό του κόστους εκκίνησης, δηλαδή ίσο με 7MWh ανά σβέση. Στον πίνακα 2.2.1.4 που ακολουθεί φαίνονται συγκεντρωμένα τα χαρακτηριστικά του αεριοστρόβιλου LM6000PC Sprint που αποτελεί την πρώτη μονάδα του εικονικού σταθμού παραγωγής του οποίου η λειτουργία θα βελτιστοποιηθεί. Σημειώνεται ότι οι συντελεστές του πολυωνύμου κατανάλωσης καυσίμου – παραγωγής εμφανίζονται στρογγυλοποιημένοι σε τρία δεκαδικά ψηφία.

<b>LM6000PC Sprint</b>	
<b>Μέγιστη παραγόμενη ισχύς (MW)</b>	$P_{base} = P_{max} = 50$
<b>Ελάχιστη παραγόμενη ισχύς (MW)</b>	$P_{min} = 5$
<b>Πολυώνυμο κατανάλωσης καυσίμου (όπου P η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς)</b>	$F = -0,037P^2 + 3,546P + 37,875$
<b>Ειδική κατανάλωση καυσίμου (kJ/Je) (συνθήκες ISO, ονομαστικό φορτίο)</b>	$q_{base} = 2,5$
<b>Χρόνος εκκίνησης (hours)</b>	$T_{up} = 1$
<b>Χρόνος σβέσης (hours)</b>	$T_{dn} = 0$
<b>Ελάχιστος χρόνος παραμονής σε μία κατάσταση</b>	$T_{rmp} = 0$
<b>Ελάχιστος χρόνος επισκευής (hours)</b>	$T_{rep} = 0$
<b>Μέγιστος αριθμός ωρών λειτουργίας μεταξύ προγραμματισμένων επισκευών</b>	$EOH_{max} = 12000$
<b>Κόστος θερμής εκκίνησης (MWh)</b>	14
<b>Κόστος ψυχρής εκκίνησης (MWh)</b>	14
<b>Ελάχιστος χρόνος παραμονής σε κατάσταση κράτησης για να θεωρηθεί η εκκίνηση ψυχρή (hours)</b>	5
<b>Κόστος σβέσης (MWh)</b>	7
<b>Συντελεστής a πολυωνόμου κατανάλωσης καυσίμου</b>	-0,037
<b>Συντελεστής b πολυωνόμου κατανάλωσης καυσίμου</b>	3,546
<b>Συντελεστής c πολυωνόμου κατανάλωσης καυσίμου</b>	37,875

**Πίνακας 2.2.1. 4:** Ο πίνακας περιλαμβάνει τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του αεριοστρόβιλου LM6000PC Sprint που αποτελεί την πρώτη μονάδα αιχμής του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής του οποίου το πρόγραμμα θα βελτιστοποιηθεί. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι απαραίτητα δεδομένα για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης (στοιχεία από [33], [34], [35] όπως αναφέρθηκαν ανωτέρω και από την πηγή [41]).

## 2.2.2 Μονάδα 2 (Αιχμής) – Αεριοστρόβιλος LM2500+

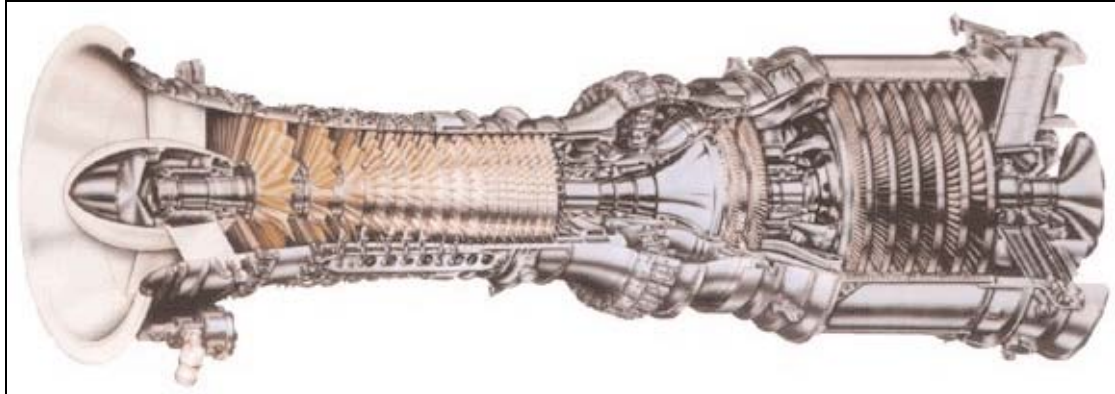
Ο αεριοστρόβιλος LM2500+ είναι ένα μοντέλο στις σειρές LM της General Electric (όπως και ο LM6000PC Sprint) και είναι και αυτός, όπως και όλα τα μοντέλα της σειράς αυτής, παράγωγος αεροπορικού κινητήρα. Το βασικό μοντέλο είναι ο αεριοστρόβιλος LM2500 ο οποίος βασίζεται στο αεροπορικό κινητήρα CF6-6 της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

Ο αεριοστρόβιλος LM2500 είναι μηχανή μίας ατράκτου (συμπιεστής και στρόβιλος) η οποία βρίσκεται σε αεροδυναμική σύζευξη με ένα στρόβιλο ισχύος. Ο αεριοστρόβιλος LM2500 όπως και ο LM2500+ χρησιμοποιούνται τόσο ως μονάδες αιχμής σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και για την κίνηση μηχανικού φορτίου σε ναυτικές κυρίως εφαρμογές. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχει η δυνατότητα και τα δύο μοντέλα να λειτουργούν με ταχύτητα περιστροφής 3000rpm για παραγωγή ρεύματος 50Hz χωρίς να απαιτείται μειωτήρας στροφών. Ο αεριοστρόβιλος LM2500 χρησιμοποιείται αρκετές φορές με ένα σύστημα ψεκασμού (Steam Injected Gas Turbine - STIG) που αυξάνει την παραγόμενη ισχύ και το  $\nu$  βαθμό από  $\omega$  της ενώ βοηθάει στη μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου. Περισσότερα για το σύστημα ψεκασμού ατμού μπορούν να βρεθούν στην βιβλιογραφική παραπομπή [33].

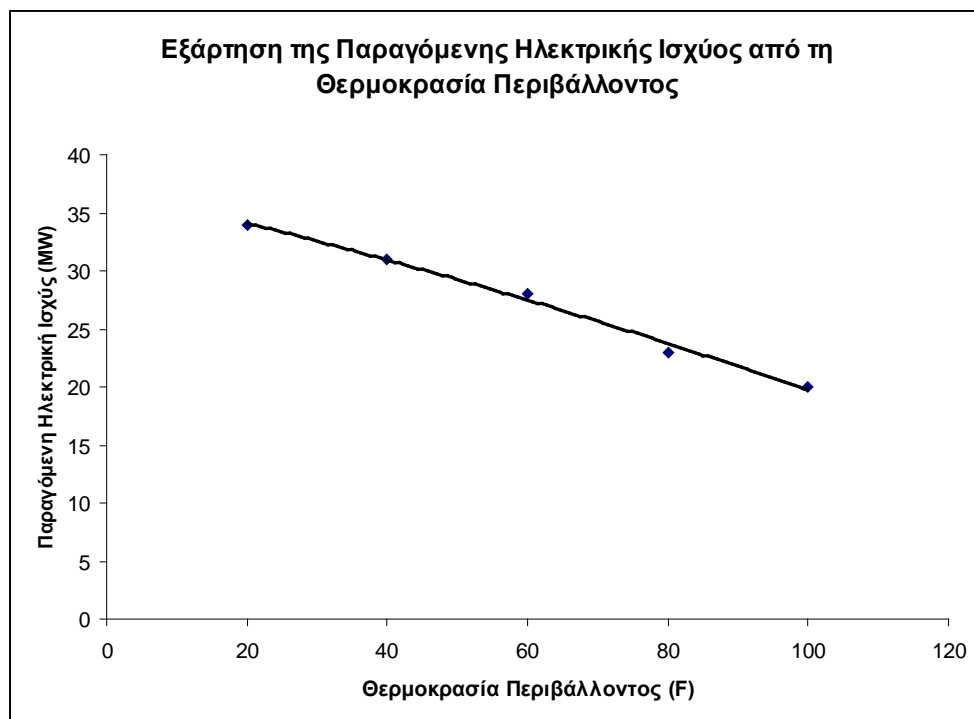
Οι κυριότερες βελτιώσεις που παρατηρούνται στο μοντέλο LM2500+ σε σχέση με το βασικό μοντέλο LM2500 είναι ο αυξημένος λόγος πίεσης, ο αυξημένος βαθμός απόδοσης και η μεγαλύτερη τιμή της παραγόμενης ισχύος στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας. Μία αλλαγή που οδηγεί σε αυτές τις βελτιώσεις είναι η προσθήκη μία μηδενικής βαθμίδας στο συμπιεστή που οδηγεί σε αυξημένη ροή και λόγο πίεσης, και η χρήση βελτιωμένων υλικών στο στρόβιλο, που επιτρέπουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες των καυσαερίων στην έξοδο από το θάλαμο καύσης. Ο λόγος πίεσης του μοντέλου LM2500+ φτάνει την τιμή 22:1 (18:1 στο μοντέλο LM2500). Στο ακόλουθο σχήμα 2.2.2.1 έχουμε μία εικόνα του αεριοστρόβιλου LM2500+, στην οποία φαίνονται οι 17 βαθμίδες του συμπιεστή, οι 2 βαθμίδες του στροβίλου και οι 6 βαθμίδες του στροβίλου ισχύος. Ουσιαστικά ο διβάθμιος στρόβιλος δεν συμμετέχει στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την κίνηση του συμπιεστή. Επιπλέον, στο σχήμα 2.2.2.2 παρουσιάζεται η εξάρτηση της παραγόμενης ισχύος από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και στο σχήμα 2.2.2.3 η εξάρτηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τα στοιχεία για τη δημιουργία των σχημάτων 2.2.2.2 και 2.2.2.3 προέρχονται από την πηγή [36].



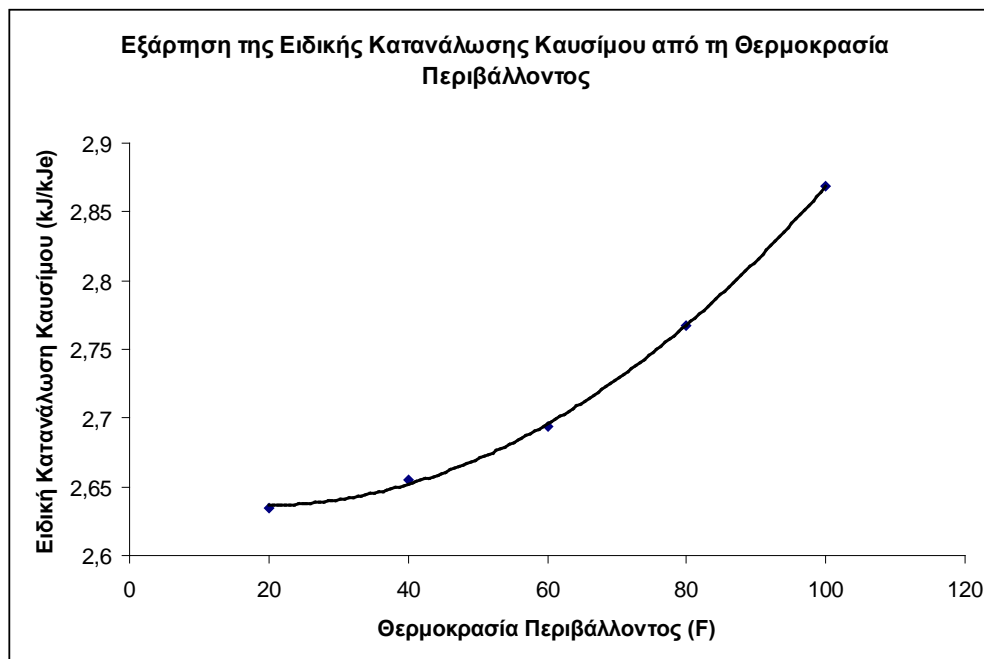
Η τιμή της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας για το μοντέλο LM2500+ είναι 30,5MW ενώ στο ίδιο σημείο ο βαθμός απόδοσης είναι 38,56%.



**Σχήμα 2.2.2. 1:** Βασική μορφή του αεριοστρόβιλου LM2500+ της General Electric (σχήμα από την πηγή [33]).



**Σχήμα 2.2.2. 2:** Επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ του αεριοστρόβιλου LM2500+ (χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από την πηγή [36]).



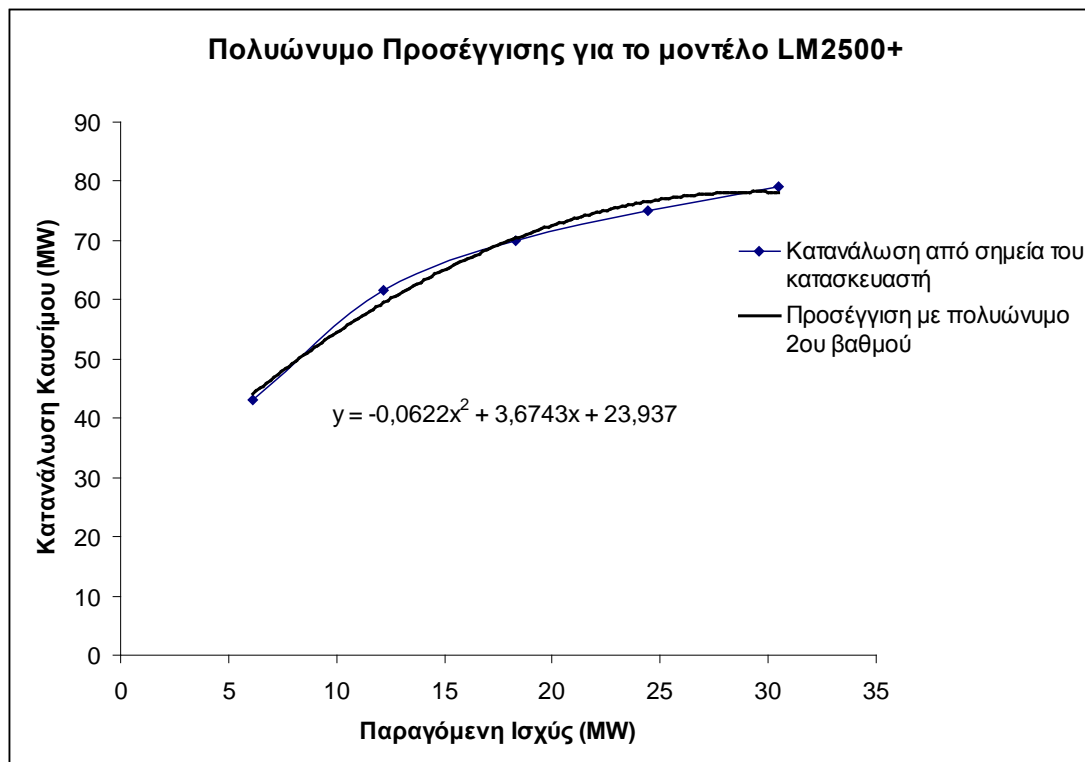
**Σχήμα 2.2.2. 3:** Επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην ειδική κατανάλωση καυσίμου του αεριοστρόβιλου LM2500+ (χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από την πηγή [36]).

Για να προσδιορίσουμε ένα πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού που θα μας παρέχει το κόστος καυσίμου (σε MW) ως συνάρτηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος θα ακολουθήσουμε την ίδια διαδικασία που αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.1. Κατά προσέγγιση θα θεωρήσουμε ότι οι τιμές του πίνακα 2.2.1.2 είναι οι ίδιες και στην περίπτωση του μοντέλου LM2500+ (όπως και ο LM6000PC Sprint είναι αεριοστρόβιλος της General Electric παράγωγος αεροπορικού κινητήρα και χρησιμοποιείται ως μονάδα αιχμής) οπότε ο πίνακας αυτός θα χρησιμοποιηθεί αυτούσιος. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τα βασικά χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου σε μερικά φορτία για τον αεριοστρόβιλο LM2500+ παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα 2.2.2.1.

Φόρτιση x (%)	Παραγόμενη Ισχύς P(MW)	Κατανάλωση Καυσίμου FC(MW)	Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου q(kJ/kJe)	Βαθμός Απόδοσης $\eta_{th}$
100	30,5	79,000	2,59	0,3861
80	24,4	75,050	3,08	0,3251
60	18,3	69,915	3,82	0,2617
40	12,2	61,620	5,05	0,1980
20	6,10	43,055	7,06	0,1417

**Πίνακας 2.2.2. 1:** Αποτελέσματα υπολογισμών για τα βασικά χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου σε μερικά φορτία για τον αεριοστρόβιλο LM2500+.

Χρησιμοποιώντας όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.1 την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για την προσέγγιση προκύπτει το ζητούμενο πολυώνυμο κατανάλωσης καυσίμου σε μερικά φορτία όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2.2.4.



**Σχήμα 2.2.2. 4:** Στο σχήμα αυτό παρουσιάζονται τα σημεία όπως προκύπτουν από τα δεδομένα από [35] και η προσέγγιση της συνάρτησης κατανάλωσης καυσίμου – παραγόμενης ισχύος με πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Σχετικά με του λειτουργικούς περιορισμούς που επιβάλλονται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας χρησιμοποιούνται τα παρακάτω δεδομένα:

1. Τεχνικό μέγιστο της μονάδας λαμβάνεται η τιμή της παραγόμενης ισχύος στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας ίση με 30,5MW.
2. Ως τεχνικό ελάχιστο λαμβάνεται τιμή περίπου στο 20% του τεχνικού μεγίστου της μονάδας και εδώ είναι 5MW.
3. Από στοιχεία της πηγής [39] προκύπτει ο χρόνος έναυσης ίσος με περίπου 10min. Για τους ίδιους λόγους όμως που αναφέρθηκαν και στην παράγραφο 2.2.1 και αφορούν στην κωδικοποίηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης επιλέγεται ως χρόνος έναυσης η μία (ακέραια) ώρα (1h).
4. Ο αεριοστρόβιλος LM2500+ είναι μονάδα αιχμής της ίδιας εταιρείας με τον αεριοστρόβιλο LM6000PC Sprint και επειδή δεν υπάρχουν διαθέσιμα αναλυτικότερα στοιχεία λαμβάνεται για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν και στην παράγραφο 2.2.1 ο χρόνος σβέσης μηδενικός. Το ίδιο ισχύει και για τον ελάχιστο χρόνο παραμονής σε μία κατάσταση.

5. Το κόστος έναυσης λαμβάνεται προσεγγιστικά ίσο με 8,5MWh ανά έναυση, το κόστος σβέσης ίσο με 4,5MWh ενώ τυπικά και μόνο λαμβάνεται ως ελάχιστο χρονικό διάστημα παραμονής σε κατάσταση κράτησης ώστε η επόμενη έναυση να θεωρηθεί ψυχρή οι 5h. Σημειώνεται ότι το κόστος έναυσης είναι ίδια είτε η έναυση θεωρείται ψυχρή είτε θεωρείται θερμή, για τους λόγους που ήδη αναφέρθηκαν όταν έγινε η ίδια επιλογή για τον αεριοστρόβιλο LM6000PC Sprint.

Τα στοιχεία της μονάδας που είναι απαραίτητα για τη βελτιστοποίηση παρουσιάζονται ομαδοποιημένα στον πίνακα 2.2.2.2. Οι συντελεστές του πολυωνύμου κατανάλωσης καυσίμου-παραγωγής παρουσιάζονται στρογγυλοποιημένοι σε τρία δεκαδικά ψηφία.

<b>LM2500+</b>	
<b>Μέγιστη παραγόμενη ισχύς (MW)</b>	$P_{base} = P_{max} = 30,5$
<b>Ελάχιστη παραγόμενη ισχύς (MW)</b>	$P_{min} = 5$
<b>Πολυώνυμο κατανάλωσης καυσίμου (όπου P η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς)</b>	$F = -0,062P^2 + 3,674P + 23,937$
<b>Ειδική κατανάλωση καυσίμου (kJ/Je) (συνθήκες ISO, ονομαστικό φορτίο)</b>	$q_{base} = 2,59$
<b>Χρόνος εκκίνησης (hours)</b>	$T_{up} = 1$
<b>Χρόνος σβέσης (hours)</b>	$T_{dn} = 0$
<b>Ελάχιστος χρόνος παραμονής σε μία κατάσταση</b>	$T_{rmp} = 0$
<b>Ελάχιστος χρόνος επισκευής (hours)</b>	$T_{rep} = 0$
<b>Μέγιστος αριθμός ωρών λειτουργίας μεταξύ προγραμματισμένων επισκευών</b>	$EOH_{max} = 12000$
<b>Κόστος θερμής εκκίνησης (MWh)</b>	8,5
<b>Κόστος ψυχρής εκκίνησης (MWh)</b>	8,5
<b>Ελάχιστος χρόνος παραμονής σε κατάσταση κράτησης για να θεωρηθεί η εκκίνηση ψυχρή (hours)</b>	5
<b>Κόστος σβέσης (MWh)</b>	4,5
<b>Συντελεστής a πολυωνόμου κατανάλωσης καυσίμου</b>	-0,062
<b>Συντελεστής b πολυωνόμου κατανάλωσης καυσίμου</b>	3,674
<b>Συντελεστής c πολυωνόμου κατανάλωσης καυσίμου</b>	23,937

**Πίνακας 2.2.2. 2:** Ο πίνακας περιλαμβάνει τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του αεριοστρόβιλου LM2500+ που αποτελεί τη δεύτερη μονάδα αιχμής του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής του οποίου το πρόγραμμα θα βελτιστοποιηθεί. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι απαραίτητα δεδομένα για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης (στοιχεία από [33], [34], [35] όπως αναφέρθηκαν ανωτέρω και από την πηγή [41]).

### 2.2.3 Μονάδα 3 (Βάσης) – Μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου

Η τρίτη κατά σειρά μονάδα του σταθμού του οποίου η λειτουργία θα βελτιστοποιηθεί είναι και η πρώτη από τις τρεις μονάδες βάσης του σταθμού. Πρόκειται για τη μοναδική μονάδα του συγκεκριμένου προβλήματος που 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. Περισσότερα θεωρητικά και τεχνολογικά στοιχεία σχετικά με τις μονάδες συνδυασμένου κύκλου αναφέρονται στο Παράρτημα Α στην παράγραφο που αναφέρεται στην τρίτη μονάδα του συστήματος.

Οι βασικές συνιστώσες της μονάδας είναι οι δύο αεριοστρόβιλοι, ο ατμοστρόβιλος και οι δύο πανομοιότυπες συσκευές ανακόμισης θερμότητας που χρησιμοποιούν ατμό. Το μοντέλο των δύο αεριοστρόβιλων είναι το ίδιο και για την ακρίβεια είναι το μοντέλο GT8C της εταιρείας ABB. Πρόκειται για βαρέως τύπου βιομηχανικό αεριοστρόβιλο του οποίου τα βασικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2.3.1.

GT 8 C	
Παραγόμενη Ισχύς στο Ονομαστικό Σημείο Λειτουργίας $P_{GT}$ (MW)	52,8
Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου στο Ονομαστικό Σημείο Λειτουργίας $q_{GT}$ (kJ/kJe)	2,90
Λόγος Πίεσης (-)	15,7
Ταχύτητα Στροβίλου Ισχύος (rpm)	3000
Θερμοκρασία Καυσαερίων στην έξοδο (°C)	517
Παροχή Μάζας (kg/sec)	179,33

**Πίνακας 2.2.3. 1:** Βασικά χαρακτηριστικά του αεριοστρόβιλου GT 8 C που χρησιμοποιείται στη μονάδα συνδυασμένου κύκλου (πηγή [38] και στοιχεία από την πηγή [41]).

Η μονάδα συνολικά στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας της παράγει 132,3MW ηλεκτρικής ισχύος. Όταν η μονάδα λειτουργεί με φόρτιση  $x_3 \geq 0,5$  τότε χρησιμοποιούνται και οι δύο αεριοστρόβιλοι. Όταν η φόρτιση λάβει τιμές μικρότερες από το 0,5 τότε ο ένας αεριοστρόβιλος τίθεται εκτός λειτουργίας και λειτουργεί μόνο ο άλλος σε συνδυασμό με τον ατμοστρόβιλο. Με βάση αυτή την αρχή λειτουργίας θα έπρεπε να προκύψουν δύο πολυώνυμα κατανάλωσης καυσίμου – παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος για τη μονάδα. Ωστόσο κάτι τέτοιο απαιτεί επιπλέον δεδομένα που δεν είναι γνωστά, ενώ περιπλέκει αρκετά το στάδιο της βελτιστοποίησης που αναφέρεται στην επιλογή των βέλτιστων φορτίσεων των μονάδων σε κάθε ώρα. Επομένως θα χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία του κατασκευαστή ως να αναφέρονται σε

μία συνεχή συνάρτηση και θα γίνει η προσέγγιση με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων ώστε να προσδιορισθεί το ζητούμενο πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού. Στον πίνακα 2.2.3.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα στοιχεία που παρέχονται από τον κατασκευαστή, ενώ στον πίνακα 2.2.3.3 παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την αριθμητική προσέγγιση του πολυωνύμου.

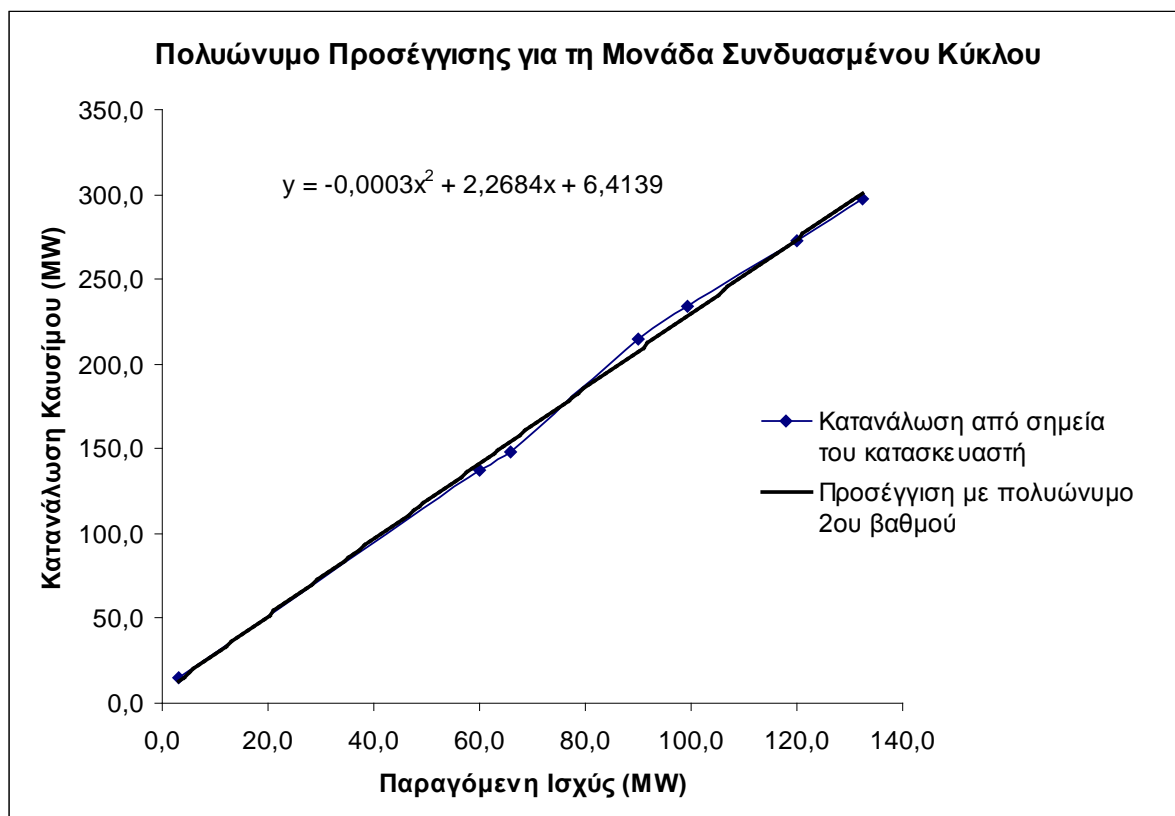
Παραγόμενη Ισχύς P(MW)	Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου q(kJ/kJe)	Πλήθος αεριοστρόβιλων σε λειτουργία
132,3	2,248	2
120,0	2,276	2
99,2	2,358	2
90,0	2,384	2
65,8	2,259	1
60,0	2,281	1

**Πίνακας 2.2.3. 2:** Στοιχεία του κατασκευαστή για τη λειτουργία και την κατανάλωση καυσίμου της μονάδας συνδυασμένου κύκλου κατά τη λειτουργία σε μερικά φορτία (στοιχεία από την πηγή [36])

Φόρτιση x (%)	Παραγόμενη Ισχύς P(MW)	Κατανάλωση Καυσίμου FC (MW)	Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου q(kJ/kJe)	Βαθμός Απόδοσης $\eta_{th}$
100	132,3	297,4	2,248	0,4449
91	120,0	273,1	2,276	0,4394
75	99,2	233,9	2,358	0,4241
68	90,0	214,5	2,384	0,4195
50	65,8	148,7	2,259	0,4426
45	60,0	136,9	2,281	0,4383
2	3	15,0	5,000	0,2000

**Πίνακας 2.2.3. 3:** Αποτελέσματα υπολογισμών για τα βασικά χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου σε μερικά φορτία για τη μονάδα συνδυασμένου κύκλου.

Στο ακόλουθο σχήμα 2.2.3.1 παρουσιάζεται η προσέγγιση του πολυωνύμου 2<sup>ου</sup> βαθμού για την κατανάλωση καυσίμου, όπως προκύπτει από τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Στον πίνακα 2.2.3.3 το τελευταίο σημείο ελήφθη κατά προσέγγιση αφού δεν υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία για την κατανάλωση στο τεχνικό ελάχιστο. Η πολύ μικρή τιμή του συντελεστή του όρου δεύτερης τάξης στο πολυώνυμο προσέγγισης δείχνει ότι η κατανάλωση καυσίμου εμφανίζει γραμμική εξάρτηση από την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ.



**Σχήμα 2.2.3. 1:** Στο σχήμα αυτό παρουσιάζονται τα σημεία όπως προκύπτουν από τα δεδομένα από την πηγή [41] και η προσέγγιση της συνάρτησης κατανάλωσης καυσίμου – παραγόμενης ισχύος με πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για τη μονάδα συνδυασμένου κύκλου.

Σε ότι αφορά στους τεχνικούς περιορισμούς που επιβάλλονται από τα χαρακτηριστικά της μονάδας συνδυασμένου κύκλου ισχύουν τα ακόλουθα:

1. Τεχνικό μέγιστο της μονάδας λαμβάνεται η τιμή της παραγόμενης ισχύος στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας η οποία είναι ίση με 132,3MW. Το τεχνικό ελάχιστο δίνεται από τον κατασκευαστή και είναι ίσο με 3MW.
2. Ως χρόνος έναυσης λαμβάνονται οι τρεις ώρες (3h), που κρίνεται ρεαλιστικό αφού πρόκειται για μονάδα βάσης και επιπλέον χρειάζεται κάποιος χρόνος για να αναπτυχθούν οι κατάλληλες θερμοκρασίες και για τη λειτουργία του αμοστροβίλου.
3. Ο χρόνος σβέσης λαμβάνεται στο μισό του χρόνου εκκίνησης, δηλαδή θα προέκυπτε ίσο με 1,5h. Για να συμβαδίζει όμως το δεδομένο αυτό με την ακέραια κωδικοποίηση του χρόνου στη διαδικασία βελτιστοποίησης λαμβάνεται ίσος με 1h.
4. Ο ελάχιστος χρόνος παραμονής σε μία κατάσταση λαμβάνεται ίσος με 1h, λόγω της λειτουργίας του αμοστροβίλου.
5. Το κόστος θερμής έναυσης λαμβάνεται ίσο με 278MWh ανά θερμή έναυση, ενώ το κόστος ψυχρής έναυσης λαμβάνεται ίσο με 464MWh ανά έναυση. Το κόστος σβέσης είναι ίσο με 116MWh ανά σβέση.



6. Ο ελάχιστος χρόνος στον οποίο πρέπει να βρίσκεται η μονάδα σε κατάσταση κράτησης ώστε η επόμενη έναυση να θεωρηθεί ψυχρή λαμβάνεται ίσος με 4h. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση αυτή, σε αντίθεση με τις δύο μονάδες αιχμής των οποίων η περιγραφή προηγήθηκε, ο χρόνος αυτός έχει σημασία στη διαδικασία βελτιστοποίησης γιατί τα κόστη θερμής και ψυχρής έναυσης διαφέρουν μεταξύ τους.

Τα χαρακτηριστικά της μονάδας συνδυασμένου κύκλου που μόλις περιγράφηκε και είναι απαραίτητα για τη βελτιστοποίηση, παρουσιάζονται ομαδοποιημένα στο πίνακα 2.2.3.4. Στην μορφή του πολωνύμου που παρουσιάζεται στη δεύτερη γραμμή του πίνακα οι συντελεστές παρουσιάζονται με ακρίβεια τριών δεκαδικών ψηφίων και για το λόγο αυτό απουσιάζει ο όρος δεύτερης τάξης, επειδή η τιμή του αντίστοιχου συντελεστή με ακρίβεια τριών δεκαδικών ψηφίων είναι μηδενική.

<b>Μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου</b>	
<b>Μέγιστη παραγόμενη ισχύς (MW)</b>	$P_{base} = P_{max} = 132,3$
<b>Ελάχιστη παραγόμενη ισχύς (MW)</b>	$P_{min} = 3$
<b>Πολυώνυμο κατανάλωσης καυσίμου (όπου P η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς)</b>	$F = 2,268P + 6,414$
<b>Ειδική κατανάλωση καυσίμου (kJ/Je) (συνθήκες ISO, ονομαστικό φορτίο)</b>	$q_{base} = 2,25$
<b>Χρόνος εκκίνησης (hours)</b>	$T_{up} = 3$
<b>Χρόνος σβέσης (hours)</b>	$T_{dn} = 1$
<b>Ελάχιστος χρόνος παραμονής σε μία κατάσταση</b>	$T_{rmp} = 1$
<b>Ελάχιστος χρόνος επισκευής (hours)</b>	$T_{rep} = 1$
<b>Μέγιστος αριθμός ωρών λειτουργίας μεταξύ προγραμματισμένων επισκευών</b>	$EOH_{max} = 12000$
<b>Κόστος θερμής εκκίνησης (MWh)</b>	278
<b>Κόστος ψυχρής εκκίνησης (MWh)</b>	464
<b>Ελάχιστος χρόνος παραμονής σε κατάσταση κράτησης για να θεωρηθεί η εκκίνηση ψυχρή (hours)</b>	4
<b>Κόστος σβέσης (MWh)</b>	116
<b>Συντελεστής a πολυωνύμου κατανάλωσης καυσίμου</b>	-0,0003
<b>Συντελεστής b πολυωνύμου κατανάλωσης καυσίμου</b>	2,268
<b>Συντελεστής c πολυωνύμου κατανάλωσης καυσίμου</b>	6,414

**Πίνακας 2.2.2. 3:** Ο πίνακας περιλαμβάνει τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της μονάδας συνδυασμένου κύκλου που αποτελεί την πρώτη μονάδα βάσης του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής του οποίου το πρόγραμμα θα βελτιστοποιηθεί. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι απαραίτητα δεδομένα για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης (στοιχεία από την πηγή [41]).

#### 2.2.4 Μονάδα 4 και Μονάδα 5 (Βάσης) – Αεριοστρόβιλος V64.3A

Οι δύο αυτές μονάδες θα εξεταστούν μαζί γιατί αποτελούνται και στις δύο χρησιμοποιείται το ίδιο μοντέλο αεριοστρόβιλου. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι 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 που ανήκουν στην ίδια σειρά με τον αεριοστρόβιλο V64.3A είναι οι V94.2, V94.2K και V94.3A. Τα βασικά θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά αυτών των αεριοστρόβιλων παρουσιάζονται στο ακόλουθο πίνακα 2.2.4.1.

Μοντέλο	V64.3A	V94.2	V94.2K	V94.3A
Θερμοκρασία Εισόδου στον Στρόβιλο (°C)	1190	1075	1060	1230
Λόγος Πίεσης	16,7	11,8	12,0	17,7
Παραγόμενη Ηλεκτρική Ισχύς (MW)	75	166	170	285
Βαθμός Απόδοσης (%)	35,9	34,5	36,5	39,6
Παροχή Καυσαερίων στην Έξοδο (kg/s)	213	531	540	690
Θερμοκρασία Καυσαερίων στην Έξοδο (°C)	574	544	545	572

**Πίνακας 2.2.4. 1:** Βασικά θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των αεριοστρόβιλων της εταιρείας Ansaldo Energia (στοιχεία από [37]).

Οι αεριοστρόβιλοι V64.3A, V94.2 και V94.3A μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε λειτουργία απλού κύκλου όσο και σε λειτουργία συνδυασμένου κύκλου. Στον σταθμό του προβλήματος που μελετάται και οι δύο αεριοστρόβιλοι V64.3A χρησιμοποιούνται σε λειτουργία απλού κύκλου. Τα στοιχεία του πίνακα 2.2.4.1 αναφέρονται σε λειτουργία στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας.

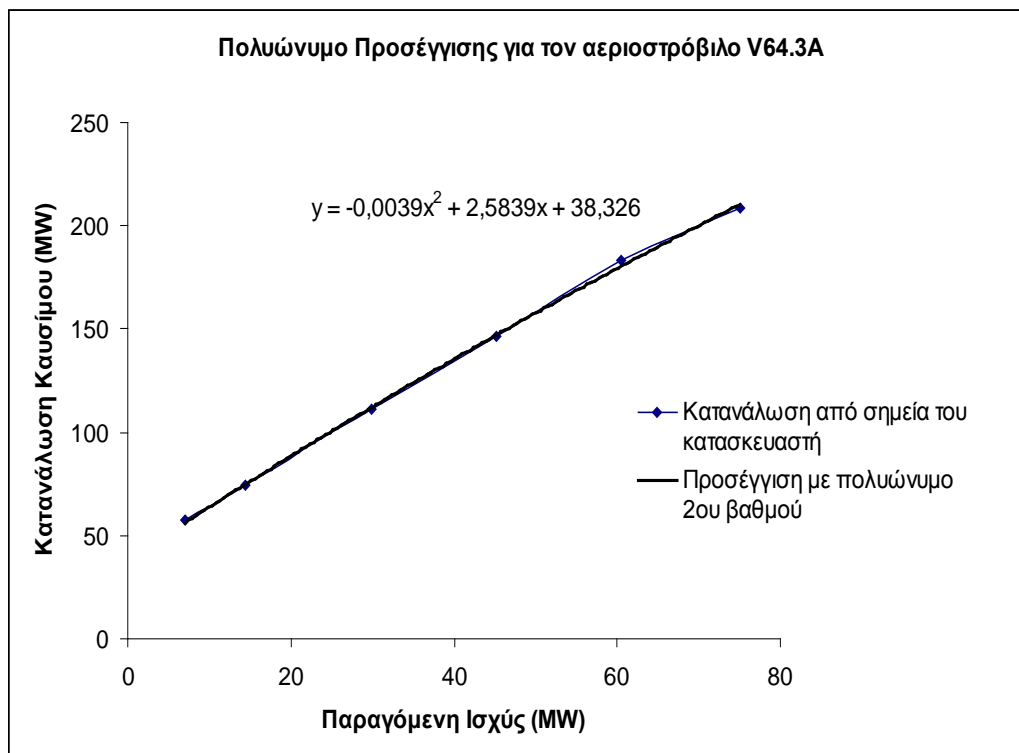
Ο αεριοστρόβιλος V64.3A χρησιμοποιείται για παραγωγή ρεύματος συχνότητας 50Hz και επομένως η ταχύτητα περιστροφής του είναι 3000rpm. Οι κύριες συνιστώσες του είναι ένας 15βάθμιος αξονικός συμπιεστής, ένας θάλαμος καύσης δακτυλιοειδούς μορφής με 24 καυστήρες και ένας 4βάθμιος στρόβιλος με ψύξη στρώματος αέρα (film cooling). Αξίζει να σημειωθεί ότι η γεννήτρια συνδέεται με τον αεριοστρόβιλο στην πλευρά του συμπιεστή (cold-end drive) και ότι ο συμπιεστής φέρει σύστημα μεταβλητής γεωμετρίας στα οδηγία πτερύγια εισόδου.

Σε ότι αφορά στην κατανάλωση καυσίμου σε μερικά φορτία χρησιμοποιούνται τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2.4.2 τα οποία έχουν προκύψει από δεδομένα της πηγής [41] και από χρήση των τύπων (2.2.1) έως (2.2.4).

Φόρτιση x (%)	Παραγόμενη Ισχύς P(MW)	Κατανάλωση Καυσίμου FC (MW)	Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου q(kJ/kJe)	Βαθμός Απόδοσης $\eta_{th}$
100	75,0	208,9	2,786	0,3590
81	60,5	183,0	3,025	0,3305
60	45,2	146,2	3,236	0,3091
40	29,8	111,3	3,732	0,2680
19	14,4	74,0	5,131	0,1949
9	7,0	57,1	8,174	0,1223

**Πίνακας 2.2.4. 2:** Αποτελέσματα υπολογισμών για τα βασικά χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου σε μερικά φορτία για τον αεριοστρόβιλο V64.3A (στοιχεία από την πηγή [41]).

Με χρήση των στοιχείων του πίνακα 2.2.4.2 και της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει το πολυώνυμο 2<sup>ov</sup> βαθμού με το οποίο προσεγγίζεται η κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει της παραγόμενης ισχύος. Η διαδικασία της προσέγγισης παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα 2.2.4.1.



**Σχήμα 2.2.4. 1:** Στο σχήμα αυτό παρουσιάζονται τα σημεία όπως προκύπτουν από τα δεδομένα από την πηγή [41] και η προσέγγιση της συνάρτησης κατανάλωσης καυσίμου – παραγόμενης ισχύος με πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Σε ότι αφορά στους τεχνικούς περιορισμούς που επιβάλλονται από τον αεριοστρόβιλο V64.3A ισχύουν τα ακόλουθα:

1. Το τεχνικό μέγιστο λαμβάνεται ίσο με την παραγόμενη ισχύ στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας η οποία είναι 75MW. Το τεχνικό ελάχιστο λαμβάνεται ίσο με 7MW.
2. Ο χρόνος έναυσης λαμβάνεται ίσος με 1h (άλλωστε πρόκειται για μονάδα βάσης οπότε ο χρόνος αυτός πρέπει σίγουρα να είναι τουλάχιστον 1h). Ο χρόνος σβέσης λαμβάνεται επίσης ίσος με 1h. Το ίδιο ισχύει και για τον ελάχιστο χρόνο παραμονής σε μία κατάσταση.
3. Το κόστος θερμής έναυσης λαμβάνεται ίσο με 14MWh ενώ το κόστος ψυχρής έναυσης επίσης ίσο με 15MWh. Το κόστος σβέσης λαμβάνεται ίσο με 7MWh.
4. Ο ελάχιστος χρόνος παραμονής σε κατάσταση κράτησης ώστε να θεωρηθεί η επόμενη έναυση ψυχρή λαμβάνεται ίσος με 2h και στην περίπτωση αυτή παίζει ρόλο μονάχα τυπικό ρόλο, καθώς τα κόστη θερμής και ψυχρής έναυσης δεν διαφέρουν.

Τα δεδομένα των μονάδων 4 και 5 (αεριοστρόβιλος V64.3A) παρουσιάζονται ομαδοποιημένα στον πίνακα 2.2.4.3. Οι συντελεστές του πολυωνύμου κατανάλωσης καυσίμου παρουσιάζονται με ακρίβεια τριών δεκαδικών ψηφίων. Μπορούμε να συγκρίνουμε την ειδική κατανάλωση καυσίμου στο ονομαστικό σημείο λειτουργία

για τον αεριοστρόβιλο V64.3A με την τιμή της ειδικής κατανάλωσης της μονάδας συνδυασμένου κύκλου. Παρατηρούμε ότι η μονάδα συνδυασμένου κύκλου παρουσιάζει σημαντικά μικρότερη τιμή. Αυτό αποτελεί και μία ένδειξη της καλύτερης απόδοσης της τεχνολογίας συνδυασμένου κύκλου αεριοστρόβιλου-ατμοστρόβιλου.

<b>V64.3A</b>	
<b>Μέγιστη παραγόμενη ισχύς (MW)</b>	$P_{base} = P_{max} = 75$
<b>Ελάχιστη παραγόμενη ισχύς (MW)</b>	$P_{min} = 7$
<b>Πολυώνυμο κατανάλωσης καυσίμου (όπου P η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς)</b>	$F = -0,004P^2 + 2,584P + 38,326$
<b>Ειδική κατανάλωση καυσίμου (kJ/Je) (συνθήκες ISO, ονομαστικό φορτίο)</b>	$q_{base} = 2,79$
<b>Χρόνος εκκίνησης (hours)</b>	$T_{up} = 1$
<b>Χρόνος σβέσης (hours)</b>	$T_{dn} = 1$
<b>Ελάχιστος χρόνος παραμονής σε μία κατάσταση</b>	$T_{rmp} = 1$
<b>Ελάχιστος χρόνος επισκευής (hours)</b>	$T_{rep} = 1$
<b>Μέγιστος αριθμός ωρών λειτουργίας μεταξύ προγραμματισμένων επισκευών</b>	$EOH_{max} = 12000$
<b>Κόστος θερμής εκκίνησης (MWh)</b>	14
<b>Κόστος ψυχρής εκκίνησης (MWh)</b>	14
<b>Ελάχιστος χρόνος παραμονής σε κατάσταση κράτησης για να θεωρηθεί η εκκίνηση ψυχρή (hours)</b>	2
<b>Κόστος σβέσης (MWh)</b>	7
<b>Συντελεστής a πολυωνύμου κατανάλωσης καυσίμου</b>	-0,004
<b>Συντελεστής b πολυωνύμου κατανάλωσης καυσίμου</b>	2,584
<b>Συντελεστής c πολυωνύμου κατανάλωσης καυσίμου</b>	38,326

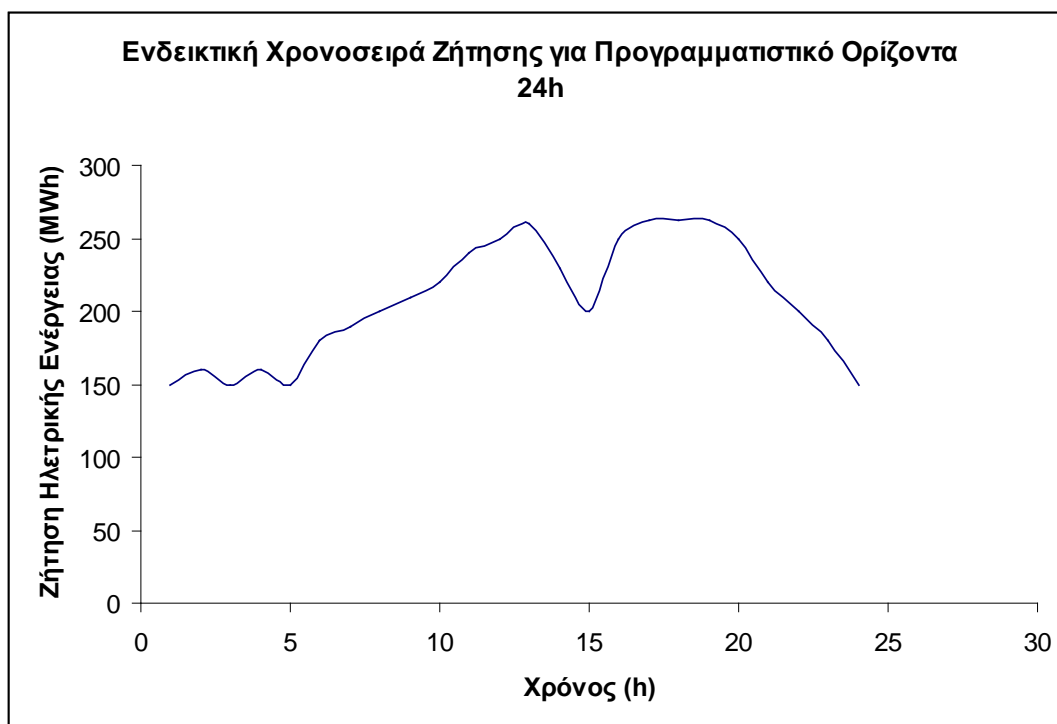
**Σχήμα 2.2.4. 2:** Ο πίνακας περιλαμβάνει τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του αεριοστρόβιλου V64.3A της Ansaldo Energia που χρησιμοποιείται στην δεύτερη και τρίτη μονάδα βάσης του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής του οποίου το πρόγραμμα θα βελτιστοποιηθεί. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι απαραίτητα δεδομένα για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης (στοιχεία από την πηγή [41] και από [37]).

### 2.3 Περιγραφή της χρονοσειράς ζήτησης

Εξαιρετικά βασικό δεδομένο για την βελτιστοποίηση αποτελεί η χρονοσειρά της ζήτησης την οποία καλείται να καλύψει ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Η χρονοσειρά ζήτησης εκτείνεται σε διάστημα ωρών που αντιστοιχεί στον χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού. Οι απαιτήσεις που πρέπει να καλύπτονται από τη χρονοσειρά ζήτησης είναι οι ακόλουθες δύο:

- Οι τιμές της ζήτησης πρέπει να 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). Σε διαφορετική περίπτωση η βελτιστοποίηση του προγράμματος δεν έχει νόημα γιατί σε κάποιες ώρες ο σταθμός εξ ορισμού δεν θα μπορεί να καλύψει τη ζήτηση και θα εμφανίζονται μεγάλες τιμές κόστους λόγω της ενεργοποίησης του περιορισμού μη κάλυψης της ζήτησης.
- Η καμπύλη της ζήτησης πρέπει να ακολουθεί τον βασικό κανόνα που σε ένα δίκτυο επιβάλλει μεγάλες τιμές της ζήτησης περίπου στις 12:00 (λειτουργία υπηρεσιών κ.λ.π.) και περίπου στις 21:00 (χρήση οικιακού φωτισμού), ενώ το ελάχιστο παρουσιάζεται συνήθως τις πρώτες πρωινές ώρες (02:00-05:00).

Ενδεικτικά μία χρονοσειρά ζήτησης για 24 ώρες παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3.1.



**Σχήμα 2.3. 1:** Στο σχήμα παρουσιάζεται μία ενδεικτική καμπύλη ζήτησης για χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού 24h η οποία ανταποκρίνεται στα δεδομένα του προβλήματος που επιλύεται (ως προς τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της ζήτησης).



**Συγκεντρωτικός Πίνακας με τα Απαραίτητα για τη Βελτιστοποίησης Χαρακτηριστικά του Σταθμού  
Ηλεκτροπαραγωγής που μελετάται**

Μονάδα	Μοντέλο	Μέγιστη Παραγόμενη Ισχύς P <sub>max</sub> (MW)	Ελάχιστη Παραγόμενη Ισχύς P <sub>min</sub> (MW)	Συντελεστές Πολυωνύμου Κατανάλωσης Καυσίμου			Χρόνος Έναυσης T <sub>STUP</sub> (h)	Χρόνος Σβέσης T <sub>SHDN</sub> (h)	Χρόνος Παραμονής σε μία κατάσταση T <sub>RAMP</sub> (h)	Ελάχιστος Χρόνος Επισκευής T <sub>REP</sub> (h)	Μέγιστος αριθμός ωρών λειτουργίας μεταξύ προγραμματισμένων επισκευών EOH <sub>max</sub> (h)	Κόστος θερμής εκκίνησης C <sub>hSTUP</sub> (MWh)	Κόστος ψυχρής εκκίνησης C <sub>cSTUP</sub> (MWh)	Κόστος σβέσης C <sub>SHDN</sub> (MWh)	Ελάχιστος χρόνος παραμονής σε κατάσταση κράτησης για να θεωρηθεί η εκκίνηση ψυχρή T <sub>hstart</sub>
				a	b	c									
1	LM6000PC Sprint	50	5	-0,037	3,546	37,875	1	0	0	0	12000	14	14	7	5
2	LM2500+	30,5	5	-0,062	3,674	23,937	1	0	0	0	12000	8,5	8,5	4,5	5
3	2xGT8C + ST	132,3	3	0	2,268	6,414	3	1	1	1	12000	278	464	116	4
4	V64.3A	75	7	-0,004	2,584	38,326	1	1	1	1	12000	14	14	7	2
5	V64.3A	75	7	-0,004	2,584	38,326	1	1	1	1	12000	14	14	7	2

### 3. Εξελικτικοί Αλγόριθμοι και Προσεγγιστική Προαξιολόγηση

#### 3.1 Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι είναι στοχαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης, που έχουν αναπτυχθεί από τη δεκαετία του 1960, αλλά άρχισαν να βρίσκουν ευρεία εφαρμογή από τη δεκαετία του 1990 και μετά. Ο λόγος που οι εξελικτικοί αλγόριθμοι έχουν κερδίσει έδαφος τα τελευταία χρόνια συγκριτικά με άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης είναι η κατακόρυφη αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά των εξελικτικών αλγορίθμων που έχουν επικεντρώσει το ενδιαφέρον, είναι το μη-μαθηματικό τους υπόβαθρο, η ευκολία με την οποία προσαρμόζονται σε κάθε νέο πρόβλημα (αρκεί να υπάρχει προγραμματισμένο λογισμικό αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης) και κυρίως η δυνατότητά τους να μην εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα (ως στοχαστική μέθοδος). Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι χειρίζονται πληθυσμούς υποψήφιων λύσεων 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. Με τον τρόπο αυτό, ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης προκύπτει ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων (στην λογική του μετώπου Pareto), και η επιλογή της λύσης που τελικά θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τον χειριστή και την εφαρμογή.

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 [18]. Στους εξελικτικούς αλγορίθμους τα άτομα (υποψήφιας λύσεις) που είναι καλύτερα προσαρμοσμένα στο περιβάλλον είναι αυτά που εμφανίζουν τη μικρότερη τιμή της συνάρτησης στόχου. Η λογική αυτή είναι βασισμένη στη θεωρία του Δαρβίνου σχετικά με τις αρχές εξέλιξης των ειδών, που διατυπώθηκε περί το 1960. Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες εξελικτικών αλγορίθμων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι (genetic algorithms), οι στρατηγικές εξέλιξης (evolution strategies) και ο γενετικός προγραμματισμός [17]. Ο αλγόριθμος 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 βασίζεται σε τιμή κόστους με βάση κατάλληλη συνάρτηση κόστους.
3. Να λαμβάνει χώρα δυναμική διαδοχή πληθυσμών, με τη δημιουργία νέων ατόμων και την εξαφάνιση άλλων με βάση την τιμή κόστους.
4. Κατά την εξέλιξη από γενιά σε γενιά, να υπάρχει κληρονομικότητα χαρακτηριστικών, αλλά και στοχαστική εμφάνιση νέων χαρακτηριστικών.

### 3.2 Βασική περιγραφή ενός εξελικτικού αλγορίθμου

Στο σημείο αυτό θα γίνει βασική περιγραφή του εξελικτικού αλγορίθμου που χρησιμοποιείται στην μέθοδο που εφαρμόζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Κατά τη γενετική ορολογία υπάρχει ένα σύνολο  $\mu$  γονέων (υποψήφια λύσεων), το οποίο εξελίσσεται σε έναν πληθυσμό  $\lambda$  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 ένα ή περισσότερα κριτήρια σύγκλισης. Τα κυριότερα είδη κριτηρίων σύγκλισης είναι τα ακόλουθα:

- Να μη βελτιώνεται περαιτέρω η λύση για έναν αριθμό αξιολογήσεων ή γενιών.
- Να έχει παρέλθει ο μέγιστος υπολογιστικός χρόνος που έχει οριστεί από τον χρήστη (συνήθως ορίζεται μέγιστος αριθμός αξιολογήσεων ή γενιών).
- Να έχει ομογενοποιηθεί σε επαρκές ποσοστό ο πληθυσμός.

Σε κάθε γενιά ενός εξελικτικού αλγορίθμου υπάρχουν τρία βασικά σύνολα ατόμων. Το σύνολο των γονέων  $S^{g,\mu}$ , το σύνολο των απογόνων  $S^{g,\lambda}$ , και το σύνολο των επίλεκτων ή ελίτ  $S^{g,e}$ . Ο ρόλος των συνόλων γονέων και απογόνων εξηγήθηκε προηγουμένως. Ο ρόλος του συνόλου των ελίτ είναι η αποθήκευση της καλύτερης κάθε φορά τρέχουσας λύσης και η χρήση από αυτό πληροφορίας που αντιστοιχεί επιθυμητά χαρακτηριστικά κατά την εξέλιξη («ελιτισμός»). Ο εξελικτικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα.

**Βήμα 1:** Επιλέγονται οι βασικές παράμετροι του αλγορίθμου (πληθυσμοί γονέων, απογόνων και επιλέκτων, πιθανότητες και είδος διασταύρωσης και μετάλλαξη – αναλυτικότερα σε επόμενες παραγράφους-, κ.λ.π.) και αρχικοποιείται ο αλγόριθμος, δηλαδή παράγεται ένα πλήθος  $S^{0,\lambda}$  τυχαίων ατόμων.

**Βήμα 2:** Αξιολογούνται τα  $\lambda$  άτομα του συνόλου  $S^{0,\lambda}$  και υπολογίζεται για καθένα από αυτά η αντίστοιχη τιμή της συνάρτησης κόστους. Για λόγους ευκολότερης παρουσίασης θα γίνει η παραδοχή ότι αναφερόμαστε σε πρόβλημα μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης. Η γενίκευση σε προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης

είναι άμεση. Στο σημείο αυτό γίνεται χρήση του λογισμικού αξιολόγησης και έτσι το βήμα αυτό κατέχει το μεγαλύτερο μέρος του υπολογιστικού κόστους του αλγορίθμου.

**Βήμα 3:** Ανανεώνεται το σύνολο των επίλεκτων με τα καταλληλότερα μέλη από το σύνολο των απογόνων (δηλαδή αυτά που εμφανίζουν την καλύτερη τιμή κόστους). 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. Σχηματικά, η ανανέωση του συνόλου των επίλεκτων παρουσιάζεται στη σχέση 3.2.1.

$$S^{g+1,e} = T_e(S^{g,\lambda} \cup S^{g,e}) \quad (3.2.1)$$

Με  $T_e$  συμβολίζεται ο τελεστής εντοπισμού των επίλεκτων μελών. Επειδή ο εξελικτικός αλγόριθμος δεν είναι απαραίτητο να βελτιώνει τη λύση σε κάθε γενιά, υπάρχει η περίπτωση να μην προκύψει άτομα με τιμή κόστους μικρότερη από τις τιμές κόστους των επίλεκτων. Στην περίπτωση αυτή το σύνολο των επίλεκτων παραμένει ως έχει.

**Βήμα 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. Η εφαρμογή του τελεστή ελιτισμού παρουσιάζεται σχηματικά στη σχέση 3.2.2. Να σημειωθεί ότι με τη χρήση του τελεστή ελιτισμού αποφεύγεται να προκύψει από μία γενιά λύση χειρότερη από την ήδη αποκτηθείσα.

$$S^{g,\lambda} = T_{e2}(S^{g,\lambda} \cup S^{g+1,e}) \quad (3.2.2)$$

**Βήμα 5:** Εφαρμόζεται ο τελεστής επιλογής γονέων  $T_\mu$ . Με τον συντελεστή αυτό γίνεται επιλογή των γονέων της επόμενης γενιάς  $S^{g+1,\mu}$ . Οι γονείς επιλέγονται συνήθως από το σύνολο των απογόνων της γενιάς  $g$ , αν και υπάρχει η δυνατότητα οι γονείς να επιλέγονται και από το σύνολο γονέων της γενιάς  $g$ . Η διαδικασία της επιλογής γονέων παρουσιάζεται στη σχέση 3.2.3.

$$S^{g+1,\mu} = T_\mu(S^{g,\mu} \cup S^{g,\lambda}) \quad (3.2.3)$$

**Βήμα 5:** Δημιουργείται το σύνολο των απογόνων της επόμενης γενιάς  $S^{g+1,\lambda}$ . Επιλέγονται  $\rho$  γονείς (συνήθως  $\rho = 2$  χωρίς αυτό να είναι υποχρεωτικό) από το σύνολο γονέων της γενιάς  $g + 1$ . Αν είναι επιθυμητό ο αλγόριθμος να εμφανίζει ισχυρότερα χαρακτηριστικά ελιτισμού υπάρχει και η επιλογή κάποιο από το  $\rho$  άτομα να προέρχεται από το σύνολο των επίλεκτων της γενιάς  $g + 1$  που ήδη έχει δημιουργηθεί. Στη συνέχεια, για κάθε σύνολο  $\rho$  γονέων που επιλέχθηκαν,

εφαρμόζονται διαδοχικά οι τελεστές διασταύρωσης  $T_r$  (crossover) και μετάλλαξης  $T_m$  (mutation) (σχέση 3.2.4).

$$S^{g+1,\lambda} = T_m \left( T_r \left( S^{g+1,\mu} \cup S^{g+1,e} \right) \right) \quad (3.2.4)$$

**Βήμα 6:** Εφαρμόζεται το κριτήριο ή τα κριτήρια σύγκλισης που έχουν επιλεγεί και αν η σύγκλιση δεν έχει επιτευχθεί, δημιουργείται μία νέα γενιά με επανάληψη των βημάτων 2 έως 6 με  $g \leftarrow g + 1$ .

Η παραπάνω περιγραφή του εξελικτικού αλγορίθμου βασίζεται στη βιβλιογραφική παραπομπή [19].

### 3.3 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 γιατί είναι προφανής μετά την παρουσίαση της δομής του αλγορίθμου που προηγήθηκε.

#### 3.3.1 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  $g$ , και όχι άτομα από το σύνολο των επίλεκτων της γενιάς  $g+1$ . 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), η γραμμική κατάταξη (linear ranking) και η πιθανοτική επιλογή με διαγωνισμό (probabilistic tournament selection). Στο πρώτο σχήμα, σε κάθε απόγονο αντιστοιχεί πιθανότητα επιλογής που ισούται με το άθροισμα των τιμών της συνάρτησης στόχου όλων των απογόνων, προς την τιμή της συνάρτησης στόχου του απόγονου στον οποίο αντιστοιχεί η πιθανότητα. 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. Το πρόβλημα με το σχήμα αυτό είναι ότι αν 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. Στην περίπτωση της γραμμικής κατάταξης, οι απόγονοι κατατάσσονται με βάση την τιμή της συνάρτησης στόχου. Επιλέγονται  $\mu$  άτομα και τα καλύτερα από αυτά εμφανίζονται με

περισσότερα αντίτυπα στο σύνολο γονιών της γενιάς  $g+1$ , ενώ τα χειρότερα απουσιάζουν. Τέλος, στην πιθανοτική επιλογή με διαγωνισμό επιλέγονται κάθε φορά τυχαία  $k$  άτομα, συμμετέχουν σε διαγωνισμό με βάση την τιμή της συνάρτησης στόχου και επιλέγεται το καταλληλότερο για να αποτελέσει έναν ακόμα γονέα της επόμενης γενιάς. Στην πιθανοτική επιλογή με διαγωνισμό υπάρχει η δυνατότητα να ορισθεί μία μικρή πιθανότητα να επικρατήσει το λιγότερο κατάλληλο άτομο στο διαγωνισμό, με αποτέλεσμα να ενισχύεται η στοχαστικότητα του αλγορίθμου.

### 3.3.2 Τελεστές Διασταύρωσης

Στο σημείο αυτό θα περιγραφεί η λειτουργία του τελεστή διασταύρωσης, όπως χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις δυαδικής κωδικοποίησης. Η δυαδική κωδικοποίηση του χρωμοσώματος αφορά και στη μέθοδο που χρησιμοποιείται στη διπλωματική εργασία, αφού οι μεταβλητές σχεδιασμού είναι εξ ορισμού δυαδικές, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 1. Θα αναφερθούμε στην περίπτωση διασταύρωσης ενός σημείου (single-point crossover) και όταν επιλέγονται δύο γονείς για να δημιουργήσουν δύο απογόνους. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν και σχήματα διασταύρωσης που περισσότεροι των δύο γονιών συνδυάζουν τα χρωμοσώματά τους για να δημιουργήσουν απογόνους [20].

Ο τελεστής διασταύρωσης επιλέγει τυχαία μία θέση μεταξύ δύο διαδοχικών δυαδικών ψηφίων του χρωμοσώματος (το σημείο θα είναι το ίδιο και στους δύο γονείς). Στη συνέχεια επιλέγονται τυχαία δύο γονείς. Τέλος, 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. 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. Πρέπει να σημειωθεί ότι η διασταύρωση στους εξελικτικούς αλγορίθμους ακολουθεί κάποια πιθανότητα για να μη βλάπτεται η στοχαστική φύση του αλγορίθμου. Η πιθανότητα αυτή ονομάζεται πιθανότητα διασταύρωσης  $P_r$  και λαμβάνει τιμές λίγο μικρότερες από τη μονάδα.

### 3.3.3 Τελεστές Μετάλλαξης

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.2 στους απογόνους που προκύπτουν από κάθε διασταύρωση εφαρμόζεται ο τελεστής μετάλλαξης. Ο τελεστής αυτός έχει σαν στόχο την εισαγωγή νέου γενετικού υλικού στον αλγόριθμο, το οποίο δεν προϋπάρχει στα μέλη των προηγούμενων γενεών. 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 0,05). Όταν χρησιμοποιείται δυαδική κωδικοποίηση, γεννιάται ένας τυχαίος αριθμός για κάθε ψηφίο του χρωμοσώματος, και μόνο αν ο τυχαίος αριθμός είναι μικρότερος του  $P_m$  συμβαίνει μετάλλαξη, δηλαδή το στοιχείο αλλάζει από 0 σε 1 ή από 1 σε 0. Σε κάποια σχήματα εξελικτικών αλγορίθμων υπάρχει η επιλογή ο τελεστής μετάλλαξης να τεθεί σε λειτουργία ύστερα από έναν συγκεκριμένο αριθμό γενιών. Επίσης, συχνά επιλέγεται να αυξηθεί η πιθανότητα μετάλλαξης, όταν για πολλές συνεχόμενες γενιές ο αλγόριθμος δεν καταφέρνει να βελτιώσει τη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης, ώστε με τον τρόπο αυτό να αποφευχθεί η περίπτωση να έχει εγκλωβιστεί ο αλγόριθμος σε τοπικό ακρότατο.

### **3.4 Εξελικτικοί αλγόριθμοι υποβοηθούμενοι από μεταπρότυπα (Προσεγγιστική Προαξιολόγηση)**

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.2, όπου περιγράφηκε η βασική δομή ενός εξελικτικού αλγορίθμου, το υπολογιστικό κόστος του αλγορίθμου προέρχεται σχεδόν εξ ολοκλήρου από το λογισμικό αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, αν ο εξελικτικός αλγόριθμος χρησιμοποιείται σε προβλήματα αεροδυναμικής και ως λογισμικό αξιολόγησης χρησιμοποιείται κώδικας εξισώσεων Navier-Stokes, τότε η χρήση του λογισμικού αυτού αποτελεί σχεδόν εξ ολοκλήρου το υπολογιστικό κόστος της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Επειδή οι εξελικτικοί αλγόριθμοι είναι μέθοδοι βελτιστοποίησης που διαχειρίζονται πληθυσμούς υποψήφιων λύσεων (και στο χαρακτηριστικό αυτό οφείλονται τα πλεονεκτήματα που εμφανίζουν συγκριτικά με άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης), όταν το λογισμικό αξιολόγησης κοστίζει υπολογιστικά, όπως στην περίπτωση των επιλυτών ροής Navier-Stokes, η χρήση τους τείνει να γίνει ασύμφορη. Είναι λοιπόν προφανές ότι απαιτείται ένας τρόπος για να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος κάθε αξιολόγησης και κατ' επέκταση του αλγορίθμου στο σύνολό του.

Ένας τρόπος προς αυτή την κατεύθυνση είναι η χρήση μεταπροτύπων (metamodel). Η χρήση μεταπροτύπων για την επιτάχυνση εξελικτικών αλγορίθμων κυρίως σε προβλήματα υπολογιστική ρευστοδυναμικής έχει προταθεί σε δημοσιεύσεις [23], [21], [22]. Το μεταπρότυπο είναι ουσιαστικά ένα μαθηματικό μοντέλο που υπολογίζει την τιμή της συνάρτησης στόχου κάθε υποψήφιας λύσης με προσέγγιση αλλά με σημαντικά μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Με τον τρόπο αυτό αν αντικατασταθεί το λογισμικό αξιολόγησης με το μεταπρότυπο, τότε επιταχύνεται κατά πολύ η διαδικασία σύγκλισης του αλγορίθμου. Για να γίνει χρήση του μεταπροτύπου δημιουργείται η μέθοδος της προσεγγιστικής προαξιολόγησης (Inexact Pre-evaluation, IPE).

Ωστόσο στη χρήση μεταπροτύπου προκύπτουν δύο βασικά προβλήματα. Το πρώτο αφορά στην τιμή της συνάρτησης στόχου κάθε υποψήφιας λύσης όπως προκύπτει από το μεταπρότυπο, η οποία είναι προσεγγιστική, οπότε στερεί ακρίβεια από το

αλγόριθμο. Για να λυθεί το πρόβλημα αυτό, σε κάθε γενιά όλες οι λύσεις αξιολογούνται με το μεταπρότυπο και, στη συνέχεια, οι επικρατέστερες επαναξιολογούνται με χρήση του πλήρους λογισμικού αξιολόγησης. Η λύση αυτή στοιχίζει λίγο σε υπολογιστικό χρόνο, ωστόσο παρέχει επιπλέον ακρίβεια που είναι επιθυμητή. Σε αυτή την τεχνική χρωστά το όνομά της η μέθοδος της προσεγγιστικής προαξιολόγησης, με την έννοια ότι όλες η λύσεις αξιολογούνται προσεγγιστικά πριν από την κανονική αξιολόγηση των επικρατέστερων.

Το δεύτερο πρόβλημα έχει να κάνει με την εκπαίδευση του μεταπρότυπου. Από τη απλούστερη περίπτωση χρήσης ενός πολυωνύμου προσέγγισης μέχρι την πιο σύνθετη αλλά συχνότερα χρησιμοποιούμενη περίπτωση χρήσης κάποιου νευρωνικού δικτύου, είναι φανερό ότι απαιτούνται κάποια αρχικά ακριβή δεδομένα για την εκπαίδευση του μεταπρότυπου. Για το λόγο αυτό στην τεχνική της προσεγγιστικής αξιολόγησης ενσωματώνεται η ακόλουθη επιλογή. Για τις πρώτες γενιές του εξελικτικού αλγόριθμου (ο αριθμός τους καθορίζεται από το χρήστη), χρησιμοποιείται κανονικά το λογισμικό αξιολόγησης (στην περίπτωση που αναφέρεται ως παράδειγμα ο επιλύτης ροής Navier-Stokes), ώστε να προκύψουν τα δεδομένα που απαιτούνται για την εκπαίδευση του μεταπρότυπου. Μετά την εκπαίδευση, το μεταπρότυπο χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση κάθε υποψήφιας λύσης και μόνο οι επικρατέστερες σε κάθε γενιά αξιολογούνται με το πλήρες λογισμικό αξιολόγησης, όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Η επιλογή αυτή αυξάνει επίσης το υπολογιστικό κόστος, είναι όμως αναγκαία για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί το μεταπρότυπο και κατ' επέκταση η μέθοδος της προσεγγιστικής προαξιολόγησης.

### **3.5 Λειτουργία μεταπρότυπου - RBF Νευρωνικά Δίκτυα**

Στην παράγραφο που προηγήθηκε περιγράφηκε η λειτουργία των εξελικτικών αλγορίθμων υποβοηθούμενων από μεταπρότυπα (metamodel assisted evolutionary algorithms) και αναπτύχθηκε η μέθοδος της προσεγγιστικής προαξιολόγησης. Εδώ θα γίνει αναφορά στο είδος του μεταπρότυπου που χρησιμοποιείται, στη λειτουργία του και στις παραμέτρους που επηρεάζουν την ακρίβειά του. Οι βασικές απαιτήσεις από το μεταπρότυπο είναι να παρουσιάζει κάποια ακρίβεια στην προσέγγιση της τιμής της συνάρτησης ή των συναρτήσεων στόχου, και να μπορεί να ανανεώνεται κατά τη σύγκλιση του αλγορίθμου, ώστε να συνεχίζει να παρουσιάζει την επιθυμητή ακρίβεια.

Μία απλή επιλογή μεταπρότυπου είναι η επιλογή κατάλληλου πολυωνύμου προσέγγισης, το οποίο θα υπολογίζει την τιμή της συνάρτησης στόχου με βάση τις τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών, ή μεταβλητών σχεδιασμού του προβλήματος βελτιστοποίησης. Μία τέτοια λύση, παρά το γεγονός ότι είναι απλούστατη προγραμματιστικά, παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα. Το κυριότερο είναι ότι στην πλειονοπία των προβλημάτων βελτιστοποίησης, που εμφανίζουν έντονα μη-γραμμικά χαρακτηριστικά, ένα πολυώνυμο προσέγγιση δεν θα μπορούσε να ανταπεξέλθει με ακρίβεια. Επιπλέον, σε περιπτώσεις πολυκριτηριακής

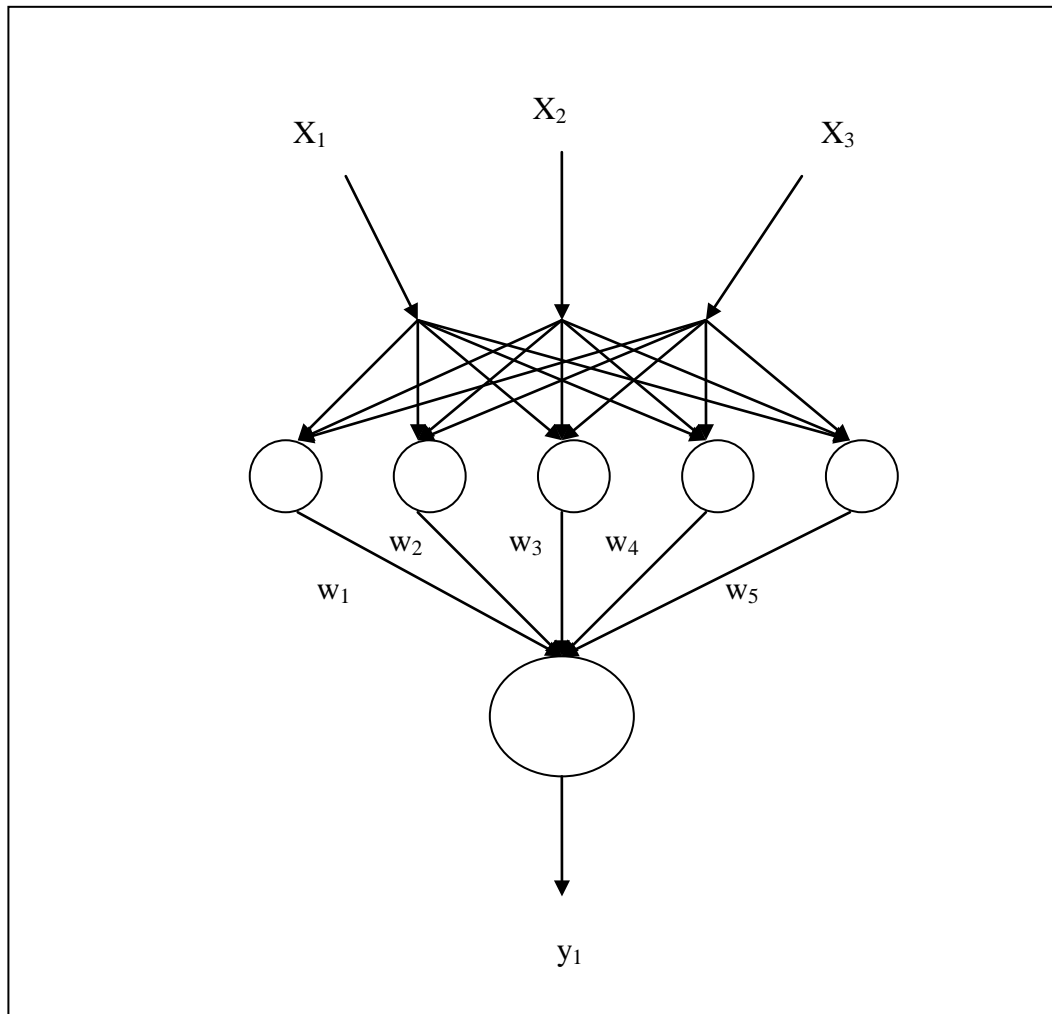


βελτιστοποίησης απαιτείται να δημιουργηθούν τόσα πολυώνυμα προσέγγισης όσοι και οι στόχοι τις βελτιστοποίησης.

Τα πολυπλοκότερα, σε σχέση με τη χρήση πολυωνύμου προσέγγισης, αλλά συχνότερα χρησιμοποιούμενα είδη μεταπροτύπων είναι τα νευρωνικά δίκτυα και συγκεκριμένα τα RBF δίκτυα. Η χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων ως μεταπρότυπα έχει προταθεί στη βιβλιογραφία [24]. Στη συνέχεια, θα γίνει περιγραφή της δομής και της λειτουργίας ενός RBF δικτύου και θα παρουσιαστούν κάποια θέματα που αφορούν στη ρύθμιση των παραμέτρων ενός τέτοιου δικτύου. Στο σημείο αυτό θα αναφερθεί απλώς ότι για να λειτουργήσει ένα νευρωνικό δίκτυο απαιτείται η εκπαίδευσή του από ένα δείγμα. Για το σκοπό αυτό πρέπει επομένως να δημιουργηθεί μία βάση δεδομένων κατά τη λειτουργία του αλγορίθμου, στη οποία θα περιλαμβάνονται οι μεταβλητές σχεδιασμού σε συνδυασμό με την ή τις τιμές της ή των συναρτήσεων κόστους για έναν αριθμό υποψήφιων λύσεων. Η απαίτηση να παράγεται το δείγμα που είναι απαραίτητο για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου από τον αλγόριθμο, θα μπορούσε να αντικατασταθεί από την παραγωγή και αξιολόγηση ενός δείγματος πριν από την έναρξη της βελτιστοποίησης. Σε μία τέτοια περίπτωση όμως, το νευρωνικό δίκτυο θα στερούνταν ακρίβειας καθώς ο αλγόριθμος θα συνέκλινε, ενώ αθροιστικά το υπολογιστικό κόστος θα παρέμενε το ίδιο. Επομένως, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η καταλληλότερη χρήση ενός νευρωνικού δικτύου ως μεταπροτύπου σε εξελικτικό αλγόριθμο είναι με χρήση της μεθόδου της προσεγγιστικής προαξιολόγησης, όπως περιγράφηκε και με επανεκπαίδευση του δικτύου κάθε φορά που χρησιμοποιείται. Σχετικά με την επανεκπαίδευση του δικτύου αναφέρονται, στη συνέχεια, πρακτικά θέματα που αφορούν στην ακρίβεια του δικτύου.

### 3.5.1 Δίκτυα συναρτήσεων ακτινικής βάσης

Υπάρχουν διάφορα είδη τεχνητών νευρωνικών δικτύων (Artificial Neural Networks). Τα δίκτυα συναρτήσεων ακτινικής βάσης (Radial Basis Function Neural Networks – RBF) αποδεικνύονται καταλληλότερα για χρήση ως μεταπρότυπα, γιατί η εκπαίδευσή τους δεν απαιτεί επαναληπτικές διαδικασίες μέχρι σύγκλισης. Ένα RBF δίκτυο μπορεί να δεχθεί έναν αριθμό  $n$  μεταβλητών εισόδου και να προβλέψει τις τιμές των  $\ell$  μεταβλητών εξόδου. Αυτό σημαίνει ότι η είσοδος ενός RBF δικτύου είναι ένα  $n$ -διάστατο διάνυσμα εισόδου  $X_n$  και η έξοδος ένα  $\ell$ -διάστατο διάνυσμα εξόδου  $Y_\ell$ . Η τυπική δομή ενός RBF νευρωνικού δικτύου παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5.1.1.



**Σχήμα 3.5.1.1:** Σχηματική παρουσίαση της δομής και λειτουργίας ενός RBF νευρωνικού δικτύου με τρεις μεταβλητές εισόδου, πέντε κέντρα εκπαίδευσης και μία μεταβλητή εξόδου.

#### Λειτουργία ενός RBF νευρωνικού δικτύου

Σε ένα RBF νευρωνικό δίκτυο χρησιμοποιούνται ως κέντρα εκπαίδευσης μέλη του δείγματος εκπαίδευσης. Ουσιαστικά μέσω των κέντρων εκπαίδευσης εισάγεται στο δίκτυο η απαραίτητη πληροφορία για τη συσχέτιση των μεταβλητών εξόδου με τις μεταβλητές εισόδου του δικτύου, όπως αυτή παρουσιάζεται από τα δείγματα εκπαίδευσης. Κατά τη λειτουργία του δικτύου η τιμή της μεταβλητής εισόδου  $x_i$  με  $i = 1, \dots, n$  συνδυάζεται με την τιμή της αντίστοιχης μεταβλητής σε κάθε κέντρο εκπαίδευσης  $c_{ij}$  με  $i = 1, \dots, n$  και  $j = 1, \dots, m$ , όπου  $m$  το πλήθος των κέντρων εκπαίδευσης. Το αποτέλεσμα του συνδυασμού αυτού είναι η παραγωγή μίας τιμής της μορφής  $(x_i - c_{ij})^2$ , η οποία καλείται και απόσταση της μεταβλητής  $i$  από το κέντρο εκπαίδευσης  $j$  (ακριβέστερα η απόσταση υψωμένη στο τετράγωνο). Η παραπάνω παράσταση υπολογίζεται για όλες τις μεταβλητές εισόδου (όλα τα  $i$ ) και οι τιμές που

προκύπτουν αθροίζονται και προκύπτει η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος δηλαδή η τιμή της παράστασης  $\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - c_{ij})^2}$  για δεδομένο  $j$ . Στη συνέχεια, η τιμή αυτή εισάγεται σε μία συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function)  $\phi$  η οποία είναι συνάρτηση της παραπάνω παράστασης και μία ακτίνας (radius)  $r$ . Στη χρήση αυτής της συνάρτησης οφείλεται και η ονομασία των δικτύων συναρτήσεων ακτινικής βάσης. Η τιμή που προκύπτει από τη συνάρτηση  $\phi$  τέλος πολλαπλασιάζεται επί ένα βάρος  $w_{jk}$  που αντιστοιχεί στη μεταβλητή εξόδου  $k$  με  $k = 1, \dots, \ell$ . Η διαδικασία που μόλις περιγράφηκε επαναλαμβάνεται για όλα τα κέντρα εκπαίδευσης (για όλα τα  $j$ ) και τα γινόμενα που προκύπτουν προστίθενται για να δώσουν την τιμή της μεταβλητής εξόδου  $y_k$ . Συνολικά η συσχέτιση της τιμής μίας μεταβλητής εξόδου με τις τιμές των μεταβλητών εισόδου του δικτύου διατυπώνεται μαθηματικά με στη σχέση 3.5.1.1.

$$y_k = \sum_{j=1}^m w_{jk} \cdot \phi \left( \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - c_{ij})^2}, r \right) \quad (3.5.1.1)$$

#### Εκπαίδευση ενός RBF δικτύου

Η συνάρτηση ενεργοποίησης  $\phi$  και η τιμή της ακτίνας που χρησιμοποιείται είναι παράμετροι που ορίζονται από τον χρήστη του δικτύου και παραμένουν αμετάβλητες. Τα κέντρα εκπαίδευσης αποτελούν μέλη του δείγματος που ήδη υπάρχει και είναι επομένως και αυτά γνωστά. Το μόνο που μένει να προσδιορισθεί για να λειτουργήσει το δίκτυο είναι οι τιμές των συντελεστών βάρους  $w_{jk}$ . Ο προσδιορισμός των συντελεστών αυτών επιτυγχάνεται με την εκπαίδευση του δικτύου. Η εκπαίδευση του δικτύου βασίζεται στη βασική απαίτηση το δίκτυο να μπορεί να αναπαράγει τις τιμές των μεταβλητών εξόδου κάθε μέλους του δείγματος που χρησιμοποιείται σαν κέντρο εκπαίδευσης, αν χρησιμοποιηθούν σαν μεταβλητές εισόδου στο δίκτυο οι τιμές των αντίστοιχων μεταβλητών σχεδιασμού του μέλους αυτού. Αφού η απαίτηση αυτή πρέπει να ικανοποιείται για όλα τα  $m$  μέλη που χρησιμοποιούνται ως κέντρα εκπαίδευσης, προκύπτουν  $m \times m$  συνδυασμοί τιμών της συνάρτησης ενεργοποίησης που δημιουργούν το μητρώο  $\Phi$ . Από τα  $m$  μέλη του δείγματος που χρησιμοποιούνται ως κέντρα εκπαίδευσης προκύπτουν  $m$  συνδυασμοί μεταβλητών εξόδου, οι οποίοι δημιουργούν το μητρώο  $\mathbf{Y}$  διαστάσεων  $m \times k$ . Οι συντελεστές βάρους που αντιστοιχίζουν κάθε τιμή της συνάρτησης ενεργοποίησης από κάθε κέντρο εκπαίδευσης με την τιμή κάθε μεταβλητής εξόδου δημιουργούν ένα μητρώο  $\mathbf{W}$  διαστάσεων  $m \times k$ . Επομένως η μαθηματική συσχέτιση της σχέσεως 3.5.1.1 εκφράζεται σε μητρωϊκή μορφή από τη σχέση 3.5.1.2.

$$[Y] = [\Phi] \cdot [W] \quad (3.5.1.2)$$

Στη σχέση αυτή μοναδικός άγνωστος είναι τα στοιχεία του μητρώου **W**. Σημειώνεται, ότι για την επίλυση της εξίσωσης 3.5.1.2 γίνεται χρήση παραγοντοποίησης κατά Cholesky (Cholesky decomposition). Με την επίλυση αυτής της εξίσωσης υπολογίζονται οι συντελεστές βαρών του δικτύου και ολοκληρώνεται η διαδικασία της εκπαίδευσης του δικτύου.

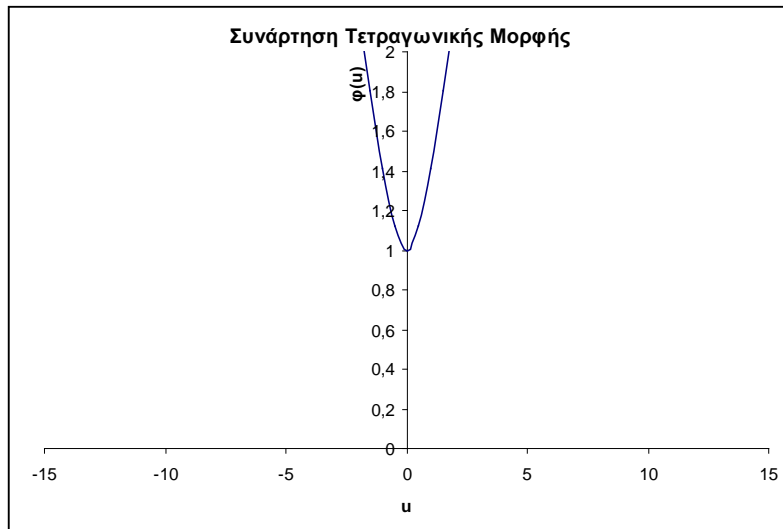
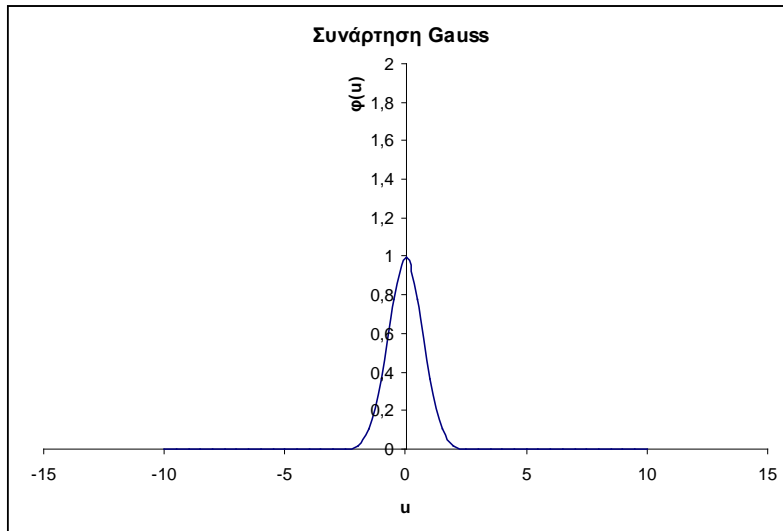
### Συναρτήσεις ενεργοποίησης

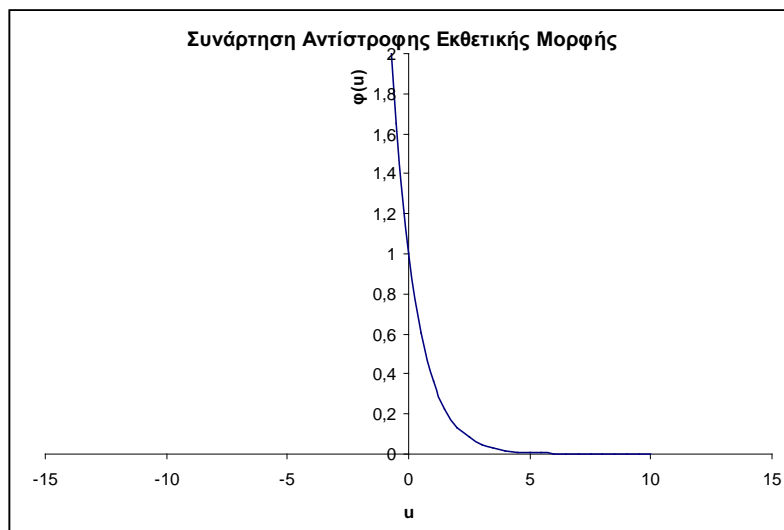
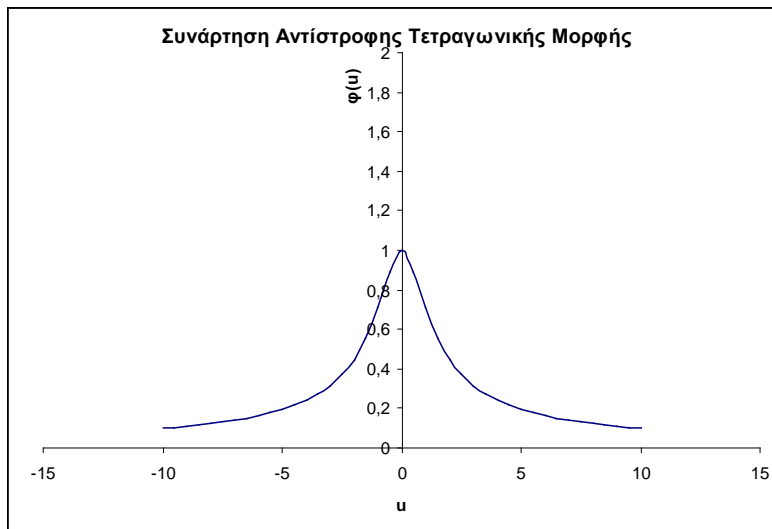
Όπως αναφέρθηκε ήδη βασική παράμετρος που για τη λειτουργία ενός RBF δικτύου είναι η μορφή της συνάρτησης ενεργοποίησης  $\varphi$ , η οποία επιλέγεται από τον χρήστη. Υπάρχουν διάφορα είδη συναρτήσεων ενεργοποίησης που χρησιμοποιούνται με επικρατέστερα τα ακόλουθα πέντε που παρουσιάζονται στον πίνακα 3.5.1.1. Στους τύπους των συναρτήσεων η μεταβλητή  $u$  αντιστοιχεί στην τιμή της παράστασης

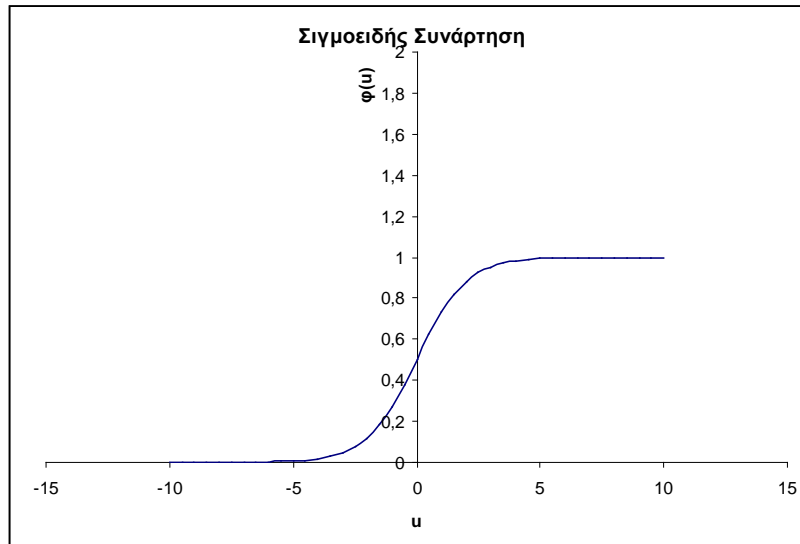
$\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - c_{ij})^2}$  που εισάγεται στη συνάρτηση, ενώ με  $r$  όπως ήδη αναφέρθηκε συμβολίζεται η ακτίνα (radius). Τέλος στο σχήμα 3.5.1.2 παρουσιάζονται οι μορφές των συναρτήσεων αυτών σε ίδια κλίμακα.

Είδος Συνάρτησης	Μαθηματική Έκφραση
Συνάρτηση Gauss (Gaussian)	$\varphi(u, r) = \exp\left(-\frac{u^2}{r^2}\right)$
Συνάρτηση Τετραγωνικής Μορφής (Multiquadric)	$\varphi(u, r) = \sqrt{u^2 + r^2}$
Συνάρτηση Αντίστροφης Τετραγωνικής Μορφής (Inverse Multiquadric)	$\varphi(u, r) = \frac{1}{\sqrt{u^2 + r^2}}$
Συνάρτηση Αντίστροφης Εκθετικής Μορφής (Inverse Exponential)	$\varphi(u, r) = \exp\left(-\frac{u}{r}\right)$
Σιγμοειδής Συνάρτηση (Sigmoidal)	$\varphi(u, r) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{u}{r}\right)}$

**Πίνακας 3.5.1. 1:** Συνήθεις μορφές συναρτήσεων ενεργοποίησης και αντίστοιχες μαθηματικές εκφράσεις.







**Σχήμα 3.5.1. 2:** Συνήθεις μορφές των συναρτήσεων ενεργοποίησης που χρησιμοποιούνται σε RBF νευρωνικά δίκτυα. Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των συναρτήσεων για διάφορες τιμές της μεταβλητής  $u$ , ενώ η τιμή της ακτίνας  $r$  έχει επιλεγεί ίση με τη μονάδα.

Δεν υπάρχει συγκεκριμένος κανόνας που να ακολουθείται σχετικά με την επιλογή της καταλληλότερης συναρτήσεως ενεργοποίησης. Η επιλογή γίνεται από το χρήστη με βάση το πρόβλημα στο οποίο χρησιμοποιείται το RBF δίκτυο και με βάση τα χαρακτηριστικά του δείγματος που διατίθεται για την εκπαίδευση του δικτύου. Το ίδιο ισχύει και για την τιμή της ακτίνας (radius) η οποία συμμετέχει στη συνάρτηση ενεργοποίησης και επιλέγεται και αυτή από το χρήστη ή υπολογίζεται από ευρετικές σχέσεις (τέτοιες σχέσεις δεν χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή).

### Αδιαστατοποίηση

Οι τιμές των μεταβλητών εισόδου ενός RBF δικτύου αρκετά συχνά διαφέρουν σε τάξη μεγέθους. Για παράδειγμα έστω ότι το RBF δίκτυο χρησιμοποιείται ως μεταπρότυπο στη βελτιστοποίηση ενός προβλήματος αεροναυπηγικής, στο οποίο μία από την μεταβλητές σχεδιασμού είναι το βάρος απογείωσης του αεροσκάφους και μία άλλη μεταβλητή είναι το βεληνεκές της πτήσης. Σε ένα τέτοιο πρόβλημα οι μεταβλητές σχεδιασμού είναι και οι μεταβλητές εισόδου του RBF νευρωνικού δικτύου και προφανώς οι τιμές τους έχουν διαφορετική τάξη μεγέθους. Επιπλέον, οι συναρτήσεις ενεργοποίησης του χρησιμοποιούνται στα RBF νευρωνικά δίκτυα λειτουργούν καλύτερα σε τιμές των μεταβλητών εισόδου γύρω από το μηδέν, δηλαδή σε αυτό το πεδίο καμπυλώνονται αισθητά και επομένως έχουν τη δυνατότητα να απεικονίσουν στις τιμές τις απόκριση του δικτύου μεταβολές που συμβαίνουν στις τιμές των μεταβλητών εισόδου. Το αποτέλεσμα στην περίπτωση αυτή θα είναι η ανακριβής απόκριση του δικτύου, γιατί η μεταβολή της τιμής της μεταβλητής εισόδου

με τη μεγαλύτερη τάξη μεγέθους επισκιάζει οποιαδήποτε μεταβολή στην τιμή της μεταβλητής εισόδου με τη μικρότερη τάξη μεγέθους.

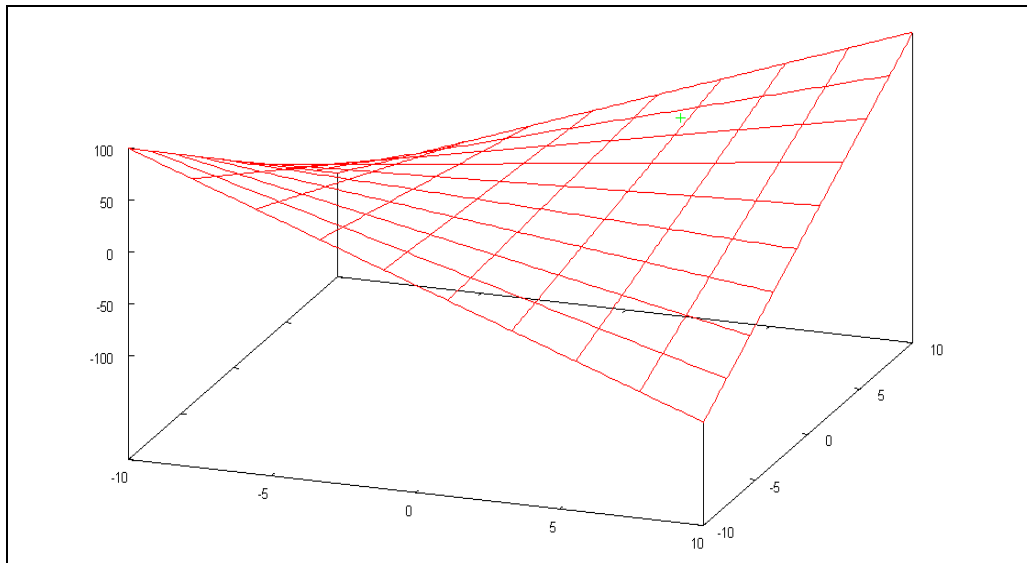
Για να λυθεί το παραπάνω πρόβλημα μία λύση είναι να αλλάξει η τιμή της ακτίνας που χρησιμοποιείται στη συνάρτηση ενεργοποίησης. Το μειονέκτημα μία τέτοιας επιλογής είναι ότι αν η ακτίνα αυξηθεί αρκετά, τότε οι συναρτήσεις ενεργοποίησης που αναφέρθηκαν σταδιακά χάνουν την καμπή τους και τελικά όταν η ακτίνα τείνει στο άπειρο εκφυλίζονται σε γραμμικές. Η λύση που προτείνεται και δεν παρουσιάζει κάποιο τέτοιο πρόβλημα είναι η αδιαστατοποίηση των τιμών των μεταβλητών εισόδου του δικτύου. Οι τιμές της απόκρισης προκύπτουν διαστατές γιατί επιλέγονται διαφορετικοί συντελεστές βάρους. Το αποτέλεσμα είναι να χρησιμοποιείται συνήθως αδιαστατοποίηση των μεταβλητών εισόδου στο RBF δίκτυο, χωρίς όμως κάτι τέτοιο να είναι υποχρεωτικό.

### 3.5.2 Απλή εφαρμογή RBF Δικτύου και διερεύνηση

Στο σημείο αυτό θα γίνει χρήση ενός RBF δικτύου σε ένα απλό πρόβλημα ώστε να είναι δυνατή η άμεση αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Θα χρησιμοποιηθεί ένα RBF δίκτυο για να αναπαραχθούν οι τιμές μίας απλής μαθηματικής συνάρτησης. Αυτή επιλέγεται να είναι μη γραμμική, αφού είναι επιθυμητό το δίκτυο να λειτουργεί ικανοποιητικά για μη γραμμικά προβλήματα, και η αναλυτική της έκφραση θα είναι η  $y = x_1 \cdot x_2$ . Προφανώς οι μεταβλητές εισόδου του δικτύου και ανεξάρτητες μεταβλητές της συνάρτησης είναι οι  $x_1$  και  $x_2$ , ενώ ως απόκριση του δικτύου προκύπτει η τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής της συνάρτησης  $y$ . Αρχικά δημιουργείται ένα πλέγμα για τις τιμές των μεταβλητών  $x_1$  και  $x_2$ , όπου κάθε μεταβλητή λαμβάνει τιμές στο διάστημα  $[-10,10]$  με βήμα 2. Υπολογίζονται οι τιμές της συνάρτησης  $y(x_1, x_2)$  για όλους του κόμβους του παραπάνω πλέγματος. Με τον τρόπο αυτό οι συνδυασμοί  $(x_1, x_2, y)$  αποτελούν δείγματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση του δικτύου. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι μία τριδιάστατη επιφάνεια. Θα εκπαιδεύσουμε ένα RBF δίκτυο το οποίο θα προβλέπει την τιμή της μεταβλητής  $y_{RBF}$  για τιμές των μεταβλητών  $x_{1,RBF} = 3$  και  $x_{2,RBF} = 7$ . Η τιμή που αναμένεται είναι  $y = 21$ . Το πόσο ακριβής θα είναι η τιμή που θα προβλέψει το RBF δίκτυο σχηματικά θα φαίνεται από το πόσο θα απέχει το σημείο  $(x_{1,RBF}, x_{2,RBF}, y_{RBF})$  από την τριδιάστατη επιφάνεια που περιγράφηκε προηγουμένως. Επιλέγουμε αρχικά ως μορφή συνάρτησης ενεργοποίησης την αντίστροφη εκθετική και αριθμό δειγμάτων εκπαίδευσης ίσο με 5. Από τους συνδυασμούς του δείγματος επιλέγονται επομένως οι 5 που έχουν τιμές μεταβλητών  $x_1$  και  $x_2$ , όσο πιο κοντινές στις τιμές  $x_{1,RBF}$  και  $x_{2,RBF}$ . Αυτό σημαίνει ότι υπολογίζεται οι απόσταση όλων των συνδυασμών  $(x_1, x_2)$  από το σημείο  $(x_{1,RBF}, x_{2,RBF})$  στο διδιάστατο χώρο (σε



περίπτωση που οι μεταβλητές εισόδου ήταν  $n$  στον  $n$ -διάστατο χώρο) και επιλέγονται οι 5 με τη μικρότερη απόσταση ως κέντρα εκπαίδευσης του RBF νευρωνικού δικτύου. Επιπλέον, να σημειωθεί ότι χρησιμοποιείται αδιαστατοποίηση για της μεταβλητές  $(x_1, x_2)$  παρότι στην περίπτωση αυτή οι μεταβλητές έχουν ίδια τάξη μεγέθους και δεν είναι αναγκαίο κάτι τέτοιο. Η τιμή της ακτίνας επιλέγεται ίση με  $r = 0,5$ . Η τιμή της απόκρισης του δικτύου είναι  $y_{RBF} = 21,1493$  και παρατηρούμε ότι είναι αρκετά κοντά στη ζητούμενη τιμή  $y = 21$ . Στο σχήμα 3.5.2.1 φαίνεται η προσέγγιση της τιμής  $y$  στον τρισδιάστατο χώρο.

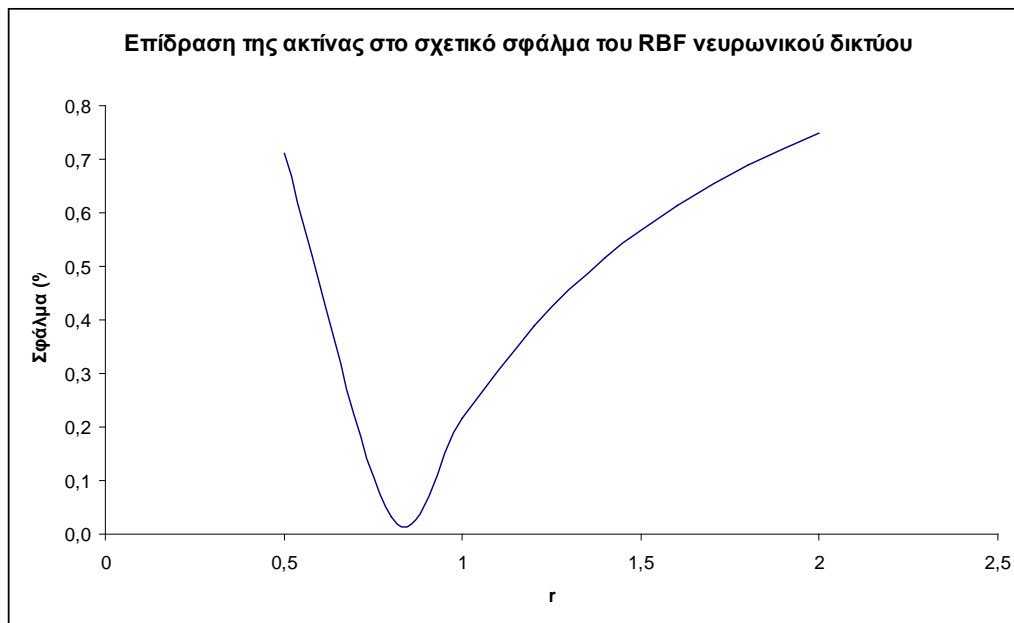


**Σχήμα 3.5.2. 1:** Το σχήμα παρουσιάζει την επιφάνεια που αντιπροσωπεύει η συνάρτηση που προσεγγίζεται με το RBF νευρωνικό δίκτυο και το σημείο που προβλέπεται από το δίκτυο. Φαίνεται ότι η πρόβλεψη του δικτύου είναι αρκετά καλή. Χρησιμοποιούνται 5 κέντρα εκπαίδευσης και ακτίνα ίση με 0, 5.

Επιλέγονται διάφορες τιμές της ακτίνας και λαμβάνονται οι τιμές  $y_{RBF}$  που προκύπτουν. Στη συνέχεια υπολογίζεται το σχετικό σφάλμα (δηλαδή η επί τοις εκατό διαφορά της απόκρισης από την ακριβή τιμή). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 3.5.2.1 και στο σχήμα 3.5.2.2.

Ακτίνα $r$	$y_{RBF}$	Σχετικό Σφάλμα (%)
0,5	21,1493	0,7110
0,8	21,0069	0,0329
1,0	20,9544	0,2171
1,2	20,9181	0,3900
1,4	20,8914	0,5171
1,6	20,8713	0,6129
1,8	20,8554	0,6886
2,0	20,8426	0,7495

**Πίνακας 3.5.2. 1:** Στον πίνακα παρουσιάζεται η επίδραση που έχει η ακτίνα στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων του RBF νευρωνικού δικτύου. Σημειώνεται ότι η επίδραση αυτή αναφέρεται στην περίπτωση του προβλήματος που εξετάζεται σε αυτή την παράγραφο και δεν μπορεί να γενικευτεί ασφαλώς σε άλλα προβλήματα.



**Σχήμα 3.5.2. 2:** Επίδραση της ακτίνας στην ακρίβεια του RBF νευρωνικού δικτύου για το πρόβλημα που αναπτύσσεται σε αυτή την παράγραφο. Φαίνεται ότι το ελάχιστο σχετικό σφάλμα παρουσιάζεται περίπου στην τιμή της ακτίνας  $r = 0,8$ .

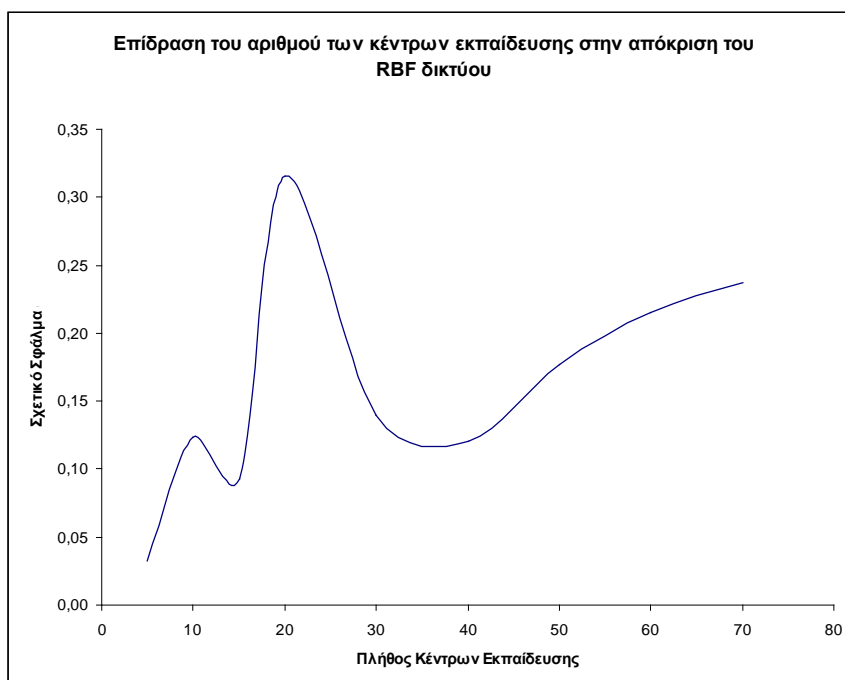
Από την ανάλυση που προηγήθηκε φαίνεται ότι η βέλτιστη τιμή ακτίνας για το πρόβλημα αυτό είναι η  $r = 0,8$ . Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η βέλτιστη τιμή της ακτίνας δεν είναι η ίδια σε κάθε πρόβλημα και πρέπει να επιλέγεται από το χρήστη με βάση το συγκεκριμένο πρόβλημα που επιλύει το RBF δίκτυο. Πάντως είναι εμφανές ότι η ακτίνα που χρησιμοποιείται επηρεάζει την ακρίβεια του δικτύου.

Αφού βρέθηκε η βέλτιστη τιμή της ακτίνας, γίνεται διερεύνηση της επίδρασης που έχει στην ακρίβεια της απόκρισης του δικτύου το πλήθος των κέντρων εκπαίδευσης.

Τα αποτελέσματα για διάφορα πλήθη των κέντρων εκπαίδευσης παρουσιάζονται στο πίνακα 3.5.2.2 και στο σχήμα 3.5.2.3.

Πλήθος Κέντρων Εκπαίδευσης	$Y_{RBF}$	Σχετικό Σφάλμα (%)
5	21,0069	0,0329
10	20,9740	0,1238
15	21,0194	0,0924
20	21,0662	0,3152
30	21,0294	0,1400
40	21,0254	0,1210
50	21,0372	0,1771
60	21,0451	0,2148
70	21,0498	0,2371

**Πίνακας 3.5.2. 2:** Στον πίνακα παρουσιάζεται η επίδραση που έχει το πλήθος των κέντρων εκπαίδευσης του RBF δικτύου στην απόκρισή του.



**Σχήμα 3.5.2. 3:** Στο σχήμα φαίνεται η επίδραση του αριθμού των κέντρων εκπαίδευσης στην απόκριση του RBF νευρωνικού δικτύου που εξετάζεται. Φαίνεται ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα αυτής της παραγράφου το καλύτερο πλήθος κέντρων εκπαίδευσης είναι 5.

Από το σχήμα 3.5.2.3 φαίνεται ότι καθώς αυξάνεται το πλήθος των κέντρων εκπαίδευσης του δικτύου η απόκριση μεταβάλλεται και μάλιστα χωρίς συγκεκριμένο τρόπο. Τα κέντρα εκπαίδευσης που επιλέγονται πρώτα είναι αυτά που έχουν τη

μικρότερη απόσταση από το σημείο που θέλουμε να υπολογίσουμε. Επομένως, όταν αυξάνεται το πλήθος τους συμπεριλαμβάνονται στον υπολογισμό κέντρα που είναι πιο απομακρυσμένα από το σημείο που επιθυμούμε και εισάγεται κατά κάποιο τρόπο «θόρυβος» στην απόκριση του δικτύου. Συνηθίζεται να επιλέγονται περισσότερα κέντρα εκπαίδευσης από το πλήθος των μεταβλητών εισόδου, όμως από το παράδειγμα που προηγήθηκε φαίνεται ότι το πλήθος τους καλό είναι να μην είναι μεγάλο όταν αυτά επιλέγονται με κριτήριο την απόστασή τους από το σημείο που υπολογίζεται.

Η εφαρμογή που χρησιμοποιήθηκε ήταν αρκετά απλή σε σύγκριση με άλλες εφαρμογές των RBF τεχνητών νευρωνικών δικτύων και ένας βασικός λόγος είναι ότι οι τιμές των μεταβλητών εισόδου και των αποκρίσεων στα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν ως κέντρα εκπαίδευσης ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένες. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει τέτοια ομοιόμορφη κατανομή, υπάρχει πάντα ο κίνδυνος η απόκριση του δικτύου να απέχει σημαντικά από την πραγματική τιμή. Αυτό συμβαίνει όταν ο συνδυασμός τιμών που προσεγγίζεται κείται εκτός του χωρίου των κέντρων εκπαίδευσης, τα οποία χωρία όμως δεν είναι γνωστά σε προβλήματα που δεν υπάρχει αναλυτική έκφραση (outliers). Όταν το δίκτυο χρησιμοποιείται ως μεταπρότυπο στη μέθοδο της προσεγγιστικής προαξιολόγησης δεν είναι επιθυμητό να ληφθούν ως επικρατέστερα άτομα σε μία γενιά του εξελικτικού αλγορίθμου λύσεις που στην πραγματικότητα παρουσιάζουν μεγαλύτερη τιμή της συνάρτησης κόστους από αυτή που υπολογίζεται από το μεταπρότυπο. Για το λόγο αυτό, τα άτομα που παρουσιάζουν τις καλύτερες τιμές κόστους σε μία γενιά, αξιολογούνται και με το λογισμικό πλήρους αξιολόγησης που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος. Το αποτέλεσμα είναι να αυξάνεται ελάχιστα το υπολογιστικό κόστος του αλγορίθμου, αλλά να ενισχύεται η ασφάλεια στη χρήση των αποτελεσμάτων του νευρωνικού δικτύου.

## **4. Επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με εξελικτικούς αλγόριθμους**

Στο κεφάλαιο 1 έγινε διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο χωρίς όσο και με το να λαμβάνονται υπόψη πιθανοτικές βλάβες. Αναφέρθηκαν οι βασικοί ορισμοί που συνοδεύουν το πρόβλημα και έγινε μία σύντομη περιγραφή των μεθόδων που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για την επίλυση αυτού του προβλήματος. Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην επίλυση με χρήση εξελικτικών αλγορίθμων, λόγω των πλεονεκτημάτων που χαρακτηρίζουν αυτή τη μέθοδο επίλυσης. Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος με εξελικτικούς αλγορίθμους. Θα περιγραφεί επίσης και ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση Monte-Carlo σε περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη και πιθανοτικές βλάβες των μονάδων κατά τη βελτιστοποίηση.

### **4.1 Βασικά δεδομένα του προβλήματος και στόχος της βελτιστοποίησης**

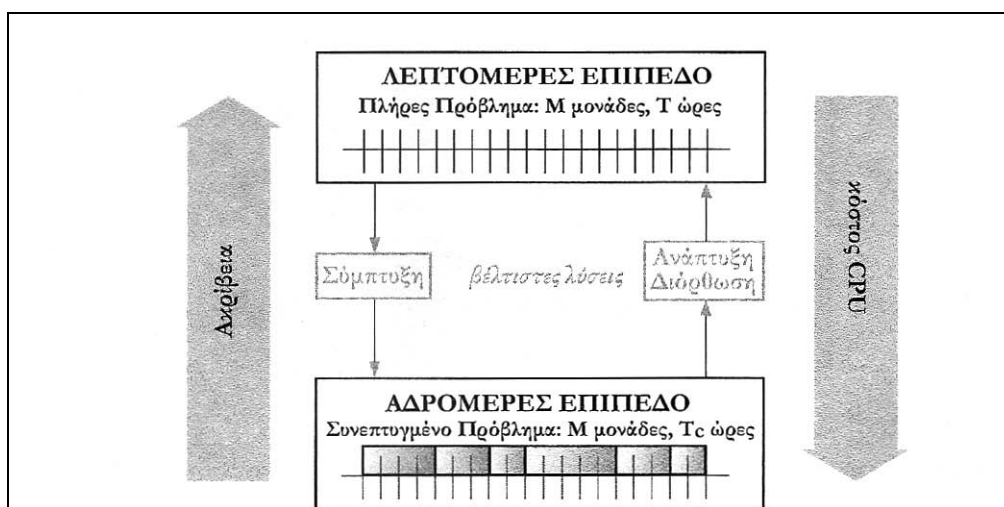
Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 1, τα βασικά δεδομένα του προβλήματος είναι η χρονοσειρά ζήτησης που πρέπει να καλυφθεί από το πρόγραμμα λειτουργίας του σταθμού, καθώς και άλλες απαιτήσεις του συστήματος, όπως για παράδειγμα η στρεφόμενη εφεδρεία κ.λ.π. Επιπλέον, απαιτούνται βασικά δεδομένα για τη λειτουργία των μονάδων, όπως αυτά περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2. Στο ίδιο κεφάλαιο δημιουργήθηκε (βλ και [1]) και ένα μοντέλο της λειτουργίας των μονάδων το οποίο αποτελεί βασικό δεδομένο της βελτιστοποίησης. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι να ελαχιστοποιηθεί το ολικό κόστος λειτουργίας (TOC), όπως αυτό ορίστηκε στο κεφάλαιο 1. Επιπλέον, πέραν των περιορισμών που αφορούν στη λειτουργία των μονάδων και εντάσσονται στα δεδομένα του προβλήματος, οι βασικοί περιορισμοί που πρέπει να τηρούνται από τη βέλτιστη λύση είναι η κάλυψη της ζήτησης και της στρεφόμενης εφεδρείας. Υπάρχει και η δυνατότητα δικριτηριακής βελτιστοποίησης με δεύτερο στόχο προς ελαχιστοποίηση, πέραν του ολικού κόστους λειτουργίας, να είναι το ρίσκο μη-κάλυψης της ζήτησης σε ενέργεια, όταν η ζήτηση του συστήματος χαρακτηρίζεται και αυτή από στοχαστικότητα. Η περίπτωση της δικριτηριακής βελτιστοποίησης δεν θα απασχολήσει αυτή τη διπλωματική εργασία. Ο αναγνώστης παραπέμπεται για περισσότερα στοιχεία σχετικά με αυτή στη διδακτορική διατριβή [1].

## 4.2 Επίλυση με εξελικτικούς αλγόριθμους

Η βασική δομή και λειτουργία ενός εξελικτικού αλγορίθμου περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3. Από την περιγραφή αυτή γίνεται σαφές ότι κάθε υποψήφια λύση σε μία γενιά του αλγορίθμου αντιπροσωπεύεται από ένα χρωμόσωμα που απαρτίζεται από τις μεταβλητές σχεδιασμούς του προβλήματος. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής περιλαμβάνει δύο ειδών μεταβλητές σχεδιασμού. Τις μεταβλητές κατάστασης  $s$  κάθε μονάδας σε κάθε ώρα, και τις τιμές της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος  $P$  κάθε μονάδας σε κάθε ώρα (οι τις αντίστοιχες τιμές των φορτίσεων  $x$ ). Οι μεταβλητές κατάστασης  $s$  λαμβάνουν ακέραιες τιμές (για την ακρίβεια 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. Ο τρόπος με τον οποίο διαχειρίζονται άλλες μέθοδοι αυτήν την κατηγορία προβλημάτων αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.4. Στην περίπτωση των εξελικτικών αλγορίθμων το χρωμόσωμα κάθε υποψήφιας λύσης απαρτίζεται από τις τιμές των μεταβλητών κατάστασης  $s$  (επομένως χρησιμοποιείται δυαδική κωδικοποίηση), ενώ οι τιμές της παραγόμενης ενέργειας (ή του φορτίου) κάθε μονάδας σε κάθε ώρα επιλέγονται με επίλυση ενός υποπροβλήματος βελτιστοποίησης με τη μέθοδο επαυξημένων πολλαπλασιαστών Lagrange (ALM) κατά την εκτέλεση του λογισμικού αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται σε αυτή τη διπλωματική εργασία είναι ένα διεπίπεδο σχήμα βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί εξελικτικούς αλγόριθμους και προτείνεται στη διδακτορική διατριβή [1] και από δημοσιεύσεις [16]. Το διεπίπεδο αυτό σχήμα χωρίζει τη βελτιστοποίηση σε δύο επίπεδα που επικοινωνούν μεταξύ τους. 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. Η λύση που προκύπτει από αυτό το επίπεδο δεν είναι η βέλτιστη και για το λόγο αυτό αναπτύσσεται ένα δεύτερο λεπτομερές επίπεδο, όπου ο εξελικτικός αλγόριθμος διαχειρίζεται πλέον το πλήρες χρωμόσωμα κάθε υποψήφιας λύσης. 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 δυνατό η λύση που προκύπτει από το λεπτομερές επίπεδο να εισαχθεί ξανά στο αδρομερές μειώνοντας έτσι το συνολικό υπολογιστικό κόστος. Ο όλος αλγόριθμος

αρχικοποιείται από μία σύντομη διαδικασία βελτιστοποίησης με τη μέθοδο Διάσχισης-Διαχώρισης (BnB). Στο σχήμα 4.2.1 παρουσιάζεται η λειτουργία του διεπίπεδου αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Όπως θα φανεί στη συνέχεια 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. Στη συνέχεια θα αναλυθεί η λειτουργία κάθε επιπέδου του αλγορίθμου καθώς και οι διαδικασίες της σύμπτυξης και της ανάλυσης-διόρθωσης του χρωμοσώματος.



**Σχήμα 4.2. 1:** Στο σχήμα παρουσιάζεται συνοπτικά η διεπίπεδη δομή του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται και η επικοινωνία μεταξύ των δύο επιπέδων (σχήμα από τη διδακτορική διατριβή [1])

### Αδρομερές επίπεδο

Στο επίπεδο αυτό επιλύεται το πρόβλημα σε ένα συνεπτυγμένο χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού, οποίος προκύπτει από τη διαδικασία της ομαδοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, οι T ώρες προγραμματισμού ομαδοποιούνται σε  $T_c$  κατηγορίες, όπου  $T_c \ll T$ , με κριτήριο το βέλτιστο σενάριο λειτουργίας των μονάδων σε κάθε ώρα, αγνοώντας τα κόστη που προκύπτουν από τους περιορισμούς μετάβαση μεταξύ καταστάσεων. Τα βήματα που ακολουθούνται για την ομαδοποίηση περιγράφονται ακολούθως.

**Βήμα 1:** Για κάθε ώρα εντοπίζεται το βέλτιστο σενάριο λειτουργίας των μονάδων χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα σενάρια των γειτονικών ωρών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος Διάσχισης-Διαχώρισης (BnB).

Βήμα2: Οι διαδοχικές ώρες που εμφανίζουν το ίδιο βέλτιστο σενάριο λειτουργίας εντάσσονται σε μία ομάδα.

Βήμα3: Ελέγχεται αν ο αριθμός των ομάδων που δημιουργούνται είναι ο επιθυμητός ( $T_C$ ) ή μικρότερος. Αν είναι τότε η διαδικασία ολοκληρώνεται. Αν όχι, τότε εντοπίζεται η ομάδα  $c$  με το μικρότερο πληθυσμό ωρών. Για την ομάδα  $c$  αλλά και τις γειτονικές της ( $r$  η δεξιά ομάδα και  $\ell$  η αριστερή) υπολογίζεται οι συνολική δυναμικότητα των ενεργών μονάδων. Η ομάδα  $c$  ενώνεται με τη γειτονική της ομάδα που εμφανίζει τη μεγαλύτερη δυναμικότητα ενεργών μονάδων. Έτσι το σενάριο της νέας ομάδας είναι αυτό με τη μεγαλύτερη δυναμικότητα. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται στην επόμενη ομάδα  $c$  που περιλαμβάνει αριθμό ωρών ίσο με τον τρέχοντα ελάχιστο.

Βήμα 4: Αν το πλήθος των ομάδων συνεχίζει να είναι μεγαλύτερο από  $T_C$  τότε επιστρέφουμε στο βήμα 3. Αν το πλήθος είναι μικρότερο ή ίσο με το επιθυμητό συντάσσεται μία πρώτη υποψήφια λύση  $T_C$  ομάδων (αντίστοιχα με τις ώρες του πλήρους χρωμοσώματος), όπου κάθε ομάδα χαρακτηρίζεται από ένα σενάριο λειτουργίας. Η λύση αυτή συνήθως (εκτός αν τύχει) δεν τηρεί του περιορισμούς του προβλήματος.

Η λύση αυτή αρχικοποιεί το εξελικτικό αλγόριθμο του αδρομερούς επιπέδου, ο οποίος διαχειρίζεται χρωμοσώματα μήκους  $MT_C$  δυαδικών ψηφίων, όπου  $M$  ο αριθμός των μονάδων. Για την αξιολόγηση της λύσης, οι ώρες που ανήκουν σε μία ομάδα λαμβάνουν το ίδιο σενάριο λειτουργίας των μονάδων. Οι περιορισμοί για τους ελάχιστους χρόνους έναυσης, σβέσης και παραμονής σε μία κατάσταση των μονάδων δε λαμβάνονται υπόψη. Η κάθε υποψήφια λύση λαμβάνει ποινή για κάθε ώρα που δεν καλύπτεται η ζήτηση.

Όταν ολοκληρωθεί η βελτιστοποίηση του αδρομερούς επιπέδου, το χρωμόσωμα της βέλτιστης λύσης αναπτύσσεται πλήρως και τροποποιείται ώστε να καλύπτονται οι λειτουργικοί περιορισμοί. Αυτή είναι η διαδικασία της ανάπτυξης-διόρθωσης της λύσης του αδρομερούς επιπέδου, ώστε να μπορεί στη συνέχεια να εισαχθεί για βελτιστοποίηση στο λεπτομερές επίπεδο.

#### Λεπτομερές επίπεδο

Στο λεπτομερές επίπεδο, ο εξελικτικός αλγόριθμος χειρίζεται το πλήρες χρωμόσωμα κάθε υποψήφια λύσης. Το μεγαλύτερο μήκος του χρωμοσώματος καθιστά το υπολογιστικό κόστος του λεπτομερούς επιπέδου αρκετά μεγάλο. Μία λύση που προτείνεται από τη διδακτορική διατριβή [1] για την επιτάχυνση του λεπτομερούς επιπέδου, είναι η χρήση επαναληπτικής χρονικά κατατεταγμένης βελτιστοποίησης. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ο χρονικός ορίζοντας  $T$  ωρών χωρίζεται σε  $K$  χρονικά



διαστήματα και σε καθένα από αυτά εφαρμόζεται αυτόνομος εξελικτικός αλγόριθμος που διαχειρίζεται χρωμοσώματα μήκους  $TM/K$  δυαδικών ψηφίων. 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. Ο κατατετμημένος εξελικτικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα.

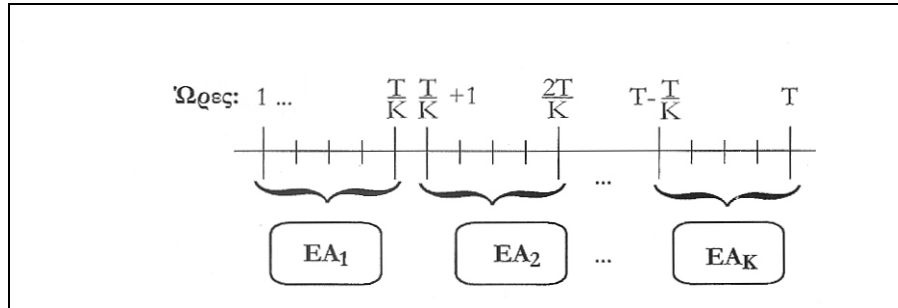
Βήμα 1: Αρχικοποιείται ο αλγόριθμος από τη λύση του αδρομερούς επιπέδου. Επιλέγεται ο αριθμός των χρονικών διαστημάτων  $K$  στα οποία θα κατατμηθεί ο χρονικός ορίζοντας προγραμματισμού. Συνήθως, επιλέγεται όλα τα διαστήματα να περιέχουν τον ίδιο αριθμό ωρών (χωρίς αυτό να είναι δεσμευτικό). Η αναπτυγμένη και διορθωμένη λύση του αδρομερούς επιπέδου χωρίζεται σε  $K$  διαστήματα και χρησιμοποιείται για την αρχικοποίηση κάθε εξελικτικού αλγορίθμου που θα βελτιστοποιήσει κάθε διάστημα. Επίσης, χρησιμοποιείται και ως τρέχουσα λύση για τα γειτονικά διαστήματα κάθε φορά κατά τον πρώτο κύκλο βελτιστοποίησης, ώστε να μπορεί να επιβληθεί η τιμή της ποινής συμβατότητας.

Βήμα 2: Σε κάθε διάστημα εκκινεί ένας εξελικτικός αλγόριθμος που πραγματοποιεί τη βελτιστοποίηση του διαστήματος. Ο κάθε εξελικτικός αλγόριθμος χρησιμοποιείται για ένα μέγιστο αριθμό γενεών ή αξιολογήσεων που ορίζεται από το χρήστη. Η βελτιστοποίηση στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της τιμής του αθροίσματος του ολικού κόστους λειτουργίας σε κάθε διάστημα με την ποινή συμβατότητας με τις τρέχουσες λύσεις των προηγούμενων διαστημάτων. Τέλος, αναφέρεται ότι ο εξελικτικός αλγόριθμος σε κάθε ένα από τα  $K$  διαστήματα αρχικοποιείται από τη λύση που έχει προκύψει στον προηγούμενο κύκλο βελτιστοποίησης για το διάστημα αυτό.

Βήμα 3: Οι λύσεις όλων των διαστημάτων συνθέτουν μία συνολική λύση η οποία αξιολογείται πλήρως.

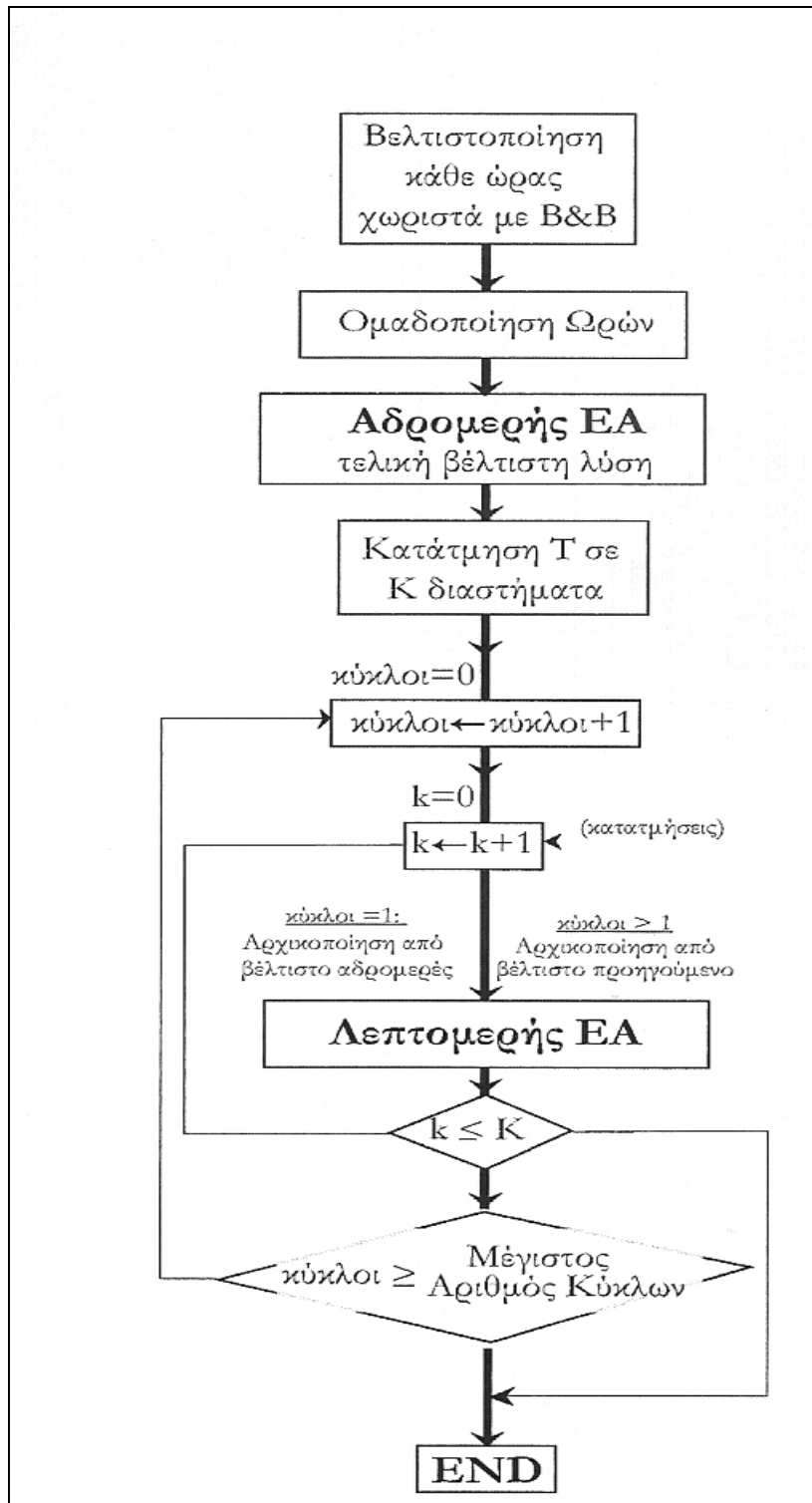
Βήμα 4: Ο κύκλος βελτιστοποίησης ολοκληρώνεται και ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 2 για να εκκινήσει νέος κύκλος, εκτός εάν ικανοποιείται κάποιο από τα κριτήρια σύγκλισης, οπότε ο αλγόριθμος τερματίζει. Τα κριτήρια σύγκλισης μπορεί να είναι η μη μεταβολή της συνολικής λύσης ή η εξάντληση ενός μέγιστου αριθμού κύκλων βελτιστοποίησης. Σημειώνεται, ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των κύκλων, μεγαλώνει και ο συντελεστής βαρύτητας της ποινής συμβατότητας ώστε να εξασφαλισθεί σωστή «γεινίαση» ή «δέσιμο» (matching) των λύσεων των διαστημάτων.

Η κατάτμηση του συνολικού ορίζοντα προγραμματισμού σε  $K$  διαστήματα τα οποία βελτιστοποιούνται από ανεξάρτητους εξελικτικούς αλγορίθμους παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2.2. Τέλος σημειώνεται ότι με τη χρήση χρονικά κατατετημένης επαναληπτικής βελτιστοποίησης αυξάνονται σημαντικά οι επιδόσεις του λεπτομερούς επιπέδου του αλγορίθμου.



**Σχήμα 4.2. 2:** Σχηματική παρουσίαση της κατάτμησης του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού σε διαστήματα σε καθένα από τα οποία επενεργεί αυτόνομος εξελικτικός αλγόριθμος (σχήμα από τη διδακτορική διατριβή [1]).

Σημειώνεται ότι στον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας η λύση του λεπτομερούς επιπέδου αποτελεί και τη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Αυτό σημαίνει ότι η λύση αυτή δεν εισάγεται ξανά στο αδρομερές επίπεδο, δηλαδή δεν γίνεται χρήση αμφίδρομης «μετανάστευσης» λύσεων, αλλά «μεταναστεύει» μόνο η λύση του αδρομερούς επιπέδου στο λεπτομερές. Στο σχήμα 4.2.3 παρουσιάζεται η δομή του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται σε μορφή διαγράμματος ροής.



**Σχήμα 4.2. 3:** Διάγραμμα ροής του χρησιμοποιούμενου διεπίπεδου εξελικτικού αλγορίθμου (σχήμα από τη διδακτορική διατριβή [1])

### 4.3 Βελτιστοποίηση με εξελικτικούς αλγορίθμους λαμβάνοντας υπόψη πιθανοτικές βλάβες

Όπως περιγράφηκε και στην παράγραφο 1.3 του κεφαλαίου 1, υπάρχει η ανάγκη βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας σταθμού ηλεκτροπαραγωγής λαμβάνοντας υπόψη και πιθανοτικές βλάβες. Στην ίδια παράγραφο και στις υποενότητες της, αναφέρθηκε ότι όταν στη βελτιστοποίηση λαμβάνονται υπόψη πιθανοτικές βλάβες, η συνάρτηση στόχου αλλάζει και αντί να περιλαμβάνει το ολικό κόστος λειτουργίας (TOC), περιλαμβάνει το εκτιμώμενο ή μέσο ολικό κόστος λειτουργίας (ETOC). Τέλος, αναφέρθηκε ότι η ακριβής μέθοδος υπολογισμού του εκτιμώμενου ολικού κόστους λειτουργίας παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα σε προβλήματα μεγάλου μεγέθους (πολλών ωρών και πολλών μονάδων). Τα μειονεκτήματα αυτά ξεπερνιούνται με τη χρήση της μεθόδου Monte-Carlo, οι αρχές τις οποίας αναφέρθηκαν στην ίδια παράγραφο. Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιασθεί ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για να γίνει χρήση της μεθόδου Monte-Carlo και θα παρουσιασθούν κάποια παραδείγματα χρήσης του αλγορίθμου. Η παράγραφος θα κλείσει με την ένταξη της μεθόδου Monte-Carlo στην τεχνική βελτιστοποίησης με εξελικτικούς αλγορίθμους.

#### Χρονοδιαγράμματα βλαβών-επισκευών

Όπως έγινε εμφανές από το μοντέλο που αναπτύχθηκε για τη λειτουργία των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με πιθανοτικές βλάβες, ο χρόνος αστοχίας κάθε μονάδας, καθώς και ο χρόνος επισκευής ακολουθούν πιθανοτικές κατανομές. Η αρχή της προσομοίωσης Monte-Carlo βασίζεται στην παραγωγή ενός μεγάλου αριθμού δειγμάτων και την αξιολόγηση του καθενός ξεχωριστά. Τα δείγματα αυτά πρέπει, επομένως, να ακολουθούν τις επιθυμητές στοχαστικές κατανομές για τις πιθανότητες αστοχίας και επισκευής των μονάδων. Επομένως, καταστρώνονται κύκλοι των φάσεων λειτουργίας-βλάβης-επισκευής για κάθε μονάδα, καλώντας μία ψευδογεννήτρια τυχαίων αριθμών από τη χρονική στιγμή  $\tau = 0$  μέχρι εξαντλήσεως του χρονικού ορίζοντα βελτιστοποίησης ( $\tau = T$ ). Με τον τρόπο αυτό, για κάθε μονάδα, δημιουργείται μία σειρά από δυαδικά ψηφία (ένα για κάθε ώρα) με την ακόλουθη κωδικοποίηση. Η τιμή 0 σε ένα δυαδικό ψηφίο σημαίνει ότι η μονάδα έχει υποστεί βλάβη και βρίσκεται στη φάση της επισκευής, ενώ η τιμή 1 σημαίνει ότι στη συγκεκριμένη ώρα η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση διαθεσιμότητας (AV) και αν χρειαστεί μπορεί να λειτουργήσει για παραγωγή ενέργειας. Είναι δυνατό η κωδικοποίηση να αντιστραφεί, δηλαδή η τιμή 1 να σημαίνει μη-διαθεσιμότητα (UAV) και η τιμή 0 διαθεσιμότητα (AV). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μία χρονική διαδοχή βλαβών-επισκευών η οποία καλείται χρονοδιάγραμμα βλαβών-επισκευών. Δύο χρονοδιαγράμματα βλαβών-επισκευών (ένα για κάθε μονάδα)

αντιστοιχούν σε ένα σενάριο για την προσομοίωση Monte-Carlo. Κάθε χρονοδιάγραμμα πιθανών βλαβών-επισκευών καταστρώνεται με τρόπο που τηρεί τις ακόλουθες προϋποθέσεις.

- Οι χρονοσειρές καταστάσεων AV-UAV βασίζονται σε διαδοχικές υποθέσεις για τους χρόνους μέχρι αστοχίας και επισκευής των μονάδων χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες πιθανοτικές κατανομές.
- Λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος που έχει διανυθεί από την τελευταία συντήρηση ή επισκευή κάθε μονάδας. Αυτό γιατί, γενικά, η τελευταία συντήρηση ή επισκευή δεν συμπίπτει απαραίτητα χρονικά με την έναρξη του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού. Επομένως, ο χρόνος αυτός πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για να ακολουθούνται σωστά οι πιθανοτικές κατανομές για τους χρόνους μέχρι αστοχίας των μονάδων. Σημειώνεται ωστόσο, ότι όταν γίνεται η υπόθεση του σταθερού ρυθμού αστοχίας, η πιθανότητα αστοχίας μίας μονάδας δεν εξαρτάται από το παρελθόν λειτουργίας της.
- Κάθε μία από τις διαδοχικές υποθέσεις για τους χρόνους μέχρι αστοχίας και επισκευής των μονάδων βασίζεται σε μία υποθετική τιμή του χρόνου μέχρι αστοχίας και του χρόνου επισκευής με τη μέθοδο του αντίστροφου μετασχηματισμού. Παράγεται δηλαδή ένας τυχαίος αριθμός  $r \in [0,1]$ , οι τιμές του οποίου ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή. Ο τυχαίος αριθμός  $r$  εξισώνεται με την πιθανότητα αστοχίας και έτσι προσομοιώνεται ο τρόπος με τον οποίο η πιθανότητα αυτή είναι κατανεμημένη πάνω στο εύρος τιμών του χρόνου μέχρι αστοχίας. Μπορεί επομένως να εκτιμηθεί μία πιθανή ώρα αστοχίας  $T_f$  με βάση τη σχέση 4.3.1.

$$T_f = -\frac{1}{\lambda_f} \ln(1-r) \quad (4.3.1)$$

Επειδή η μεταβλητή  $1-r$  ακολουθεί την ίδια κατανομή με τη μεταβλητή  $r$  η σχέση 4.3.1 μετασχηματίζεται στη σχέση 4.3.2.

$$T_f = -\frac{1}{\lambda_f} \ln(r) \quad (4.3.2)$$

Παράγοντας εκ νέου αριθμούς  $r$  (διαφορετικούς από αυτούς που χρησιμοποιούνται για το χρόνο μέχρι αστοχίας) προσδιορίζεται και μία πιθανή τιμή του χρόνου επισκευής  $T_{rep}$  με βάση τη σχέση 4.3.3.

$$T_{rep} = -\frac{1}{\mu_{rep}} \ln(r) \quad (4.3.3)$$

- Η υπόθεση για το χρόνο αστοχίας γίνεται σε κάποια ώρα που η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση κανονικής παραγωγής (ON). Έκτοτε, οι καταστάσεις διαθεσιμότητας και μη-διαθεσιμότητας (AV και UAV) επιβάλλονται ανεξάρτητα από το πρόγραμμα λειτουργίας της μονάδας.

Στη συνέχεια περιγράφεται σε βήματα ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός μέλους του δείγματος Monte-Carlo, για μία μονάδα  $u_i$ . Προφανώς, για να δημιουργηθεί ένα πλήρες σενάριο ο αλγόριθμος αυτός θα επαναληφθεί τόσες φορές όσες είναι και οι μονάδες του συστήματος. Στα επόμενα με  $\tau$  συμβολίζεται ο πραγματικός χρόνος, με  $t_i$  ο χρόνος μέχρι αστοχίας της μονάδας  $i$  και με  $t_{i,rep}$  ο χρόνος ολοκλήρωσης μίας επισκευής.

#### Αλγόριθμος δημιουργίας ενός μέλους του δείγματος Monte-Carlo

Βήμα 1: Ο απόλυτος χρόνος ξεκινάει από την τιμή  $\tau = 0$  και παράγεται μία τυχαία τιμή της μεταβλητής  $r$  από την ομοιόμορφη κατανομή.

Βήμα 2: Η  $r$  μετατρέπεται σε χρόνο μέχρι αστοχίας μέσω της σχέσης (4.3.2) και τίθεται  $\tau = t_i$ , όπου  $t_i$  είναι η πρώτη ώρα εντός του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού που η μονάδα είναι σε κατάσταση παραγωγής (ON). Από  $\tau = t_i$  έως  $\tau + \max(T_{i,f} - 1, 0)$ , η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση διαθεσιμότητας (AV). Για την ώρα  $\tau + T_{i,f}$  η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση μη-διαθεσιμότητας (UAV) λόγω στιγμιαίας βλάβης. Ο χρόνος  $\tau$ , ανανεώνεται σε  $\tau + T_{i,f}$ .

Βήμα 3: Παράγεται μία νέα τιμή της μεταβλητής  $r$  από την ομοιόμορφη κατανομή.

Βήμα 4: Η τιμή της μεταβλητής  $r$  μετατρέπεται σε χρόνο επισκευής μέσω της σχέσης (4.3.3). Από την ώρα  $\tau$ , έως την ώρα  $\tau + \max(T_{i,rep} - 1, 0)$  η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση μη-διαθεσιμότητας (UAV). Έκτοτε η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση διαθεσιμότητας μέχρι να συμβεί επόμενη βλάβη. Ο χρόνος  $\tau$  ανανεώνεται σε  $\tau + T_{i,rep}$ .

Βήμα 5: Τα βήματα 1-4 επαναλαμβάνονται μέχρι να εξαντληθεί ο χρονικός ορίζοντας προγραμματισμού.

Με τον αλγόριθμο που προηγήθηκε παράγεται μία χρονοσειρά βλαβών-επισκευών. Προκειμένου να υπολογισθεί το εκτιμώμενο ολικό κόστος λειτουργίας μίας υποψήφιας λύσης, λαμβάνεται το χρωμόσωμα που αντιστοιχεί στη λύση αυτή και διορθώνεται κατάλληλα ώστε να σέβεται το σενάριο αστοχιών-βλαβών. Συγκεκριμένα, διορθώνονται η τιμές της μεταβλητής κατάστασης  $s$  των μονάδων στην τιμή 0 στις ώρες που είναι σε αστοχία και η τιμή της είναι 1 (κατάσταση ON), αλλά παράλληλα σύμφωνα με τη χρονοσειρά βλαβών-επισκευών η μονάδα είναι σε κατάσταση μη-διαθεσιμότητας (UAV).

Ως εφαρμογή επιλέγεται ένα σύστημα δύο μονάδων (συγκεκριμένα οι αεριοστρόβιλοι LM6000PC Sprint και LM2500+) και υπολογίζεται το εκτιμώμενο ή μέσο ολικό κόστος λειτουργίας για χρονική περίοδο μίας εβδομάδας. Η ζήτηση που αντιστοιχεί σε αυτή την εβδομάδα είναι η ίδια που χρησιμοποιείται στην παράγραφο 6.1 του κεφαλαίου 6 και παρουσιάζεται στο σχήμα 6.1.1.1 Παράγονται 4000 σενάρια βλαβών-επισκευών. Ο μέσος χρόνος μέχρι αστοχίας και για τις δύο μονάδες είναι 4000ώρες, ενώ ο μέσος χρόνος επισκευής είναι επίσης κοινός και ίσος με 24ώρες. Οι χρόνοι αυτοί αντιστοιχούν σε ρυθμούς αστοχίας και επισκευής ίσους με  $\lambda_f = 0,00025$  και  $\mu_{rep} = 0,04167$ . Σε κάθε σενάριο αντιστοιχεί μία τιμή ολικού κόστους λειτουργίας (TOC) που υπολογίζεται σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν στο κεφάλαιο 1. Το εκτιμώμενο ολικό κόστος λειτουργίας (ETOC) προκύπτει από το άθροισμα όλων των ολικών κοστών λειτουργίας διαιρούμενο με τον αριθμό των σεναρίων. Η υποψήφια λύση που χρησιμοποιείται σε αυτή την εφαρμογή παρουσιάζει ολικό κόστος λειτουργίας σε σενάριο χωρίς βλάβες ίσο με  $TOC_{no-fail} = 26124,13MWh$ . Από το 4000 σενάρια μόνο τα 208 παρουσιάζουν βλάβη σε κάποια από τις δύο μονάδες. Αυτό συμβαίνει γιατί ο μέσος χρόνος μέχρι αστοχίας είναι μεγάλος συγκριτικά με το χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού. Το εκτιμώμενο ολικό κόστος λειτουργίας σε αυτή την περίπτωση υπολογίζεται ίσο με  $ETOC = 26711,04MWh$ . Είναι προφανές ότι η τιμή του ETOC είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με την τιμή του  $TOC_{no-fail}$  επειδή στα σενάρια που συμβαίνει βλάβη, ένα μέρος της ζήτησης μπορεί να μην καλύπτεται από την παραγωγή και επιβάλλεται όρος ποινής, οπότε το ολικό κόστος λειτουργίας των σεναρίων με βλάβη είναι συνήθως μεγαλύτερο από το ολικό κόστος λειτουργίας των σεναρίων χωρίς βλάβη. Αυτό πάντως δεν είναι κανόνας. Υπάρχει η περίπτωση όταν αστοχήσει μία μονάδα και η παραγωγή της μπορεί να καλυφθεί από κάποια άλλη μονάδα που ήδη λειτουργεί, το ολικό κόστος λειτουργίας να παρουσιασθεί μικρότερο γιατί η μονάδα που βρίσκεται σε κατάσταση ON παράγει σε μεγαλύτερο φορτίο και άρα με καλύτερο βαθμό απόδοσης. Σημειώνεται, όμως ότι η περίπτωση αυτή δεν είναι αρκετά συχνή.

#### **4.4 Προσθήκη της μεθόδου Monte-Carlo στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης με διεπίπεδο εξελικτικό αλγόριθμο**

Στη περίπτωση που στόχος της βελτιστοποίησης είναι η εύρεση του βέλτιστου προγράμματος λειτουργίας των μονάδων χωρίς να λαμβάνονται υπόψη πιθανοτικοί περιορισμοί, το διεπίπεδο σχήμα βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.2. Όταν, θέλουμε να ληφθούν επιπλέον υπόψη πιθανοτικές βλάβες απαιτείται μία μικρή τροποποίηση του αλγορίθμου.

Το αδρομερές επίπεδο παραμένει ως έχει και η βελτιστοποίηση σε αυτό γίνεται με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του ολικού κόστους λειτουργίας χωρίς να λαμβάνονται υπόψη πιθανοτικές βλάβες. Ο βασικός λόγος για τον οποίο γίνεται αυτή η επιλογή

έχει να κάνει με το ρόλο του αδρομερούς επιπέδου. Ο ρόλος του αδρομερούς επιπέδου είναι να βρεθεί με χαμηλό υπολογιστικό κόστος, μία αρκετά καλή λύση για να αρχικοποιήσει το λεπτομερές επίπεδο. Η μέθοδος Monte-Carlo όπως ήδη αναφέρθηκε, εμφανίζει αρκετά μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Αν για παράδειγμα η βελτιστοποίηση αφορούσε το σύστημα που αναφέρθηκε στο τέλος της παραγράφου 4.3 και το μέγεθος δείγματος Monte-Carlo ήταν 4000 σενάρια, τότε το υπολογιστικό κόστος κάθε αξιολόγησης μίας υποψήφιας λύσης θα ήταν περίπου 200 φορές μεγαλύτερο. Επομένως, για να μην αυξηθεί το υπολογιστικό κόστος του αδρομερούς επιπέδου, επιλέγεται η βελτιστοποίηση σε αυτό να γίνεται χωρίς να λαμβάνονται υπόψη πιθανοτικές βλάβες.

Στο λεπτομερές επίπεδο, το υπολογιστικό κόστος είναι αυξημένο σε σχέση με το αδρομερές επίπεδο, γιατί βασικός στόχος είναι η ακρίβεια της αξιολόγησης και, άρα, της βελτιστοποίησης. Αν θέλουμε να λάβουμε υπόψη στους υπολογισμούς πιθανοτικές βλάβες των μονάδων, τότε η αξιολόγηση κάθε υποψήφιας λύσης στο επίπεδο αυτό γίνεται με χρήση της μεθόδου Monte-Carlo. Επομένως, ο στόχος της βελτιστοποίησης στο λεπτομερές επίπεδο είναι, πλέον, η εύρεση του προγράμματος λειτουργίας των μονάδων που θα εμφανίζει το ελάχιστο εκτιμώμενο ολικό κόστος λειτουργίας (ETOC). Σε πρώτη φάση αυτό που γίνεται εμφανές είναι το σημαντικά μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος του λεπτομερούς επιπέδου σε περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη πιθανοτικές βλάβες. Ειδικά σε προβλήματα μεγάλου μεγέθους (πολλές μονάδες και πολλές ώρες προγραμματισμού) το υπολογιστικό κόστος του λεπτομερούς επιπέδου καθιστά τη χρήση του αλγορίθμου σχεδόν απαγορευτική. Τέλος, σημειώνεται ότι όταν στο λεπτομερές επίπεδο γίνεται χρήση επαναληπτικής χρονικά κατατετημημένης βελτιστοποίησης, οι χρονοσειρές βλαβών-επισκευών των μελών του δείγματος Monte-Carlo παράγονται πριν καταταμηθεί ο χρονικός ορίζοντας προγραμματισμού και, στη συνέχεια, χωρίζονται ώστε να προκύψουν οι χρονοσειρές που αντιστοιχούν σε κάθε χρονικό διάστημα.



## 5. Επιτάχυνση της βελτιστοποίησης με εξελικτικούς

### αλγορίθμους λαμβάνοντας υπόψη πιθανοτικές βλάβες

#### 5.1 Ανάγκη διατύπωσης νέας μεθόδου για την επιτάχυνση της βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη πιθανοτικές βλάβες.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφηκε ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος της βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση εξελικτικών αλγορίθμων. Στο υψηλό, από πλευράς ακρίβειας και υπολογιστικού κόστους, λεπτομερές επίπεδο επιλέγεται, να ληφθούν υπόψη πιθανοτικές βλάβες. Για να ληφθούν υπόψη πιθανοτικές βλάβες γίνεται χρήση της μεθόδου Monte-Carlo. Όπως έγινε ήδη φανερό από την παρουσίαση της μεθόδου Monte-Carlo, το υπολογιστικό κόστος κάθε υποψήφιας λύσης είναι αρκετά μεγάλο. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το χαρακτηριστικό των εξελικτικών αλγορίθμων να διαχειρίζονται πληθυσμούς υποψήφιων λύσεων, οδηγεί σε απαγορευτικό υπολογιστικό κόστος όταν λαμβάνονται υπόψη πιθανοτικές βλάβες. Όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3, όταν το λογισμικό αξιολόγησης που χρησιμοποιείται σε έναν εξελικτικό αλγόριθμο εμφανίζει μεγάλο υπολογιστικό κόστος, ένα τέχνασμα για την επιτάχυνση του αλγορίθμου είναι η χρήση της μεθόδου της προσεγγιστικής προαξιολόγησης. Στη μέθοδο αυτή, όπως επίσης αναφέρθηκε, συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ως μεταπρότυπο ένα RBF δίκτυο, χωρίς βέβαια αυτό να είναι δεσμευτικό (θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί άλλου τύπου νευρωνικό δίκτυο ή μια μέθοδος πολυωνυμικής παρεμβολής).

Η συνήθης τακτική που ακολουθείται για τη χρήση του μεταπρότυπου είναι η δημιουργία ενός RBF δικτύου που λαμβάνει ως μεταβλητές εισόδου τις μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος βελτιστοποίησης, και παράγει ως μεταβλητές απόκρισης (μεταβλητές εξόδου) τις τιμές των συναρτήσεων στόχου του προβλήματος βελτιστοποίησης. Ωστόσο, η δημιουργία και η λειτουργία ενός RBF δικτύου σύμφωνα με αυτή την τακτική, στο παρόν πρόβλημα, παρουσιάζει ελαττώματα.

Το πρώτο πρόβλημα σχετίζεται με το πλήθος των μεταβλητών σχεδιασμού του προβλήματος. Το πλήθος των μεταβλητών σχεδιασμού όπως έχει περιγραφεί από τη διατύπωση του προβλήματος, είναι ίσο με το γινόμενο του αριθμού των μονάδων του συστήματος και των ωρών του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού. Επομένως, ειδικά σε προβλήματα πολλών μονάδων και πολλών ωρών, το πλήθος των μεταβλητών σχεδιασμού είναι ιδιαίτερα μεγάλο. Άρα εξίσου μεγάλο είναι και το πλήθος των μεταβλητών εισόδου του RBF δικτύου. Στο σημείο αυτό εντοπίζεται ένα βασικό πρόβλημα. Τα RBF δίκτυα χαρακτηρίζονται από ανακριβή απόκριση όταν το

πλήθος των μεταβλητών εισόδου είναι ιδιαίτερα μεγάλο (δημιουργείται «θόρυβος» στην απόκριση του δικτύου – εκτός, βέβαια, αν υπάρξει ένα πολύ μεγάλο δείγμα εκπαίδευσης, κάτι που σαφώς θα επιμηκύνει και το χρόνο εκπαίδευσης του δικτύου). Το δεύτερο πρόβλημα έχει να κάνει με τη φύση των μεταβλητών σχεδιασμού του προβλήματος. Οι μεταβλητές σχεδιασμού είναι οι μεταβλητές κατάστασης  $s$  και οι τιμές που λαμβάνουν είναι δυαδικές (μόνο 0 και 1). Εδώ εντοπίζεται ένα ακόμη πρόβλημα, καθώς τα RBF δίκτυα δεν μπορούν να λειτουργήσουν με δυαδικές μεταβλητές εισόδου (δεν μπορούν από δυαδικές μεταβλητές να παράγουν πραγματική απόκριση). Γίνεται λοιπόν σαφές ότι δεν είναι δυνατή η δημιουργία ενός RBF δικτύου με βάση τη συνήθη τακτική, στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη πιθανοτικές βλάβες.

## 5.2 Μέθοδος δημιουργίας μεταπρότυπου με RBF νευρωνικό δίκτυο

Η μέθοδος που προτείνεται για να ξεπεραστούν τα προβλήματα που αναφέρθηκαν έχει προταθεί στη δημοσίευση [26]. Η μέθοδος συνίσταται στα εξής βήματα:

Βήμα 1: Επιλέγεται το πλήθος των μεταβλητών εισόδου του RBF νευρωνικού δικτύου  $n_{RBF}$ . Έχει επιλεγεί το μέγεθος του δείγματος Monte-Carlo που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του μέσου εκτιμώμενου κόστους λειτουργίας, και έχουν καταστρωθεί οι χρονοσειρές βλαβών-επισκευών όλων των μελών του δείγματος.

Βήμα 2: Γίνεται η επιλογή των  $n_{RBF}$  σεναρίων του δείγματος που είναι τα πιο αντιπροσωπευτικά. Στη συνέχεια θα αναπτυχθούν δύο μέθοδοι επιλογής των αντιπροσωπευτικών σεναρίων.

Βήμα 3: Υπολογίζονται οι τιμές του ολικού κόστους λειτουργίας της υποψήφιας λύσης στα  $n_{RBF}$  σενάρια που έχουν επιλεγεί. Οι τιμές αυτές αποτελούν τις τιμές των μεταβλητών εισόδου του RBF δικτύου. Ως απόκριση του δικτύου λαμβάνεται η τιμή του εκτιμώμενου ολικού κόστους λειτουργίας του συνόλου των σεναρίων που απαρτίζουν το δείγμα της μεθόδου Monte-Carlo.

Για να δημιουργηθεί το μεταπρότυπο, οι υποψήφιας λύσεις των δύο πρώτων γενεών αξιολογούνται πλήρως σε όλα τα σενάρια του δείγματος Monte-Carlo. Για κάθε υποψήφια λύση αποθηκεύεται σε βάση δεδομένων η τιμή του μέσου ή εκτιμώμενου ολικού κόστους λειτουργίας (ETOC) και οι τιμές του ολικού κόστους λειτουργίας για τα  $n_{RBF}$  αντιπροσωπευτικά σενάρια. Από αυτή τη βάση δεδομένων εκπαιδεύεται ένα RBF νευρωνικό δίκτυο με τη μέθοδο του περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.

Σύμφωνα με τη μέθοδο της προσεγγιστικής προαξιολόγησης, μετά τη δημιουργία του μεταπρότυπου όλες οι λύσεις αξιολογούνται με το μεταπρότυπο και οι καλύτερες κάθε γενιά αξιολογούνται ξανά με το λογισμικό πλήρους αξιολόγησης (πλήρες δείγμα Monte-Carlo). Οι λύσεις που αξιολογούνται με χρήση του πλήρους λογισμικού αξιολόγησης αποτελούν και νέα μέλη στη βάση δεδομένων (αν δεν υπάρχουν ήδη σε αυτή) και μπορούν να επιλεγούν ως κέντρα εκπαίδευσης του RBF νευρωνικού δικτύου. Το δίκτυο εκπαιδεύεται πριν από κάθε χρήση του για να επιλέγει τα καταλληλότερα μέλη της βάσης δεδομένων ως κέντρα εκπαίδευσης και για να παρακολουθεί και τη διαδικασία σύγκλισης του αλγορίθμου χωρίς να στερείται σε ακρίβεια.

Για να λειτουργήσει το μεταπρότυπο πρέπει να επιλεγούν οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία του RBF νευρωνικού δικτύου. Αυτές είναι η μορφή της συνάρτησης ενεργοποίησης, η τιμή της ακτίνας (radius) και το πλήθος των κέντρων εκπαίδευσης. Οι παράμετροι αυτές όπως αναφέρθηκε ρυθμίζονται ξεχωριστά για κάθε πρόβλημα. Πέρα από αυτές τις παραμέτρους, με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε προκύπτει μία ακόμη παράμετρος που είναι ελεύθερη να ορισθεί. Η παράμετρος αυτή αφορά στο πλήθος των μεταβλητών εισόδου του νευρωνικού δικτύου  $n_{RBF}$  που συμπίπτει με το πλήθος των σεναρίων του δείγματος Monte-Carlo που επιλέγονται ως αντιπροσωπευτικά. Εδώ επικρατούν δύο αντικρουόμενες τάσεις. Η μία επιβάλλει μεγάλο πλήθος αντιπροσωπευτικών σεναρίων για να απεικονίζεται καλύτερα η επίδραση κάθε σεναρίου στην τιμή του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας. Θεωρητικά αν χρησιμοποιούνταν οι τιμές του ολικού κόστους λειτουργίας σε όλα τα σεναρία του δείγματος Monte-Carlo, η απόκριση του δικτύου θα ήταν ουσιαστικά η μέση τιμή των τιμών των μεταβλητών εισόδου. Ωστόσο μία τέτοια επιλογή θα είχε το ίδιο υπολογιστικό κόστος με την πλήρη αξιολόγηση της λύσης. Έτσι προκύπτει η δεύτερη τάση που επιβάλλει όσο το δυνατόν μικρότερο πλήθος αντιπροσωπευτικών σεναρίων για να μην αυξάνεται υπερβολικά το υπολογιστικό κόστος. Άλλωστε για να προκύψουν οι τιμές του ολικού κόστους λειτουργίας σε καθένα από τα αντιπροσωπευτικά σεναρία χρειάζεται να γίνει αξιολόγηση της λύσης στα σεναρία αυτά. Μία καλή επιλογή είναι να χρησιμοποιηθούν περίπου 10 αντιπροσωπευτικά σεναρία, τα οποία όμως θα έχουν επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αντιπροσωπεύουν όσο το δυνατόν καλύτερα την επίδραση όλων των σεναρίων στην τιμή του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας. Επομένως, ένα θέμα που προκύπτει είναι το κριτήριο επιλογής των αντιπροσωπευτικών σεναρίων. Σχετικά με αυτό αναπτύσσονται στην επόμενη παράγραφο δύο προτεινόμενες τεχνικές.

### 5.3 Μέθοδοι επιλογής των αντιπροσωπευτικών σεναρίων

Στην παράγραφο αυτή προτείνονται δύο μέθοδοι επιλογής των αντιπροσωπευτικών σεναρίων προκειμένου να συσταθεί μεταπρότυπο με τη μέθοδο που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Σημειώνεται ότι η επιλογή των αντιπροσωπευτικών σεναρίων είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί από αυτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η ακρίβεια του μεταπρότυπου. Η πρώτη μέθοδος βασίζεται στην κατάταξη των σεναρίων με βάση την τιμή του ολικού κόστους λειτουργίας, ενώ η δεύτερη βασίζεται στη απόσταση των δυαδικών στοιχειοσειρών (Hamming distance) των σεναρίων.

#### 5.3.1 Επιλογή αντιπροσωπευτικών σεναρίων με βάση τη μέθοδο της κατάταξης

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή επιλέγεται μία υποψήφια λύση (συνήθως αυτή που προκύπτει ως «βέλτιστη» από τη βελτιστοποίηση του αδρομερούς επιπέδου) και, με βάση αυτήν και τα σεναρία βλαβών όπως εκφράζονται από τις σχετικές πιθανότητες, δημιουργείται ένα πλήρες δείγμα Monte-Carlo (MC το πλήθος σεναρία). Στη συνέχεια, η λύση αυτή αξιολογείται σε όλα τα σεναρία του δείγματος και προκύπτουν οι τιμές του ολικού κόστους λειτουργίας για όλα τα σεναρία. Τα σεναρία κατατάσσονται σε αύξουσα σειρά με βάση την τιμή του ολικού κόστους που εμφανίζουν. Από αυτά επιλέγεται να κρατηθούν μόνο τα σεναρία που εμφανίζουν διαφορετικές τιμές του ολικού κόστους λειτουργίας. Τα σεναρία που έχουν απομείνει χωρίζονται σε  $n_{RBF}$  (αν είναι δυνατό ισοπληθείς) κλάσεις και από κάθε κλάση επιλέγεται ο αριθμητικός μέσος. Το αποτέλεσμα είναι να επιλεγούν  $n_{RBF}$  σεναρία τα οποία αντιπροσωπεύουν όσο καλύτερα γίνεται το πλήρες δείγμα των MC σεναρίων. Πρέπει να σημειωθεί ότι παρά την απλότητα της μεθόδου αυτής βασικό της μειονέκτημα είναι ότι η επιλογή των σεναρίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υποψήφια λύση που χρησιμοποιείται για να γίνει η εφαρμογή της. Αν χρησιμοποιηθεί άλλη λύση θα προκύψουν άλλες τιμές ολικού κόστους λειτουργίας για κάθε σεναριο και κατά συνέπεια θα επιλεγούν άλλα σεναρία ως αντιπροσωπευτικά.

#### 5.3.2 Επιλογή αντιπροσωπευτικών σεναρίων με βάση την απόσταση των δυαδικών στοιχειοσειρών

Όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4 κάθε μέλος του δείγματος Monte-Carlo αντιπροσωπεύεται από μία χρονοσειρά βλαβών-επισκευών η οποία είναι μία δυαδική στοιχειοσειρά. Ορίζεται η απόσταση δύο δυαδικών στοιχειοσειρών ως το πλήθος των δυαδικών ψηφίων που διαφέρουν. Έστω δύο δυαδικές στοιχειοσειρές μήκους  $i$  ψηφίων όπως φαίνεται ακολούθως. Η απόστασή τους (hamming distance,  $h_d$ ) υπολογίζεται με βάση τη σχέση 5.3.2.1.

Στοιχειοσειρά 1:  $bit1_1 bit1_2 bit1_3 \dots bit1_i$

Στοιχειοσειρά 2:  $bit1_1 bit1_2 bit1_3 \dots bit1_i$

$$h\_d = \sum_{j=1}^i |bit1_j - bit2_j| \quad (5.3.2.1)$$

Με τον τρόπο αυτό δύο ίδιες στοιχειοσειρές έχουν μεταξύ τους μηδενική απόσταση  $h\_d$ . Η μέθοδος επιλογής των αντιπροσωπευτικών σεναρίων περιγράφεται από τα επόμενα βήματα.

Βήμα 1: Δημιουργείται ένα πλήρες δείγμα Monte-Carlo με τη μέθοδο που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4, το οποίο αποτελείται από MC σενάρια καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύεται από μία χρονοσειρά βλαβών-επισκευών. Στα επόμενα βήματα όταν θα αναφερόμαστε σε σενάριο θα εννοούμε τη χρονοσειρά βλαβών-επισκευών που αντιστοιχεί στο σενάριο. Επιπλέον επιλέγεται μία αρχική τιμή ελάχιστης απόστασης  $d_{\min}$  της οποίας η χρησιμότητα θα φανεί στη συνέχεια.

Βήμα 2: Ξεκινώντας από το πρώτο σενάριο (καμία βλάβη) υπολογίζεται η απόσταση κάθε σεναρίου με όσα έπονται αυτού στο δείγμα. Αν η απόσταση προκύψει μηδέν τότε το σενάριο που έπεται βγαίνει εκτός επιλογής. Το ίδιο συμβαίνει όταν η απόσταση προκύψει μικρότερη από  $d_{\min}$ . Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται ο υπολογισμός των αποστάσεων όλων των δυνατών συνδυασμών σεναρίων μεταξύ τους που θα ήταν εξαιρετικά χρονοβόρα, αφού το πλήθος του δείγματος είναι συνήθως μεγάλο. Το αποτέλεσμα είναι να μείνουν πιθανά για επιλογή τα σενάρια που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ τους.

Βήμα 3: Αν το πλήθος των σεναρίων που έχουν απομείνει είναι μεγαλύτερο από  $n_{RBF}$ , τότε αυξάνεται κατά μία ακέραια μονάδα η τιμή της απόστασης  $d_{\min}$ . Εάν το πλήθος είναι μικρότερο, τότε μειώνεται κατά μία μονάδα η απόσταση  $d_{\min}$ . Και στις δύο περιπτώσεις ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 2. Εάν το πλήθος των σεναρίων που απομένουν είναι το επιθυμητό, τότε ο αλγόριθμος τερματίζει.

Η μέθοδος αυτή δεν εξασφαλίζει την επιλογή  $n_{RBF}$  ακριβώς σεναρίων γιατί μπορεί δύο διαφορετικά σενάρια όταν συγκριθούν με ένα τρίτο να εμφανίζουν την ίδια απόσταση. Για το λόγο αυτό από τα σενάρια που επιλέγονται κρατάμε μόνο τα  $n_{RBF}$ . Άλλωστε τα τελευταία σενάρια που θα μπορούσαν να επιλεγθούν είναι αυτά που θα εμφάνιζαν τη μικρότερη απόσταση από τα υπόλοιπα και επομένως, τα λιγότερο αντιπροσωπευτικά.

Από τον τρόπο που περιγράφηκε αυτή η μέθοδος φαίνεται ότι είναι σαφώς πιο πολύπλοκη από τη μέθοδο της κατάταξης και αν δεν προγραμματιστεί κατάλληλα εμφανίζει και μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος. Ωστόσο, αν προγραμματιστεί

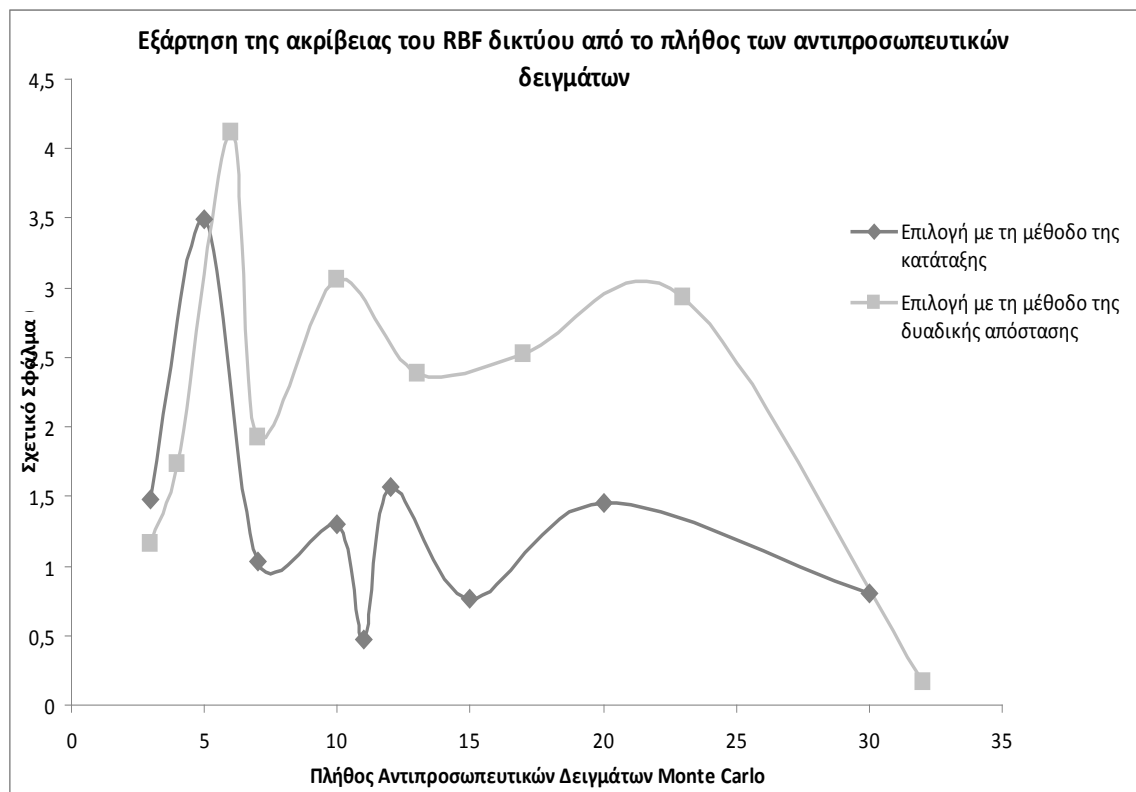
«έξυπνα» μπορεί να εμφανίσει μικρότερο υπολογιστικό κόστος από τη μέθοδο της κατάταξης γιατί δεν απαιτεί καμία αξιολόγηση με τη μέθοδο Monte-Carlo. Μοναδική απαίτηση είναι να δημιουργηθεί ένα δείγμα σεναρίων Monte-Carlo. Από αυτό το χαρακτηριστικό προκύπτει και το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου σε σχέση με τη μέθοδο της κατάταξης. Η επιλογή των σεναρίων δεν επηρεάζεται από τίποτα άλλο πέρα από τα ίδια τα σεναρία του δείγματος, οπότε τα σεναρία που επιλέγονται θα συνεχίσουν να είναι τα πιο αντιπροσωπευτικά του δείγματος (με βάση την απόσταση των δυαδικών στοιχειοσειρών), ανεξάρτητα από τη λύση που αξιολογείται κάθε φορά.

#### **5.4 Πρακτικά θέματα και εφαρμογές των μεθόδων επιλογής αντιπροσωπευτικών σεναρίων**

Στην παράγραφο αυτή θα υποθεθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής 2 μονάδων για 24ώρες χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού. Οι ρυθμοί αστοχίας και επισκευής θα αυξηθούν ώστε να γίνει καλύτερη εποπτεία της μεθόδου. Έτσι χρησιμοποιείται μέσος χρόνος μέχρι αστοχίας ίσος με 200 ώρες και μέση διάρκεια μίας επισκευής ίση με 7 ώρες. Με βάση αυτά τα στοιχεία και τον αλγόριθμο που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4 παράγονται 4000 σεναρία λειτουργίας (χρονοσειρές βλαβών-επισκευών) που αποτελούν το πλήρες δείγμα Monte-Carlo. Επιλέγεται μία υποψήφια λύση στην οποία εφαρμόζεται η τεχνική της κατάταξης των σεναρίων και επιλέγονται τα αντιπροσωπευτικά σεναρία. Στη συνέχεια αξιολογείται ένα σχετικά μεγάλο πλήθος λύσεων στο πλήρες δείγμα Monte-Carlo και τα ολικά κόστη λειτουργίας των αντιπροσωπευτικών σεναρίων μαζί με το μέσο ολικό κόστος λειτουργίας κάθε λύσης αποθηκεύονται σε μία βάση δεδομένων. Από αυτή τη βάση δεδομένων εκλέγονται τα κέντρα εκπαίδευσης του RBF δικτύου. Αφού εκπαιδευτεί το δίκτυο χρησιμοποιείται για την προσεγγιστική αξιολόγηση μίας λύσης που δεν περιέχεται στη βάση δεδομένων. Τέλος, η λύση αυτή αξιολογείται στο πλήρες δείγμα Monte-Carlo και συγκρίνονται τα αποτελέσματα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για διάφορα πλήθη αντιπροσωπευτικών σεναρίων.

Η ίδια τακτική ακολουθείται και για τη μέθοδο επιλογής των αντιπροσωπευτικών σεναρίων με βάση την απόσταση των δυαδικών στοιχειοσειρών. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας παρουσιάζονται στο σχήμα 5.4.1.1. Η μία καμπύλη αντιστοιχεί στη μέθοδο της κατάταξης, ενώ η άλλη στη μέθοδο της επιλογής με βάση την απόσταση δυαδικών στοιχειοσειρών. Παρατηρούμε ότι η μέθοδος της κατάταξης παρουσιάζει μικρότερο σφάλμα στην πρόβλεψη της τιμής του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας για τη δεδομένη υποψήφια λύση που εξετάζεται. Η μέθοδος της επιλογής με βάση την απόσταση των δυαδικών στοιχειοσειρών παρουσιάζει μεγαλύτερα σφάλματα για τη δεδομένη υποψήφια λύση. Ωστόσο όταν τα σεναρία που έχουν επιλεγεί

χρησιμοποιηθούν ως αντιπροσωπευτικά σε κάποια άλλη λύση, τότε είναι πιθανό η μέθοδος της κατάταξης να εμφανίζει μεγαλύτερα σφάλματα. Έτσι, η μέθοδος της κατάταξης εφ' όσον βασίζεται και στα χαρακτηριστικά του προβλήματος επιτυγχάνει καλύτερη επιλογή σεναρίων για μία υποψήφια λύση, όμως η επιλογή με βάση την απόσταση των δυαδικών στοιχειοσειρών επιτυγχάνει επιλογή σεναρίων ανεξάρτητη της λύσης που αξιολογείται κάθε φορά. Στο σχήμα 5.4.1 παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το πλήθος των αντιπροσωπευτικών σεναρίων και οι δύο μέθοδοι τείνουν να σταθεροποιηθούν γύρω από μία σταθερή τιμή σχετικού σφάλματος. Όμως όσο αυξάνεται το πλήθος των αντιπροσωπευτικών σεναρίων, τόσο αυξάνεται το κόστος κάθε προσεγγιστικής προαξιολόγησης με χρήση του μεταπροτύπου, όπως ήδη περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Επομένως, η επιλογή του πλήθους των αντιπροσωπευτικών σεναρίων πρέπει να γίνει με ένα συμβιβασμό ανάμεσα στην ακρίβεια του μεταπροτύπου και στο υπολογιστικό κόστος χρήσης του.



**Σχήμα 5.4. 1:** Στο σχήμα φαίνεται το σχετικό σφάλμα της εκτίμησης του RBF δικτύου για την τιμή του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας (ETOC) μίας υποψήφιας λύσης συναρτήσει του πλήθους των αντιπροσωπευτικών σεναρίων, όπως προκύπτει από εφαρμογή των δύο μεθόδων επιλογής αντιπροσωπευτικών σεναρίων που περιγράφηκαν στην παράγραφο 5.3. Το πλήθος των κέντρων εκπαίδευσης του RBF δικτύου λαμβάνεται κάθε φορά ίσο με περίπου 150% του πλήθους των αντιπροσωπευτικών σεναρίων (χωρίς αυτό να είναι υποχρεωτικό). Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο σχήμα ισχύουν μόνο για τη συγκεκριμένη υποψήφια λύση που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή τους και επομένως δεν μπορούν να γενικευτούν, ειδικά σε ότι αφορά στη σύγκριση της ακρίβειας των δύο μεθόδων.





## 6. Εφαρμογές

### 6.1 Βελτιστοποίηση του προγράμματος λειτουργίας σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δύο μονάδων για χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού μίας εβδομάδας.

Στην εφαρμογή αυτή θα εξετασθεί η περίπτωση της βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής δύο μονάδων για μία εβδομάδα. Σύμφωνα με τον προτεινόμενο αλγόριθμο, η βελτιστοποίηση ξεκινά πρώτα στο αδρομερές επίπεδο, με χρήση της τεχνικής Διάσχισης-Διαχώρισης (BnB) και με χρήση εξελικτικού αλγορίθμου. Στην επίλυση του αδρομερούς επιπέδου δεν λαμβάνονται υπόψη πιθανοτικές βλάβες των μονάδων και, επομένως, σε αυτό το επίπεδο ειδικά, δεν απαιτείται να γίνει προσομοίωση Monte-Carlo. Στη συνέχεια, η λύση που προκύπτει από το αδρομερές επίπεδο εισάγεται στο λεπτομερές επίπεδο επίλυσης. Στο επίπεδο αυτό γίνεται χρήση ενός κατατετμημένου εξελικτικού αλγορίθμου. Για την ακρίβεια επιλύεται ένας εξελικτικός αλγόριθμος για κάθε μέρα ξεχωριστά (άρα η χρονική διάρκεια μιας μέρας καθορίζει την κατάτμηση) και η τελική σύνθεση των λύσεων που προέκυψαν για τις 7 μέρες δίνει τη λύση για έναν κύκλο βελτιστοποίησης. Στο λεπτομερές επίπεδο λαμβάνονται υπόψη και πιθανοτικές βλάβες, αφού από αυτό θα προκύψει η τελική λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Για να ληφθούν υπόψη πιθανοτικές βλάβες, γίνεται χρήση της μεθοδολογίας Monte-Carlo. Για να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος χρησιμοποιείται η τεχνική της προσεγγιστικής προαξιολόγησης με χρήση μεταπροτύπου, όπως προτείνεται στην εργασία αυτή και περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3 και στο κεφάλαιο 5. Μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων και της διαδικασίας σύγκλισης του αλγορίθμου, γίνεται αξιολόγηση του αλγορίθμου και της λειτουργίας του.

#### 6.1.1 Περιγραφή του συστήματος

Το σύστημα που μελετάται αποτελείται από δύο μονάδες αεριοστρόβιλων παράγωγων αεροπορικών κινητήρων. Οι μονάδες αυτές είναι ένας αεριοστρόβιλος LM2500+ και ένας αεριοστρόβιλος LM6000PC Sprint, και οι δύο της εταιρείας General Electric. Τα χαρακτηριστικά των μονάδων παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2 σε αντίστοιχες παραγράφους. Στον ακόλουθο πίνακα 6.1.1.1 παρουσιάζεται η αντιστοίχιση κάθε μονάδας με το μοντέλο αεριοστρόβιλου που χρησιμοποιείται και ο πίνακας στον οποίο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του μοντέλου που είναι απαραίτητα για τη βελτιστοποίηση.

	Μοντέλο Αεριοστρόβιλου	Πίνακας Χαρακτηριστικών
<b>Μονάδα 1</b>	LM6000PC Sprint	Πίνακας 2.2.1.4
<b>Μονάδα 2</b>	LM2500+	Πίνακας 2.2.2.2

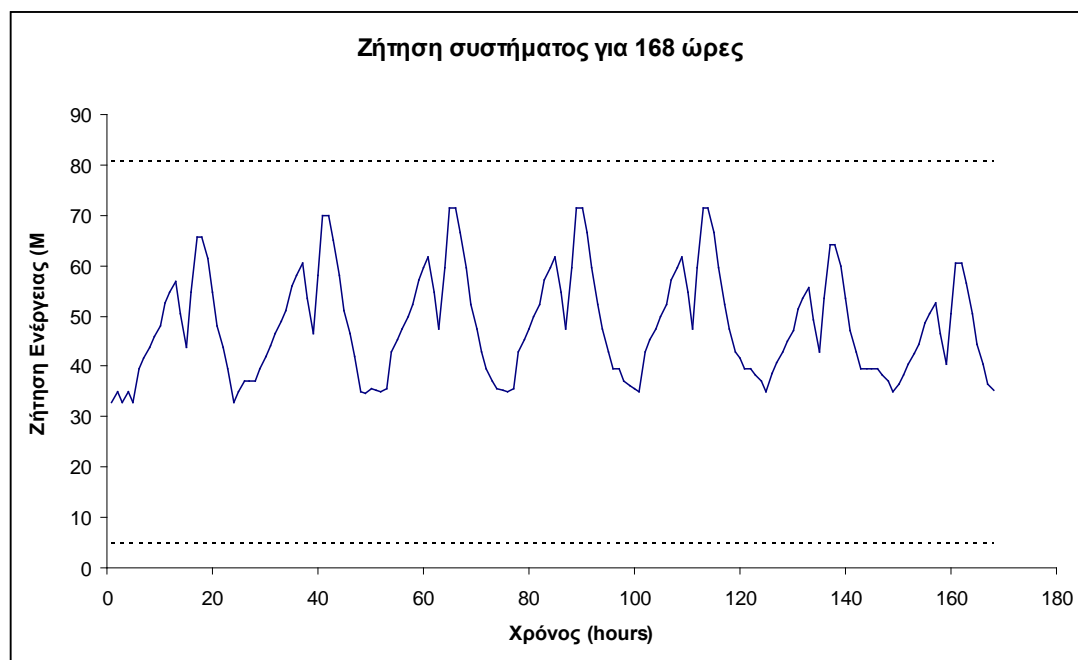
**Πίνακας 6.1.1. 1:** Μοντέλο αεριοστρόβιλου που χρησιμοποιείται σε κάθε μονάδα και πίνακας του κεφαλαίου 2 που περιλαμβάνει τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε μοντέλου που είναι απαραίτητα για τη βελτιστοποίηση.

Στα σχήματα 2.2.1.5 και 2.2.2.4 παρουσιάζονται τα πολυώνυμα κατανάλωσης καυσίμου – παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος για την πρώτη και τη δεύτερη μονάδα του συστήματος αντίστοιχα.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης Monte-Carlo, απαιτείται να είναι διαθέσιμες οι τιμές του ρυθμού αστοχίας και του ρυθμού επισκευής των μονάδων. Για το ρυθμό αστοχίας των μονάδων επιλέγεται η (κοινή) τιμή  $\lambda_f = 0,00025$  που αντιστοιχεί σε μέσο χρόνο μέχρι αστοχίας 4000 ώρες λειτουργίας. Ο ρυθμός επισκευής λαμβάνεται και αυτός ίδιος και για τις δύο μονάδες και ίσος με  $\mu_{rep} = 0,0417$  που αντιστοιχεί σε μέσο χρόνο επισκευής ίσο με 24 ώρες. Οι τιμές αυτές έχουν επιλεγεί ώστε να ανταποκρίνονται όσο το δυνατόν καλύτερα στην πραγματικότητα, αλλά και να αφήνουν τα περιθώρια εμφάνισης βλάβης στις 168 ώρες του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού, για να μπορεί να γίνει εποπτεία της λειτουργίας της μεθόδου. Το μόνο δεδομένο ακόμα που χρειάζεται να ορισθεί για το σύστημα είναι το παρελθόν λειτουργίας των μονάδων. Για την πρώτη μονάδα θεωρούμε ότι βρίσκεται σε κατάσταση παραγωγής (ON) για 8 ώρες πριν την έναρξη του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού, ενώ το παρελθόν λειτουργίας της δεύτερης μονάδας λαμβάνεται ελεύθερο. Αυτό σημαίνει ότι η κατάσταση της δεύτερης 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.

Εκτός από τα στοιχεία του συστήματος των μονάδων που έχουν ήδη ορισθεί, βασικό δεδομένο της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι η ζήτηση του συστήματος που πρέπει να καλύπτεται. Στην περίπτωση που μελετάται, η ζήτηση εκτείνεται σε χρονικό ορίζοντα 168 ωρών (μια εβδομάδα) και παρουσιάζεται συναρτήσει του χρόνου στο σχήμα 6.1.1.1. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της ζήτησης σε ενέργεια δεν ξεπερνά το άθροισμα των τεχνικών μεγίστων των μονάδων (80,5MW), ενώ η ελάχιστη τιμή της είναι μεγαλύτερη από το μικρότερο από τα τεχνικά ελάχιστα των δύο μονάδων (5MW). Η απαίτηση αυτή ελέγχεται, αν και είναι προφανές ότι πρέπει να καλύπτεται σε πραγματικά συστήματα αφού η επιλογή της δυναμικότητας (άρα και του μοντέλου μηχανής) των μονάδων γίνεται βάση στατιστικών στοιχείων που αναφέρονται στη ζήτηση του συστήματος. Τέλος, παρατηρούμε ότι η ζήτηση

ακολουθεί την προβλεπόμενη μορφή, που παρουσιάζει αιχμές κατά τις μεσημεριανές ώρες και κατά τις βραδινές, όπως περιγράφηκε προηγουμένως και στην παράγραφο 2.3. Να σημειωθεί ότι τα δύο τελευταία 24ωρα διαφοροποιούνται ελαφρώς, γιατί αυξάνεται η ζήτηση λίγο περισσότερο τις πρώτες πρωινές ώρες (ξημερώματα Σαββάτου και Κυριακής), ενώ τις υπόλοιπες ώρες η ζήτηση είναι μικρότερη από τις προηγούμενες μέρες, εφ' όσον αρκετές υπηρεσίες που καταναλώνουν ενέργεια δε λειτουργούν κατά τη διάρκεια του σαββατοκύριακου.

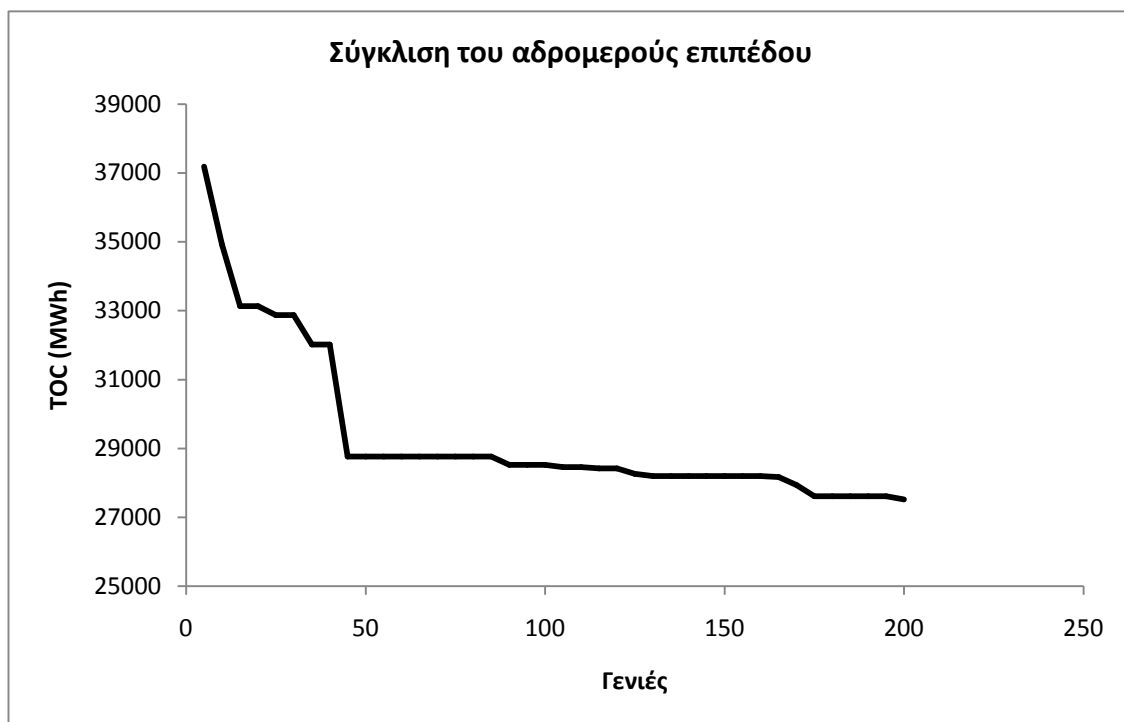


**Σχήμα 6.1.1. 1:** Χρονοσειρά ζήτησης για χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού 168 ώρες (μία εβδομάδα). Στο σχήμα φαίνονται τα χαρακτηριστικά της ζήτησης όπως περιγράφηκαν στην παράγραφο που προηγήθηκε. Οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν το τεχνικό μέγιστο και το τεχνικό ελάχιστο του σταθμού που αποτελείται από τις δύο μονάδες.

### 6.1.2 Βελτιστοποίηση

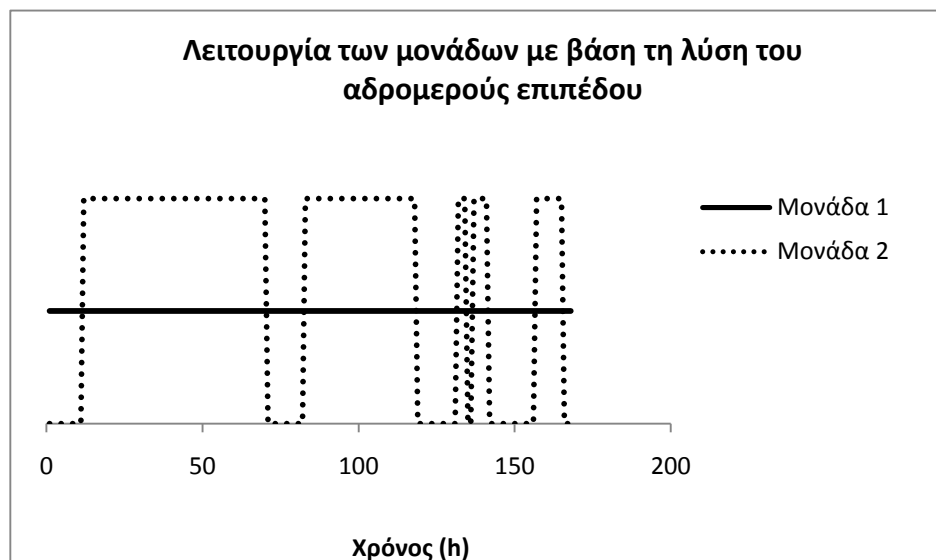
Η βελτιστοποίηση γίνεται με χρήση του διεπίπεδου εξελικτικού αλγορίθμου που προτείνεται από τη διδακτορική διατριβή [1]. Αρχικά γίνεται χρήση της μεθόδου Διάσχισης-Διαχώρισης (BnB) και μετά επιλύεται το πρόβλημα μέσω εξελικτικού αλγορίθμου στο αδρομερές επίπεδο. Πριν αρχίσει η βελτιστοποίηση μέσω του εξελικτικού αλγορίθμου, ομαδοποιούνται οι 168 ώρες του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού σε 30 ομάδες. Το αποτέλεσμα είναι να προκύψει ένα σημαντικά μικρότερο χρωμόσωμα που πρέπει να διαχειριστεί ο εξελικτικός αλγόριθμος ( $30 \times 2 = 60$  δυαδικά ψηφία αντί για  $168 \times 2 = 336$ ). Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη βελτιστοποίηση στο αδρομερές επίπεδο, δεν λαμβάνονται υπόψη πιθανοτικές βλάβες. Αυτό επιλέγεται, γιατί ο σκοπός της βελτιστοποίησης στο σημείο αυτό είναι να αποκτηθεί μία αρκετά καλή λύση με χαμηλό υπολογιστικό κόστος, η οποία θα εισαχθεί στην συνέχεια στο ακριβέστερο αλλά και πιο δαπανηρό

υπολογιστικά, λεπτομερές επίπεδο. Η βελτιστοποίηση είναι μονοκριτηριακή και στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της τιμής του ολικού κόστους λειτουργίας (TOC). Μετά τη χρήση της μεθόδου Διάσχισης-Διαχώρισης λαμβάνεται λύση με τιμή ολικού κόστους λειτουργίας ίση με  $TOC_{BnB} = 37645,63MWh$ . Η λύση αυτή εισάγεται στον εξελικτικό αλγόριθμο που πραγματοποιεί τη βελτιστοποίηση του αδρομερούς επιπέδου. Ο εξελικτικός αλγόριθμος για το αδρομερές επίπεδο ύστερα από 200 γενιές και 11514 αξιολογήσεις, έδωσε λύση με ολικό κόστος λειτουργίας ίσο με  $TOC_{course} = 27518,83MWh$ . Από κάθε γενιά επιλέγονται 40 γονείς και παράγονται από αυτούς 60 απόγονοι. Η πιθανότητα διασταύρωσης λαμβάνεται ίση με 0,9 ενώ η πιθανότητα μετάλλαξης σε κάθε ψηφίο του χρωμοσώματος ίση με 0,05. Από κάθε γενιά προκύπτει ένας επίλεκτος (ελίτ – αναφέρεται γιατί, αν και είναι σύνηθες στα μονοκριτηριακά προβλήματα να αναφερόμαστε μόνο σε έναν επίλεκτο, ο παρόν αλγόριθμος γενικά επιτρέπει να χρησιμοποιούνται και άνω του ενός, κάτι που υπό προϋποθέσεις μπορεί να διευκολύνει την ταχύτερη σύγκλιση του), ο οποίος αποτελεί αυτόματα και ένα από τα μέλη της επόμενης γενιάς. Η διαδικασία σύγκλισης του αλγορίθμου στη βέλτιστη λύση για το αδρομερές επίπεδο παρουσιάζεται στο σχήμα 6.1.2.1.



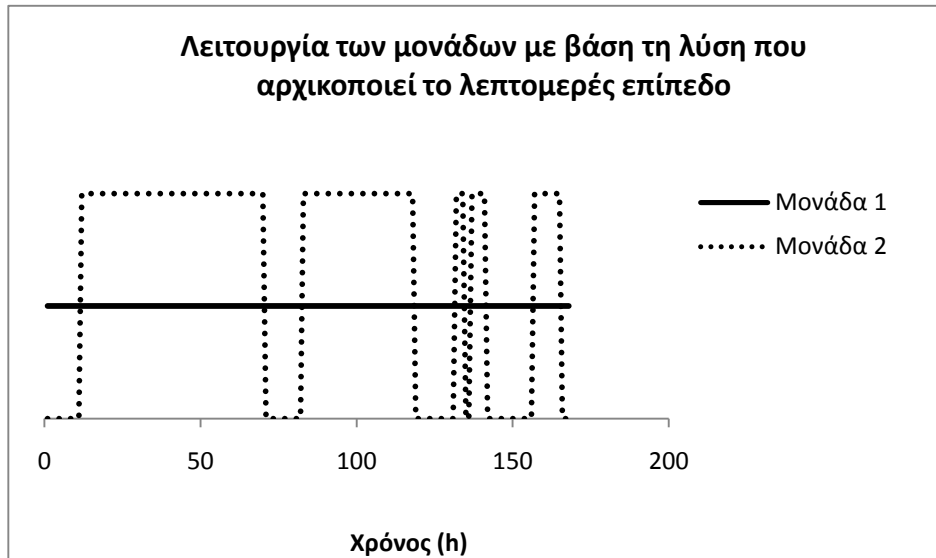
**Σχήμα 6.1.2. 1:** Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται η σύγκλιση του εξελικτικού αλγορίθμου κατά τη βελτιστοποίηση στο αδρομερές επίπεδο. Η λύση που ανιχνεύεται δεν είναι απαραίτητα (γενικά, μάλιστα, σχεδόν ποτέ δεν είναι) η βέλτιστη, αλλά μία συμβιβαστική λύση με χαμηλό υπολογιστικό κόστος που θα χρησιμοποιηθεί για να αρχικοποιηθεί τη βελτιστοποίηση του λεπτομερούς επιπέδου.

Η λύση του αδρομερούς επιπέδου εμφανίζεται στο σχήμα 6.1.2.2, όπου φαίνονται οι καταστάσεις των δύο μονάδων χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι λειτουργικοί περιορισμοί (επιλογή που γίνεται πάντα κατά την επίλυση του αδρομερούς επιπέδου).



**Σχήμα 6.1.2. 2:** Στο σχήμα παρουσιάζονται σχηματικά οι καταστάσεις των μονάδων από τη λύση που προκύπτει από το αδρομερές επίπεδο (Η μονάδα 1 που αντιπροσωπεύεται από μία συνεχόμενη ευθεία λειτουργεί συνεχώς, ενώ η μονάδα 2 λειτουργεί μόνο τις ώρες που υπερψώνεται η καμπύλη που της αντιστοιχεί).

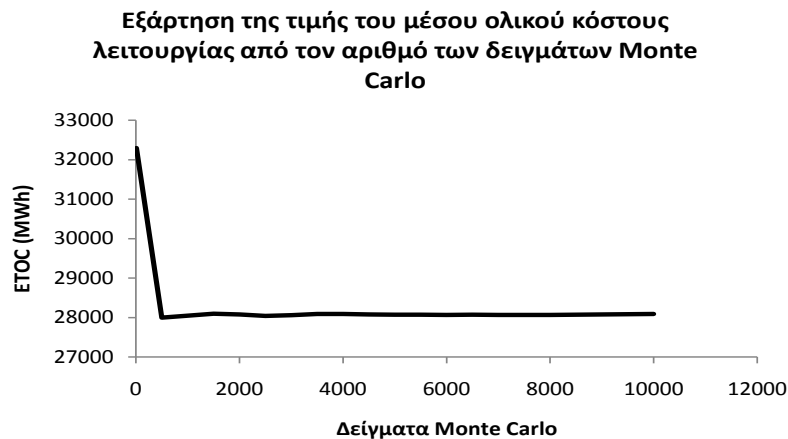
Στη συνέχεια το χρωμόσωμα που αντιστοιχεί στη λύση του αδρομερούς επιπέδου αναπτύσσεται στο πλήρες μέγεθός του (336 ψηφία, δηλαδή για μια εβδομάδα με ωριαία ανάλυση) και αξιολογείται ως πλήρης λύση χωρίς να λαμβάνονται και πάλι υπόψη πιθανοτικές βλάβες. Αυτή τη φορά στον υπολογισμό λαμβάνονται υπόψη και οι περιορισμοί για τις μεταβατικές καταστάσεις των μονάδων και για τα επιπλέον κόστη που προκύπτουν από αυτές. Το ολικό λειτουργικό κόστος που προκύπτει είναι  $TOC_{fine\_ini} = 27583,83MWh$ . Η λύση αυτή προφανώς παρουσιάζει μεγαλύτερο ολικό κόστος λειτουργίας (αυξημένο κατά 5 φορές το κόστος μίας έναυσης και 5 φορές το κόστος μίας σβέσης της μονάδας 2), γιατί αυτή τη φορά προστίθενται και τα κόστη έναυσεων και σβέσεων. Η συνολική παραγωγή ενέργειας υπολείπεται κατά περίπου 10,21MWh σε σχέση με τη συνολική ζήτηση ενέργειας. Ο συντελεστής που επιβαρύνει τη μη κάλυψη της ζήτησης είναι 10MWh καυσίμου για κάθε MWh παραβίασης και επιπλέον προστίθεται και ένα πάγιο κόστος 300MWh για κάθε λύση που δεν ικανοποιεί τη ζήτηση. Τέλος, το σενάριο λειτουργίας των μονάδων για τη λύση που λαμβάνει υπόψη και τους περιορισμούς των μεταβατικών καταστάσεων των μονάδων παρουσιάζεται στο σχήμα 6.1.2.3.



**Σχήμα 6.1.2. 3:** Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται η λειτουργία των μονάδων (ON και OFF) για τη λύση που προέκυψε από το αδρομερές επίπεδο, αλλά λαμβάνονται και υπόψη οι περιορισμοί μετάβασης από τη μία κατάσταση στην άλλη. Η λύση αυτή θα αρχικοποιήσει επίσης το λεπτομερές επίπεδο. Παρατηρούμε ότι τηρούνται οι ελάχιστοι χρόνοι έναυσης σβέσης και παραμονής σε μία κατάσταση (αδράνειας). Στη λειτουργία της πρώτης μονάδας δεν έχουμε κάποια αλλαγή κατάστασης. Φαίνεται ότι στο συγκεκριμένο σύστημα, η πρώτη μονάδα λειτουργεί ως μονάδα βάσης και καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης, ενώ η δεύτερη λειτουργεί ως μονάδα αιχμής και καλύπτει τις αιχμές της ζήτησης.

Στο λεπτομερές επίπεδο θα γίνει βελτιστοποίηση στην οποία θα λαμβάνονται υπόψη πιθανοτικές βλάβες. Όπως ήδη έχει αναφερθεί αυτό επιτυγχάνεται με χρήση της μεθόδου Monte-Carlo, με βασικό μειονέκτημα το σημαντικά αυξημένο υπολογιστικό κόστος. Για να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος θα γίνει χρήση της τεχνικής της προσεγγιστικής προαξιολόγησης που περιγράφηκε σε προηγούμενα κεφάλαια. Στο σημείο αυτό πρέπει να επιλεγεί το πλήθος των σεναρίων που θα χρησιμοποιηθούν ως αντιπροσωπευτικά στη δημιουργία του μεταπροτύπου, και τα σενάρια τα ίδια (δηλαδή οι χρονοσειρές βλαβών – επισκευών που αντιστοιχούν σε αυτά). Επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν 11 αντιπροσωπευτικά σενάρια, από τα οποία το πρώτο θα αντιστοιχεί στην περίπτωση που δεν εμφανίζεται καμία βλάβη σε καμία από τις μονάδες μέσα στο χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού. Το μέγεθος του δείγματος Monte-Carlo που θα χρησιμοποιηθεί λαμβάνεται ίσο με 4000 δείγματα. Η επιλογή αυτή αιτιολογείται από το σχήμα 6.1.2.4 που φαίνεται η εξάρτηση της τιμής του εκτιμώμενου ή μέσου ολικού λειτουργικού κόστους της λύσης αρχικοποίησης του λεπτομερούς επιπέδου από το πλήθος των δειγμάτων Monte-Carlo. Για την επιλογή τα 4000 σενάρια κατηγοριοποιούνται σε 10 κατηγορίες (αφού το 1 σενάριο αντιστοιχεί στην περίπτωση χωρίς βλάβη και θα ληφθεί εξ' ορισμού ως αντιπροσωπευτικό) ανάλογα με την τιμή του ολικού κόστους λειτουργίας που εμφανίζουν (TOC) και επιλέγεται ένα από κάθε κατηγορία (ο αριθμητικός μέσος της κατηγορίας). Στην περίπτωση που μελετάται, τα σενάρια αυτά παρουσιάζουν τα

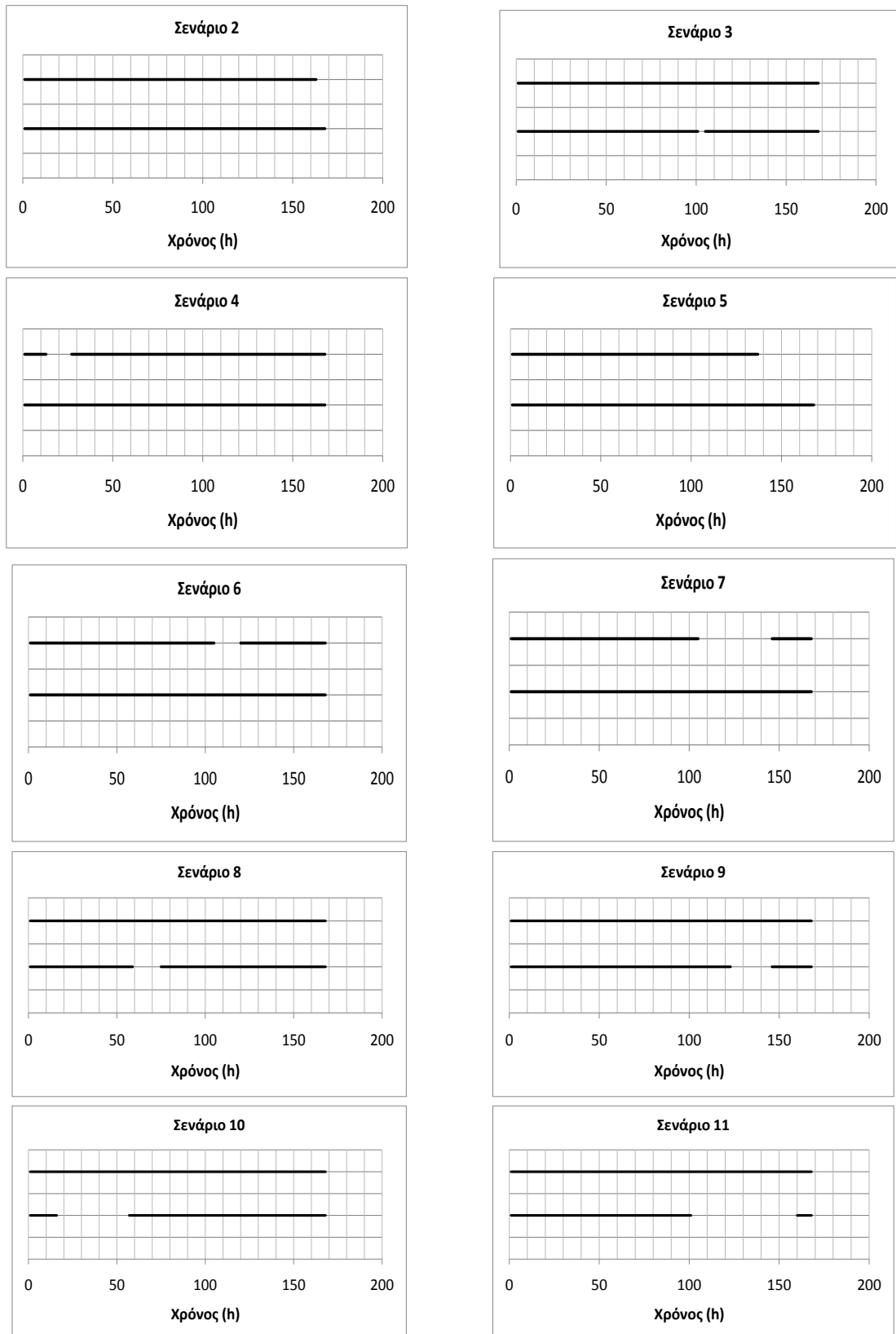
λειτουργικά κόστη λειτουργίας του παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1.2.1, ενώ η χρονοσειρές βλαβών επισκευών στις οποίες αντιστοιχούν παρουσιάζονται στο σχήμα 6.1.2.5. Σημειώνεται ότι η διαδικασία της επιλογής σεναρίων εφαρμόζεται στη λύση με την οποία θα αρχικοποιηθεί το λεπτομερές επίπεδο η οποία παρουσιάζει ολικό κόστος λειτουργίας ίσο με  $TOC_{fine\_ini} = 27583,83MWh$ .



**Σχήμα 6.1.2. 4:** Στο σχήμα παρουσιάζεται η εξάρτηση της τιμής του εκτιμώμενου ή μέσου ολικού κόστους λειτουργίας (ETOC) της λύσης που θα χρησιμοποιηθεί ως αρχικοποίηση του λεπτομερούς επιπέδου του αλγορίθμου από το μέγεθος του δείγματος Monte-Carlo. Φαίνεται ότι όταν το μέγεθος ξεπερνά τα 2000 σεσάρια η τιμή του ETOC παραμένει πρακτικά ίδια. Επομένως για ασφάλεια επιλέγεται για την προσομοίωση μέγεθος 4000 σεσάρια.

Αριθμός Αντιπροσωπευτικού Σεναρίου	Ολικό Κόστος Λειτουργίας (TOC)
1	27583,83
2	27798,74
3	28692,75
4	29345,11
5	30171,13
6	31234,45
7	33050,84
8	35153,34
9	39016,34
10	43144,89
11	56899,29

**Πίνακας 6.1.2. 1:** Στον πίνακα παρουσιάζονται τα ολικά κόστη των σεναρίων που επιλέγονται ως αντιπροσωπευτικά, όπως προκύπτουν από την αξιολόγησή τους στη λύση του αδρομερούς επιπέδου. Το πρώτο από αυτά τα σεσάρια αντιστοιχεί στην περίπτωση που δεν εμφανίζεται καμία βλάβη.



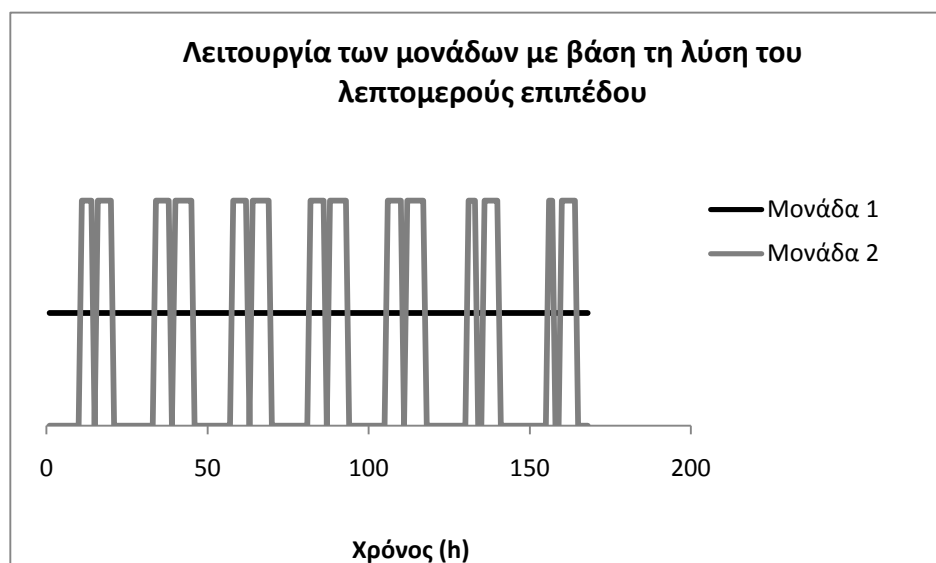
**Σχήμα 6.1.2. 5:** Στο σχήμα παρουσιάζονται τα σενάρια που επιλέγονται ως αντιπροσωπευτικά. Η πάνω γραμμή σε κάθε σχήμα αντιστοιχεί στη μονάδα 2 ενώ η κάτω στην μονάδα 1. Η ύπαρξη μαύρης γραμμής αντιστοιχεί στην κατάσταση διαθεσιμότητας (AV), ενώ η απουσία της στην κατάσταση μη-διαθεσιμότητας (UAV). Το πρώτο σενάριο παραλείπεται γιατί δεν περιέχει κάποια βλάβη.



Αφού γίνει επιλογή των αντιπροσωπευτικών σεναρίων, ξεκινά η βελτιστοποίηση του λεπτομερούς επιπέδου. Το χρωμόσωμα που αντιστοιχεί σε κάθε λύση αξιολογείται ως έχει, χωρίς να πραγματοποιείται κάποια ομαδοποίηση των ωρών προγραμματισμού. Για να επιταχυνθεί η διαδικασία της σύγκλισης χρησιμοποιείται κατατετμημένος εξελικτικός αλγόριθμος. Έτσι, ο ορίζοντας προγραμματισμού χωρίζεται σε 7 μέρη των 24ωρών (ώστε σύνολο να προκύπτουν 168ώρες προγραμματισμού), και για κάθε 24ωρο γίνεται βελτιστοποίηση με εξελικτικό αλγόριθμο ξεχωριστά. Μεταξύ των 24ώρων υπάρχει αρχικά χαλαρή σύνδεση σε ότι αφορά στους περιορισμούς για το παρελθόν λειτουργίας κάθε μονάδας, και όταν οι περιορισμοί αυτοί δεν ικανοποιούνται επιβάλλεται ποινή γειννίασης. Όταν γίνει βελτιστοποίηση σε όλα τα 24ωρα, συντίθεται το ολικό χρωμόσωμα και επαναξιολογείται στο σύνολό του. Με τον τρόπο αυτό ολοκληρώνεται ένας κύκλος βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, ξεκινάει νέος κύκλος που αρχικοποιείται από την αποκτηθείσα λύση, αλλά αυτή τη φορά παρουσιάζει αυξημένη τιμή ποινής γειννίασης. Σε κάθε επόμενο κύκλο ο πολλαπλασιαστής για την ποινή γειννίασης αυξάνεται. Έτσι μετά από μία σειρά κύκλων η βέλτιστη λύση υποχρεώνεται να υπακούει σε όλους τους περιορισμούς, ώστε να παρουσιάζει ελάχιστη δυνατή τιμή κόστους. Τελικά καταλήγουμε σε ένα σχήμα όπου χρησιμοποιούνται 7 «αυτόνομοι» εξελικτικοί αλγόριθμοι, και οι λύσεις τους συνθέτουν ένα χρωμόσωμα που αξιολογείται στο τέλος κάθε κύκλου βελτιστοποίησης. Με τον τρόπο αυτό η αρχική βελτιστοποίηση της μίας εβδομάδας, ανάγεται τελικά σε 7 διασυνδεδεμένες βελτιστοποιήσεις 24ώρου. Για να γίνει χρήση της μεθόδου της προσεγγιστικής προαξιολόγησης απαιτείται να δημιουργηθεί πρώτα μία βάση δεδομένων για να χρησιμοποιηθεί από το RBF νευρωνικό δίκτυο. Για το λόγο αυτό σε κάθε εξελικτικό αλγόριθμο, οι δύο πρώτες γενιές αξιολογούνται με εφαρμογή της πλήρους προσομοίωσης Monte-Carlo (δηλαδή υπολογίζεται το κόστος της υποψήφιας λύσης σε 4000 σενάρια Monte-Carlo). Μόλις δημιουργηθεί αυτή η απαραίτητη βάση δεδομένων τίθεται σε λειτουργία το μεταπρότυπο. Τα μέλη των επόμενων γενιών αξιολογούνται με εκπαίδευση και εφαρμογή του μεταπρότυπου (και άρα με σημαντικά μικρότερο υπολογιστικό κόστος) και μόνο τα δέκα (έτσι επιλέγεται) καλύτερα μέλη κάθε γενιάς αξιολογούνται πλήρως. Για να λειτουργήσει το μεταπρότυπο υπολογίζεται το κόστος κάθε υποψήφιας λύσης μόνο στα 11 επιλεγμένα σενάρια βλαβών-επισκευών και με χρήση του RBF νευρωνικού δικτύου, υπολογίζεται προσεγγιστικά μεν αλλά με σημαντικά μικρότερο κόστος δε, η τιμή του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας για 4000 σενάρια, χωρίς να χρειάζεται να υπολογισθεί το ολικό κόστος λειτουργίας σε καθένα από αυτά τα 4000.

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται σε κάθε 24ωρο ρυθμίζονται με τις ίδιες παραμέτρους. Σε κάθε γενιά επιλέγονται 40 γονείς από τους οποίους παράγονται 60 απόγονοι. Κάθε απόγονος προέρχεται από δύο γονείς με εξαίρεση τον μοναδικό επίλεκτο κάθε γενιάς, ο οποίος αναπαράγεται στην επόμενη ως έχει. Η πιθανότητα διασταύρωσης επιλέγεται ίση με 0,9, ενώ η πιθανότητα μετάλλαξης ίση με 0,01. Κάθε εξελικτικός αλγόριθμος πραγματοποιεί τη βελτιστοποίηση του κάθε 24ώρου για 1000 αξιολογήσεις μέσα σε ένα κύκλο βελτιστοποίησης. Η βελτιστοποίηση κάθε 24ώρου

σταματά όταν η βέλτιστη λύση δεν μεταβάλλεται για 30 γενιές. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται για 15 κύκλους. Τα αποτελέσματά της παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα. Η σύγκλιση της μεθόδου στο λεπτομερές επίπεδο δεν παρουσιάζεται σχηματικά γιατί η λύση δεν βελτιώνεται μετά τον πρώτο κύκλο βελτιστοποίησης. Αυτό σε καμία περίπτωση δεν σημαίνει ότι η μέθοδος δεν συγκλίνει. Αντιθέτως, η σύγκλιση πραγματοποιείται από τον πρώτο κύκλο βελτιστοποίησης και τηρούνται και οι περιορισμοί λειτουργίας των μονάδων ως προς το παρελθόν λειτουργίας τους σε κάθε 24ωρο. Πολύ σημαντικό στοιχείο είναι η ποινή που επιβάλλεται για τη μη κάλυψη της ζήτησης. Επιλέγεται να χρεώνονται ως ποινή πάντα 300MWh καυσίμου για κάθε παραβίαση της ζήτησης μεγαλύτερης από 0,1MWh και σε αυτή την ποινή να προστίθενται 10 MWh για κάθε MWh παραβίασης. Με τον τρόπο αυτό η λύση που θα προκύψει θα σέβεται τον βασικό περιορισμό για την κάλυψη της ζήτησης. Σε αυτόνομα συστήματα, όπως αυτό που μελετάται, η ζήτηση πρέπει να καλύπτεται από το πρόγραμμα λειτουργίας γιατί δεν υπάρχει δυνατότητα εναλλακτικής αγοράς ενέργειας. Η λύση που προκύπτει τελικά καλύπτει όλη τη ζήτηση στην περίπτωση μη-εμφάνισης βλαβών, ενώ όταν λαμβάνονται υπόψη και πιθανοτικές βλάβες, η μέση τιμή της ζήτησης που δεν καλύπτεται είναι 36,33MWh Στο σχήμα 6.1.2.6 παρουσιάζεται το σενάριο λειτουργίας των μονάδων όπως επιλέγεται από τη βέλτιστη λύση που προκύπτει.



**Σχήμα 6.1.2. 6:** Στο σχήμα παρουσιάζεται το σενάριο λειτουργίας από τη βέλτιστη λύση που προκύπτει από το λεπτομερές επίπεδο λαμβάνοντας υπόψη πιθανοτικές βλάβες των μονάδων και εφαρμόζοντας τη χρήση δικτύων RBF για επιτάχυνση της διαδικασίας Monte-Carlo.

Από το σχήμα αυτό παρατηρούμε ότι σύμφωνα με το βέλτιστο σενάριο λειτουργίας των μονάδων η πρώτη μονάδα λειτουργεί διαρκώς (μεγαλύτερη δυναμικότητα και καλύτερος βαθμός απόδοσης), επομένως αναλαμβάνει το ρόλο της μονάδας βάσης, ενώ η δεύτερη μονάδα τίθεται σε λειτουργία για να καλύψει αιχμές του δικτύου σε περιπτώσεις που η ζήτηση ξεπερνάει τη μέγιστη δυναμικότητα της πρώτης μονάδας και ουσιαστικά αναλαμβάνει το ρόλο της μονάδας αιχμής. Σε κάποιες περιπτώσεις, βλέπουμε ότι η λειτουργία της δεύτερης μονάδας διακόπτεται στιγμιαία. Αυτό σημαίνει ότι αν εντοπιστεί ότι για μία μόνο ώρα δεν απαιτείται η λειτουργία της δεύτερης μονάδας, τότε πραγματοποιείται σβέση της μονάδας αυτής με μηδενικό χρόνο μετάβασης και η μονάδα δεν θα παράγει για μία ώρα, όσο δηλαδή απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η έναυσή της ώστε να ξαναβρεθεί σε κατάσταση παραγωγής (ON) στην ώρα που απαιτείται. Οι λόγοι που γίνεται μία τέτοια επιλογή στο βέλτιστο σενάριο είναι δύο. Πρώτον, οι χρόνοι σβέσης και αδράνειας (παραμονής σε μία κατάσταση,  $T_{SHDN}$  και  $T_{RAMP}$  αντίστοιχα) είναι μηδενικοί, επομένως παρέχεται η δυνατότητα για μία τέτοια επιλογή. Αν η τιμή έστω του ενός από τους δύο χρόνους ήταν διάφορη του μηδενός, η επιλογή αυτή δεν θα υπήρχε. Ο δεύτερος λόγος είναι πως τα κόστη σβέσης και έναυσης είναι τέτοια ώστε το συνολικό κόστος της επιλογής της στιγμιαίας κράτησης της μονάδας να παρουσιάζεται μικρότερο από το κόστος λειτουργίας και των δύο μονάδων, με την πρώτη να λειτουργεί σε μικρότερο φορτίο (και άρα με μικρότερο βαθμό απόδοσης).

Τελευταίος υπολογισμός για την αξιολόγηση της βέλτιστης λύσης είναι ο συνολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης. Η συνολική ζήτηση των 168ωρών είναι 8110,95MWh, ενώ για την περίπτωση που δεν εμφανίζεται καμία βλάβη η βέλτιστη λύση παρουσιάζει ολικό κόστος λειτουργίας ίσο με  $TOC_{fine,non-failed} = 24634,73MWh$  και επομένως βαθμό απόδοσης ίσο με :

$$\eta_{fine,non-failed} = \frac{\sum_{i=1}^{168} d_i}{TOC_{fine,non-failed}} = \frac{8110,95}{24816,73} = 0,3268$$

Όμοια αν η συνολική ζήτηση διαιρεθεί με το εκτιμώμενο ολικό κόστος λειτουργίας της βέλτιστης λύσης προκύπτει ο μέσος βαθμός απόδοσης, λαμβάνοντας υπόψη και πιθανοτικές βλάβες, ίσος με:

$$\eta_{fine,expected} = \frac{\sum_{i=1}^{168} d_i}{ETOC_{fine}} = \frac{8110,95}{25411,25} = 0,3192$$

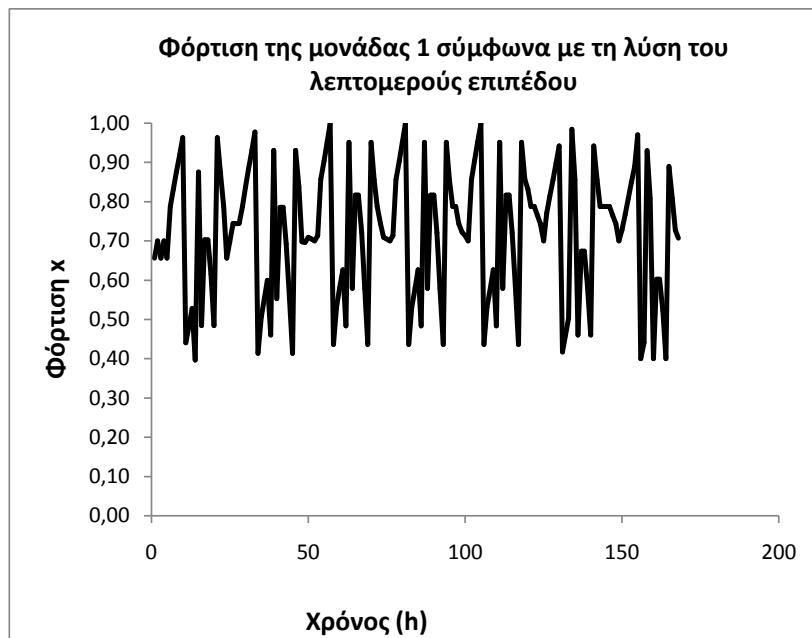
Προφανώς, η τιμή του  $\eta_{fine,expected}$  προκύπτει μικρότερη από την τιμή του  $\eta_{fine,non-failed}$ , αφού στον υπολογισμό του μέσου βαθμού απόδοσης λαμβάνονται υπόψη και τα

σενάρια στα οποία εμφανίζεται κάποια βλάβη. Οι αντίστοιχοι βαθμοί απόδοσης της λύσης του αδρομερούς επιπέδου από την οποία αρχικοποιήθηκε το λεπτομερές επίπεδο είναι:

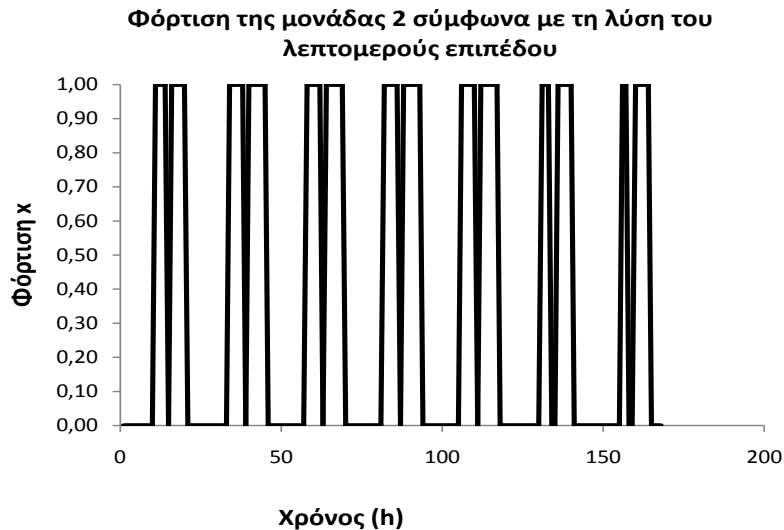
$$\eta_{fine\_ini,non-failed} = \frac{\sum_{i=1}^{168} d_i}{TOC_{fine\_ini,non-failed}} = \frac{8110,95}{27583,83} = 0,2940$$

$$\eta_{fine\_ini,expected} = \frac{\sum_{i=1}^{168} d_i}{ETOC_{fine\_ini}} = \frac{8110,95}{32934,94} = 0,2463$$

Από τη σύγκριση αυτών των βαθμών απόδοσης με τους αντίστοιχους της βέλτιστης λύσης, συμπεραίνουμε ότι ο αλγόριθμος βελτιώνει τη λύση. Η βελτίωση που παρατηρείται στους βαθμούς απόδοσης είναι της τάξεως του 11% για το σενάριο χωρίς βλάβες και 30% για το μέσο βαθμό απόδοσης (λαμβάνοντας υπόψη και τις πιθανοτικές βλάβες). Τα φορτία της πρώτης και της δεύτερης μονάδας σύμφωνα με τη βέλτιστη λύση φαίνονται στα σχήματα 6.1.2.7 και 6.1.2.8 αντίστοιχα. Τέλος, αναφέρεται ότι στους υπολογισμούς δεν ελήφθη υπόψη κάποιος περιορισμός σχετικά με τη στρεφόμενη εφεδρεία.

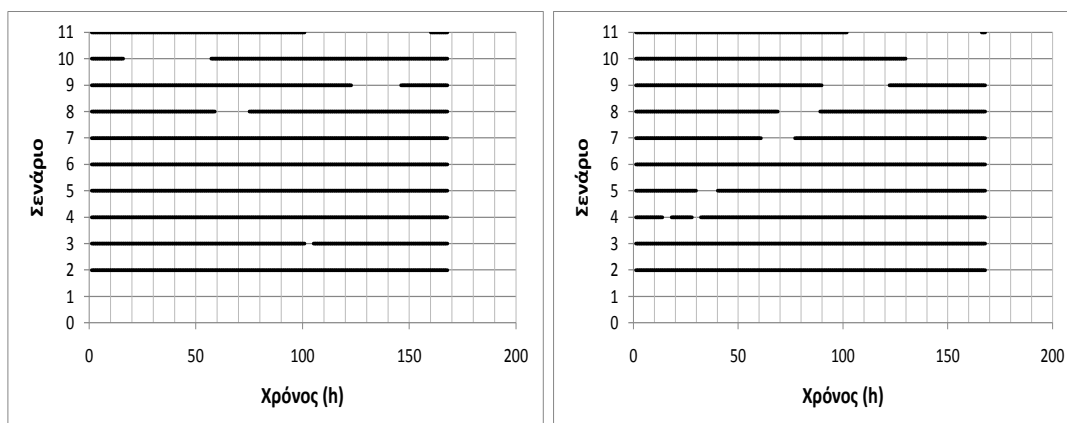


**Σχήμα 6.1.2. 7:** Φόρτιση της πρώτης μονάδας συναρτήσει του χρόνου για τη βέλτιστη λύση του συστήματος. Παρατηρούμε ότι η πρώτη μονάδα βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία και το φορτίο της αυξομειώνεται ανάλογα με τη ζήτηση και με τη λειτουργία της δεύτερης μονάδας.

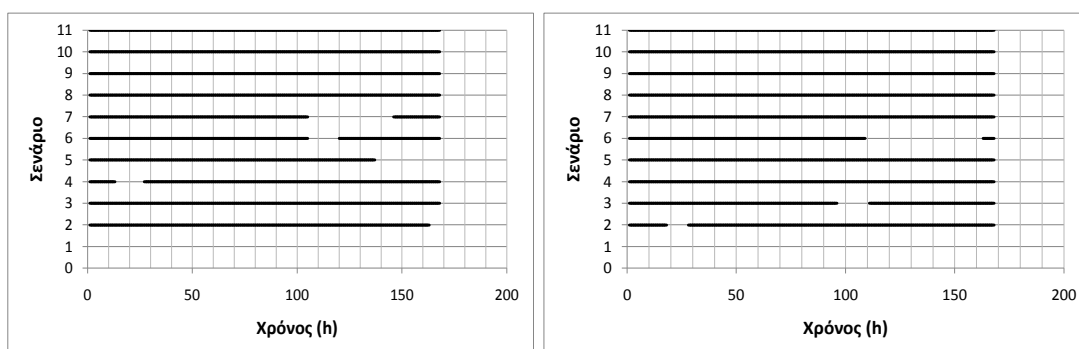


**Σχήμα 6.1.2. 8:** Στο σχήμα παρουσιάζεται η φόρτιση της δεύτερη μονάδας συναρτήσει του χρόνου, όπως προκύπτει από τη βέλτιστη λύση. Παρατηρούμε ότι η δεύτερη μονάδα τίθεται σε λειτουργία στις περιπτώσεις που η ζήτηση δεν μπορεί να καλυφθεί από τη λειτουργία της πρώτης μονάδας. Αυτό αντιστοιχεί και στο ρόλο της δεύτερης μονάδας ως μονάδα αιχμής.

Στα σχήματα 6.1.2.9 και 6.1.2.10 φαίνονται τα αντιπροσωπευτικά σενάρια για διαφορετικούς ρυθμούς αστοχίας και επισκευής των μονάδων. Φαίνεται ότι όταν αυξάνεται ο ρυθμός αστοχίας της πρώτης μονάδας και μειώνεται ο ρυθμός επισκευής της δεύτερης (άρα η πρώτη μονάδα θα βρίσκεται πιο συχνά σε κατάσταση UAV σε σχέση με τη δεύτερη), τα αντιπροσωπευτικά σενάρια που επιλέγονται έχουν περισσότερες αστοχίες για την πρώτη μονάδα, κάτι που είναι λογικό αφού ο ρυθμός αστοχίας είναι αυξημένος. Στα αντιπροσωπευτικά σενάρια η δεύτερη μονάδα αστοχεί λιγότερο συχνά σύμφωνα με αντιπαραβολή των σχημάτων 6.1.2.9 και 6.1.2.10. Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί η επιλογή των αντιπροσωπευτικών σεναρίων γίνεται σε κάθε περίπτωση με βάση την τιμή του ολικού κόστους λειτουργίας των σεναρίων. Έτσι αφού οι συχνότερες αστοχίες της πρώτης μονάδας οδηγούν σε σενάρια με μεγαλύτερο κόστος, η επιλογή των σεναρίων είναι τέτοια ώστε η δεύτερη μονάδα να αστοχεί λιγότερο συχνά σε αυτά (ώστε να επιλεγούν σενάρια που να καλύπτουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος τιμών ολικού κόστους λειτουργίας). Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αν μεγαλώσουν οι αστοχίες μίας μονάδας στα αντιπροσωπευτικά σενάρια, τότε οι αστοχίες της άλλης μονάδας θα είναι μικρότερες στα σενάρια αυτά. Έτσι παρατηρούμε ότι η μέθοδος της κατάταξης για την επιλογή των αντιπροσωπευτικών σεναρίων παρουσιάζει ένα πλεονέκτημα σε σχέση με τη μέθοδο της απόστασης των δυαδικών στοιχειοσειρών. Το πλεονέκτημα είναι ότι δεν επιτρέπει στους διάφορους ρυθμούς αστοχίας και επισκευής να επηρεάσουν την ακρίβεια του μεταπροτύπου.



**Σχήμα 6.1.2.9:** Μονάδα 1 – Αστοχίες για τα 10 πρώτα αντιπροσωπευτικά δείγματα για: ρυθμό αστοχίας 1/4000 & ρυθμό επισκευής 1/24 (αριστερά) & ρυθμό αστοχίας 1/1000 & ρυθμό επισκευής 1/24 (δεξιά).



**Σχήμα 6.1.2.10:** Μονάδα 2 – Αστοχίες για τα 10 πρώτα αντιπροσωπευτικά δείγματα για: ρυθμό αστοχίας 1/4000 & ρυθμό επισκευής 1/24 (αριστερά) & ρυθμό αστοχίας 1/4000 & ρυθμό επισκευής 1/12 (δεξιά).

### 6.1.3 Αξιολόγηση

Από τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του σταθμού της εφαρμογής αυτής όπως σχολιάστηκε συμπεραίνουμε ότι ο αλγόριθμος εντοπίζει μία πολύ καλή λύση του προβλήματος (σε σχέση με το υπολογιστικό κόστος του), ακόμα και όταν λαμβάνονται υπόψη πιθανοτικές βλάβες. Επίσης διαπιστώνεται ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου της κατάταξης για την επιλογή των αντιπροσωπευτικών σεναρίων είναι αρκετά ακριβή και η ακρίβειά της δεν επηρεάζεται από τις τιμές των ρυθμών αστοχίας και επισκευής των μονάδων. Τέλος, μπορούμε επίσης να σημειώσουμε ότι η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση συνολικά παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα των εξελικτικών αλγορίθμων (εντοπισμός καθολικού ελάχιστου της συνάρτησης στόχου) και ταυτόχρονα εξαλείφει το μειονέκτημα της αργής σύγκλισης

που παρουσιάζουν οι κλασικές μέθοδοι εξελικτικών αλγορίθμων, λόγω της χρήσης της προσεγγιστικής προαξιολόγησης. Στην επόμενη εφαρμογή θα φανεί και το κέρδος σε υπολογιστικό κόστος από τη χρήση της μεθόδου της προσεγγιστικής προαξιολόγησης.

## 6.2 Βελτιστοποίηση του προγράμματος λειτουργίας σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πέντε μονάδων για χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού τριών ημερών (εικονικό δίκτυο ελληνικού νησιού).

Στην εφαρμογή αυτή θα γίνει χρήση της μεθόδου με παρόμοιο τρόπο με την προηγούμενη εφαρμογή της παραγράφου 6.1. Σημειώνεται ότι επειδή όπως φαίνεται από τα χαρακτηριστικά των μονάδων τα πολυώνυμα κατανάλωσης των μονάδων παρουσιάζουν αρκετά διαφορετική μορφή (σε κάποιες μονάδες τείνουν να γίνουν γραμμικά ενώ σε άλλες όχι), η μέθοδος επαυξημένων συντελεστών Lagrange που χρησιμοποιείται για την επίλυση κάθε ωριαίου υποπροβλήματος ανάθεσης φορτίου παρουσιάζει δυσκολίες στη σύγκλιση. Έτσι χρησιμοποιείται εναλλακτικά για τη βέλτιστη ανάθεση φορτίου η μέθοδος που προτείνεται στη δημοσίευση [5]. Τέλος, η βελτιστοποίηση θα επαναληφθεί λαμβάνοντας υπόψη και την απαίτηση για στρεφόμενη εφεδρεία (πολύ σημαντική για την περίπτωση ενός εικονικού μεγάλου ελληνικού νησιού) και θα γίνει σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

### 6.2.1 Περιγραφή του συστήματος

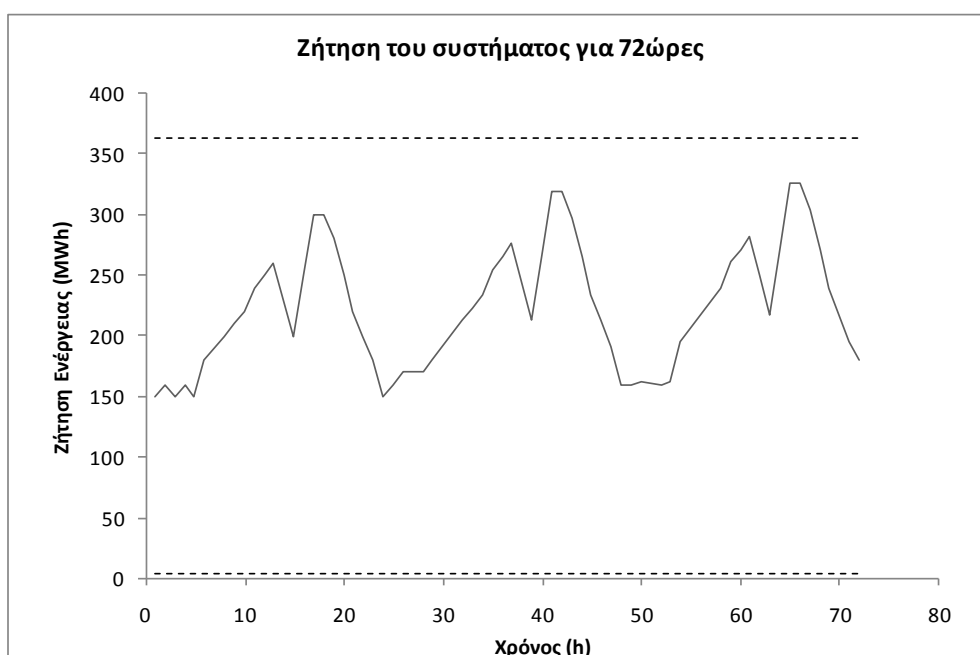
Ο σταθμός που μελετάται σε αυτή την εφαρμογή αποτελείται από πέντε συνολικά μονάδες εκ των οποίων οι τρεις είναι μονάδες βάσης και οι δύο μονάδες αιχμής. Οι μονάδες αιχμής είναι και οι δύο αεριοστρόβιλοι παράγωγοι αεροπορικών κινητήρων, ενώ οι δύο μονάδες βάσης είναι αμιγώς αεριοστροβλικές και η μία είναι μονάδα συνδυασμένου κύκλου. Τα μοντέλα των μηχανών που αντιστοιχούν σε κάθε μονάδα παρουσιάζονται στον πίνακα 6.2.1.1 μαζί με τον αριθμό του πίνακα του κεφαλαίου 2 στον οποίο περιέχονται τα βασικά χαρακτηριστικά της μονάδας για τη βελτιστοποίηση.

	Μοντέλο	Πίνακας Χαρακτηριστικών
<b>Μονάδα 1</b>	LM60000PC Sprint	Πίνακας 2.2.1.4
<b>Μονάδα 2</b>	LM2500+	Πίνακας 2.2.2.2
<b>Μονάδα 3</b>	2xGT8C + ST	Πίνακας 2.2.3.4
<b>Μονάδα 4</b>	V64.3A	Πίνακας 2.2.4.2
<b>Μονάδα 5</b>	V64.3A	Πίνακας 2.2.4.2



**Πίνακας 6.2.1. 1:** Στον πίνακα παρουσιάζονται τα μοντέλα μηχανής που αντιστοιχούν σε κάθε μονάδα και για κάθε μοντέλο ο πίνακας που περιέχει τα βασικά χαρακτηριστικά που είναι απαραίτητα για τη βελτιστοποίηση.

Οι τιμές των ρυθμών αστοχίας και επισκευής των μονάδων λαμβάνονται κοινές για όλες τις μονάδες και είναι  $\lambda_f = 0,00025$  και  $\mu_{rep} = 0,0417$  που αντιστοιχούν σε μέσο χρόνο εμφάνισης βλάβης ίσο με 4000ώρες και μέσο χρόνο ολοκλήρωσης μίας επισκευής ίσο με 24ώρες. Το παρελθόν όλων των μονάδων λαμβάνεται ελεύθερο με εξαίρεση την τρίτη μονάδα όπου θεωρούμε ότι βρίσκεται σε κατάσταση παραγωγής (ON) για 8ώρες πριν από την έναρξη του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού. Η ζήτηση των τριών ημερών του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού (βραχυπρόθεσμος προγραμματισμός) παρουσιάζεται στο σχήμα 6.2.1.1, και όπως φαίνεται βρίσκεται εντός των ορίων της μέγιστης και της ελάχιστης δυναμικότητας όλων των μονάδων. Η μορφή του χρονοδιαγράμματος ζήτησης παρουσιάζει επιπλέον τις αιχμές στις μεσημεριανές και τις βραδινές ώρες. Οι τιμές της ζήτησης ανταποκρίνονται στην περίπτωση ενός εικονικού μεγάλου ελληνικού νησιού με αυτόνομο δίκτυο.



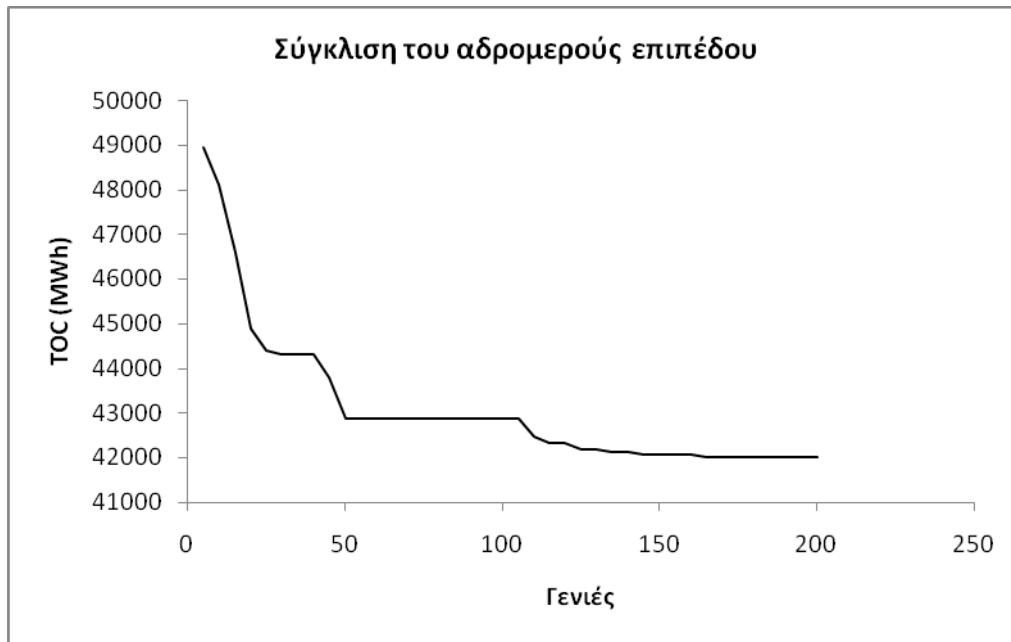
**Σχήμα 6.2.1. 1:** Ζήτηση του συστήματος για τρεις μέρες (72ώρες). Παρατηρούμε ότι η ζήτηση βρίσκεται εντός των τεχνικών ορίων του σταθμού.

## 6.2.2 Βελτιστοποίηση

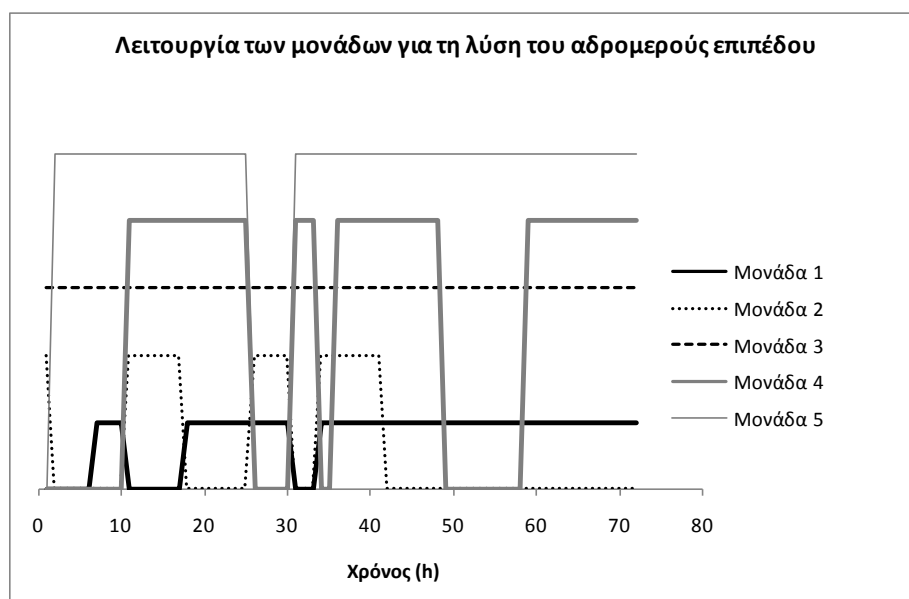
Στο αδρομερές επίπεδο γίνεται αρχικά χρήση της μεθόδου BnB με την οποία επιλέγονται τα βέλτιστα σενάρια για κάθε ώρα ώστε να γίνει η ομαδοποίηση των ωρών του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού για να επιλυθεί το αδρομερές επίπεδο. Τελικά προκύπτουν 30 ομάδες ωρών, οπότε το μέγεθος του χρωμοσώματος που χρησιμοποιείται στο αδρομερές επίπεδο είναι 75 δυαδικά ψηφία. Σημειώνεται ότι το πλήρες μήκος του χρωμοσώματος είναι 360 δυαδικά ψηφία, οπότε με την ομαδοποίηση των ωρών γίνεται σημαντική οικονομία στο υπολογιστικό κόστος του αδρομερούς επιπέδου. Ο εξελικτικός αλγόριθμος του αδρομερούς επιπέδου χρησιμοποιείται για 200 γενιές και 11601 αξιολογήσεις και εντοπίζει λύση που παρουσιάζει ολικό κόστος λειτουργίας ίσο με  $TOC_{coarse} = 42020,91MWh$ . Η λύση αυτή δεν παραβιάζει τη ζήτηση και αυτό γιατί ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει στη βέλτιστη λύση η οποία πρέπει να ικανοποιεί τη ζήτηση όταν δεν εμφανίζονται βλάβες. Σημειώνεται ότι στόχος της βελτιστοποίησης στο αδρομερές επίπεδο είναι η ελαχιστοποίηση του ολικού κόστους λειτουργίας χωρίς να λαμβάνονται υπόψη πιθανοτικές βλάβες για να αποκτηθεί μία καλή αρχική λύση για την αρχικοποίηση του λεπτομερούς επιπέδου με χαμηλό υπολογιστικό κόστος. Ο βαθμός απόδοσης της λύσης του αδρομερούς επιπέδου είναι ίσος με:

$$\eta_{coarse} = \frac{\sum_{i=1}^{168} d_i}{TOC_{coarse}} = \frac{16016,41}{42020,91} = 0,3812$$

Στη βελτιστοποίηση του αδρομερούς επιπέδου όπως έχει ήδη ειπωθεί στο κεφάλαιο 4 δε λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί που αφορούν στις μεταβατικές καταστάσεις των μονάδων, ούτε τα κόστη που τις συνοδεύουν. Η σύγκλιση του εξελικτικού αλγόριθμου του αδρομερούς επιπέδου παρουσιάζεται στο σχήμα 6.2.2.1. Το σενάριο λειτουργίας των μονάδων για τη λύση του αδρομερούς επιπέδου παρουσιάζεται στο σχήμα 6.2.2.2.



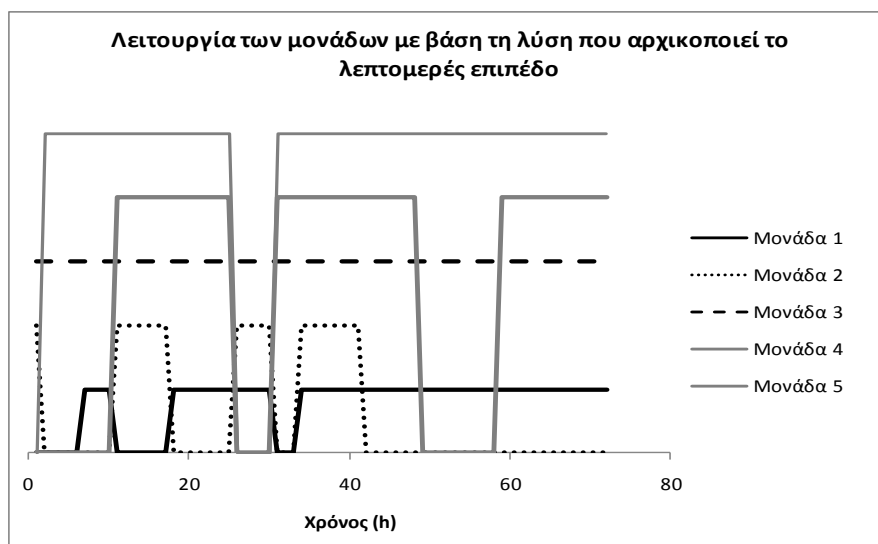
**Σχήμα 6.2.2. 1:** Στο σχήμα παρουσιάζεται η σύγκλιση του αδρομερούς επιπέδου. Παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει στην 165<sup>η</sup> γενιά.



**Σχήμα 6.2.2. 2:** Στο σχήμα παρουσιάζονται οι καταστάσεις των μονάδων σύμφωνα με τη βέλτιστη λύση του αδρομερούς επιπέδου. Παρατηρούμε ότι η μονάδα 3 και οι μονάδα 4 που είναι μονάδες βάσης λειτουργούν περισσότερες ώρες, ενώ η μονάδα 2 που είναι μονάδα αιχμής με τη μικρότερη δυναμικότητα λειτουργεί τις λιγότερες ώρες.

Στη συνέχεια η λύση αυτή αξιολογείται λαμβάνοντας υπόψη και τους περιορισμούς για τους ελάχιστους χρόνους έναυσης, σβέσης και αδράνειας των μονάδων, αφού πρώτα το χρωμόσωμα που αντιστοιχεί στη λύση αναπτυχθεί σε πλήρες μέγεθος (360 δυαδικά ψηφία). Το αποτέλεσμα διαφέρει από αυτό που προέκυψε στο αδρομερές

επίπεδο γιατί τώρα λαμβάνονται υπόψη και τα κόστη έναυσης και σβέσης των μονάδων και είναι  $TOC_{fine-ini} = 42294,68\text{MWh}$ . Οι καταστάσεις των μονάδων φαίνονται στο σχήμα 6.2.2.3.



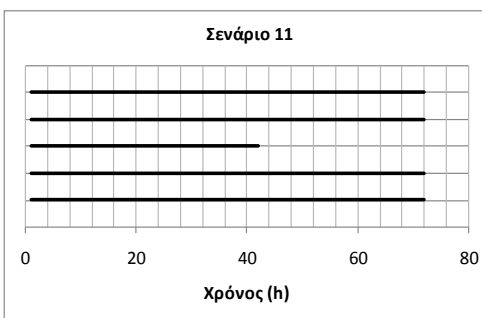
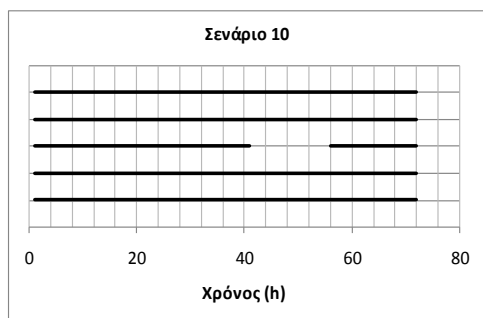
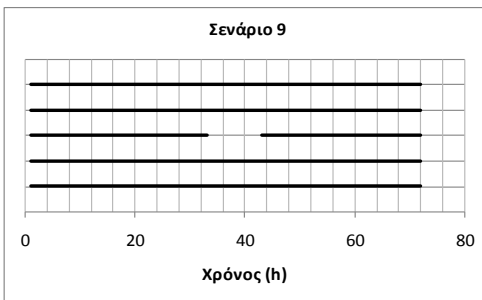
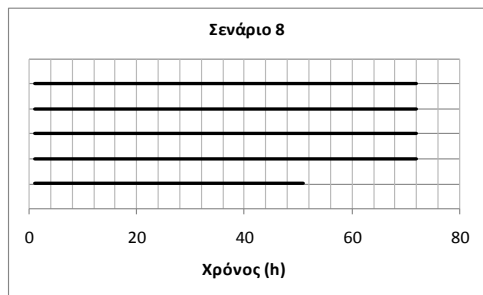
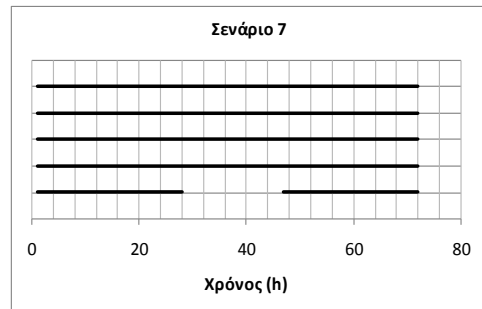
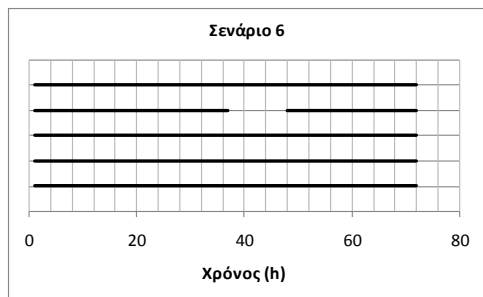
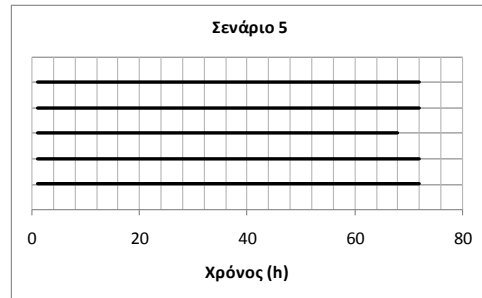
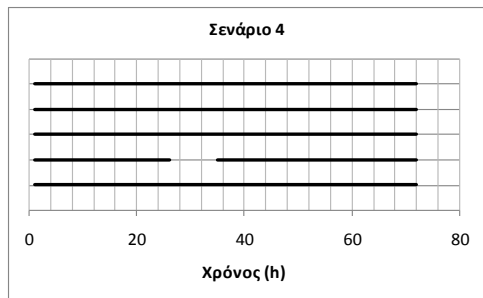
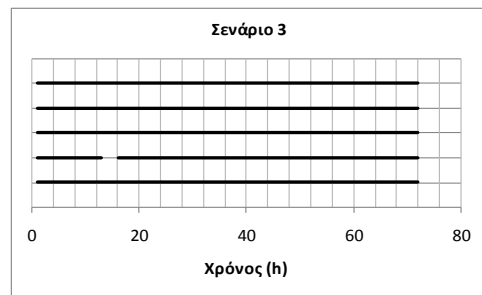
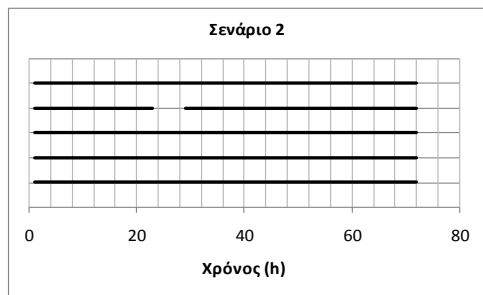
**Σχήμα 6.2.2. 3:** Στο σχήμα παρουσιάζονται οι καταστάσεις των μονάδων (ON-OFF) με βάση τη λύση που θα αρχικοποιήσει το λεπτομερές επίπεδο βελτιστοποίησης.

Η λύση που θα αρχικοποιήσει το λεπτομερές επίπεδο αξιολογείται σε 4000 σενάρια Monte-Carlo (ικανοποιητικό πλήθος σεναρίων) προκειμένου να γίνει η επιλογή των αντιπροσωπευτικών σεναρίων. Η τιμή του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας που προκύπτει είναι  $TOC_{fine-ini,MC} = 42502,47\text{MWh}$ . Από τα 4000 σενάρια επιλέγεται το σενάριο χωρίς βλάβες και 10 ακόμα διαφορετικά αντιπροσωπευτικά σενάρια με βλάβες με τη μέθοδο της κατάταξης. Οι τιμές ολικού κόστους λειτουργίας που εμφανίζει η λύση που αρχικοποιεί το λεπτομερές επίπεδο στα αντιπροσωπευτικά σενάρια παρουσιάζονται στον πίνακα 6.2.2.1.

Αριθμός Αντιπροσωπευτικού Σεναρίου	Ολικό Κόστος Λειτουργίας (TOC) σε MWh
1	42294,68
2	42205,46
3	42290,00
4	42743,29
5	43246,37
6	43863,32
7	44611,93
8	45564,89
9	46590,29
10	48462,27
11	54598,30

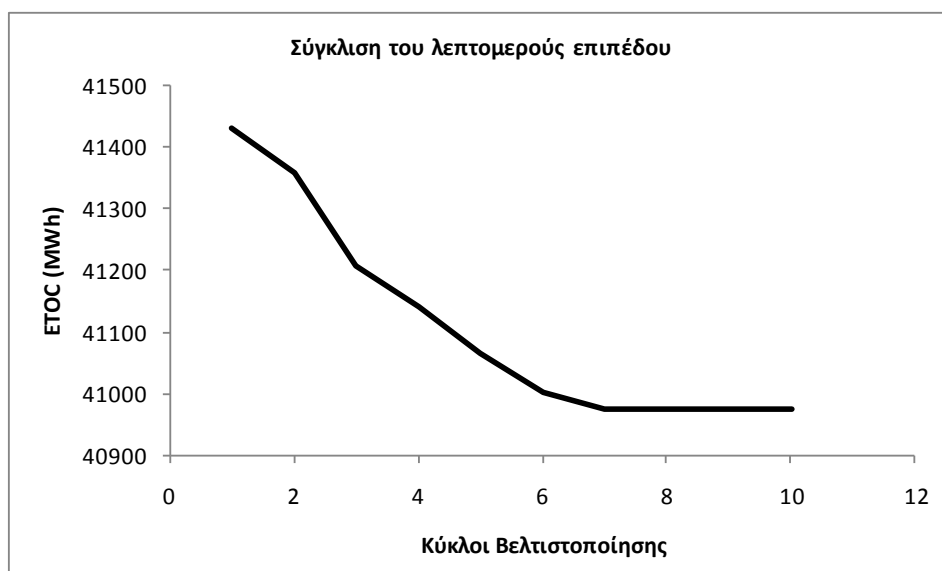
**Πίνακας 6.2.2. 1:** Στον πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του ολικού κόστους λειτουργίας της λύσης που αρχικοποιεί το λεπτομερές επίπεδο στα 11 αντιπροσωπευτικά σενάρια που επιλέγονται για τη σύσταση του μεταπροτύπου με βάση την τεχνική της κατάταξης που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5.

Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι το ολικό κόστος λειτουργίας των σεναρίων 2 και 3 που είναι μικρότερο από το ολικό κόστος λειτουργίας του σεναρίου 1 (σενάριο χωρίς βλάβες). Με σύγκριση των σχήματος 6.2.2.3 και του σχήματος 6.2.2.4 για το 2<sup>ο</sup> σενάριο παρατηρούμε ότι στις ώρες που συμβαίνει βλάβη στην 4<sup>η</sup> μονάδα σύμφωνα με το σενάριο 2, η μονάδα αυτή βρίσκεται στις καταστάσεις σβέσης και κράτησης. Επομένως, όταν συμβαίνει βλάβη στη μονάδα αυτή, οι φορτίσεις των υπόλοιπων μονάδων παραμένουν ως έχουν και επιπλέον δεν χρεώνεται το κόστος σβέσης της μονάδας, αφού η μονάδα περνάει σε κατάσταση μη-διαθεσιμότητας χωρίς να μεσολαβήσει φυσικά η κατάσταση σβέσης (αφού εμφανίζεται αστοχία). Το ίδιο ισχύει και για το σενάριο 3 και τη 2<sup>η</sup> μονάδα. Συμπεραίνουμε επομένως, ότι στις περισσότερες περιπτώσεις εμφάνισης βλαβών, το ολικό κόστος λειτουργίας του σταθμού αυξάνεται, υπάρχουν όμως και περιπτώσεις (λιγότερο συχνές) που κάτι τέτοιο δεν ισχύει.



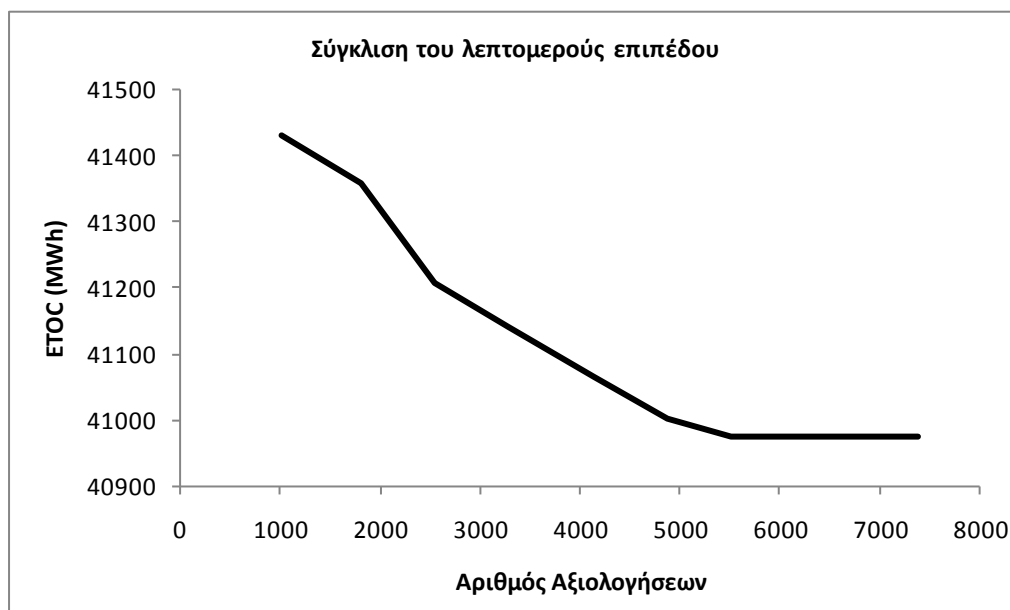
**Σχήμα 6.2.2. 4:** Στο σχήμα παρουσιάζονται οι χρονοσειρές επισκευών-βλαβών που αντιστοιχούν στα αντιπροσωπευτικά σενάρια που επιλέγονται. Σε κάθε σχήμα η κάτω χρονοσειρά αντιστοιχεί στην πρώτη μονάδα και η πάνω στην πέμπτη.

Για τη βελτιστοποίηση του λεπτομερούς επιπέδου χρησιμοποιείται επαναληπτική χρονικά κατατετημένη βελτιστοποίηση με εξελικτικούς αλγορίθμους, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4. Ο χρονικός ορίζοντας προγραμματισμού χωρίζεται σε 3 τμήματα, οπότε σε κάθε κύκλο βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται τρεις «αυτόνομοι» εξελικτικοί αλγόριθμοι και η βελτιστοποίηση τριημέρου χωρίζεται σε 3 βελτιστοποιήσεις ημερήσιας βάσης. Σε κάθε γενιά των εξελικτικών αλγορίθμων χρησιμοποιούνται 40 γονείς και 60 απόγονοι. Η πιθανότητα διασταύρωσης λαμβάνεται ίση με 0,9 ενώ η αρχική τιμή της πιθανότητας μετάλλαξης λαμβάνεται ίση με 0,01. Ο κάθε εξελικτικός αλγόριθμος συγκλίνει όταν το επικρατέστερο άτομο κάθε γενιάς παραμένει το ίδιο για 30 συνεχόμενες γενιές. Σε κάθε εξελικτικό αλγόριθμο, η μέθοδος της προσεγγιστικής προαξιολόγησης εκκινεί αφού πρώτα έχουν γίνει 300 ακριβείς αξιολογήσεις, και σε κάθε γενιά όταν χρησιμοποιείται το μεταπρότυπο τα 10 επικρατέστερα άτομα αξιολογούνται και με την ακριβή μέθοδο (πλήρης μέθοδος Monte-Carlo). Η σύγκλιση του αλγορίθμου παρουσιάζεται στο σχήμα 6.2.2.5. Στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται ο αριθμός των κύκλων βελτιστοποίησης. Δεν χρησιμοποιούνται οι γενιές του εξελικτικού αλγορίθμου, γιατί κάθε εξελικτικός αλγόριθμος συγκλίνει ξεχωριστά και απευθύνεται σε ένα μόνο μέρος της ζήτησης (επομένως τα κόστη των λύσεων των αυτόνομων εξελικτικών αλγορίθμων που απευθύνονται σε διαφορετικά τμήματα της ζήτησης δεν είναι συγκρίσιμα). Σημειώνεται ότι στόχος της βελτιστοποίησης του λεπτομερούς επιπέδου είναι η ελαχιστοποίηση της τιμής του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας (ETOC), αφού λαμβάνονται υπόψη πιθανοτικές βλάβες.



**Σχήμα 6.2.2. 5:** Στο σχήμα παρουσιάζεται η σύγκλιση του αλγορίθμου του λεπτομερούς επιπέδου στη βέλτιστη λύση μετά από 10 κύκλους βελτιστοποίησης.

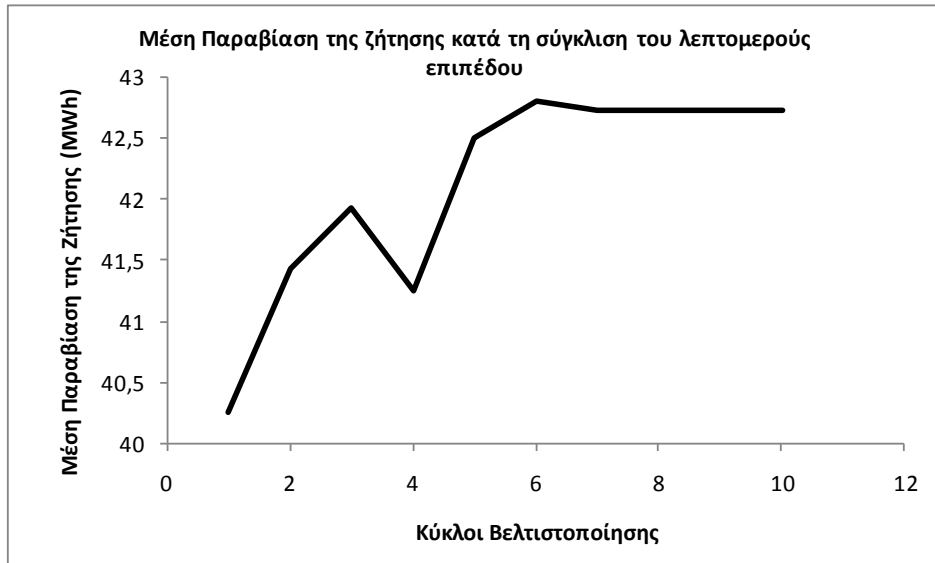
Στο λεπτομερές επίπεδο κάθε αξιολόγηση γίνεται σε ένα χρωμόσωμα 120 δυαδικών ψηφίων και άρα το υπολογιστικό κόστος μία τέτοιας αξιολόγησης είναι μικρότερο από το υπολογιστικό κόστος μία αξιολόγησης της πλήρους λύσης (κατά προσέγγιση το 1/3). Επομένως, αν ο αλγόριθμος σε κάθε τμήμα της ζήτησης συγκλίνει σε έναν αριθμό αξιολογήσεων 120 δυαδικών ψηφίων, μπορούμε προσεγγιστικά να πούμε ότι ο κύκλος βελτιστοποίησης ολοκληρώνεται στον ίδιο αριθμό αξιολογήσεων 360 δυαδικών ψηφίων. Έτσι προκύπτει το σχήμα 6.2.2.6 στο οποίο φαίνεται η σύγκλιση της βελτιστοποίησης του λεπτομερούς επιπέδου συναρτήσει του αριθμού των αξιολογήσεων.



**Σχήμα 6.2.2. 6:** Στο σχήμα παρουσιάζεται η σύγκλιση της βελτιστοποίησης του λεπτομερούς επιπέδου συναρτήσει του αριθμού των ακριβών (exact) αξιολογήσεων. Παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει στη βέλτιστη λύσης δε περίπου 7000 ισοδύναμες αξιολογήσεις.

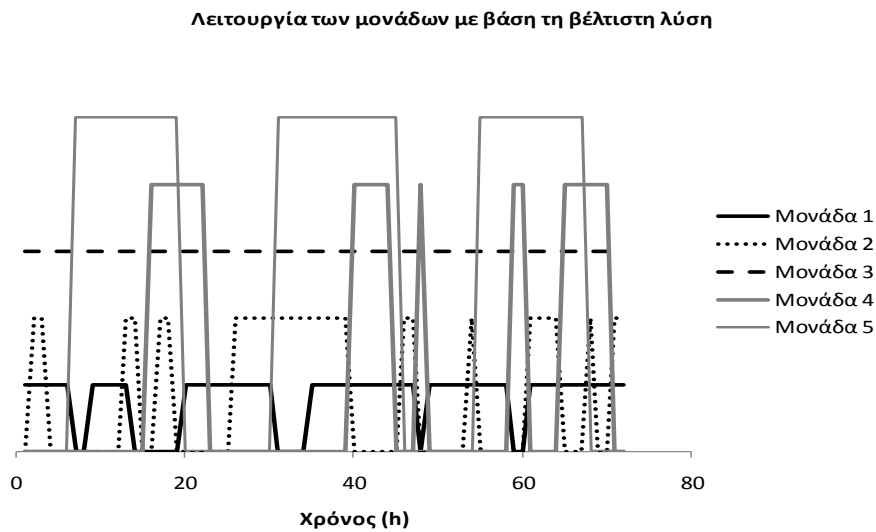
Η λύση του λεπτομερούς επιπέδου παρουσιάζει μέσο ολικό κόστος λειτουργίας ίσο με  $TOC_{fine,MC} = 40973,22\text{MWh}$  και παρατηρούμε ότι η λύση αυτή είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της λύσης που αρχικοποίησε το λεπτομερές επίπεδο. Το ολικό κόστος λειτουργίας της λύσης αυτής σε σενάριο χωρίς βλάβες είναι ίσο με  $TOC_{fine,non-failed} = 40615,06\text{MWh}$  και στο σενάριο αυτό η ζήτηση καλύπτεται πλήρως. Όταν λαμβάνονται όλα τα σενάρια επισκευών-βλαβών η μέση παραβίαση της ζήτησης για τη βέλτιστη λύση είναι ίση με 42,74MWh. Στο σχήμα 6.2.2.7 παρουσιάζεται η τιμή της μέσης παραβίασης της ζήτησης συναρτήσει των κύκλων βελτιστοποίησης.





**Σχήμα 6.2.2. 7:** Στο σχήμα παρουσιάζεται η μέση παραβίαση της ζήτησης κατά τη διαδικασία σύγκλισης του λεπτομερούς επιπέδου. Παρατηρούμε ότι όσο ο αλγόριθμος συγκλίνει η μέση παραβίαση της ζήτησης αυξάνεται και τελικά σταθεροποιείται στην τελική της τιμή. Αυτό είναι λογικό γιατί καθώς ο αλγόριθμος εντοπίζει οικονομικότερες λύσεις πλησιάζει όλο και περισσότερο σε περιοχές που οι περιορισμοί του προβλήματος τηρούνται οριακά. Επιπλέον σε όλη τη διαδικασία σύγκλισης η παραβίαση της ζήτησης στο σενάριο χωρίς βλάβες που είναι και το συχνότερα εμφανιζόμενο είναι μηδενική, οπότε όσο οι νέες λύσεις βελτιώνουν το ολικό κόστος λειτουργίας αυτού του σεναρίου, βελτιώνεται και το μέσο ολικό κόστος λειτουργίας για όλα τα σενάρια, έστω και αν η ζήτηση σε κάποια από αυτά παραβιάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό.

Στο σχήμα 6.2.2.8 που ακολουθεί παρουσιάζεται η λειτουργία των μονάδων με βάση τη βέλτιστη λύση που υπολογίστηκε.



**Σχήμα 6.2.2. 8:** Στο σχήμα παρουσιάζονται οι καταστάσεις λειτουργίας των μονάδων με βάση τη βέλτιστη λύση. Με αντιπαραβολή με το σχήμα 6.2.2.3 βλέπουμε ότι η μονάδες βάσης 4 και 5 λειτουργούν λιγότερες ώρες, ενώ η μονάδες αιχμής και ιδιαίτερα η μονάδα 2 λειτουργούν περισσότερες. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η φόρτιση των μονάδων στις ώρες που λειτουργούν και μειώνεται το συνολικό κόστος (αφού οι μονάδες λειτουργούν με μεγαλύτερη φόρτιση και άρα με καλύτερο βαθμό απόδοσης).

Οι βαθμοί απόδοσης της βέλτιστης λύσης είναι ίσοι με:

$$\eta_{fine,expected} = \frac{\sum_{i=1}^{168} d_i}{ETOC_{fine}} = \frac{16016,4094}{40973,22} = 0,3909$$

$$\eta_{fine,non-failed} = \frac{\sum_{i=1}^{168} d_i}{TOC_{fine}} = \frac{16016,4094}{40615,06} = 0,3943$$

Παρατηρούμε ότι οι βαθμοί απόδοσης είναι βελτιωμένοι σε σχέση με τη λύση που αρχικοποίησε το λεπτομερές επίπεδο, όπως αναμενόταν.

Στον πίνακα 6.2.2.2 παρουσιάζεται η μέση φόρτιση κάθε μονάδας λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις ώρες που αυτή λειτουργεί, για τις λύσεις του αδρομερούς και του λεπτομερούς επιπέδου. Στον πίνακα 6.2.2.3 παρουσιάζονται οι ώρες λειτουργίας κάθε μονάδας για τις λύσεις του αδρομερούς και του λεπτομερούς επιπέδου. Από τους

πίνακες αυτούς βλέπουμε ότι μειώνονται οι ώρες λειτουργίας των μονάδων 4 και 5 που είναι μονάδες βάσης και αυξάνονται οι ώρες λειτουργίας των μονάδων 1 και 2 που είναι μονάδες αιχμής, ενώ το μέσο φορτίο όλων των μονάδων είναι μεγαλύτερο στο λεπτομερές επίπεδο. Αυτό συμβαίνει για τον εξής λόγο.

Αν η ζήτηση είναι τέτοια που να απαιτεί από τις μονάδες βάσεις να λειτουργούν σε μερικά φορτία, τότε μπορεί να γίνει η επιλογή να μην λειτουργήσουν οι μονάδες βάσεις και να λειτουργήσουν οι μονάδες αιχμής (αν καλύπτουν τη ζήτηση) σε μεγάλες φορτίσεις, ώστε να μειωθεί το συνολικό κόστος παραγωγής ενέργειας (μεγάλες φορτίσεις συνεπάγονται καλύτερους βαθμούς απόδοσης). Έτσι παρατηρούμε ότι οι μονάδες αιχμής (1 και 2) λειτουργούν με μέση φόρτιση 100%, ενώ παράλληλα αυξάνεται και η μέση φόρτιση των μονάδων βάσης (4 & 5). Η μονάδα 3 που εμφανίζει τη μεγαλύτερη δυναμικότητα, λειτουργεί όλες τις ώρες του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού σύμφωνα με τις λύσεις και των δύο επιπέδων βελτιστοποίησης. Ωστόσο, με τη βελτιστοποίηση του λεπτομερούς επιπέδου αυξάνεται η μέση φόρτισή της. Αυτό εξηγείται και από το γεγονός ότι οι δύο άλλες μονάδες βάσης λειτουργούν για λιγότερες ώρες. Έτσι οι μονάδες αιχμής καλύπτουν το κενό των μονάδων βάσης 4 και 5 και λειτουργούν σε φόρτιση 100% και η υπόλοιπη ζήτηση καλύπτεται με αύξηση της φόρτισης της μονάδας 3.

<b>Φορτίσεις %</b>		
	<b>Αδρομερές επίπεδο</b>	<b>Λεπτομερές Επίπεδο</b>
<b>Μονάδα 1</b>	100,00	100,00
<b>Μονάδα 2</b>	100,00	100,00
<b>Μονάδα 3</b>	54,14	79,80
<b>Μονάδα 4</b>	97,30	100,00
<b>Μονάδα 5</b>	83,53	100,00

**Πίνακας 6.2.2. 2:** Στο πίνακα παρουσιάζονται οι φορτίσεις των μονάδων για τις λύσεις του αδρομερούς και του λεπτομερούς επιπέδου βελτιστοποίησης. Παρατηρούμε ότι η φόρτιση όλων των μονάδων παρουσιάζεται μεγαλύτερη στη λύση του λεπτομερούς επιπέδου, για του λόγους που εξηγήθηκαν.

<b>Ώρες Λειτουργίας</b>		
	<b>Αδρομερές επίπεδο</b>	<b>Λεπτομερές Επίπεδο</b>
<b>Μονάδα 1</b>	56	57
<b>Μονάδα 2</b>	21	30
<b>Μονάδα 3</b>	72	72
<b>Μονάδα 4</b>	45	21
<b>Μονάδα 5</b>	66	41

**Πίνακας 6.2.2. 3:** Στον πίνακα παρουσιάζονται οι ώρες λειτουργίας των μονάδων για τις λύσεις του αδρομερούς και του λεπτομερούς επιπέδου. Παρατηρούμε ότι στο λεπτομερές επίπεδο αυξάνονται οι ώρες λειτουργίας των μονάδων αιχμής 1 και 2 και μειώνονται οι ώρες λειτουργίας των μονάδων βάσης 4 και 5, όπως ήδη εξηγήθηκε.

## Στρεφόμενη εφεδρεία

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το παρόν πρόβλημα αναφέρεται στην περίπτωση ενός εικονικού μεγάλου ελληνικού νησιού. Στα μεγάλα ελληνικά νησιά, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια διευρύνεται η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (κυρίως αιολικής). Αυτές οι μορφές ενέργειας κατά κανόνα επηρεάζονται ιδιαίτερα από μετεωρολογικούς παράγοντες και αυξάνουν τις απαιτήσεις του συστήματος σε στρεφόμενη εφεδρεία. Για το λόγο αυτό επαναλαμβάνεται η βελτιστοποίηση του παρόντος συστήματος λαμβάνοντας υπόψη και τον περιορισμό της στρεφόμενης εφεδρείας (spinning reserve) που επιβάλλεται από το διαχειριστή του συστήματος. Επιλέγεται να καλύπτεται στρεφόμενη εφεδρεία ίση με το 5% της ζήτησης του συστήματος. Για κάθε λύση που δεν καλύπτει την απαίτηση για στρεφόμενη εφεδρεία επιβάλλεται ποινή η οποία συνεισφέρει και αυτή στην τιμή του ολικού λειτουργικού κόστους της λύσης. Για τον τρόπο υπολογισμού της στρεφόμενης εφεδρείας έγινε αναφορά στην παράγραφο 1.2.3 του κεφαλαίου 1. Η βέλτιστη λύση που εντοπίζεται από το λεπτομερές επίπεδο παρουσιάζει μέσο ολικό κόστος λειτουργίας ίσο με  $TOC_{Sr, fine, MC} = 41024,94 \text{ MWh}$  και ολικό κόστος λειτουργίας σε σενάριο χωρίς βλάβες ίσο με  $TOC_{SR, fine, non-failed} = 40686,36 \text{ MWh}$ . Παρατηρούμε ότι οι τιμές αυτές είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις τιμές που προέκυψαν χωρίς να λαμβάνεται υπόψη στρεφόμενη εφεδρεία. Αυτό είναι λογικό γιατί η λύση πρέπει πλέον να καλύπτει έναν ακόμα περιορισμό. Επομένως, υποχρεωτικά κάποιες από τις μονάδες θα εργάζονται σε μικρότερη φόρτιση (ειδικά τις ώρες που η μονάδα 3 εργάζεται στο μέγιστο φορτίο της) και άρα με μικρότερο βαθμό απόδοσης. Η λύση που λαμβάνει υπόψη της και τη στρεφόμενη εφεδρεία παρουσιάζει μηδενική απώλεια της ζήτησης στο σενάριο χωρίς βλάβες, ενώ η μέση απώλεια της ζήτησης για 4000 σενάρια Monte-Carlo είναι 38,98 MWh. Παρατηρούμε ότι η μέση απώλεια της ζήτησης είναι μικρότερη όταν λαμβάνεται υπόψη και η στρεφόμενη εφεδρεία. Αυτό συμβαίνει γιατί μέρος της ζήτησης που προορίζεται να καλυφθεί από μία μονάδα που βρίσκεται σε κατάσταση μη-διαθεσιμότητας, καλύπτεται από τα αποθέματα σε στρεφόμενη εφεδρεία. Επομένως, θα μπορούσαμε να πούμε ότι η λύση που λαμβάνει υπόψη και τη στρεφόμενη εφεδρεία παρουσιάζει μεγαλύτερο κόστος, αλλά και μεγαλύτερη ασφάλεια ως προς την κάλυψη της ζήτησης όταν συμβαίνουν πιθανοτικές βλάβες. Στους πίνακες 6.2.2.4 και 6.2.2.5 γίνεται σύγκριση των μέσων φορτίων των μονάδων και των ωρών λειτουργίας τους αντίστοιχα για την περίπτωση που δεν λαμβάνεται υπόψη στρεφόμενη εφεδρεία και για την περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη.

<b>Φορτίσεις %</b>		
	<b>Χωρίς Στρεφόμενη Εφεδρεία</b>	<b>Με Στρεφόμενη Εφεδρεία</b>
<b>Μονάδα 1</b>	100,00	100,00
<b>Μονάδα 2</b>	100,00	100,00
<b>Μονάδα 3</b>	79,80	78,05
<b>Μονάδα 4</b>	100,00	100,00
<b>Μονάδα 5</b>	100,00	98,57

**Πίνακας 6.2.2. 4:** Στον πίνακα παρουσιάζονται οι φορτίσεις των μονάδων για την περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη στρεφόμενη εφεδρεία και για την περίπτωση που δεν λαμβάνεται υπόψη. Παρατηρούμε ότι όταν λαμβάνεται υπόψη στρεφόμενη εφεδρεία, οι μέσες φορτίσεις των μονάδων είναι μικρότερες. Αυτό συμβαίνει γιατί πρέπει από το περιθώριο σε φόρτιση κάθε μονάδας να καλύπτεται η απαιτούμενη στρεφόμενη εφεδρεία.

<b>Ώρες Λειτουργίας</b>		
	<b>Χωρίς Στρεφόμενη Εφεδρεία</b>	<b>Με Στρεφόμενη Εφεδρεία</b>
<b>Μονάδα 1</b>	57	58
<b>Μονάδα 2</b>	30	35
<b>Μονάδα 3</b>	72	72
<b>Μονάδα 4</b>	21	29
<b>Μονάδα 5</b>	41	33

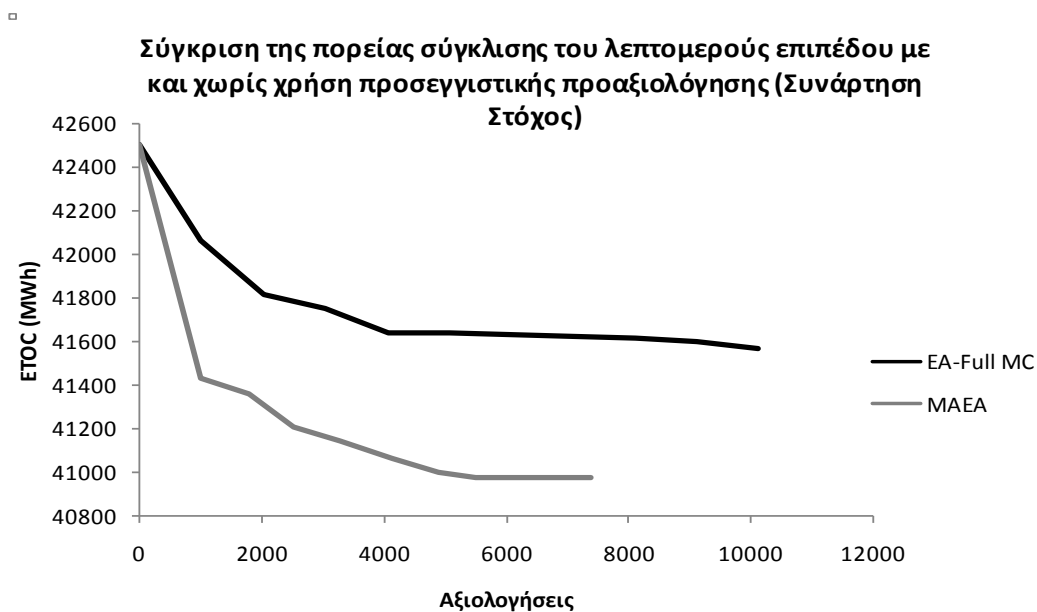
**Πίνακας 6.2.2. 5:** Στον πίνακα παρουσιάζονται οι ώρες λειτουργίας των μονάδων για την περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη στρεφόμενη εφεδρεία και για την περίπτωση που δεν λαμβάνεται υπόψη. Παρατηρούμε ότι όταν λαμβάνεται υπόψη στρεφόμενη εφεδρεία οι περισσότερες μονάδες λειτουργούν για πιο πολλές ώρες. Αυτό συμβαίνει γιατί πλέον σε αρκετές ώρες αν η απαίτηση σε στρεφόμενη εφεδρεία δεν καλύπτεται από τις μονάδες που βρίσκονται σε κατάσταση παραγωγής χρειάζεται να τεθούν σε λειτουργία και άλλες μονάδες για να καλύψουν την απαίτηση. Αυτός είναι και ένας ακόμη λόγος που αυξάνεται η μέση φόρτιση των μονάδων στην περίπτωση με στρεφόμενη εφεδρεία, γιατί αν λειτουργούν περισσότερες μονάδες τότε η συνολική παραγωγή καταμερίζεται διαφορετικά σε κάθε μονάδα.

### 6.2.3 Αξιολόγηση

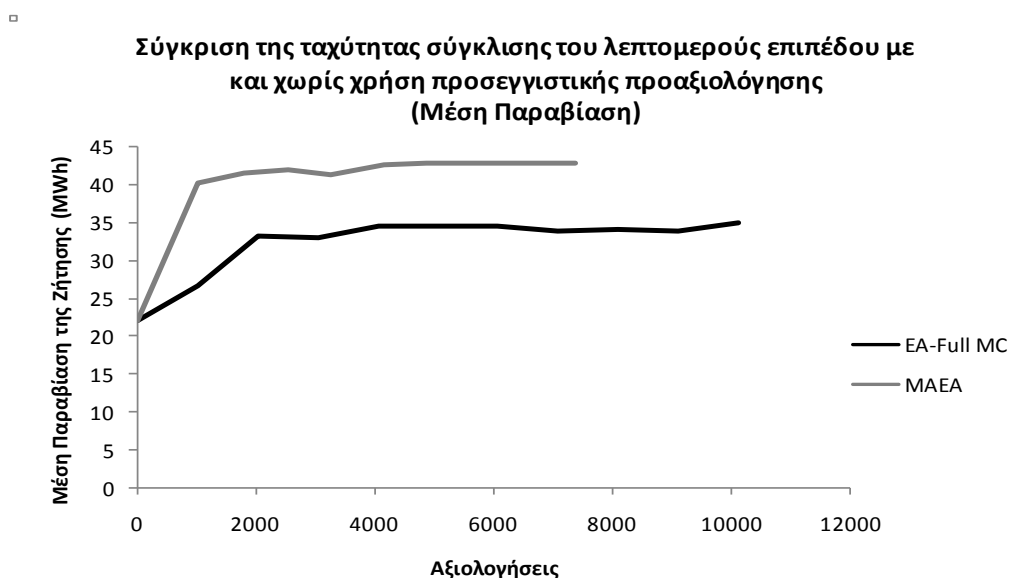
Από τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του συστήματος αυτού συμπεραίνουμε ότι η μέθοδος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται εντοπίζει τη βέλτιστη λύση η οποία μάλιστα χαρακτηρίζεται και από πολύ καλό βαθμό απόδοσης (περίπου 39%). Στη βελτιστοποίηση έχουν ληφθεί υπόψη και πιθανοτικές βλάβες, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε απομονωμένα συστήματα.

Επίσης, η λύση που προέκυψε λαμβάνοντας υπόψη και τη στρεφόμενη εφεδρεία παρουσιάζει επίσης πολύ καλό βαθμό απόδοσης (ελάχιστα αυξημένο σε σχέση με την περίπτωση που δε λαμβάνεται υπόψη κάτι τέτοιο) και μικρότερη τιμή της μέσης παραβίασης της ζήτησης. Μπορούμε να πούμε επομένως ότι όσο αυξάνεται η απαίτηση του διαχειριστή του συστήματος για στρεφόμενη εφεδρεία, τόσο μειώνονται οι πιθανότητες να μην καλυφθεί η ζήτηση σε περίπτωση εμφάνισης βλάβης (πάντα βέβαια σε άμεση σχέση με τις τιμές της ζήτησης και τις διαθέσιμες μονάδες), με αντίστοιχη βέβαια μείωση του βαθμού απόδοσης. Επομένως, η στρεφόμενη εφεδρεία εξαρτάται μεν από τα χαρακτηριστικά του δικτύου (ύπαρξη αιολικών πάρκων κ.λ.π.), αλλά η τιμή της μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για να γίνει έλεγχος της μέσης τιμής παραβίασης της ζήτησης. Όσο αυξάνονται οι απαιτήσεις σε στρεφόμενη εφεδρεία μειώνεται ο βαθμός απόδοσης της βέλτιστης λύσης. Επομένως, είναι στην ευχέρεια του διαχειριστή του συστήματος να κάνει την επιλογή σχετικά με την τιμή της στρεφόμενης εφεδρείας, ώστε να επιλέξει τον ιδανικό συνδυασμό τιμών των δύο αντικρουόμενων στόχων (μέσο ολικό κόστος λειτουργίας και στρεφόμενη εφεδρεία) στη λογική του μετώπου Pareto (Pareto Front). Σημειώνεται, ωστόσο ότι δεν καταλήγουμε σε δικριτηριακή βελτιστοποίηση, αφού μοναδικός στόχος είναι η τιμή του μέσου ολικού κόστους λειτουργίας ενώ η μέθοδος βελτιστοποίησης διαχειρίζεται τη στρεφόμενη εφεδρεία ως περιορισμό που πρέπει να τηρείται από τη βέλτιστη λύση.

Στο παρόν πρόβλημα λόγω του μεγέθους του (αριθμός μονάδων και ωρών) γίνεται επίσης σαφής η μείωση του υπολογιστικού κόστους που επιτυγχάνεται με τη χρήση της μεθόδου της προσεγγιστικής προαξιολόγησης και την εφαρμογή της στη μέθοδο Monte-Carlo με βάση την τεχνική που προτείνεται στο κεφάλαιο 5. Στο σχήμα 6.2.3.1 που ακολουθεί φαίνεται η πορεία σύγκλισης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης του λεπτομερούς επιπέδου στην περίπτωση που δεν γίνεται χρήση της προσεγγιστικής προαξιολόγησης (EA – Full MC) και στην περίπτωση που γίνεται χρήση της (MAEA). Στο σχήμα 6.2.3.2 παρουσιάζεται η μεταβολή της τιμής της μέσης παραβίασης της ζήτησης για την περίπτωση χρήσης προσεγγιστικής αξιολόγησης και για την περίπτωση που δεν γίνεται χρήση της μεθόδου αυτής. Και από τα δύο σχήματα συμπεραίνουμε ότι για το ίδιο υπολογιστικό κόστος, όταν χρησιμοποιείται προσεγγιστική προαξιολόγηση εντοπίζεται καλύτερη λύση.



**Σχήμα 6.2.3. 1:** Στο σχήμα παρουσιάζεται η πορεία σύγκλισης του αλγόριθμου βελτιστοποίησης του λεπτομερούς επιπέδου με και χωρίς χρήση της μεθόδου προσεγγιστικής προαξιολόγησης, όπως αυτή προσαρμόστηκε στο πλαίσιο της προσομοίωσης Monte Carlo στο κεφάλαιο 5. Παρατηρούμε ότι όταν γίνεται χρήση προσεγγιστικής προαξιολόγησης (MAEA) ο αλγόριθμος συγκλίνει για το ίδιο υπολογιστικό κόστος σε αρκετά καλύτερη λύση. Με τον τρόπο αυτό συμπεραίνουμε ότι η χρήση προσεγγιστικής προαξιολόγησης μειώνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος του αλγορίθμου.



**Σχήμα 6.2.3. 2:** Στο σχήμα παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης παραβίασης της ζήτησης με και χωρίς χρήση της μεθόδου προσεγγιστικής προαξιολόγησης. Για τον ίδιο αριθμό αξιολογήσεων, όταν γίνεται χρήση της μεθόδου προσεγγιστικής προαξιολόγησης (MAEA), η τιμή της μέσης παραβίασης της ζήτησης παρουσιάζεται μεγαλύτερη. Επομένως, ο αλγόριθμος πλησιάζει προσηγορικά τα όρια των περιορισμών.





## 7. Επίλογος – Συμπεράσματα

### 7.1 Ανακεφαλαίωση

Η παρούσα διπλωματική εργασία δομήθηκε στη βάση της πρόσφατα ολοκληρωθείσας διδακτορικής διατριβής της Δρ. Χαρίκλειας Γεωργοπούλου, [1], στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ. Στη μέθοδο και στο λογισμικό της διατριβής [1] έγιναν επιπλέον διερευνήσεις (και βελτιώσεις, όπου η διερεύνηση το υπέδειξε) και αναδομήθηκε (στη βάση νέων συμπληρωματικών ιδεών) τμήμα του λογισμικού αυτού. Οι νέες ιδέες, τα πρωτότυπα στοιχεία δηλαδή της παρούσας εργασίας και, ταυτόχρονα, οι επεμβάσεις που έγιναν στο προϋπάρχον λογισμικό, ακολουθούν σε χωριστή ενότητα. Κύριος σκοπός της εργασίας ήταν να βελτιωθεί, ακόμη περισσότερο (κυρίως ως προς τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτεί), μια αποδοτική μέθοδος υπολογισμού της βέλτιστης ανάθεσης φορτίου στις μονάδες σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, όταν είναι δεδομένη η ζήτηση ενέργειας για τον ορίζοντα προγραμματισμού (με χρονική μονάδα την ώρα) αλλά ταυτοχρόνως μπορούν να λαμβάνουν χώρα πιθανοτικές βλάβες των μονάδων. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και η μέθοδος Monte-Carlo είναι τα τρία βασικά δομικά στοιχεία αυτής της διπλωματικής εργασίας. Οι πιστοποιήσεις και οι συγκρίσεις έγιναν σε εικονικά απομονωμένα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής, όχι πολύ διαφορετικά από αυτά που χρησιμοποιούν (ή θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν) μεγάλα ελληνικά νησιά, ώστε να φανεί η πρακτική χρησιμότητα της προτεινόμενης μεθόδου στον ελληνικό χώρο.

Ανακεφαλαιώνοντας, στα κεφάλαια που προηγήθηκαν,

- Διατυπώθηκε η αξία βελτιστοποίησης του προγράμματος λειτουργίας σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη πιθανοτικές βλάβες των μονάδων.
- Διατυπώθηκε μαθηματικά το πρόβλημα βελτιστοποίησης, δηλαδή ορίστηκαν οι μεταβλητές σχεδιασμού, οι στόχοι και οι περιορισμοί της βελτιστοποίησης.
- Περιγράφηκε ο τρόπος χειρισμού των παραμέτρων του προβλήματος, κυρίως αυτών που αφορούν στις πιθανοτικές βλάβες.
- Αναπτύχθηκε η μέθοδος της προσομοίωσης Monte-Carlo για χρήση στην αξιολόγηση υποψηφίων λύσεων και, κατά συνέπεια, στη βελτιστοποίηση του προγράμματος λειτουργίας σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με πιθανοτικές βλάβες.
- Έγινε μία σύντομη επισκόπηση των μεθόδων που προτείνονται στη βιβλιογραφία για την επίλυση του προβλήματος.

- Περιγράφηκε η βασική δομή και η λειτουργία των εξελικτικών αλγορίθμων (EAs) ως μεθόδους βελτιστοποίησης και αναφέρθηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης τους, συγκριτικά με άλλες μεθόδους.
- Προσαρμόστηκε και διερευνήθηκε (ώστε να συμπεριφέρεται «βέλτιστα» στο πρόβλημα που εδώ μας ενδιαφέρει) η μέθοδος της προσεγγιστικής προαξιολόγησης για την επιτάχυνση των εξελικτικών αλγορίθμων.
- Η τελευταία βασίστηκε στη χρήση δικτύων συναρτήσεων ακτινικής βάσης (RBF δίκτυα) ως μεταπροτύπων κατά τη βελτιστοποίηση με εξελικτικούς αλγόριθμους υποβοηθούμενων από μεταπρότυπα (MAEAs).
- Χρησιμοποιήθηκε και περιγράφηκε ένας υπάρχων διεπίπεδος εξελικτικός αλγόριθμος για την επίλυση του παρόντος προβλήματος.
- Βελτιώθηκε ένα μοντέλο εκπαίδευσης μεταπροτύπου με χρήση RBF δικτύων για εφαρμογή στην ειδική περίπτωση λειτουργίας των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής υπό πιθανοτικούς περιορισμούς, όπως πιθανοτικές βλάβες.
- Αναλύθηκαν τα χαρακτηριστικά δύο συστημάτων εικονικών ελληνικών νησιών.
- Έγινε εφαρμογή του προτεινόμενου αλγόριθμου βελτιστοποίησης στα δύο αυτά συστήματα.
- Έγινε αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των εφαρμογών του αλγορίθμου.
- Διαπιστώθηκε η ακριβής και ορθή λειτουργία του αλγορίθμου και η σημαντική μείωση του υπολογιστικού κόστους που προκύπτει από τη χρήση του.

## 7.2 Η Προτεινόμενη Μέθοδος, εν συντομία

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση αφορά στη χρήση ενός διεπίπεδου σχήματος βελτιστοποίησης, βασισμένου στους εξελικτικούς αλγορίθμους.

Στο αδρομερές επίπεδο βελτιστοποίησης βασικός στόχος είναι να αποκτηθεί με χαμηλό υπολογιστικό κόστος βελτιστοποίησης μία καλή ενδιάμεση λύση η οποία θα βελτιστοποιηθεί περαιτέρω στο λεπτομερές επίπεδο. Για το λόγο αυτό, στη βελτιστοποίηση του αδρομερούς επιπέδου επιλέγεται να μην συμπεριληφθούν πιθανοτικές βλάβες, και επομένως, δεν γίνεται χρήση της μεθόδου προσομοίωσης Monte-Carlo, η οποία έτσι κι αλλιώς είναι η σημαντικότερη αιτία αύξησης του υπολογιστικού κόστους.

Στο λεπτομερές επίπεδο, στόχος είναι η μέγιστη (με βάση τα υπάρχοντα μαθηματικά μοντέλα) ακρίβεια κατά την αξιολόγηση υποψηφίων λύσεων (σεναρίων λειτουργίας των μονάδων του σταθμού) και, άρα, πρακτικά, το επίπεδο αυτό επωμίζεται όλο το υπολογιστικό κόστος. Στο επίπεδο αυτό, λαμβάνονται υπόψη και πιθανοτικές βλάβες, οι οποίες εντάσσονται στο λογισμικό αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης με τη μέθοδο Monte-Carlo. Επιπλέον, για να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος της βελτιστοποίησης του λεπτομερούς επιπέδου, γίνεται χρήση της μεθόδου της προσεγγιστικής προαξιολόγησης, καθώς και της μεθόδου επαναληπτικής χρονικά κατατετημένης βελτιστοποίησης.

Τα μεταπρότυπα που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο της προσεγγιστικής προαξιολόγησης, είναι δίκτυα συναρτήσεων ακτινικής βάσης (RBF δίκτυα). Αυτό, βέβαια, δεν είναι περιοριστικό, μιας και στη θέση τους θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε νευρωνικό δίκτυο άλλου τύπου. Η προσαρμογή του τρόπου χρήσης του μεταπρότυπου στο πρόβλημα της λειτουργίας των μονάδων λαμβάνοντας υπόψη πιθανοτικές βλάβες γίνεται με την επιλογή αντιπροσωπευτικών σεναρίων βλαβών-επισκευών (στο σημείο προσδιορίζεται και η συμβολή της παρούσας εργασίας στη μέθοδο «βάσης» [1]) και την χρήση του ολικού κόστους λειτουργίας κάθε σεναρίου ως μεταβλητή εισόδου για το μεταπρότυπο. Για την επιλογή των αντιπροσωπευτικών δειγμάτων προτείνονται και διερευνώνται δύο μέθοδοι. Η πρώτη πραγματοποιεί της επιλογή με βάση το ολικό κόστος λειτουργίας μιας λύσης σε κάθε σενάριο. Η δεύτερη πραγματοποιεί την επιλογή με κριτήριο την απόσταση των δυαδικών στοιχειοσειρών των χρονοσειρών βλαβών-επισκευών που αντιστοιχούν σε κάθε σενάριο του δείγματος Monte-Carlo. Καθεμιά από τις μεθόδους αυτές παρουσιάζει τα δικά της χαρακτηριστικά. Η δεύτερη μέθοδος παρουσιάζει το πλεονέκτημα της ανεξαρτησίας από κάποια λύση (πάνω στην οποία γίνεται η επιλογή των σεναρίων). Η πρώτη εξαρτάται από τη λύση που χρησιμοποιείται για να γίνει η επιλογή των σεναρίων, αλλά παρουσιάζει σταθερότητα ως προς την αλλαγή των ρυθμών αστοχίας και επισκευής (εγγυάται ότι αν αλλάξουν οι τιμές αυτών των ρυθμών, θα επιλεγθούν και πάλι τα πιο αντιπροσωπευτικά σενάρια με βάση το κριτήριο που χρησιμοποιείται), όπως φάνηκε από την εφαρμογή 1 του κεφαλαίου 6.

### 7.3 Νέα στοιχεία

Τα νέα στοιχεία της παρούσας διπλωματικής εργασίας εντοπίζονται στη διερεύνηση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την επιλογή των αντιπροσωπευτικών σεναρίων με σκοπό την εκπαίδευση του μεταπροτύπου και στις εφαρμογές της μεθόδου βελτιστοποίησης σε δύο εικονικά συστήματα ελληνικών νησιών.

#### Νέα στοιχεία στην εκπαίδευση του μεταπροτύπου

- Έγινε διερεύνηση των παραμέτρων της εκπαίδευσης (τιμή ακτίνας, πλήθος κέντρων εκπαίδευσης, κ.λ.π.) του RBF δικτύου.
- Έγινε διερεύνηση της επίδρασης που έχει στην ακρίβεια του δικτύου το πλήθος των αντιπροσωπευτικών σεναρίων.
- Διατυπώθηκαν δύο μέθοδοι επιλογής των αντιπροσωπευτικών σεναρίων που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση του μεταπροτύπου όταν γίνεται χρήση της μεθόδου Monte-Carlo.

#### Νέα στοιχεία στις εφαρμογές της μεθόδου βελτιστοποίησης

- Έγινε μοντελοποίηση της λειτουργίας πραγματικών μηχανών που χρησιμοποιούνται ή θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε απομονωμένα συστήματα ελληνικών νησιών, δηλαδή παρουσιάστηκε ο τρόπος χειρισμού των δεδομένων του κατασκευαστή, ώστε αυτά να μετατραπούν σε πληροφορίες αξιοποιήσιμες από τη μέθοδο βελτιστοποίησης.
- Έγινε εφαρμογή της μεθόδου βελτιστοποίησης σε δύο εικονικά συστήματα ελληνικών νησιών και αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα. Διατυπώθηκε η ευκολία προσαρμογής της μεθόδου σε διαφορετικά συστήματα και το μειωμένο υπολογιστικό κόστος της σε σχέση με τη βελτιστοποίηση με εξελικτικούς αλγορίθμους και χρήση προσομοίωσης Monte-Carlo χωρίς χρήση προσεγγιστικής προαξιολόγησης.

### 7.4 Σχόλια

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται χαρακτηρίζεται από τα πλεονεκτήματα της χρήσης των εξελικτικών αλγορίθμων, ενώ παράλληλα εξαλείφει το βασικό μειονέκτημά τους που είναι το μεγάλο υπολογιστικό κόστος.

Λόγω της χρήσης εξελικτικών αλγορίθμων, οι τροποποιήσεις που απαιτούνται για τη βελτιστοποίηση διαφορετικών συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής είναι ελάχιστες και περιορίζονται μόνο στο λογισμικό αξιολόγησης κάθε συστήματος. Επομένως, η μέθοδος βελτιστοποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε απομονωμένο σύστημα ηλεκτρισμού (με το νέο κατάλληλο λογισμικό αξιολόγησης), χωρίς να χρειάζεται επαναδιατύπωσή της.

Λόγω της χρήσης της μεθόδου προσεγγιστικής προαξιολόγησης, το υπολογιστικό κόστος της μεθόδου μειώνεται δραστικά, κάτι που είναι εμφανές και από τις εφαρμογές του κεφαλαίου 6. Επιπλέον, με κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων του μεταπροτύπου και της χρήσης του μέσα στον αλγόριθμο, η μείωση του υπολογιστικού κόστους γίνεται με αμελητέα απώλεια σε ακρίβεια.

Τέλος, λόγω της χρήσης επαναληπτικής χρονικά κατατεταγμένης βελτιστοποίησης, επιταχύνεται η εύρεση της βέλτιστης λύσης στη βελτιστοποίηση του λεπτομερούς επιπέδου. Αυτό γίνεται γιατί κάθε εξελικτικός αλγόριθμος διαχειρίζεται μικρότερο πλήθος μεταβλητών σχεδιασμού. Άρα σε κάθε εξελικτικό αλγόριθμο αξιολογούνται όλο και περισσότεροι συνδυασμοί των τιμών αυτών των μεταβλητών και γίνεται αναλυτικότερη εξερεύνηση του χώρου των υποψήφιων λύσεων.

## **7.5 Γενίκευση και Προτάσεις για Μελλοντική Εργασία**

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε για την εκπαίδευση μεταπροτύπου για τη λειτουργία μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με πιθανοτικές βλάβες μπορεί να γενικευτεί και να χρησιμοποιηθεί και σε άλλα προβλήματα βελτιστοποίησης που εμπεριέχουν στοχαστικές μεταβλητές. Με τον τρόπο αυτό, γίνεται δυνατή η ένταξη της μεθόδου Monte-Carlo στη βελτιστοποίηση με εξελικτικούς αλγορίθμους, εξαλείφοντας το μειονέκτημα του μεγάλου υπολογιστικού κόστους.

Επιπλέον, θα μπορούσε να γίνει βελτιστοποίηση της επιλογής των παραμέτρων του RBF δικτύου που χρησιμοποιείται ως μεταπρότυπο με στόχο την ελαχιστοποίηση του σφάλματος της απόκρισης του δικτύου. Σε ένα τέτοιο πρόβλημα, μεταβλητές σχεδιασμού θα ήταν οι παράμετροι του δικτύου και συνάρτηση-στόχος το σφάλμα της απόκρισης του δικτύου. Έτσι μπορεί να δημιουργηθεί ένα λογισμικό που θα επιλέγει τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του μεταπροτύπου, χωρίς να απαιτείται να γίνει παραμετρική ανάλυση κάθε φορά για το πρόβλημα στο οποίο το RBF δίκτυο χρησιμοποιείται ως μεταπρότυπο.

Τέλος, προτείνεται η παραλληλοποίηση της βελτιστοποίησης λεπτομερούς επιπέδου, ώστε κάθε υποδιαίρεση του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού να βελτιστοποιείται σε διαφορετικό επεξεργαστή. Με τον τρόπο αυτό δε μειώνεται περαιτέρω το πραγματικό υπολογιστικό κόστος (πλήθος αξιολογήσεων), μειώνεται όμως ο χρόνος αναμονής του χρήστη. Στην ίδια λογική, θα ήταν ενδιαφέρον να παραλληλοποιηθεί

και η διαδικασία Monte-Carlo, μιας και σε αυτήν αξιολογούνται ταυτόχρονα χιλιάδες ανεξάρτητα μεταξύ τους σενάρια. Η παραλληλοποίηση θα μπορούσε να γίνει είτε σε συστοιχία παράλληλων υπολογιστών (CPU), είτε με χρήση καρτών γραφικών (GPU). Για τη δεύτερη περίπτωση, θα χρειαστεί βέβαια αναδιτύπωση του λογισμικού αξιολόγησης σε κατάλληλη γλώσσα προγραμματισμού (π.χ. CUDA) [42].

## **Παραρτήματα**



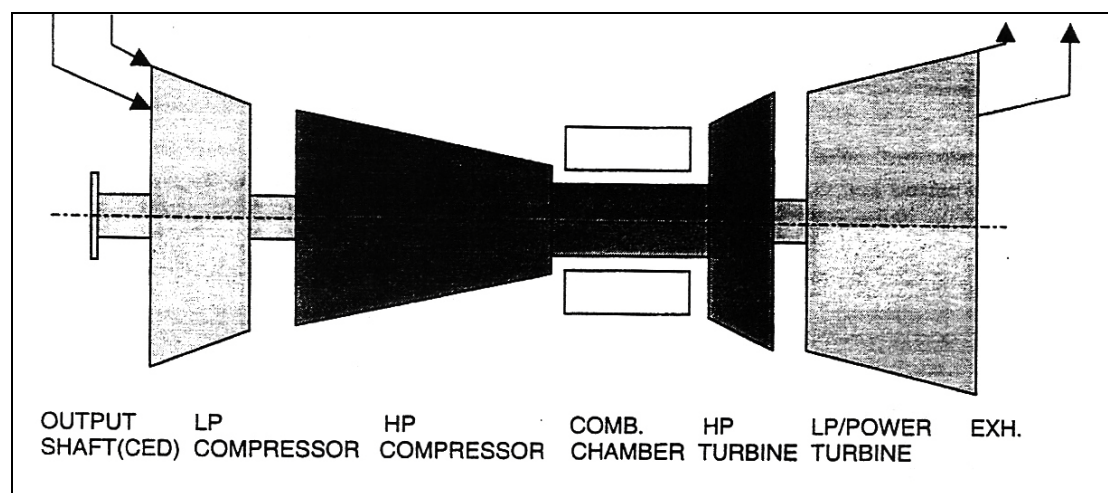


## Παράρτημα Α

Στο παράρτημα αυτό συμπεριλαμβάνονται κάποια χαρακτηριστικά των μονάδων που δεν αφορούν άμεσα τη βελτιστοποίηση, εμφανίζουν όμως ενδιαφέρον από μηχανολογικής πλευράς.

### A.1 Μονάδα 1 – Αεριοστρόβιλος LM6000PC Sprint (General Electric)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 2.2.1 του κεφαλαίου 2 πρόκειται για μία μονάδα αιχμής με βασικά χαρακτηριστικά αυτά που παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2.1.4. Στην συνέχεια θα γίνει μία σύντομη περιγραφή των συνιστωσών του αεριοστρόβιλου LM6000PC Sprint και θα αναφερθούν κάποια πιο αναλυτικά στοιχεία για το σύστημα καύσης και το σύστημα ψεκασμού νερού σε μορφή spray (σύστημα Sprint). Πριν αρχίσουμε να αναφερόμαστε σε κάθε συνιστώσα παρουσιάζεται στο σχήμα Π.Α.1.1 η βασική διάταξη των συνιστωσών του αεριοστρόβιλου. Να υπενθυμίσουμε ότι όλοι οι αεριοστρόβιλοι της σειράς LM6000 είναι μηχανές διπλού τυμπάνου και έτσι δεν χρησιμοποιούν στρόβιλο ισχύος, αλλά στρόβιλο χαμηλής πίεσης ο οποίος είναι υπεύθυνος τόσο για την κίνηση του συμπιεστή χαμηλής πίεσης όσο και για την κίνηση της ατράκτου ισχύος.

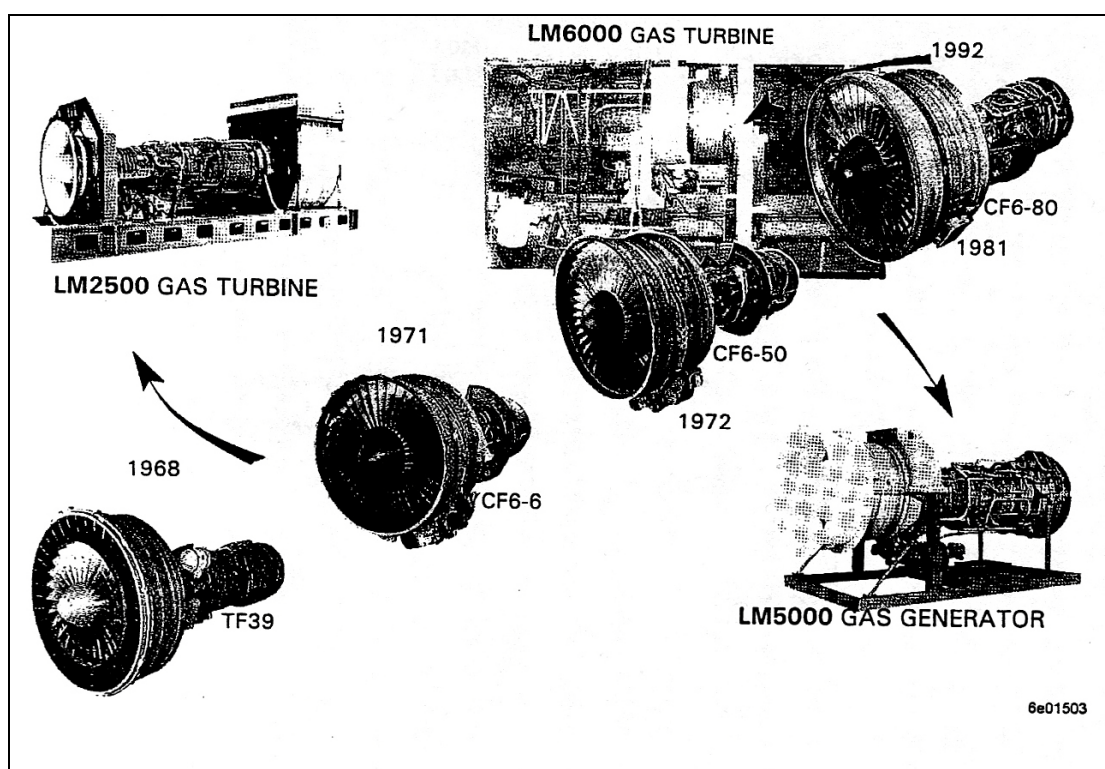


**Σχήμα Π.Α.1. 1:** Βασική διάταξη συνιστωσών του αεριοστρόβιλου LM6000 (σχήμα από πηγή [34]).

Πριν γίνει αναφορά σε κάθε συνιστώσα του αεριοστρόβιλου αξίζει να γίνει μία πιο εκτενής αναφορά στην ιστορία του μοντέλου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 2.2.1 του κεφαλαίου 2 οι αεριοστρόβιλοι της σειράς LM6000 είναι παράγωγοι αεροπορικών κινητήρων και συγκεκριμένα προέρχονται από το μοντέλο

CF6-80C2 της σειράς αεροπορικών κινητήρων CF6. Ο πρώτος βιομηχανικός αεριοστρόβιλος παράγωγος αεροπορικού κινητήρα της σειράς CF6 που δημιουργήθηκε είναι ο LM25000 που βασίστηκε στο μοντέλο CF6-6.

Η ιστορική εξέλιξη των κινητήρων CF6 και η παράλληλη εξέλιξη των μοντέλων της σειράς LM που προέρχονται απ' αυτούς παρουσιάζεται στο σχήμα Π.Α.1.2. Οι κινητήρες της σειράς CF6 είναι διπλού τυμπάνου, turbofan μεγάλου λόγου παράκαμψης. Προέρχονται από τον κινητήρα TF39 που έχει χρησιμοποιηθεί σε αεροσκάφη της πολεμικής αεροπορίας και αποτέλεσε τον πρώτο turbofan κινητήρα μεγάλου λόγου παράκαμψης παγκοσμίως. Περισσότερα στοιχεία για τους κινητήρες της σειράς CF6 και της σειράς TF39 μπορούν να αναζητηθούν στο διαδίκτυο στη πηγή [40].



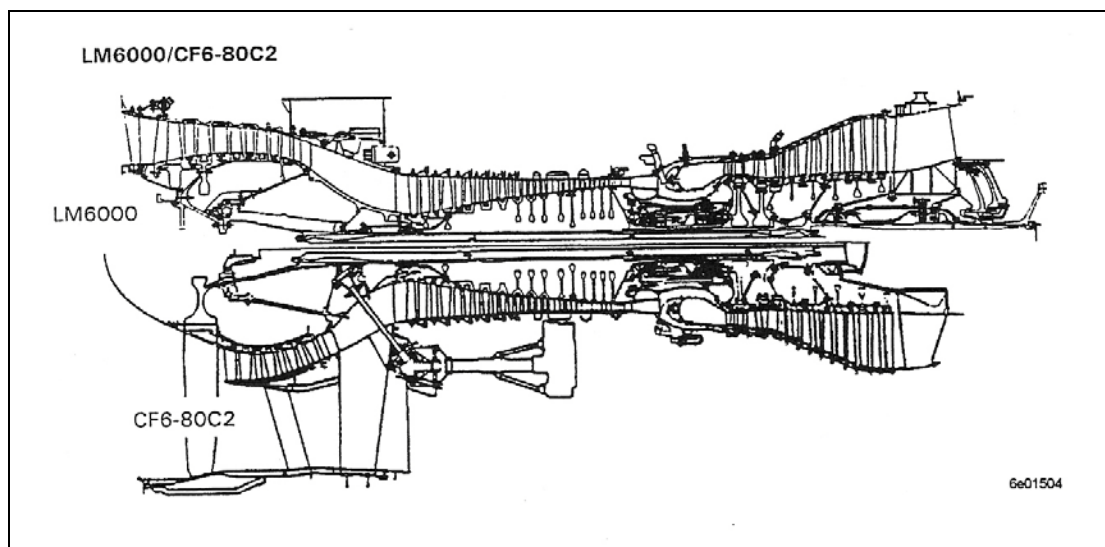
**Σχήμα Π.Α.1. 2:** Ιστορική εξέλιξη της σειράς LM παράλληλα με τη σειρά των αεροπορικών κινητήρων CF6 από την οποία προέρχεται (σχήμα από πηγή [34]).

Ο κινητήρας CF6-80C2 έχει υποστεί κάποιες μετατροπές για να παραχθεί από αυτόν το μοντέλο LM6000 που προορίζεται για βιομηχανική χρήση. Οι κυριότερες είναι οι ακόλουθες:

- Στο μπροστινό μέρος του αεριοστρόβιλου έχει αφαιρεθεί ο μεγάλος ανεμιστήρας (fan) και έχουν προστεθεί οδηγία πτερύγια εισόδου (inlet guide vanes).
- Ο συμπιεστής χαμηλής πίεσης που χρησιμοποιείται στο μοντέλο LM6000 προέρχεται από το μοντέλο CF6-50.

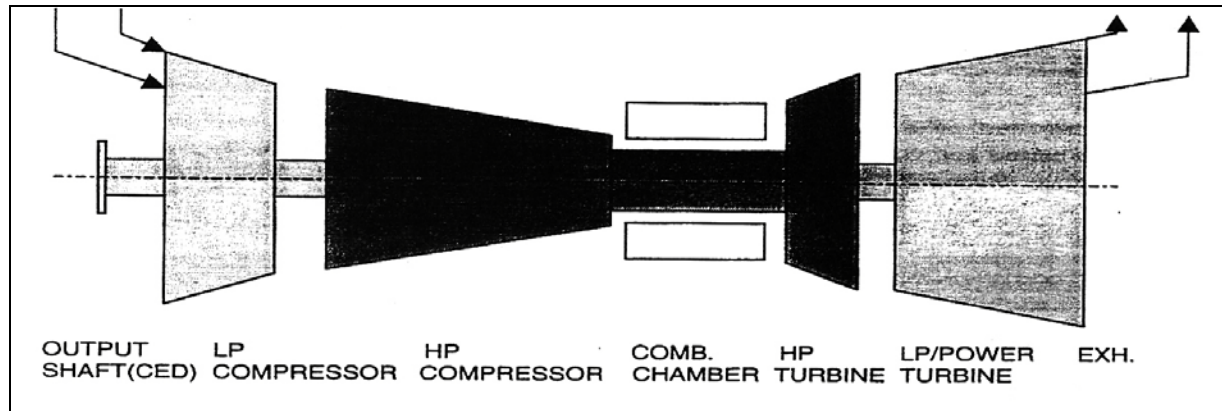
- Έχουν προστεθεί πλαίσια στο μπροστινό και στο πίσω μέρος.
- Έχει προστεθεί η άτρακτος ισχύος τόσο στη μεριά του συμπιεστή όσο και στη μεριά του στροβίλου (τα μοντέλα της σειράς LM6000 παρέχουν και τις δύο εναλλακτικές τοποθέτησης της γεννήτριας, ή ακόμα και τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν δύο γεννήτριες, μία στη μεριά του συμπιεστή και μία στη μεριά του στροβίλου).
- Χρησιμοποιείται νέο σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου για βιομηχανική χρήση.
- Έχει προστεθεί υδραυλικό σύστημα για μεταβλητή γεωμετρία.

Ο κινητήρας CF6-80C2 και το παράγωγός του βιομηχανικός αεριοστρόβιλος LM6000 συγκρίνονται στο σχήμα Π.Α.1.3.



**Σχήμα Π.Α.1. 3:** Σύγκριση του αεριοστρόβιλου LM6000 και του αεροπορικού κινητήρα CF6-80C2 από τον οποίο προέρχεται (σχήμα από πηγή [34]).

Τέλος, πριν γίνει αναφορά στις επιμέρους συνιστώσες της μηχανής παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα Π.Α.1.1 κάποιες τιμές των βασικών θερμοδυναμικών μεγεθών στα διάφορα σημεία της μηχανής με βάση τη διάταξη που παρουσιάζεται στο σχήμα Π.Α.1.1. Να σημειωθεί ότι οι τιμές αναφέρονται στο μοντέλο LM6000PC που δεν χρησιμοποιεί το σύστημα Sprint και επομένως δεν συμπίπτουν ακριβώς με τις τιμές των μεγεθών του μοντέλου LM6000PC Sprint.

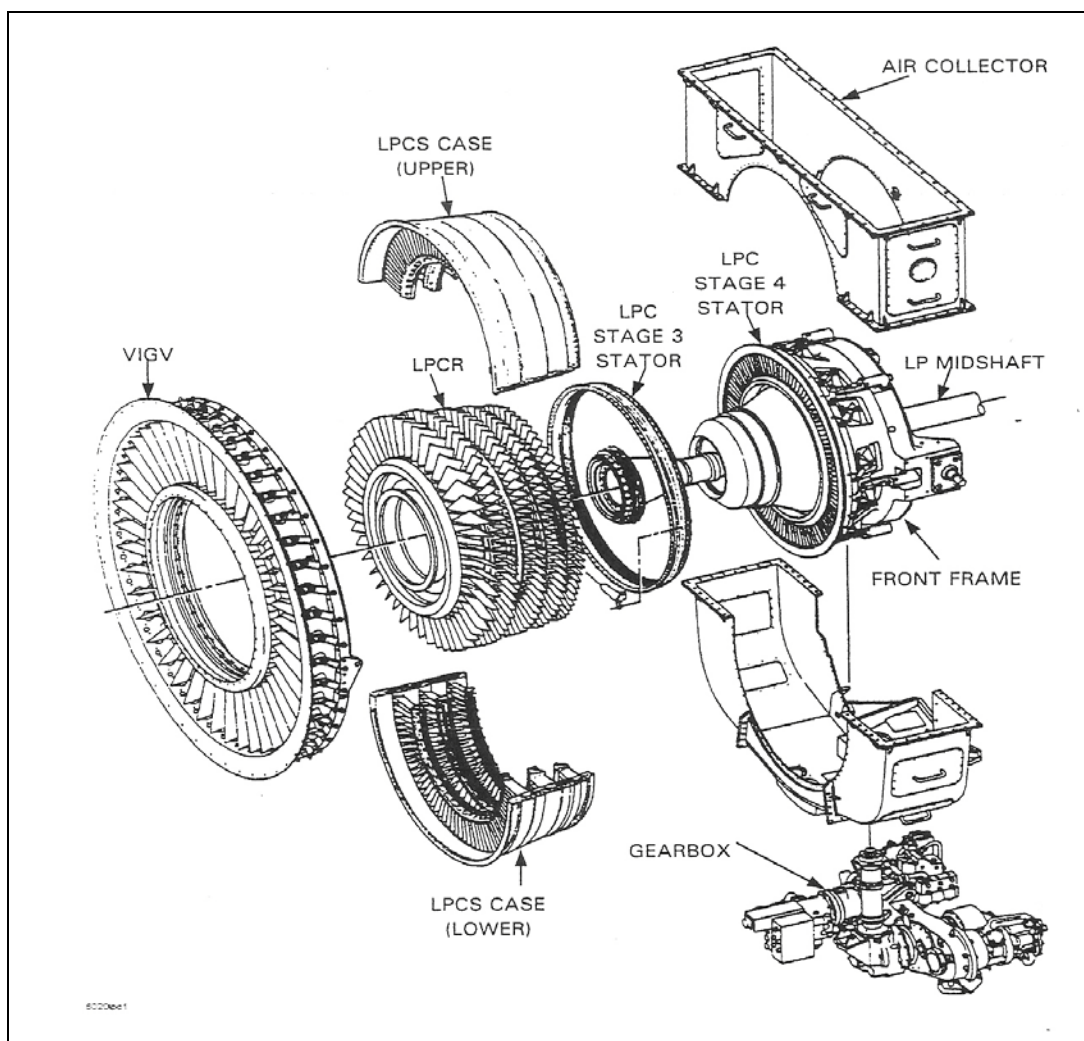


	Είσοδος	Συμπιεστής Χαμηλής Πίεσης	Συμπιεστής Υψηλής Πίεσης	Θάλαμος Καύσης	Στρόβιλος Υψηλής Πίεσης	Στρόβιλος Χαμηλής Πίεσης	Έξοδος Καυσαερίων
Πίεση (bar)	1	2,5	29,8	28,3	7,6	1	
Θερμοκρασία (°C)	15	113	537	1196	838	450	
Παροχή Μάζας (kg/s)	127					127	
Συντελεστής Ειδικής Θερμοχωρητικότητας $C_p$ (kJ/kg.K)		1,00	1,05	1,20	1,23	1,15	1,06
Λόγος Θερμοχωρητικοτήτων $\gamma$ (-)		1,40	1,37		1,31	1,33	
Ισεντροπικός Βαθμός Απόδοσης		86,3	87,3		88,8	88	

**Πίνακας Π.Α.1. 1:** Τιμές των βασικών θερμοδυναμικών μεγεθών στα διάφορα σημεία του αεριοστρόβιλου LM6000 (μοντέλο LM6000PC – στοιχεία από πηγή [34]).

## Συμπιεστής Χαμηλής Πίεσης

Ο συμπιεστής χαμηλής πίεσης είναι ένας αξονικός συμπιεστής 5 βαθμίδων και κινείται από το στρόβιλο χαμηλής πίεσης. Ο λόγος πίεσης που παράγει είναι 2,5. Η θερμοκρασία του αέρα μετά τη συμπίεση είναι 113°C, ενώ η ισχύς που καταναλώνεται για τη συμπίεση στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας είναι 12,5MW. Να σημειώσουμε ότι ο αεριοστρόβιλος LM6000PC Sprint λειτουργεί με ταχύτητα περιστροφής 3600rpm. Επομένως, για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος συχνότητας 50Hz χρησιμοποιείται μειωτήρας στροφών ώστε να επιτευχθεί η σύγχρονη ταχύτητα της γεννήτριας που είναι 3000rpm. Ο συμπιεστής χαμηλής πίεσης και τα βασικότερα μέρη του παρουσιάζονται στο σχήμα Π.Α.1.4.



**Σχήμα Π.Α.1. 4:** Τα κύρια δομικά μέρη και η συναρμολόγησή τους στον συμπιεστή χαμηλής πίεσης (σχήμα από πηγή [34]).

Στο κομμάτι του συμπιεστή χαμηλής πίεσης περιλαμβάνονται και δύο από τα κύρια μέρη του συστήματος μεταβλητής γεωμετρίας του αεριοστρόβιλου (Variable Geometry System). Αυτά είναι τα μεταβλητής γεωμετρίας οδηγά πτερύγια εισόδου

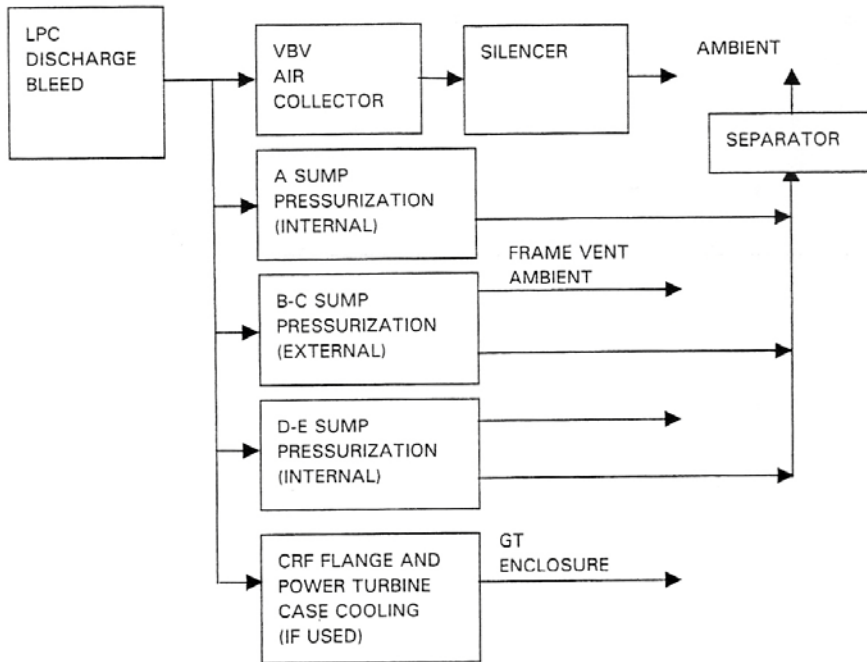
(Inlet Guide Vanes IGVs) και οι μεταβλητής γεωμετρίας θύρες αποβολής αέρα (Variable Bleed Valves). Το σύστημα μεταβλητής γεωμετρίας περιλαμβάνει και μεταβλητής γεωμετρίας σταθερά πτερύγια του συμπιεστή υψηλής πίεσης. Αναφορά στη χρησιμότητα και τη λειτουργία του συστήματος μεταβλητής γεωμετρίας θα γίνει στη συνέχεια.

### **Συμπιεστής Υψηλής Πίεσης**

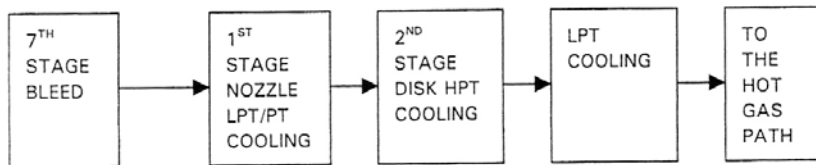
Ο συμπιεστής υψηλής πίεσης είναι και αυτός ένας αξονικού τύπου 14βάθμιος συμπιεστής που κινείται από το διβάθμιο στρόβιλο υψηλής πίεσης. Ο λόγος πίεσης που παράγει είναι περίπου 12 και σε συνδυασμό με την λειτουργία του συμπιεστή χαμηλής πίεσης δημιουργεί έναν λόγο πίεσης ίσο με 29,8. Μετά από τη συμπίεση ο αέρας έχει θερμοκρασία 537°C. Η ταχύτητα περιστροφής του συμπιεστή υψηλής πίεσης είναι ίση με 10260rpm.

Στην είσοδο του συμπιεστή υψηλής πίεση βρίσκεται τοποθετημένη μία πτερύγωση από οδηγία πτερύγια εισόδου (IGVs). Η πτερύγωση αυτή όπως και οι σταθερές πτερυγώσεις μέχρι και την 5<sup>η</sup> συνοδεύονται από σύστημα μεταβλητής γεωμετρίας (Variable Stator Vanes VSVs). Επίσης, στις βαθμίδες 7, 8 και 11 και 14 του συμπιεστή υψηλής πίεσης έχουμε απομαστεύσεις αέρα για διάφορες χρήσεις. Συνολικά, οι χρήσεις των απομαστεύσεων τόσο από το συμπιεστή χαμηλής όσο και από το συμπιεστή υψηλής πίεσης είναι οι ακόλουθες:

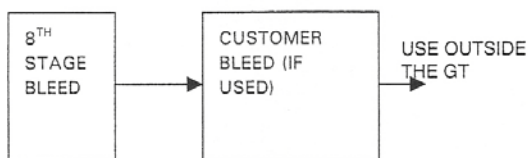
LPC discharge bleed



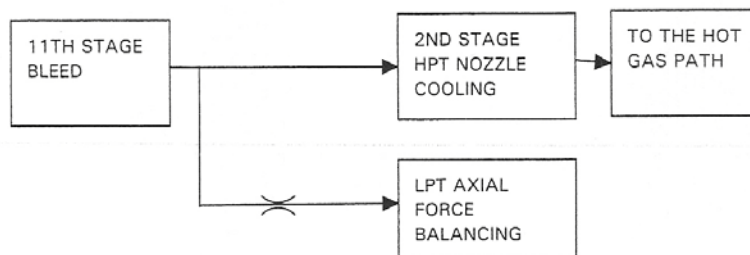
7<sup>th</sup> stage bleed



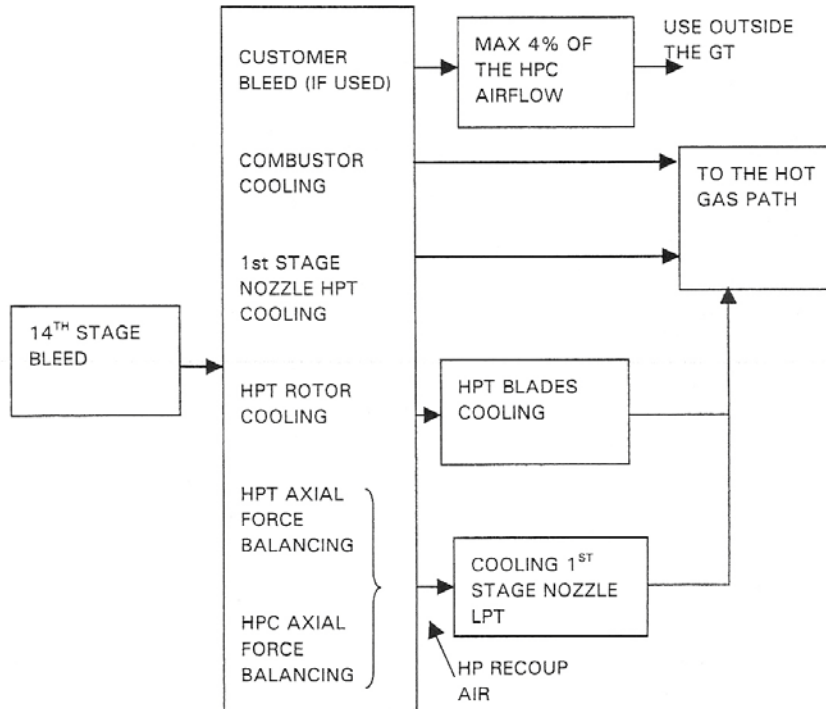
8<sup>th</sup> stage bleed



11<sup>th</sup> stage bleed



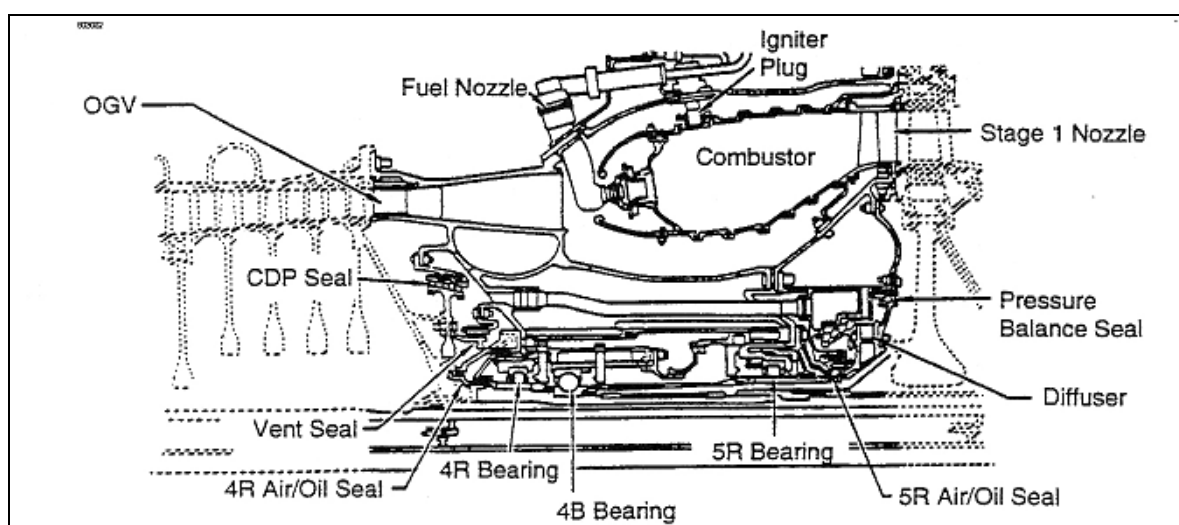
14<sup>th</sup> stage bleed (COMPRESSOR DISCHARGE)





## Θάλαμος Καύσης

Στον θάλαμο καύσης πραγματοποιείται η επιπλέον αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα που προέρχεται από τον συμπιεστή υψηλής πίεσης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της καύσης υγρού μίγματος υδρογονανθράκων ή φυσικού αερίου. Για να πραγματοποιηθεί η καύση χρησιμοποιείται το οξυγόνο του αέρα, το οποίο αντιδρά με το καύσιμο. Η σχεδίαση του θαλάμου καύσης είναι τέτοια ώστε η ανάμειξη του καυσίμου με τον αέρα να είναι επαρκής και ώστε να εξασφαλίζει σταθερή φλόγα σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας, χωρίς να υπερθερμαίνονται τα τοιχώματα του θαλάμου. Στο ακόλουθο σχήμα Π.Α.1.5 παρουσιάζεται η βασική διάταξη του θαλάμου καύσης για το μοντέλο LM6000PC Sprint.



**Σχήμα Π.Α.1. 5:** Βασική διάταξη του θαλάμου καύσης για το μοντέλο LM6000PC Sprint (σχήμα από πηγή [34])

Ο θάλαμος καύσης είναι δακτυλιοειδούς μορφής και αποτελείται από 30 ακροφύσια εγχύσεως καυσίμου και από δύο σπινθηριστές. Επιπλέον χρησιμοποιείται και μία σειρά από διατάξεις που συντελούν στην δημιουργία όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφης ροής αέρα και πιο ομοιόμορφο θερμοκρασιακό πεδίο πριν την είσοδο στον στρόβιλο υψηλής πίεσης.

Υπάρχουν αρκετά ακόμα χαρακτηριστικά για τα εξαρτήματα και τις διατάξεις του θαλάμου καύσης, η περιγραφή των οποίων όμως ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Σημειώνεται ότι το μοντέλο που χρησιμοποιείται (LM6000PC Sprint) δεν χρησιμοποιεί το σύστημα ξηρής καύσης χαμηλών εκπομπών (DLE Combustion System) που χρησιμοποιείται σε άλλα μοντέλα της σειράς LM6000.

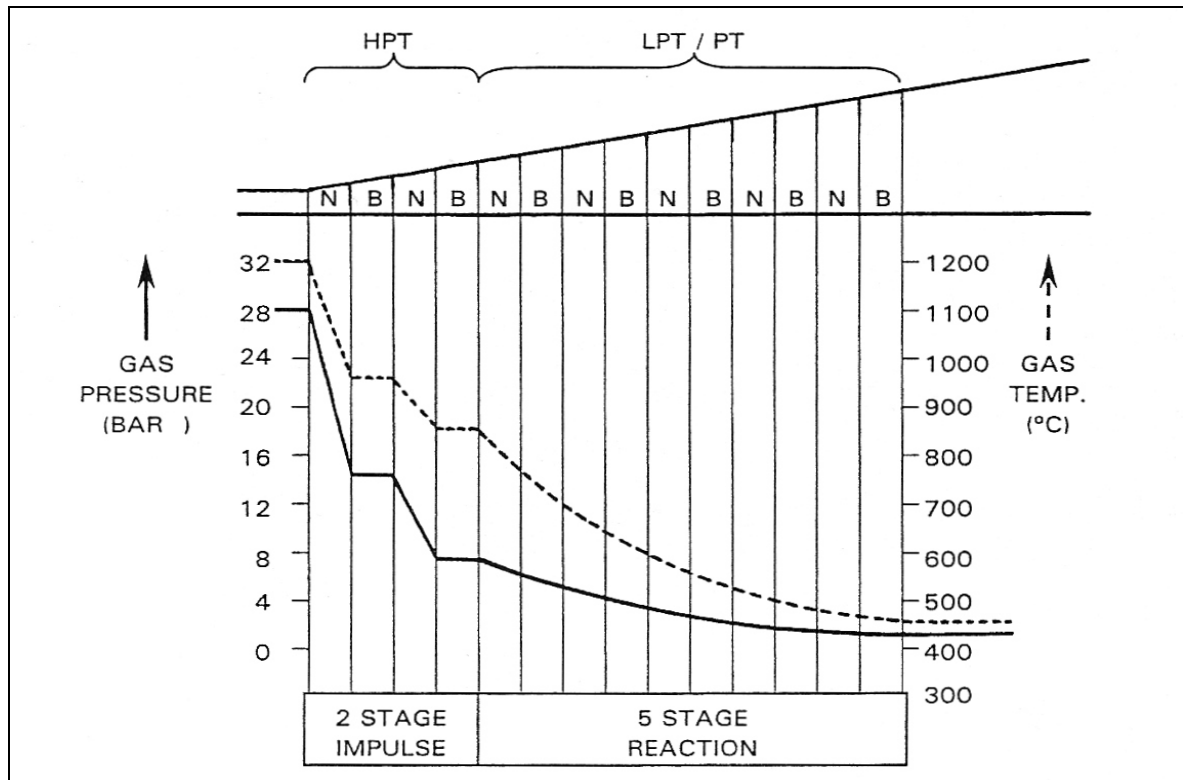
## Στρόβιλος Υψηλής Πίεσης

Ο στρόβιλος υψηλής πίεσης χρησιμοποιείται για την παραγωγή του απαιτούμενου έργου για την κίνηση του συμπιεστή υψηλής πίεσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την εκτόνωση των καυσαερίων που προέρχονται από τη διαδικασία της καύσης. Τα καυσαέρια εξέρχονται από τον θάλαμο καύσης με υψηλή θερμοκρασία και πίεση και εισέρχονται στο στρόβιλο υψηλής πίεσης, στον οποίο η ροή επιταχύνεται και η πίεση και η θερμοκρασία μειώνονται. Ο στρόβιλος υψηλής πίεσης του αεριοστρόβιλου LM6000PC Sprint είναι διβάθμιος. Κάθε βαθμίδα αποτελείται από μία σταθερή πτερύγωση ακολουθούμενη από μία κινητή.

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες στροβίλων ως προς τον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται η εκτόνωση των καυσαερίων. Οι στρόβιλοι δράσης και οι στρόβιλοι αντίδρασης. Στους στροβίλους δράσης, η πτώση της πίεσης πραγματοποιείται αποκλειστικά στις σταθερές πτερυγώσεις. Ο στρόβιλος υψηλής πίεσης του αεριοστρόβιλου LM6000PC Sprint τείνει περισσότερο στην περίπτωση ενός στροβίλου δράσης. Για τις βαθμίδες στροβίλων ορίζεται ο βαθμός αντίδρασης  $r$  που είναι ο λόγος της ενέργειας που παράγεται από την κινητή πτερύγωση της βαθμίδας, προς την ενέργεια που παράγεται συνολικά από τη βαθμίδα. Η ενέργεια που παράγεται προκύπτει από τη διαφορά των ολικών ενθαλπιών. Περισσότερα για τα θερμοδυναμικά και ρευστομηχανικά χαρακτηριστικά της ροής μέσα στον στρόβιλο μπορούν να βρεθούν την βιβλιογραφική παραπομπή [27]. Στο ακόλουθο σχήμα Π.Α.1.6 παρουσιάζεται η πτώση πίεσης και θερμοκρασία των καυσαερίων ανά πτερύγωση, τόσο για τον στρόβιλο υψηλής πίεσης όσο και για τον στρόβιλο ισχύος (χαμηλής πίεσης). Είναι προφανές ότι οι δύο πρώτες βαθμίδες (στρόβιλος υψηλής πίεσης), είναι βαθμίδες δράσης (πτώση πίεσης και θερμοκρασίας μόνο στις σταθερές πτερυγώσεις), ενώ αντίθετα οι υπόλοιπες (στρόβιλος ισχύος) είναι βαθμίδες αντίδρασης (πτώση πίεσης και στις κινητές πτερυγώσεις). Γενικά υπάρχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα για κάθε κατηγορία. Τα βασικά από αυτά αναφέρονται στη συνέχεια.

- Στους στροβίλους αντίδρασης η εκτόνωση συμβαίνει μόνο στις σταθερές πτερυγώσεις. Συνήθως, η εκτόνωση πραγματοποιείται σε λίγες βαθμίδες και έτσι η πτώση πίεσης και θερμοκρασίας στην πρώτη σταθερή πτερύγωση είναι αρκετά μεγάλη. Αυτό σημαίνει ότι η πρώτη κινητή πτερύγωση παρουσιάζει μειωμένες ανάγκες ψύξης σε σχέση με τους στροβίλους αντίδρασης. Αντίστροφα, το ίδιο χαρακτηριστικό των στροβίλων δράσης επιτρέπει μεγαλύτερες θερμοκρασίες εισόδου στο στρόβιλο για δεδομένη ποιότητα ψύξης στην κινητή πτερύγωση, κάτι που οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης ισχύος. Βέβαια, με τον τρόπο αυτό αυξάνονται οι ανάγκες ψύξης της πρώτης σταθερής πτερύγωσης, η οποία όμως επειδή δεν κινείται μπορεί να ψυχθεί με λύσεις τεχνικά απλούστερες. Επίσης, η πρώτη σταθερή πτερύγωση μπορεί να κατασκευαστεί και από υλικά ιδιαίτερα ανθεκτικά σε θερμική καταπόνηση, χωρίς να υπάρχει η απαίτηση μεγάλης μηχανικής αντοχής από το υλικό.

- Κατά κανόνα, η απόδοση ενός στροβίλου δράσης είναι μικρότερη από έναν στρόβιλο αντίδρασης. Ωστόσο το μειονέκτημα αυτό μπορεί να ισοσταθμιστεί από τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες εισόδου στο στρόβιλο δράσης, που όπως είπαμε βελτιώνουν τις επιδόσεις του στροβίλου.



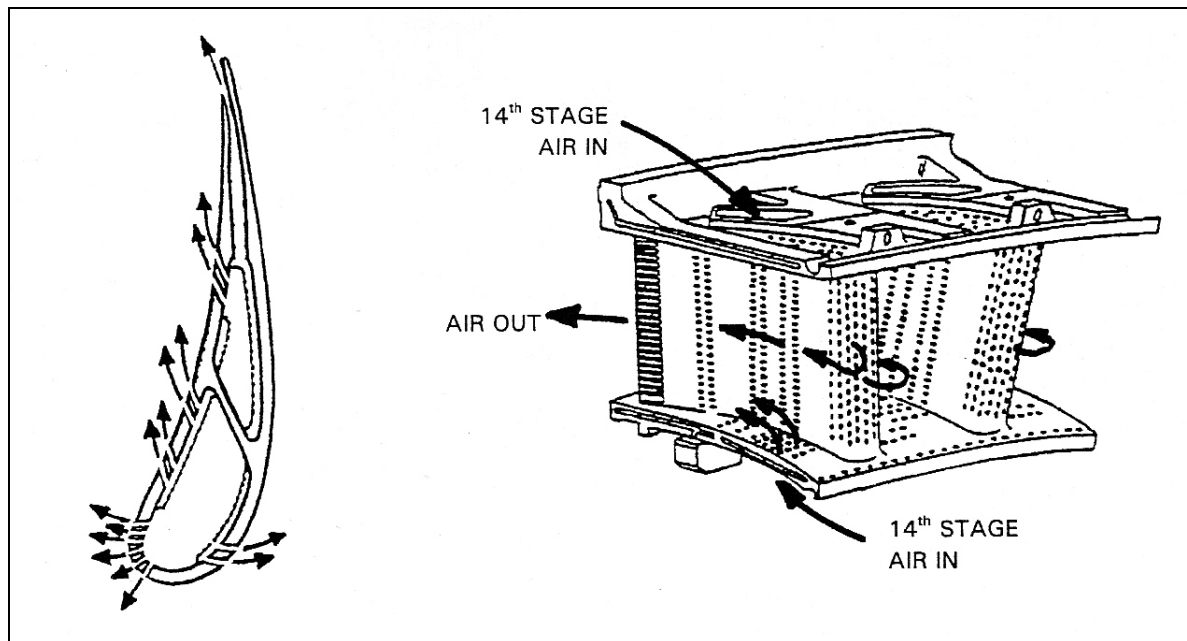
**Σχήμα Π.Α.1. 6:** Πτώση πίεσης και θερμοκρασίας των καυσαερίων κατά τη διέλευσή τους από τον στρόβιλο υψηλής πίεσης και τον στρόβιλο ισχύος. Φαίνεται ότι οι δύο βαθμίδες του στροβίλου υψηλής πίεσης είναι βαθμίδες δράσης (πτώση θερμοκρασίας και πίεσης μόνο στη σταθερή περύγωση), ενώ η πέντε βαθμίδες του στροβίλου ισχύος είναι βαθμίδες αντίδρασης (σχήμα από πηγή [34])

Ένα πολύ σημαντικό θέμα για την ασφαλή και αποδοτική λειτουργία του στροβίλου υψηλής πίεσης είναι η ψύξη των περυγίων και ιδιαίτερα των περυγίων της πρώτης σταθερής βαθμίδας, που εκτίθενται στις πιο υψηλές θερμοκρασίες από όλα και επιπλέον είναι και ακίνητα (γεγονός που επιβαρύνει τη θερμική τους καταπόνηση).

Τα περύγια αυτά είναι κατασκευασμένα από ειδικά κράματα που αντέχουν στις υψηλές θερμοκρασίες. Το υλικό που χρησιμοποιείται στα περύγια της πρώτης σταθερής περύγωσης του στροβίλου υψηλής πίεσης στον αεριοστρόβιλο είναι ένα ειδικό κράμα κοβαλτίου, χρωμίου και νικελίου. Το υλικό αυτό χρησιμοποιείται με την προσθήκη επικάλυψης που αυξάνει την αντίσταση στην διάβρωση και την οξειδωση.

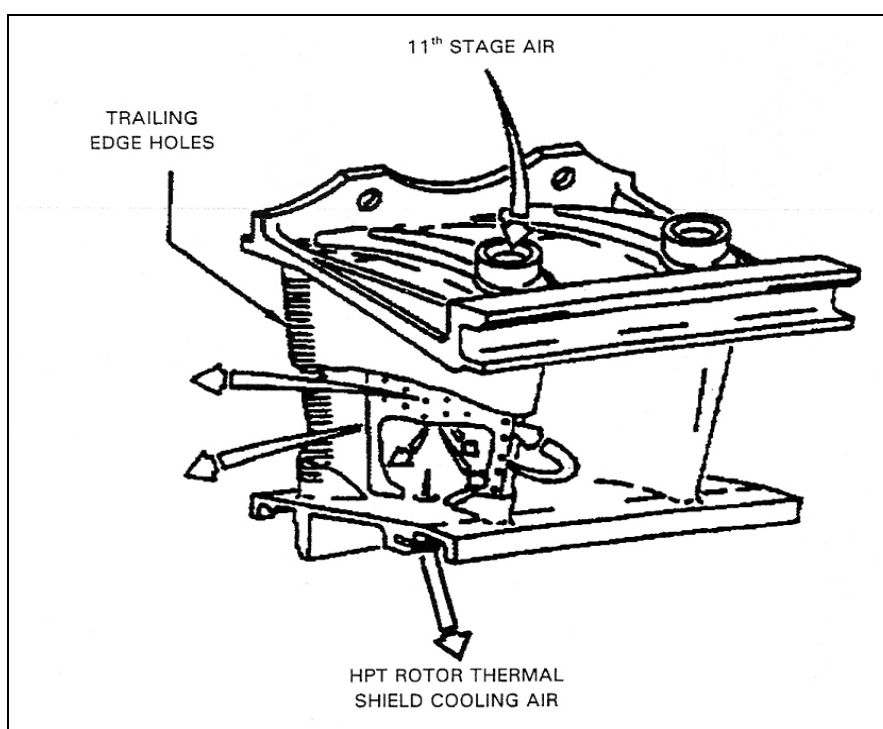
Τα περύγια αυτά ψύχονται στο εσωτερικό τους με συναγωγή από αέρα και στην επιφάνειά τους με χρήση λεπτού στρώματος αέρα (film cooling). Ο αέρας που

χρησιμοποιείται προέρχεται από απομάστευση από τον συμπιεστή υψηλής πίεσης (14<sup>η</sup> βαθμίδα). Για να πραγματοποιηθεί η ψύξη, στο εσωτερικό του πτερυγίου διαμορφώνονται δύο κοιλότητες. Ο αέρας που της μπροστινής κοιλότητας διοχετεύεται μέσω οπών στη ακμή προσβολής τους πτερυγίου (leading edge) και στις επιφάνειες κοντά σ' αυτή, ενώ ο αέρας της οπίσθιας κοιλότητας διοχετεύεται μέσω κατάλληλα διαμορφωμένων οπών στην ακμή εκφυγής. Οι διαμορφώσεις που χρησιμοποιούνται για την ψύξη των σταθερών πτερυγίων της πρώτης βαθμίδας παρουσιάζονται στο σχήμα Π.Α.1.7. Η πτώση της πίεσης του αέρα ψύξης από τον συμπιεστή μέχρι την εισαγωγή του στη ροή του στροβίλου διαφέρει από σημείο σε σημείο, ώστε η πίεσή του να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πίεση των καυσαερίων στο σημείο της εισαγωγής του αέρα ψύξης για να διαταράσσεται όσο το δυνατόν λιγότερο το πεδίο ροής γύρω από τα πτερυγία. Έτσι για τον αέρα που ψύχει την ακμή προσβολής, η πτώση πίεσης από την έξοδο του συμπιεστή είναι 1bar, για τον αέρα που ψύχει τις ενδιάμεσες επιφάνειες του πτερυγίου η πτώση πίεσης είναι 6,5bar, ενώ για τον αέρα που ψύχει την ακμή εκφυγής η πτώση πίεσης είναι 13bar (όση και η συνολική πτώση πίεσης των καυσαερίων στη βαθμίδα).



**Σχήμα Π.Α.1. 7:** Διαμορφώσεις των σταθερών πτερυγίων της πρώτης βαθμίδας του στροβίλου υψηλής πίεσης του μοντέλου LM6000PC Sprint για την εφαρμογή ψύξης τους (σχήμα από την πηγή [34])

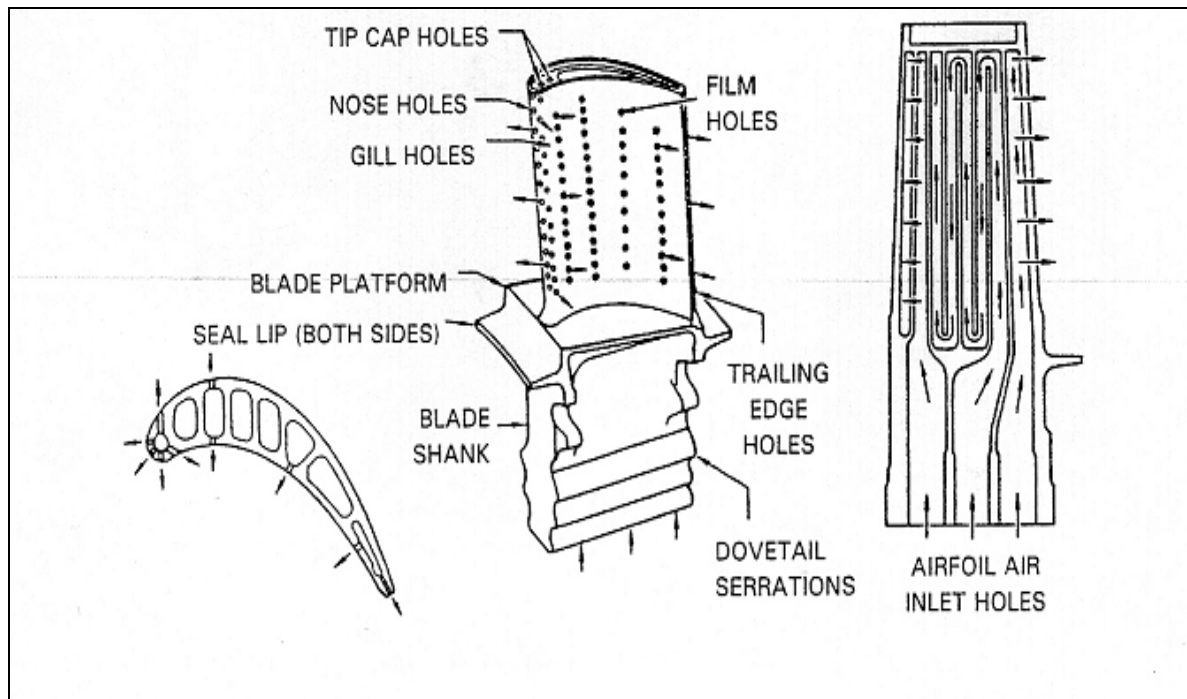
Η σταθερή πτερύγωση της δεύτερης βαθμίδας του στροβίλου υψηλής πίεσης, λόγω των λιγότερων αναγκών ψύξης (χαμηλότερες θερμοκρασίες αερίου), χρησιμοποιούν ψύξη με αέρα στο εσωτερικό του πτερυγίου. Ο αέρας διοχετεύεται στα πτερύγια μέσω απομαστεύσεων από την 11<sup>η</sup> βαθμίδα του συμπιεστή υψηλής πίεσης και αποβάλλεται στην ροή των αερίων μέσω ανοιγμάτων στην ακμή εκφυγής των πτερυγίων της βαθμίδας. Ενδεικτικά η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στο σχήμα Π.Α.1.8.



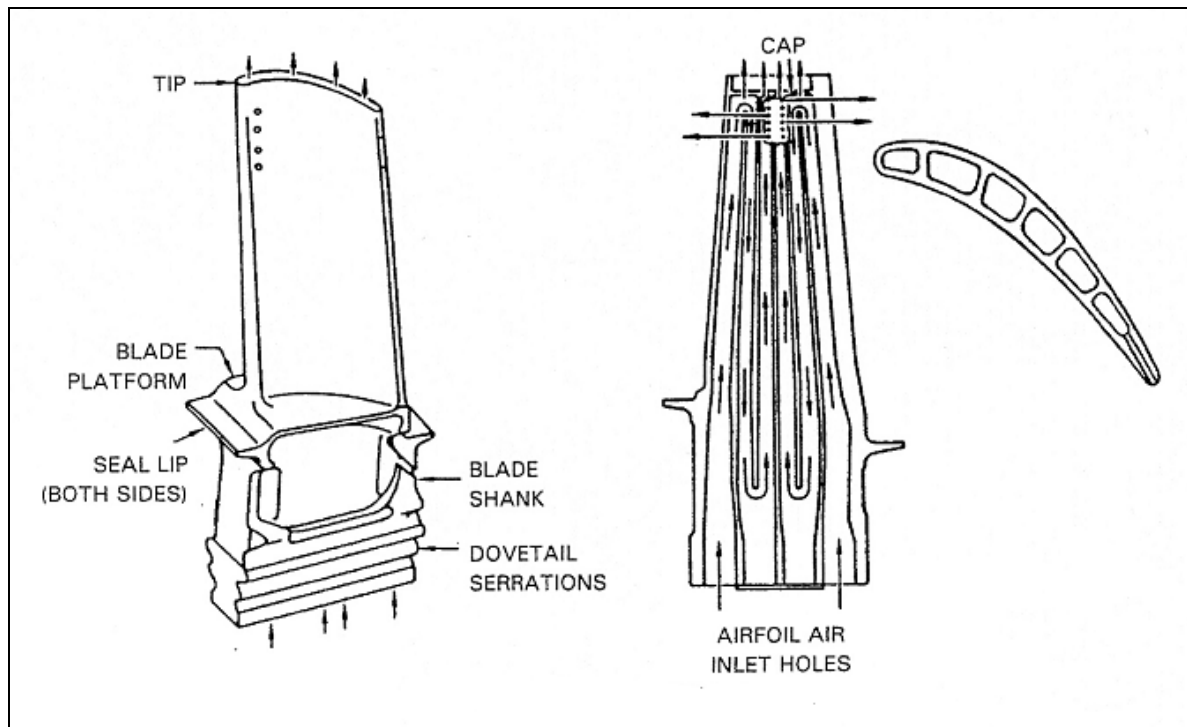
**Σχήμα Π.Α.1. 8:** Στο σχήμα παρουσιάζονται οι λύσεις που χρησιμοποιούνται για την ψύξη των σταθερών πτερυγίων της δεύτερης βαθμίδας του στροβίλου υψηλής πίεσης του αεριοστροβίλου LM6000PC Sprint (σχήμα από πηγή [34])

Τα κινητά πτερύγια της πρώτης βαθμίδας ψύχονται με συναγωγή εσωτερικά και εξωτερικά με στρώμα αέρα (film cooling). Για να ενισχυθεί η συναλλαγή θερμότητας στο εσωτερικό του πτερυγίου, ο αέρας ψύξης κυκλοφορεί σε έναν ειδικά διαμορφωμένο λαβύρινθο. Επίσης, αέρα εξέρχεται και από οπές επάνω στο πτερύγιο στην ακμή προσβολής, στην ακμή εκφυγής και στο ακροπτερύγιο (blade tip). Τα κινητά πτερύγια της δεύτερης βαθμίδας ψύχονται μόνο μέσω συναγωγής και ο αέρας αποβάλλεται στη ροή των αερίων μόνο μέσω οπών στο ακροπτερύγιο. Οι διαμορφώσεις που χρησιμοποιούνται για την ψύξη τις κινητές πτερυγώσεις της

πρώτης και της δεύτερης βαθμίδας παρουσιάζονται στα σχήματα Π.Α.1.9 και Π.Α.1.10 αντίστοιχα.



**Σχήμα Π.Α.1. 9:** Διαμορφώσεις και λαβύρινθοι για την ψύξη των κινητών πτερυγίων της πρώτης βαθμίδας του στροβίλου υψηλής πίεσης του αεριοστροβίλου LM6000PC Sprint (σχήμα από πηγή [34])



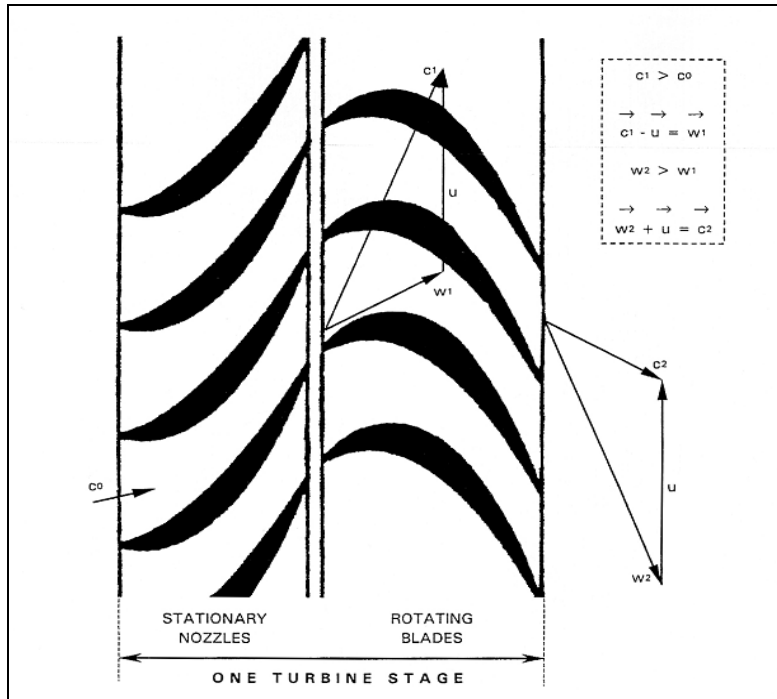
**Σχήμα Π.Α.1. 10:** Διαμορφώσεις και λαβύρινθοι για την ψύξη των κινητών πτερυγίων της δεύτερης βαθμίδας του στροβίλου υψηλής πίεσης του αεριοστροβίλου LM6000PC Sprint (σχήμα από πηγή [34])

## Στρόβιλος Ισχύος – Χαμηλής Πίεσης

Ο στρόβιλος χαμηλής πίεσης – στρόβιλος ισχύος, χρησιμοποιείται για δύο σκοπούς. Παράγει ενέργεια για την κίνηση του συμπιεστή χαμηλής πίεσης και παράγει μηχανική ενέργεια για την κίνηση του φορτίου (στην περίπτωση της ηλεκτροπαραγωγής για την κίνηση ηλεκτρικής γεννήτριας). Τα καυσαέρια εισέρχονται στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης, αφού έχουν πρώτα εκτονωθεί σε έναν βαθμό στο στρόβιλο υψηλής πίεσης. Στο στρόβιλο ισχύος (στρόβιλο χαμηλής πίεσης), τα καυσαέρια εκτονώνονται περαιτέρω μέσω 5 βαθμίδων αντίδρασης, μέχρι πίεσεως λίγο μικρότερης από την ατμοσφαιρική. Κατά την εκτόνωση τα καυσαέρια επιταχύνονται και αυξάνεται η κινητική τους ενέργεια, η οποία στην έξοδο της τελευταίας βαθμίδας είναι αρκετά μεγάλη και αποτελεί απώλεια. Για να περιορισθεί αυτή η απώλεια, μετά την τελευταία βαθμίδα στροβίλου ακολουθεί διαχύτης, μέσω του οποίου η κινητική ενέργεια των καυσαερίων χρησιμοποιείται για την αύξηση της πίεσης. Το αποτέλεσμα είναι η πίεση στην έξοδο των καυσαερίων από τον αεριοστρόβιλο να είναι λίγο μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική.

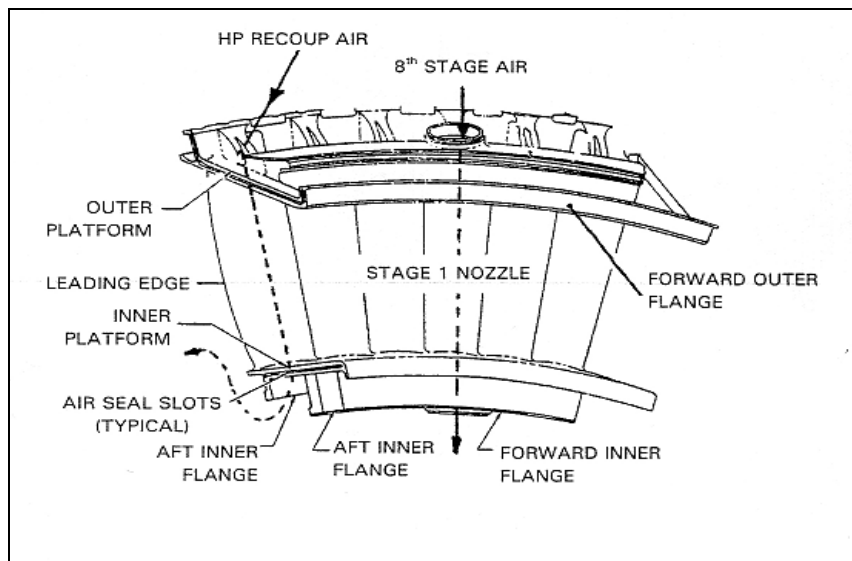
Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι βαθμίδες του στροβίλου ισχύος είναι βαθμίδες αντίδρασης. Αυτό συμβαίνει γιατί οι θερμοκρασίες είναι αρκετά μικρότερες σε σχέση με τον στρόβιλο υψηλής πίεσης και έτσι είναι σημαντικά μειωμένες και οι ανάγκες ψύξης, ενώ επιπλέον οι βαθμίδες αντίδρασης παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση. Μία βαθμίδα αντίδρασης παρουσιάζεται ενδεικτικά στο σχήμα Π.Α.1.11. Παρατηρούμε ότι τα κανάλια που δημιουργούνται μεταξύ των πτερυγίων τόσο στη σταθερή όσο και στην κινητή πτερύγωση, παρουσιάζουν συγκλίνουσα μορφή. Αυτό σημαίνει ότι η εκτόνωση και η επιτάχυνση της ροής συμβαίνει και στις δύο πτερυγώσεις (για το λόγο αυτό η βαθμίδα χαρακτηρίζεται ως αντίδρασης). Να σημειωθεί ότι λόγω της εκτόνωσης των καυσαερίων, αυξάνεται ο όγκος τους και έτσι όσο προχωράμε κατά την κατεύθυνση της ροής των καυσαερίων το μήκος των πτερυγίων αυξάνει (με συνέπεια την αύξηση της διατομής του καναλιού ροής μεταξύ των πτερυγίων).





**Σχήμα Π.Α.1. 11:** Τυπική βαθμίδα αντίδρασης αξονικού στροβίλου (σχήμα από πηγή [34])

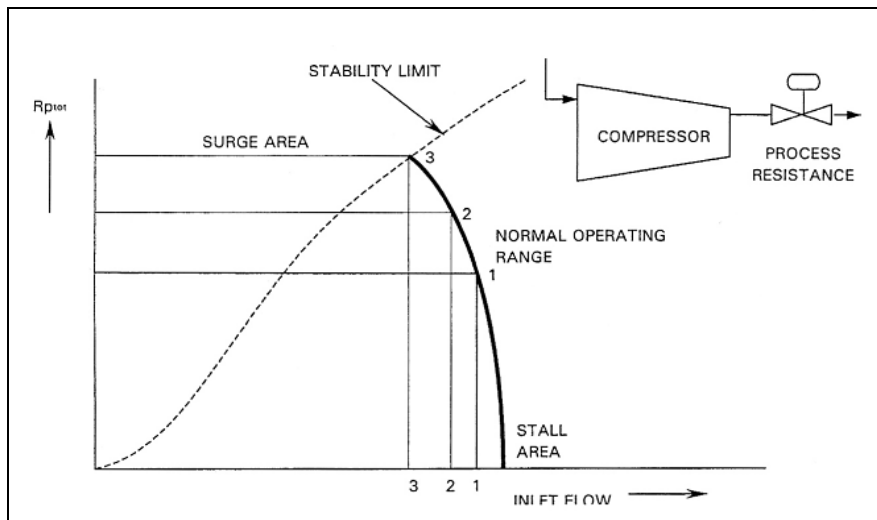
Τα περύγια του στροβίλου ισχύος επειδή αντιμετωπίζουν μικρότερες θερμοκρασίες από τα περύγια του στροβίλου υψηλής πίεσης έχουν και λιγότερες ανάγκες ψύξης. Για το λόγο αυτό, για την ψύξη των περυγίων τόσο των κινητών όσο και των σταθερών περυγώσεων χρησιμοποιείται αέρας που απομαστεύεται από την 7<sup>η</sup> βαθμίδα του συμπιεστή. Ο αέρας αυτός αφού ψύξει τα περύγια αποβάλλεται στην ροή των καυσαερίων. Η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται για την ψύξη της πρώτης σταθερής περυγώσης του στροβίλου ισχύος παρουσιάζεται στο σχήμα Π.Α.1.12.



**Σχήμα Π.Α.1. 12:** Διάταξη για την ψύξη της πρώτης σταθερής περυγώσης του στροβίλου ισχύος για τον αεριοστροβίλο LM6000PC Sprint (σχήμα από πηγή [34])

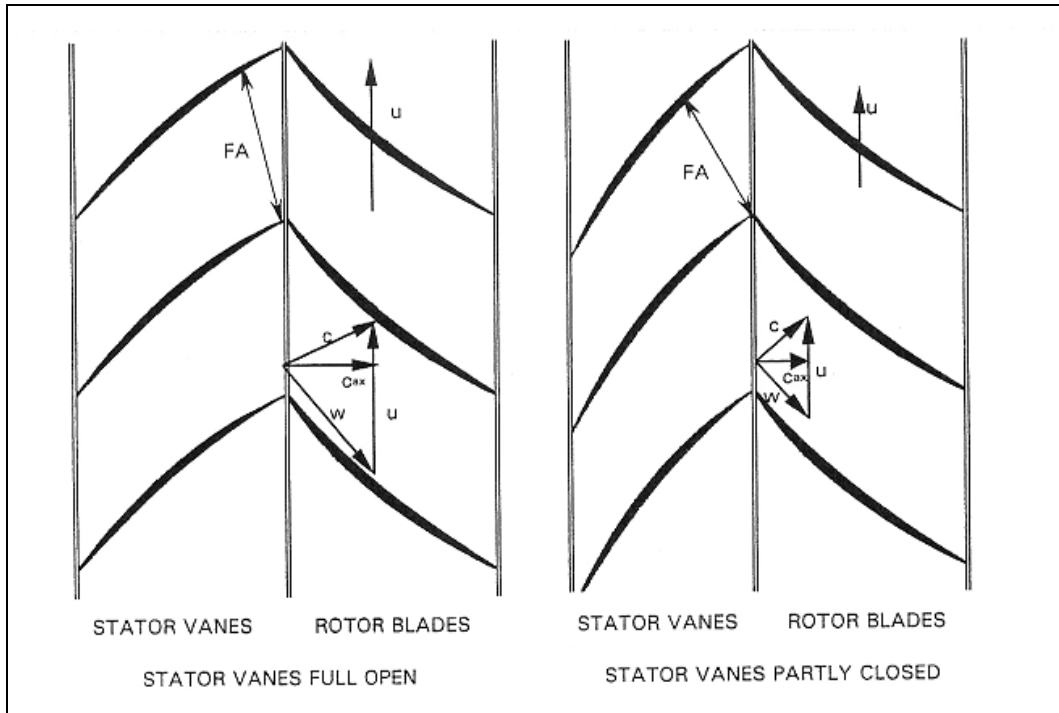
## Σύστημα Μεταβλητής Γεωμετρίας

Οι περυγώσεις των συμπιεστών χαμηλής και υψηλής πίεσης των αεριοστρόβιλων σχεδιάζονται ώστε να λειτουργούν ιδανικά κοντά στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας (ονομαστική ταχύτητα περιστροφής, παροχή και λόγος πίεσης). Ωστόσο η λειτουργία των συνιστωσών αυτών σε μεταβλητές συνθήκες παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς. Το πεδίο χαρακτηριστικών ενός αξονικού συμπιεστή έχει τη μορφή του σχήματος Π.Α.1.13. Κατά την εκκίνηση της μηχανής, η «αντίσταση» που συναντά η ροή του αέρα είναι μεγαλύτερη. Για να συνεχίσει η διακίνηση του αέρα αυξάνεται ο λόγος πίεσης του συμπιεστή. Όσο αυτή η «αντίσταση» αυξάνεται η παροχή φτάνει μία οριακή ελάχιστη τιμή (που είναι διαφορετική για κάθε ταχύτητα περιστροφής), ο λόγος πίεσης μειώνεται απότομα και ο συμπιεστής αδυνατεί να διακινήσει τον αέρα κατάντι με αποτέλεσμα αυτός να επιστρέφει στην εισαγωγή της μηχανής. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται πάλμωση και είναι κατάσταση ασταθούς λειτουργίας τους συμπιεστή. Το όριο στο οποίο εμφανίζεται η πάλμωση παρουσιάζεται στο πεδίο χαρακτηριστικών του συμπιεστή μέσω της γραμμής πάλμωσης (stability limit στο σχήμα Π.Α.1.13). Επίσης, κατά την εκκίνηση, τόσο ο συμπιεστής χαμηλής πίεσης όσο και ο συμπιεστής υψηλής πίεσης λειτουργούν σε χαμηλότερη ταχύτητα περιστροφής από την ονομαστική τους παράγοντας, κατά συνέπεια μικρότερο λόγο πίεσης. Αυτό έχει ως συνέπεια η ροή στις τελευταίες βαθμίδες συμπιεστή να εμφανίζει μεγαλύτερες ταχύτητες, απ' ό,τι επιτρέπεται από τη σχεδίαση των βαθμίδων. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί στη δημιουργία ηχητικού λαιμού στις βαθμίδες αυτές και κατά συνέπεια αύξηση της «αντίστασης» της ροής (η παροχή δεν γίνεται να αυξηθεί παραπάνω - choking). Αυτό μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση πάλμωσης (λόγω της αυξημένης «αντίστασης» της ροής) στις πρώτες βαθμίδες του συμπιεστή. Η πάλμωση γενικά πρέπει να αποφεύγεται γιατί είναι περιοδικό φαινόμενο που μπορεί να δημιουργήσει ταλαντώσεις καταστρεπτικές για το σύστημα του αεριοστρόβιλου, ενώ επιπλέον επειδή αλλάζει η φορά της ροής, είναι πιθανό να γίνει αναρρόφηση της φλόγας του θαλάμου καύσης από τον συμπιεστή με αποτέλεσμα την καταστροφή του. Το σύστημα μεταβλητής γεωμετρίας έχει σκοπό να προφυλάξει τον αεριοστρόβιλο από τα παραπάνω ανεπιθύμητα φαινόμενα ασταθούς λειτουργίας.

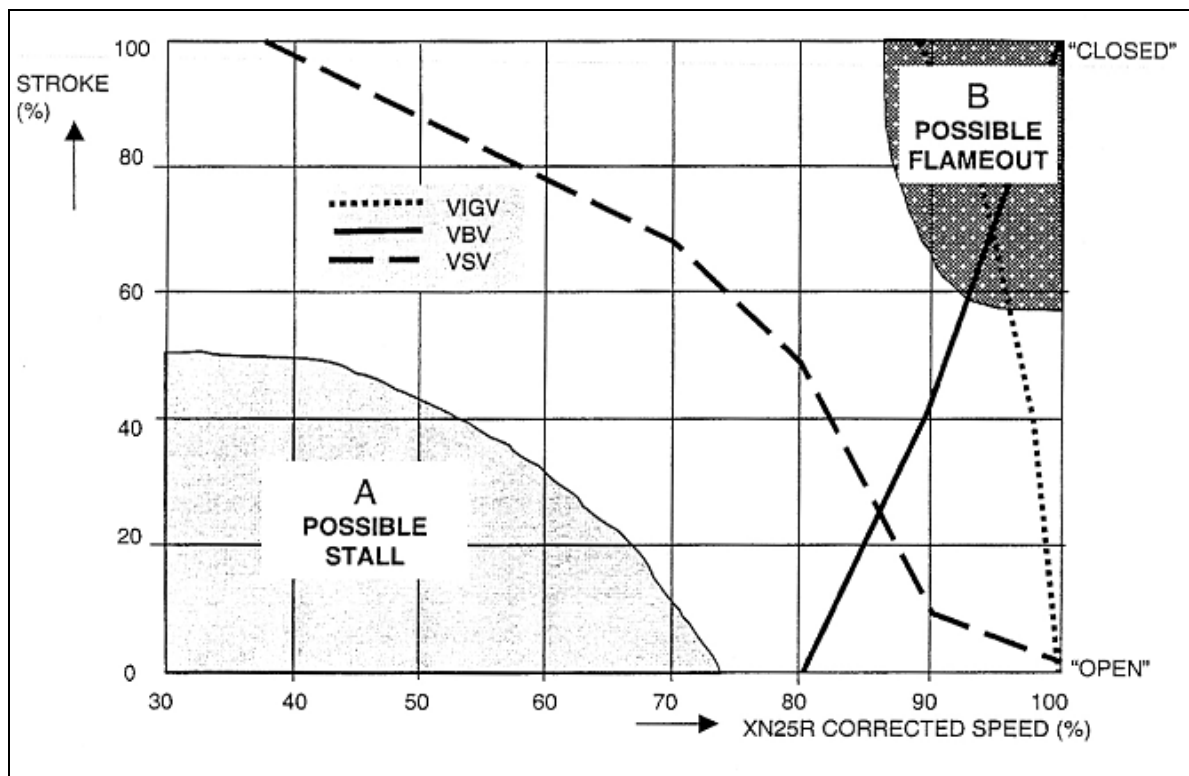


**Σχήμα Π.Α.1. 13:** Τυπική μορφή του πεδίου χαρακτηριστικών ενός συμπιεστή αξονικής ροής. Στο σχήμα παρουσιάζεται η χαρακτηριστική για μία δεδομένη ταχύτητα περιστροφής του συμπιεστή (σχήμα από πηγή [34])

Το σύστημα μεταβλητής γεωμετρίας επενεργεί στα οδηγία πτερύγια εισόδου του συμπιεστή χαμηλής πίεσης (VIGVs), στις βαλβίδες απομάστευσης αέρα (VBVs) και στα πτερύγια των πρώτων σταθερών πτερυγώσεων του συμπιεστή υψηλής πίεσης (VSVs). Κατά την εκκίνηση, τα οδηγία πτερύγια εισόδου του συμπιεστή χαμηλής πίεσης βρίσκονται σε θέση που εξασφαλίζει όσο το δυνατόν μικρότερη διατομή για την ροή του αέρα, ώστε να περιορίζεται η παροχή μάζας. Οι βαλβίδες απομάστευσης είναι ανοιχτές κατά το μέγιστο ώστε να μειώνεται η παροχή μάζας στον συμπιεστή υψηλής πίεσης και να αποφεύγονται υψηλές ταχύτητες στις βαθμίδες του. Τέλος, τα πτερύγια των σταθερών πτερυγώσεων του συμπιεστή υψηλής πίεσης βρίσκονται στην πιο «κλειστή» τους θέση (ελάχιστη διατομή για την ροή), ενώ παράλληλα με την αλλαγή της γωνίας των πτερυγίων εξασφαλίζονται σωστές γωνίες πρόσπτωσης (κοντά στην ονομαστική) για τα πτερύγια των κινητών πτερυγώσεων σε διάφορες συνθήκες ταχυτήτων ροής. Η θέση των σταθερών πτερυγίων των πρώτων βαθμίδων του συμπιεστή υψηλής πίεσης σε υψηλές και χαμηλές ταχύτητες ροής φαίνεται στο σχήμα Π.Α.1.14. Στο σχήμα Π.Α.1.15 παρουσιάζονται οι θέσεις των τριών συνιστωσών του συστήματος μεταβλητής γεωμετρίας, καθώς και οι περιοχές που είναι πιθανό να παρουσιαστούν ανεπιθύμητες συνθήκες λειτουργίας. Η περιοχή Α αναφέρεται στην εμφάνιση της πάλμωσης και τις δημιουργίες ηχητικού όπως περιγράφηκε προηγουμένως η μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Η περιοχή Β αναφέρεται στην περίπτωση που οι βαλβίδες απομάστευσης είναι ανοιχτές σε υψηλές ταχύτητες. Τότε η παροχή μάζας που διακινείται μέσω του συμπιεστή στο θάλαμο καύσης είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα να μην παρέχεται επαρκής ποσότητα αέρα καύσης και η φλόγα στον θάλαμο καύσης να σβήσει.



**Σχήμα Π.Α.1. 14:** Θέση των σταθερών πτερυγίων των πρώτων βαθμίδων του συμπιεστή υψηλής πίεσης για υψηλές και χαμηλές ταχύτητες (σχήμα από πηγή [34])



**Σχήμα Π.Α.1. 15:** Θέσης των τριών συνιστωσών του συστήματος μεταβλητής γεωμετρίας του αεροστρόβιλου LM6000PC Sprint κατά τη διαδικασία εκκίνησης [34])

## **A.2 Μονάδα 2 – Αεριοστρόβιλος LM2500+ (General Electric)**

Ο αεριοστρόβιλος LM2500+ χρησιμοποιείται ως μονάδα αιχμής και είναι και αυτός παράγωγος αεροπορικού κινητήρα (ανήκει στην σειρά βιομηχανικών αεριοστρόβιλων παράγωγων αεροπορικών κινητήρων της General Electric). Κάποια βασικά στοιχεία για την προέλευση του μοντέλου και την ιστορική εξέλιξη της σειράς LM έχουν ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 2.2.2 που αφορά την συγκεκριμένη μονάδα, καθώς και στην παράγραφο A.1 του παραρτήματος που αναφέρεται στον αεριοστρόβιλο LM6000PC Sprint που ανήκει στην ίδια σειρά αεριοστρόβιλων. Ο αεριοστρόβιλος αυτός αποτελείται από έναν άξονα που συνδέει τον αξονικό συμπιεστή με τον 2βάθμιο στρόβιλο που τον κινεί, και από έναν στρόβιλο ισχύος που βρίσκεται σε αεροδυναμική σύζευξη με το σύστημα αυτό. Ο στρόβιλος ισχύος περιστρέφεται με ταχύτητα 3000rpm και συνδέεται με απευθείας με τη γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος 50Hz, χωρίς να χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί μειωτήρας στροφών. Για το συγκεκριμένο μοντέλο δεν υπήρξαν διαθέσιμα στοιχεία αντίστοιχα με αυτά του LM6000PC Sprint. Ωστόσο, επειδή και οι δύο αεριοστρόβιλοι είναι παράγωγοι αεροπορικών κινητήρων της General Electric κάποιες από τις λύσεις που υιοθετούνται σε ότι αφορά τα επιμέρους συστήματα είναι παρόμοιες. Στην συνέχεια ακολουθεί η παράθεση κάποιων στοιχείων των βασικών συνιστωσών του αεριοστρόβιλου.

Ο συμπιεστής του αεριοστρόβιλου είναι αξονικής ροής και αποτελείται από 17βαθμίδες. Από τις βαθμίδες αυτές, στις 6 πρώτες χρησιμοποιείται σύστημα μεταβλητής γεωμετρίας στις σταθερές τους περυγώσεις, αντίστοιχο με αυτό που περιγράφηκε για τον αεριοστρόβιλο LM6000PC Sprint. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για να ξεπεραστούν τα προβλήματα ασταθούς λειτουργίας που παρουσιάζονται κατά την εκκίνηση του συμπιεστή. Ο λόγος πίεσης του συμπιεστή είναι 20:1 ενώ η παροχή μάζας στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας είναι 46,7kg/s.

Ο στρόβιλος που κινεί τον συμπιεστή είναι διβάθμιος και περιστρέφεται με ταχύτητα 6100rpm στον ονομαστικό σημείο λειτουργίας. Ο στρόβιλος ισχύος είναι 6βάθμιος και βρίσκεται σε αεροδυναμική σύζευξη με το 2βαθμιο στρόβιλο. Η ταχύτητα περιστροφής του είναι, όπως ήδη αναφέρθηκε 3000rpm για παραγωγή ρεύματος 50Hz.

Ο θάλαμος καύσης είναι δακτυλοειδούς μορφής και χρησιμοποιεί ως καύσιμο μίγμα υγρών υδρογονανθράκων. Για την έναυση χρησιμοποιούνται δύο σπινθηριστές όπως και στον αεριοστρόβιλο LM6000PC Sprint. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης του συστήματος ξηρής καύσης μειωμένων εκπομπών (DLE).

Να σημειωθεί ότι το σύστημα ψεκασμού ατμού (STIG) χρησιμοποιείται στον αεριοστρόβιλο LM2500 από τον οποίο προέρχεται το μοντέλο LM2500+ αλλά δεν χρησιμοποιείται στον συγκεκριμένο αεριοστρόβιλο.

### **A.3 Μονάδα 3 – Μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου**

Η μονάδα αυτή είναι μονάδα βάσης και τα βασικά χαρακτηριστικά της αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.2.3 του δεύτερου κεφαλαίου. Στο σημείο αυτό θα περιγραφούν κάποια βασικά στοιχεία των μονάδων συνδυασμένου κύκλου αεριοστρόβιλου – ατμοστρόβιλου.

Υπάρχουν δύο ειδών διατάξεις για τη χρήση συνδυασμού αεριοστρόβιλου–ατμοστρόβιλου, ως προς τη σχετική θέση μέσα στον κύκλωμα του αεριοστρόβιλου και του ατμοστρόβιλου.

- Στην πρώτη κατηγορία διατάξεων ο ατμοπαραγωγός συνδέεται μετά τον αεριοστρόβιλο και εκμεταλλεύεται τη θερμότητα των καυσαερίων σε πίεση περιβάλλοντος, είτε με καύση επιπλέον καυσίμου ή χωρίς καύση.
- Στην δεύτερη κατηγορία διατάξεων ο ατμοπαραγωγός συνδέεται μεταξύ του συμπιεστή και του στρόβιλου και αποτελεί το θάλαμο καύσης του αεριοστρόβιλου.

Στους σταθμούς με ατμοπαραγωγό μετά τον αεριοστρόβιλο, τα θερμά καυσαέρια του αεριοστρόβιλου χρησιμοποιούνται ως αέρας καύσης στον ατμοπαραγωγό για την καύση επιπλέον καυσίμου. Επίσης, υπάρχει και η δυνατότητα τα καυσαέρια να χρησιμοποιηθούν απευθείας για την ατμοποίηση του νερού στον ατμοπαραγωγό, χωρίς να χρειαστεί η καύση επιπλέον καυσίμου. Με τη διάταξη αυτή γίνεται εκμετάλλευση των θερμών καυσαερίων του αεριοστρόβιλου, που θα απορρίπτονταν στον περιβάλλον σε υψηλή θερμοκρασία και θα αποτελούσαν απώλεια του συστήματος. Μία άλλη εναλλακτική για χρήση των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου θα ήταν η χρήση του για προθέρμανση του αέρα καύσης μετά το συμπιεστή. Κάτι τέτοιο δεν συμφέρει οικονομικά, ειδικά σε αεριοστρόβιλους με υψηλό λόγο πίεσης, αφού σε τέτοια περίπτωση ο αέρας μετά τον συμπιεστή έχει αρκετά υψηλή πίεση και θερμοκρασία όχι πολύ μικρότερη από τη θερμοκρασία των καυσαερίων που εξέρχονται από τον αεριοστρόβιλο. Έτσι χρειάζονται μεγάλες επιφάνειες συναλλαγής για να επιτευχθεί η ψύξη των καυσαερίων πριν αυτά απορριφθούν στην ατμόσφαιρα.

Η περίπτωση της μονάδας που μελετάται χρησιμοποιεί δύο αεριοστρόβιλους GT 8 C των οποίων τα καυσαέρια χρησιμοποιούνται για την ατμοποίηση του νερού χωρίς καύση επιπλέον καυσίμου. Η θέρμανση και ατμοποίηση του νερού επιτυγχάνεται μέσω δύο εναλλακτών θερμότητας, ένας για κάθε αεριοστρόβιλο, στους οποίους συναλλάσσεται θερμότητα μεταξύ των θερμών καυσαερίων του αεριοστρόβιλου και του νερού που ατμοποιείται. Οι εναλλάκτες αυτοί παίζουν ουσιαστικά το ρόλο του ατμοπαραγωγού χωρίς όμως να έχουμε σε αυτούς καύση. Ο ατμός που παράγεται από τους δύο εναλλάκτες εισέρχεται στον ατμοστρόβιλο του συστήματος και εκτονώνεται. Το σύστημα περιλαμβάνει τρεις ηλεκτρικές γεννήτριες, μία για κάθε αεριοστρόβιλο και μία για τον ατμοστρόβιλο. Με τον τρόπο αυτό, υπάρχει η δυνατότητα σε χαμηλά φορτία να λειτουργεί μόνο ο ένας αεριοστρόβιλος, ενώ

επιπλέον για να διευκολυνθεί η διαδικασία έναυσης του συστήματος κατά την εκκίνηση ο ατμοστρόβιλος τίθεται εκτός λειτουργίας. Στα συστήματα αυτά η πίεση του ατμού πριν την είσοδο στον ατμοστρόβιλο, εξαρτάται από τη θερμοκρασία των καυσαερίων μετά από τον αεριοστρόβιλο.

Για τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης χωρίς πρόσθετη καύση ισχύει η σχέση (Π.Α.3.1). Στη σχέση αυτή με  $P_{GT}$  συμβολίζεται η ισχύς που παράγεται από τους αεριοστρόβιλους, με  $P_{DT}$  η ισχύς που παράγεται από τον ατμοστρόβιλο και με  $Q_{GT}$  η προσαγόμενη στον θάλαμο καύσης του αεριοστρόβιλου (ή στην περίπτωση μας των αεριοστρόβιλων) θερμότητας μέσω του καυσίμου και της θερμογόνου δύναμής του. Ο βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου συμβολίζεται με  $\eta_{CC}$ .

$$\eta_{CC} = \frac{P_{GT} + P_{DT}}{Q_{GT}} \quad (\text{Π.Α.3.1})$$

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται και πρόσθετο καύσιμο στον ατμοπαραγωγό, ο βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου υπολογίζεται από τον τύπο (Π.Α.3.1), αν στον παρονομαστή προστεθεί και η προσαγόμενη στην ατμοπαραγωγό θερμότητα μέσω της παροχής και της θερμογόνου δύναμης του πρόσθετου καυσίμου.

Σε ένα συνδυασμένο κύκλο αεριοστρόβιλου-ατμοστρόβιλου χρησιμοποιούνται δύο θερμοδυναμικοί κύκλοι. Ο ένας είναι ο κύκλος που ακολουθεί ο αέρας-καυσαέριο στον αεριοστρόβιλο και προσεγγίζει τον ιδανικό κύκλο Joule-Brayton, και ο δεύτερος είναι ο κύκλος που ακολουθεί το νερό-ατμός στον εναλλάκτη θερμότητας (ή ατμοπαραγωγό όταν έχουμε καύση επιπρόσθετου καυσίμου) που προσεγγίζει τον ιδανικό κύκλο Rankine. Περισσότερα για τους κύκλους αυτούς παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β που ακολουθεί στη συνέχεια.

Η δεύτερη κατηγορία διατάξεων που αναφέρθηκε στην αρχή της παραγράφου είναι λιγότερο χρησιμοποιούμενη. Στην περίπτωση αυτή ο ατμοπαραγωγός αντικαθιστά τον θάλαμο καύσης του αεριοστρόβιλου. Η αναγκαία θερμότητα στα καυσαέρια πριν την είσοδό τους στο στρόβιλο του αεριοστρόβιλου παρέχεται με την απόδοση επιπλέον θερμότητας στον ατμοπαραγωγό για την παραγωγή ατμού. Το μειονέκτημα που καθιστά τη λύση αυτή αντικοινωνική είναι ο μειωμένος βαθμός απόδοσης σε μειωμένα φορτία. Αυτό συμβαίνει γιατί ο αεριοστρόβιλος πρέπει να αποβάλλει φορτίο παράλληλα με τον ατμοστρόβιλο και εισέρχεται σε μη ευνοϊκή περιοχή λειτουργίας από πλευράς απόδοσης.





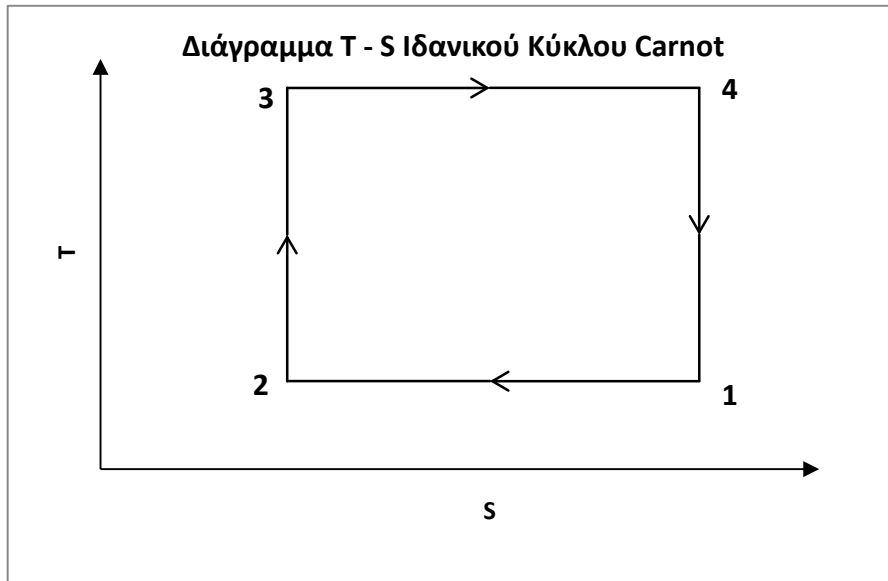
## Παράρτημα Β

Στο παράρτημα αυτό περιγράφονται οι κύκλοι που ακολουθούνται από τα εργαζόμενα μέσα στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Θα επικεντρώσουμε το ενδιαφέρον μας στον κύκλο Joule-Brayton και Clausius-Rankine. Ο πρώτος από τους δύο μοντελοποιεί τη λειτουργία των αεριοστρόβιλων, ενώ ο δεύτερος τη λειτουργία των ατμοστρόβιλων και γενικότερα των ατμοηλεκτρικών σταθμών. Παρά το γεγονός ότι στις εφαρμογές τις παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν χρησιμοποιείται κάποια αμιγώς ατμοηλεκτρική μονάδα, ο κύκλος Clausius-Rankine παρουσιάζει ενδιαφέρον γιατί βρίσκει εφαρμογή στο κύκλωμα νερού-ατμού της μονάδας συνδυασμένου κύκλου (μονάδα 3, παράγραφος Α.3 του παραρτήματος Α). Τέλος, να σημειωθεί ότι θα γίνει και μία σύντομη αναφορά στον κύκλο Carnot που θεωρητικά παρουσιάζει τον μέγιστο βαθμό απόδοσης για συγκεκριμένα όρια θερμοκρασιών λειτουργίας, καθώς και στον κύκλο Ericsson του οποίου τα χαρακτηριστικά είναι επιθυμητό να προσεγγισθούν αρκετές φορές κατά την λειτουργία των αεριοστρόβιλων [29].

### B.1 Κύκλος Carnot

Ο κύκλος Carnot είναι θεωρητικός θερμοδυναμικός κύκλος που επιτυγχάνει το μέγιστο θερμικό βαθμό απόδοσης για συγκεκριμένα όρια θερμοκρασιών λειτουργίας. Ο κύκλος Carnot αποτελείται από μία ισοθερμοκρασιακή συμπίεση (1-2), μία ισεντροπική θέρμανση-συμπίεση (2-3), μία ισοθερμοκρασιακή αποτόνωση (3-4) και μία ισεντροπική ψύξη- αποτόνωση (4-1). Ο κύκλος Carnot δεν μπορεί να υλοποιηθεί σε μία πραγματική θερμική μηχανή, ωστόσο χρησιμεύει γιατί παρέχει τον μέγιστο βαθμό απόδοσης που μπορεί να επιτευχθεί από μία θερμική μηχανή. Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Carnot δίνεται από την σχέση (Π.Β.1.1) [29]. Στο σχήμα Π.Β.1.1 παρουσιάζεται σε διάγραμμα θερμοκρασίας – εντροπίας (T-s) ο ιδανικός κύκλος Carnot.

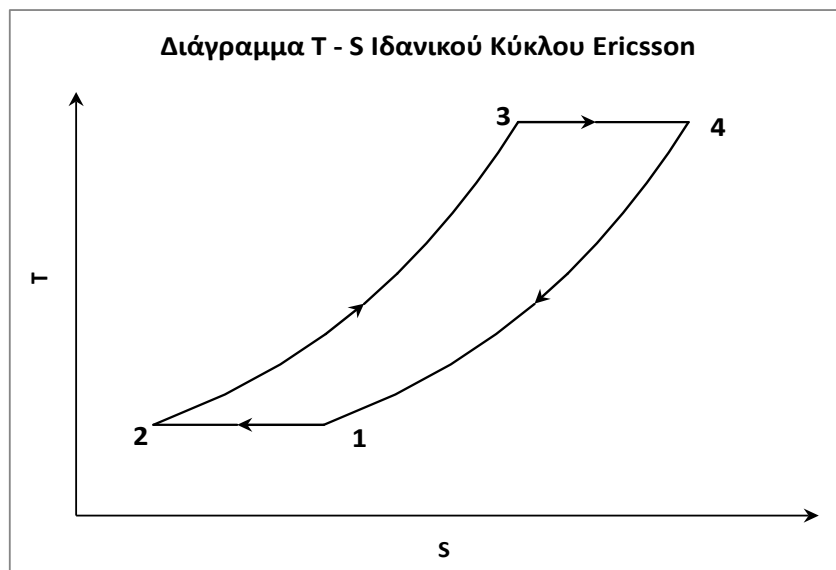
$$(\eta_c)_{th} = 1 - \frac{T_{t1}}{T_{t3}} \quad (\text{Π.Β.1.1})$$



**Σχήμα Π.Β.1. 1:** Στο σχήμα παρουσιάζεται σε διάγραμμα T-s η μορφή του ιδανικού κύκλου Carnot.

## B.2 Κύκλος Ericsson

Ο κύκλος Ericsson είναι ένας κύκλος που είναι αρκετές φορές επιθυμητό να προσεγγισθεί από τη λειτουργία των αεριοστροβίλων. Ο κύκλος αυτός αποτελείται από μία ισοθερμοκρασιακή συμπίεση (1-2), μία ισόθλιπτη πρόσδοση θερμότητας (2-3), μία ισοθερμοκρασιακή αποτόνωση (3-4) και μία ισόθλιπτη αποβολή θερμότητας (4-1). Ο κύκλος συνοδεύεται από βαθμό απόδοσης που υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (Π.Β.1.1.). Το κύριο μειονέκτημα του κύκλου είναι η τεχνικά δύσκολη υλοποίηση των συναλλαγών θερμότητας [29].



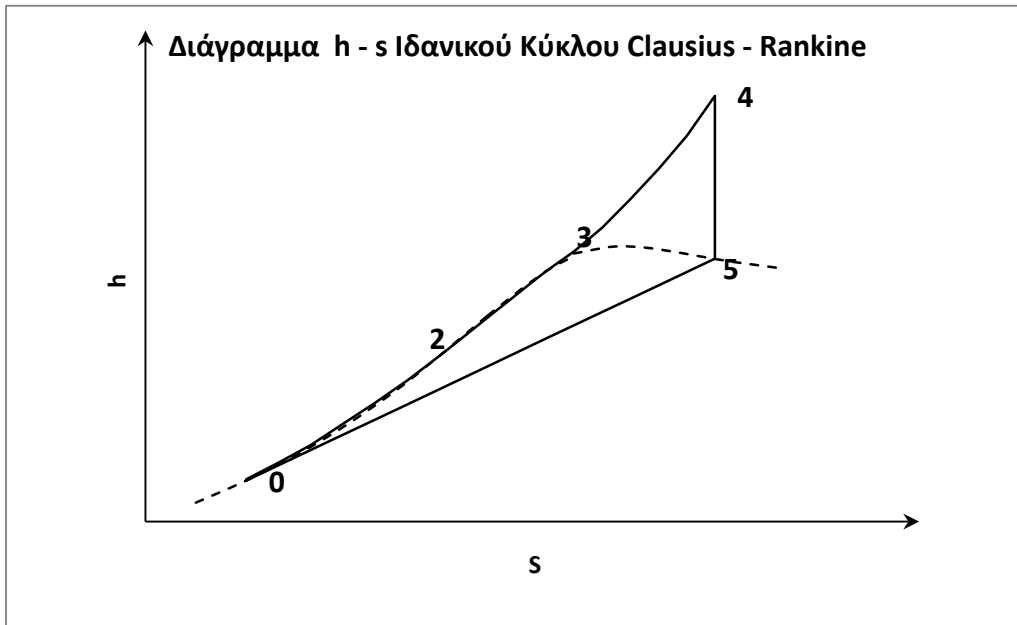
**Σχήμα Π.Β.2. 1:** Στο σχήμα παρουσιάζεται σε διάγραμμα T-s ο ιδανικός κύκλος Ericsson.

### B.3 Κύκλος Clausius-Rankine

Ο κύκλος Clausius-Rankine με εργαζόμενο μέσο το νερό-ατμό χρησιμοποιείται στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς και στο κύκλωμα νερού-ατμού των μονάδων συνδυασμένου κύκλου. Σε έναν ατμοηλεκτρικό σταθμό η διαδικασία, που ακολουθείται για την υλοποίηση του κύκλου από τις διάφορες συσκευές, είναι η ακόλουθη.

Από την τροφοδοτική δεξαμενή το νερό με τη βοήθεια τροφοδοτικής αντλίας, που αυξάνει την πίεσή του οδηγείται στον ατμopαραγωγό (ή στον εναλλάκτη θερμότητας με ατμό που χρησιμοποιείται σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου χωρίς πρόσθετη χρήση καυσίμου), (0-1). Εκεί το νερό θερμαίνεται, ατμοποιείται και υπερθερμαίνεται (1-2, 2-3, 3-4). Στην συνέχεια, ο ατμός οδηγείται στον ατμοστρόβιλο όπου συμβαίνει η αποτόνωσή του με απόδοση έργου στον άξονα που συνδέεται απευθείας ή μέσω μειωτήρα με την ηλεκτρική γεννήτρια (4-5). Τέλος, ο ατμός εισάγεται στο συμπυκνωτή, όπου ψύχεται και υγροποιείται και με τη βοήθεια αντλίας συμπυκνώματος οδηγείται στην τροφοδοτική δεξαμενή (5-0). Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου Clausius-Rankine δίνεται από τη σχέση (Π.Β.3.1). Στο σχήμα Π.Β.3.1 παρουσιάζεται σε διάγραμμα ενθαλπίας-εντροπίας, ο κύκλος Clausius-Rankine (κύκλος υπέρθερμου ατμού) [28].

$$\eta_{th} = 1 - \frac{h_5 - h_0}{h_4 - h_1} \quad (\text{Π.Β.3.1.})$$



**Σχήμα Π.Β.3. 1:** Στο σχήμα παρουσιάζεται σε διάγραμμα h-s ο κύκλος νερού-ατμού Clausius-Rankine. Ο κύκλος που παρουσιάζεται είναι ιδανικός (ισεντροπική μεταβολή στον ατμοστρόβιλο κ.λ.π.) και υπέρθερμου ατμού. Το σημείο 1 δε διακρίνεται στο σχήμα γιατί λόγω κλίμακας σχεδόν συμπίπτει με το σημείο 0.

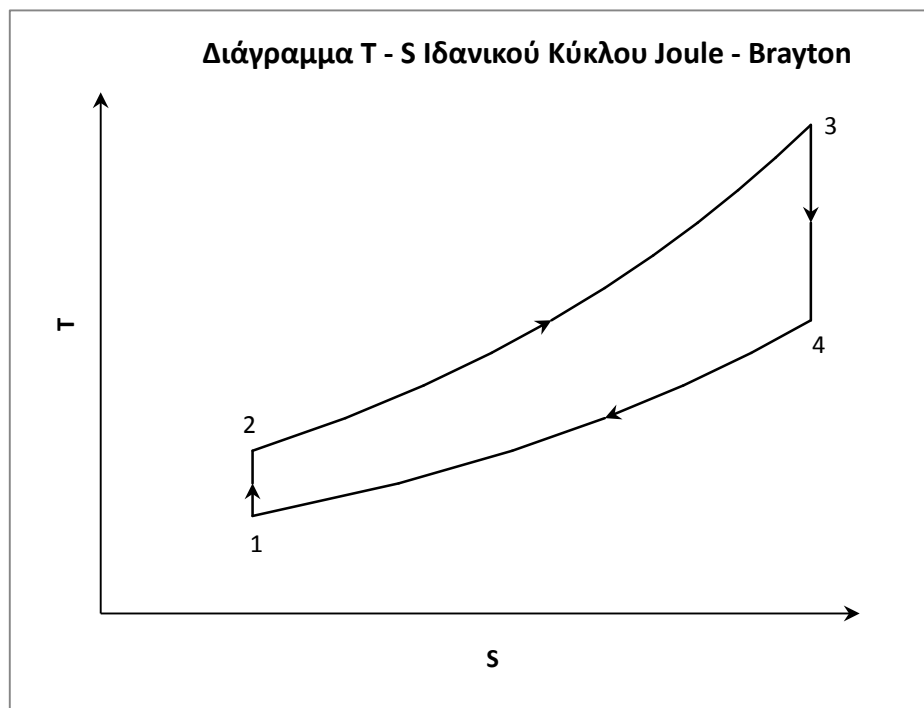
#### B.4 Κύκλος Joule-Brayton

Ο ιδανικός κύκλος Joule-Brayton είναι ο κύκλος που προσεγγίζεται περισσότερο από τη λειτουργία των αεριοστρόβιλων. Ο κύκλος αποτελείται από μία ισεντροπική συμπίεση (1-2), μία ισόθλιπτη πρόσδοση θερμότητας (2-3), μία ισεντροπική αποτόνωση (3-4) και μία ισόθλιπτη αποβολή θερμότητας (4-1). Η συμπίεση και η αποτόνωση επιτυγχάνονται στην πράξη μέσω του συμπιεστή και του στροβίλου. Αυτό σημαίνει ότι στην πραγματικότητα οι μεταβολές αυτές δεν επιτυγχάνονται ισεντροπικά, αλλά συνοδεύονται από έναν ισεντροπικό βαθμό απόδοσης. Επίσης, η μεταβολή (4-1) πραγματοποιείται μόνο στην περίπτωση αεριοστρόβιλου κλειστού κυκλώματος (εφαρμογή που δεν αναφέρεται τους αεριοστρόβιλους που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας). Στους αεριοστρόβιλους ανοιχτού κυκλώματος ο θερμός αέρας της κατάστασης 4 απορρίπτεται στο περιβάλλον, ενώ αναρροφάται συνεχώς αέρας κατάστασης 1 [29]. Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου δίνεται από τη σχέση (Π.Β.4.1). Κατά τη λειτουργία των αεριοστρόβιλων, η πίεση στην έξοδο του στροβίλου είναι ατμοσφαιρική και ίση με την πίεση του αέρα στην αναρρόφηση του συμπιεστή. Η ειδική ισχύς που αποδίδεται μέσω του κύκλου Joule-Brayton ( $w$ ) δίνεται από τη σχέση (Π.Β.4.2).

$$\eta_{th} = 1 - \left( \frac{p_{t1}}{p_{t2}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 1 - \frac{T_{t1}}{T_{t2}} \quad (\text{Π.Β.4.1})$$

$$w = T_{t3} - T_{t4} \quad (\text{Π.Β.4.2})$$

Να σημειωθεί ότι ο δείκτης  $t$  που χρησιμοποιείται στις θερμοκρασίες και τις πιέσεις των παραπάνω σχέσεων αναφέρεται σε ολικά μεγέθη, και αυτό γιατί αναφερόμαστε σε ροή αερίων με κάποια ταχύτητα. Σύμφωνα με τη σχέση (Π.Β.4.1), ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Joule-Brayton εξαρτάται από το λόγο πίεσης του συμπιεστή και συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος πίεσης τόσο καλύτερος είναι ο βαθμός απόδοσης. Σε αντίθεση με το βαθμό απόδοσης, η ειδική ισχύς του κύκλου εξαρτάται και από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και ακόμα περισσότερο από τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο. Για το λόγο αυτό επιδιώκεται η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερη. Ο βασικότερος περιορισμός προς αυτή την κατεύθυνση είναι η θερμική αντοχή των υλικών κατασκευής του στρόβιλου και ιδιαίτερα των πτερυγίων των πρώτων βαθμίδων. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιούνται διάφορες διατάξεις για την ψύξη των πτερυγίων του στρόβιλου. Κάποιες από αυτές τις διατάξεις περιγράφονται σε παραγράφους του παραρτήματος Α. [29]



**Σχήμα Π.Β.4. 1:** Στο σχήμα παρουσιάζεται σε διάγραμμα T-s ο ιδανικός κύκλος Joule-Brayton, που προσεγγίζεται από τη λειτουργία των αεριοστρόβιλων. Οι μεταβολές 1-2 και 3-4 είναι ισεντροπικές (σε αντίθεση με τις αντίστοιχες μεταβολές που συμβαίνουν σε ένα πραγματικό κύκλο αεριοστρόβιλου), ενώ η πρόσδοση θερμότητας 2-3 γίνεται χωρίς απώλειες πίεσης.

## Βιβλιογραφία

- [1] X. A. Γεωργοπούλου. *Τεχνικές Βελτιστοποίησης για τον Προγραμματισμό Λειτουργίας Αεριο/Ατμοστροβιλικών Μονάδων και το Σχεδιασμό Συνιστωσών τους*. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Ρευστών, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών, Αθήνα, 2009
- [2] S. M. Ross. *Introduction to Probability Models (Tenth Edition)*, 2010
- [3] Senjyu, T., Shinabukuro, K., Uezato, K., Funabashi, T. A fast technique for unit commitment problem by extended priority list. *IEEE Transactions on Power Systems* 2003, Vol. 18(2): 882-888
- [4] Tingfang, Y., Ting, T.O. Methodological Priority List for Unit Commitment Problem. *International Conference on Computer Science and Software Engineering Proceedings* 2008, Vol.1: 176-179
- [5] Mazumdar, M., Chrzan, L. Monte-Carlo stochastic simulation of electric power generation system production costs under time-dependent constraints, 1995. *Electric Power Systems*, 35, 101-108
- [6] Pang, C., Sheble, G.B., Albuyeh, F. Evaluation of Dynamic Programming Based Methods and Multiple Area Representation for Thermal Unit Commitments. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 1981, Vol.100(3): 1212-1218
- [7] Al-Kalaani, Y. Power generation scheduling algorithm using dynamic programming, *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 2008. In Press
- [8] S. Patra, S.K. Goswami, B. Goswami, Fuzzy and simulated annealing based dynamic programming for the unit commitment problem, *Expert Systems with Applications*, 2009, Vol.36(3): 5081-5086
- [9] Merlin, A., Sandrin, P. A New Method for Unit Commitment at Electricite De France. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1988, Vol. 102(5): 1218-1225

- [10] A. Cohen, M. Yoshimura, A branch-and-bound algorithm for unit commitment. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1983, Vol. PAS-102: 444-451
- [11] Dillon, T.S., Edwin, K.W., Kochs, H.D., Taud, R.J. Integer programming approach to the problem of optimal unit commitment with probabilistic reserve determination. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1978, Vol.97(6): 2154-2166
- [12] Lidgate, D., Nor, K.M. Unit commitment in a thermal generation system with multiple pumped storage power stations. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1984, Vol.6(2): 101-111
- [13] D. Dasgupta, D.R. McGregor, Thermal unit commitment using genetic algorithms. Generation, Transmission and Distribution IEE Proceedings, 1994, Vol.(141): 459-465
- [14] N.P. Padhy, Unit commitment using hybrid models: a comparative study for dynamic programming, expert system, fuzzy system and genetic algorithms. Electrical Power and Energy Systems 23 (2000) 827-836. Department of Electrical Engineering, University of Roorkee, India
- [15] S.A. Kazarlis, A.G. Bakirtzis, V. Petridis, A genetic algorithm solution to the unit commitment problem. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.11(1):83-92
- [16] C.A. Georgopoulou, K.C. Giannakoglou, A two-level method for solving power generating unit commitment problems. IEEE-PES PowerTech 2007 Conference, Lauzanne, Switzerland, July 1-5, 2007
- [17] D.E. Goldberg. Genetic algorithms in search, optimization & machine learning, Addison-Wesley, 1989
- [18] K. De Jong. Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems. Ph.D. Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, 1975
- [19] K. X. Γιαννάκογλου. *Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στην Αεροδυναμική*, Εκδόσεις ΕΜΠ (4<sup>η</sup> Έκδοση), Αθήνα, 2006
- [20] L. Davis. Handbook of genetic algorithms, Van Nostrand Reinhold, 1991
- [21] K.C. Giannakoglou, I.C. Kampolis, C.A. Georgopoulou. Metamodel-assisted evolutionary algorithms (MAEAs). von Karmann Institute Lecture Series on

Introduction to Optimization and Multidisciplinary Design in Aeronautics and Turbomachinery, von Karmann Institute for Fluid Dynamics, Rhode Saint Genese, Belgium, 2008

- [22] I.C. Kampolis, A.S. Zymaris, V.G. Asouti, K.C. Giannakoglou. Multilevel optimization strategies based on metamodel-assisted evolutionary algorithms, for computationally expensive problems. *In proceedings of the 2007 Congress on Evolutionary Computation, CEC 2007*, pages 4116-4123, Singapore, 2007, IEEE Press
- [23] M.K. Karakasis, K.C. Giannakoglou. On the use of metamodel-assisted, multiobjective evolutionary algorithms. *Engineering Optimization*, volume 38(8), pages 941-957, 2006
- [24] K.C. Giannakoglou. Acceleration of Genetic Algorithms Using Artificial Neural Networks – Theoretical Background, von Karman Institute Lectures Series on Genetic Algorithms for Optimization in Aeronautics and Turbomachinery, May 15-19, 2000
- [25] C.A. Georgopoulou, K.C. Giannakoglou. Solutions to the unit commitment problem using two-level evolutionary algorithms, EUROGEN 2007 Conference, Jyväskylä, Finland, June 11-13-2007
- [26] C.A. Georgopoulou, K.C. Giannakoglou. Metamodel-Assisted Evolutionary Algorithms for the Unit Commitment Problem with Probabilistic Outages, National Technical University of Athens, School of Mechanical Engineering, Lab. of Thermal Turbomachines, Parallel CFD & Optimization Unit.
- [27] Κ.Δ. Παπαηλιού, Κ.Μ. Μαθιουδάκης, Κ.Χ. Γιαννάκογλου. *Εισαγωγή στις Θερμικές Στροβιλομηχανές*, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2000
- [28] Ε. Κακκαράς. *Θερμοηλεκτρική Σταθμοί*. Εκδόσεις Φούντας, 2000
- [29] Κ. Μαθιουδάκης. *Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Ατμοστροβίλων*, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2007
- [30] Κ. Μαθιουδάκης. *Εισαγωγή στους Αεροπορικούς Κινητήρες: Στροβιλοαντιδραστήρες*, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2008
- [31] Ν. Παπαγεωργίου. *Ατμοπαραγωγοί Ι – Γενικές Αρχές*. Εκδόσεις Συμμεών, 2<sup>η</sup> Έκδοση, 1991
- [32] Σ. Σιμόπουλος. *Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών*. Εκδόσεις ΕΜΠ, 1980



- [33] Φυλλάδιο της εταιρείας General Electric με κωδικό GER-3695
- [34] Φυλλάδιο της εταιρείας General Electric για τον αεριοστρόβιλο LM6000PC Sprint
- [35] Φυλλάδιο ORBIT Vol.25 No.1, 2005, υπό τον τίτλο Performance Monitoring For Gas Turbines
- [36] Φυλλάδιο της εταιρείας General Electric για τον αεριοστρόβιλο LM2500+
- [37] Φυλλάδιο της εταιρείας Ansaldo Energia σχετικό με βιομηχανικούς αεριοστρόβιλους της εταιρείας με τίτλο Gas Turbines.
- [38] Electric Power 1997 Handbook
- [39] Ιστοσελίδα [www.gepower.com](http://www.gepower.com)
- [40] Ιστοσελίδα [www.ge.com](http://www.ge.com)
- [41] Στοιχεία από τη Διεύθυνση Μελετών Κατασκευών Θερμοηλεκτρικών Έργων, ΔΜΚΘΗΕ της Δ.Ε.Η.
- [42] Ε. Φουντής. *Προγραμματισμός σε κάρτες γραφικών και εφαρμογή στην αεροδυναμική βελτιστοποίηση*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Ρευστών, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών, Αθήνα, 2009