



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ**

**ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ  
ΤΙΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗ ΔΙΑΓΝΩΣΗ  
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΜΙΧΑΗΛ Γ. ΧΑΝΙΩΤΗ**

**Επίβλεψη:**  
**Λέκτορας Ν. Αρετάκης**  
**Λέκτορας Σ.Ν.Δ. Ι. Ρουμελιώτης**

**ΑΘΗΝΑ**  
**ΙΟΥΛΙΟΣ 2013**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα το Λέκτορα Αρετάκη Νικόλαο, ο οποίος επέβλεψε τη διπλωματική αυτή εργασία και με βοήθησε με τις τεχνικές του γνώσεις και την εμπειρία του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ρουμελιώτη για τη συμβολή του στην περαίωση της εργασίας αυτής, καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές του.

Ακόμη, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον υποψήφιο διδάκτορα Καλαθάκη Χρήστο για την πολύτιμη βοήθεια του επί του κειμένου της διπλωματικής, αλλά και για τις χρήσιμες συμβουλές του.

Εν τέλει, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για τη στήριξη και την υπομονή τους όλα αυτά τα χρόνια.



Στους γονείς μου  
Γιώργο  
Φωτεινή





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ**

Περίληψη διπλωματικής εργασίας:

**ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΙΣ**  
**ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗ ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ**  
**ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ**

Μιχαήλ Γ. Χανιώτης

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συσχέτιση των διαδικασιών συντήρησης και της κατάστασης υγείας της μηχανής με μετρήσεις χαρακτηριστικών μεγεθών που λαμβάνονται από τη μετρητική διάταξη της μηχανής. Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία μεγάλου όγκου πραγματικών μετρήσεων από βιομηχανικούς αεριοστρόβιλους και έγινε προσπάθεια συσχέτισής τους με πιθανές αλλά και δεδομένες παρεμβάσεις στη μηχανή.

Αρχικά, συλλέχθηκαν μετρήσεις από τη βάση δεδομένων του διαγνωστικού συστήματος στους δύο αεριοστρόβιλους της μονάδας συνδυασμένου κύκλου Νο III του Λαυρίου, το οποίο έχει δημιουργηθεί και εγκατασταθεί από το ΕΘΣ, αλλά και πληροφορίες γύρω από τις συντηρήσεις των αεριοστρόβιλων από τα ημερολόγια της μονάδας (logbooks). Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε διόρθωση των μετρήσεων ώστε να αναχθούν στις συνθήκες αναφοράς. Ακολούθως, στις διορθωμένες μετρήσεις εφαρμόστηκε η μέθοδος της αναγωγής σε σταθερό φορτίο με χρήση της τεχνικής της γραμμικής προσέγγισης ελαχίστων τετραγώνων, ώστε να προσδιοριστεί η τάση μεταβολής τους. Η μέθοδος εφαρμόστηκε με δύο τρόπους, πρώτον στα δεδομένα μεταξύ δύο διαδοχικών συντηρήσεων, όπως αυτές απεικονίζονται στα ημερολόγια της μονάδας και δεύτερον, χρησιμοποιώντας όλο τον όγκο μετρήσεων μη λαμβάνοντας υπ' όψιν τα συμβάντα συντήρησης. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν και για τη βελτίωση του μοντέλου της υπό μελέτη μηχανής στο λογισμικό TEACHES, το οποίο έχει αναπτυχθεί από το Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ και παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της λειτουργίας αλλά και τον προσδιορισμό

της κατάστασης υγείας διαφόρων αεριοστροβίλων με χρήση των μοντέλων προσομοίωσης τους. Για το λόγο αυτό έγινε επιλογή των κατάλληλων μετρήσεων ώστε να γίνει βελτίωση του χάρτη λειτουργίας του συμπιεστή του συγκεκριμένου κινητήρα. Ακολούθως, με χρήση του βελτιωμένου μοντέλου στο λογισμικό TEACHES, πραγματοποιήθηκε διάγνωση της κατάστασης των αεριοστροβίλων. Τα δεδομένα παρεμβάσεων στις μηχανές συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα του λογισμικού TEACHES. Συγκεκριμένα, αυτό έγινε με τον υπολογισμό και την παρατήρηση της συμπεριφοράς των παραμέτρων υγείας, της παροχής αέρα εισόδου, του φορτίου και του θερμικού βαθμού απόδοσης, σε συνάρτηση με τις ημερομηνίες που πραγματοποιήθηκαν οι συντηρήσεις. Με αυτόν τον τρόπο εκτιμήθηκε η κατάσταση των δύο αεριοστροβίλων και προτάθηκε ένας βέλτιστος αριθμός Off-Line πλυσιμάτων των δύο συμπιεστών.

Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των μετρήσεων από τους δύο αεριοστροβίλους της μονάδας συνδυασμένου κύκλου του Αλουμινίου της Ελλάδας. Σε αυτήν την περίπτωση δεν ήταν διαθέσιμο το ιστορικό των συντηρήσεων των δύο μηχανών. Η επεξεργασία αφορά τον υπολογισμό του διορθωμένου φορτίου και της διορθωμένης Ροής θερμότητας (Heat Rate) με βάση τις καμπύλες διόρθωσης και των οδηγιών από το εγχειρίδιο της κατασκευάστριας εταιρίας. Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον VBA (Visual Basic for Applications) και είχε ως στόχο τη διαμόρφωση εικόνας σχετικά με την κατάσταση των κινητήρων, αλλά και την πιθανή διαπίστωση συμβάντων συντήρησης.



**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>1.1</b>
1.1	Σκοπός διπλωματικής εργασίας. ....	1.1
1.2	Δομή διπλωματικής εργασίας.....	1.2
<b>2</b>	<b>Περιγραφή διαδικασίας συντήρησης αεριοστροβίλων</b> .....	<b>2.1</b>
2.1	Διαδικασίες συντήρησης .....	2.1
<b>3</b>	<b>Επεξεργασία μετρήσεων Μονάδας Παραγωγής III του ΑΗΣ Λαυρίου</b>	<b>3.1</b>
3.1	Αναλυτική περιγραφή αεριοστροβίλων μονάδας παραγωγής III του ΑΗΣ Λαυρίου της ΔΕΗ .....	3.1
3.1.1	Περιγραφή διαγνωστικού συστήματος .....	3.3
3.2	Ανάλυση και επεξεργασία μετρήσεων αεριοστροβίλων Λαυρίου III, και σχολιασμός αυτών.....	3.5
3.2.1	Καταγραφή μετρήσεων και συμβάντων.....	3.5
3.2.2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση στη διόρθωση μετρήσεων αεριοστροβίλων.....	3.9
3.2.3	Αναγωγή διορθωμένων μετρήσεων σε σταθερό φορτίο.....	3.19
3.2.4	Επεξεργασία δεδομένων χωρίς να ληφθούν υπόψη οι συντηρήσεις, σχολιασμός και σύγκριση. ....	3.35
3.3	Παρεμβάσεις και βελτιώσεις του μοντέλου της μηχανής στο λογισμικό TEACHES.....	3.41
3.3.1	Σύντομη παρουσίαση του λογισμικού TEACHES. ....	3.41
3.3.2	Παρεμβάσεις στο μοντέλο μηχανής στο λογισμικό TEACHES. ....	3.44
3.3.3	Αποτελέσματα βελτιωμένης προσομοίωσης από το TEACHES για τον αεριοστρόβιλο GT31.....	3.46
3.3.4	Αποτελέσματα βελτιωμένης προσομοίωσης από το TEACHES για τον αεριοστρόβιλο GT32.....	3.52
3.3.5	Αποτελέσματα και σύγκριση μεγεθών συνολικών επιδόσεων για τους αεριοστροβίλους GT31 και GT32. ....	3.55
<b>4</b>	<b>Επεξεργασία μετρήσεων και καμπύλες διόρθωσης, για διαγνωστικούς σκοπούς στο Αλουμίνιο της Ελλάδας (ΑτΕ)</b> .....	<b>4.1</b>
4.1	Περιγραφή αεριοστροβίλων. ....	4.1
4.2	Διόρθωση φορτίου, με χρήση καμπυλών διόρθωσης, και σχολιασμός αποτελεσμάτων. ....	4.3
4.3	Υπολογισμός και διόρθωση Ροής Θερμότητας (Heat Rate), με χρήση καμπυλών διόρθωσης, και σχολιασμός αποτελεσμάτων. ....	4.10

---

<b>5</b>	<b>Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα</b> .....	<b>5.1</b>
5.1	Ανακεφαλαίωση .....	5.1
5.2	Συμπεράσματα .....	5.2
<b>6</b>	<b>Βιβλιογραφία</b> .....	<b>1</b>

# 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### **1.1 Σκοπός διπλωματικής εργασίας.**

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συσχέτιση πραγματικών μετρήσεων από αεριοστροβίλους με τις διαδικασίες συντήρησης και ο προσδιορισμός της υγείας των μηχανών.

Οι μηχανές από τις οποίες συλλέχθηκαν δεδομένα και μετρήσεις είναι οι δύο αεριοστρόβιλοι της μονάδας συνδυασμένου κύκλου No III της ΔΕΗ στο Λαύριο και οι δύο αεριοστρόβιλοι της μονάδας συνδυασμένου κύκλου στο Αλουμίνιο της Ελλάδας (ΑΤΕ).

Τα δεδομένα της μονάδας III του Λαυρίου διορθώθηκαν ώστε να αναχθούν σε συνθήκες αναφοράς. Για την διόρθωση χρησιμοποιήθηκε η βέλτιστη μέθοδος η οποία προσδιορίστηκε μέσω της σύγκρισης των αναφερόμενων στη βιβλιογραφία. Στη συνέχεια, οι διορθωμένες μετρήσεις επεξεργάστηκαν με τη μέθοδο της αναγωγής σε σταθερό φορτίο και έγινε χρήση της τεχνικής της γραμμικής προσέγγισης ελαχίστων τετραγώνων στο σύνολο των δεδομένων. Στόχος αυτής της διαδικασίας είναι η απομόνωση της επίδρασης της μεταβολής του φορτίου στα μετρούμενα μεγέθη και ο προσδιορισμός της τάσης μεταβολής συγκεκριμένων αεροθερμοδυναμικών μεγεθών και σύνδεση με τις συντηρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στους κινητήρες.

Με την επεξεργασία των μετρήσεων από τους αεριοστροβίλους του Λαυρίου βελτιώθηκε η λειτουργία του μοντέλου του συγκεκριμένου τύπου κινητήρα στο λογισμικό TEACHES (ΕΘΣ) με αποτέλεσμα την καλύτερη προσομοίωση της λειτουργίας τους καθώς και του προσδιορισμού της κατάστασης αυτών. Για την επίτευξη της βελτίωσης του μοντέλου, επιλέχθηκαν οι καταλληλότερες μετρήσεις με σκοπό τη βελτίωση του χάρτη λειτουργίας του συμπιεστή. Έπειτα, με τη διαδικασία της διάγνωσης από το λογισμικό και τη τροφοδότησή του με τις διαθέσιμες μετρήσεις, υπολογίστηκαν οι παράμετροι

υγείας των αεριοστροβίλων, αλλά και άλλα μεγέθη ενδεικτικά της απόδοσης τους, όπως ο θερμοκός βαθμός απόδοσης, το φορτίο και η παροχή αέρα εισόδου. Έτσι, πραγματοποιείται εκτίμηση της κατάστασης υγείας των μηχανών, αλλά επίσης δίδεται και η δυνατότητα να προταθεί ένας βέλτιστος αριθμός Off-Line πλυσιμάτων των δύο συμπιεστών.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των μετρήσεων από τους δύο αεριοστροβίλους στο Αλουμίνιο της Ελλάδας. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε κώδικας σε περιβάλλον VBA ώστε να γίνει υπολογισμός του διορθωμένου φορτίου και της διορθωμένης Ροής Θερμότητας (Heat Rate) με χρήση των καμπυλών διορθωσης και του αντίστοιχου εγχειριδίου του κατασκευαστή. Σκοπός είναι η εκτίμηση της γενική κατάσταση των αεριοστροβίλων και να εντοπιστούν πιθανές παρεμβάσεις στη λειτουργία τους από την παρατήρηση της συμπεριφοράς των μεγεθών, δηλαδή της τάσης μεταβολής αυτών.

## **1.2 Δομή διπλωματικής εργασίας.**

Η παρούσα διπλωματική εργασία δομείται από πέντε κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται εν συντομία ο σκοπός και η δομή της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται αναλυτική περιγραφή των διαδικασιών συντήρησης των αεριοστροβίλων. Η συντήρηση συνδέεται άρρηκτα με τη σωστή και αποδοτική λειτουργία του κινητήρα. Για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης και της διαθεσιμότητας του αεριοστροβίλου, είναι απαραίτητη η παρακολούθηση του συνόλου των μετρήσεων, ώστε να πραγματοποιηθεί συντήρηση όταν η κατάσταση της μηχανής το απαιτεί και όχι με βάση τις προκαθορισμένες ώρες λειτουργίας από τον κατασκευαστή.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αφού γίνει μία βιβλιογραφική αναφορά στις μεθόδους διορθωσης πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων για την επιλογή της πιο αξιόπιστης. Έτσι, αφού γίνει διορθωση, πραγματοποιείται επεξεργασία των μετρήσεων από τους αεριοστροβίλους της μονάδας III του Λαυρίου και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και η συσχέτισή τους με τις διαδικασίες συντήρησης. Έπειτα, παρουσιάζονται οι παρεμβάσεις που έγιναν στο λογισμικό TEACHES, με στόχο τη βελτίωση της λειτουργίας του, καθώς και τα αποτελέσματα της λειτουργίας διάγνωσης από το λογισμικό, και ο σχολιασμός αυτών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιλαμβάνεται η επεξεργασία των μετρήσεων από τους δύο αεριοστροβίλους της μονάδας στο Αλουμίνιο της Ελλάδας και συγκεκριμένα ο υπολογισμός του διορθωμένου φορτίου και της διορθωμένης Ροής Θερμότητας (Heat Rate) με χρήση των καμπυλών διορθωσης. Επίσης, γίνεται

παρουσίαση των αποτελεσμάτων και σχολιασμός της τάσης μεταβολής των μεγεθών.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται ανακεφαλαίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και παράθεση των συμπερασμάτων που προκύπτουν.



# 2

## Περιγραφή διαδικασίας συντήρησης αεριοστροβίλων

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται περιγραφή της διαδικασίας συντήρησης αεριοστροβίλων, όπως αυτή περιγράφεται από το εγχειρίδιο της General Electric. Υπάρχουν πολλά είδη συντηρήσεων, τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού, ανάλογα με την έκταση της συντήρησης, τα μέρη της μηχανής όπου θα συμπεριληφθούν σε αυτήν, και το αν επηρεάζεται η λειτουργία των αεριοστροβίλων.

### 2.1 Διαδικασίες συντήρησης

Συντήρηση ορίζεται το σύνολο των ενεργειών, οι οποίες είναι απαραίτητες να πραγματοποιηθούν στη μηχανή με στόχο την επαναφορά των μηχανικών ανοχών αυτής σε προκαθορισμένα και επιθυμητά όρια και ανανέωση τμημάτων της που έχουν υποστεί γήρανση πέραν κάποιων ορίων.

Υπάρχουν δύο ειδών διαδικασίες συντήρησης βιομηχανικών Αεριοστροβίλων. Η "συμβατική" διαδικασία συντήρησης ακολουθεί αυστηρά τις οδηγίες του κατασκευαστή. Πιο συγκεκριμένα, οι απαραίτητες επεμβάσεις στη μηχανή γίνονται μόνο με βάση τις ώρες λειτουργίας που έχει υποδείξει ο κατασκευαστής. Από την άλλη πλευρά, στην "υπό συνθήκη" συντήρηση ή συντήρηση βάση κατάστασης, οποιαδήποτε επέμβαση σε συνιστώσα της μηχανής γίνεται μόνο όταν η κατάσταση αυτής το απαιτεί. Προφανώς, για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, είναι απαραίτητη η παρακολούθηση κάθε εξαρτήματος και συνιστώσας της μηχανής, ανά πάσα χρονική στιγμή. (Κ.Μαθιουδάκης, 2007).

Πρωτεύων στόχος του χρήστη του κινητήρα αποτελεί το ελάχιστο δυνατό κόστος συντήρησης και η ταυτόχρονη επίτευξη μεγίστου ποσοστού διαθεσιμότητας του κινητήρα (Robert Hoefl, GER-3620J). Ο βασικός ορισμός της έννοιας του ποσοστού διαθεσιμότητας μίας μηχανής δίνεται από (Boyce, 2006):

$$A = \frac{P - S - F}{P} \quad (2.1)$$

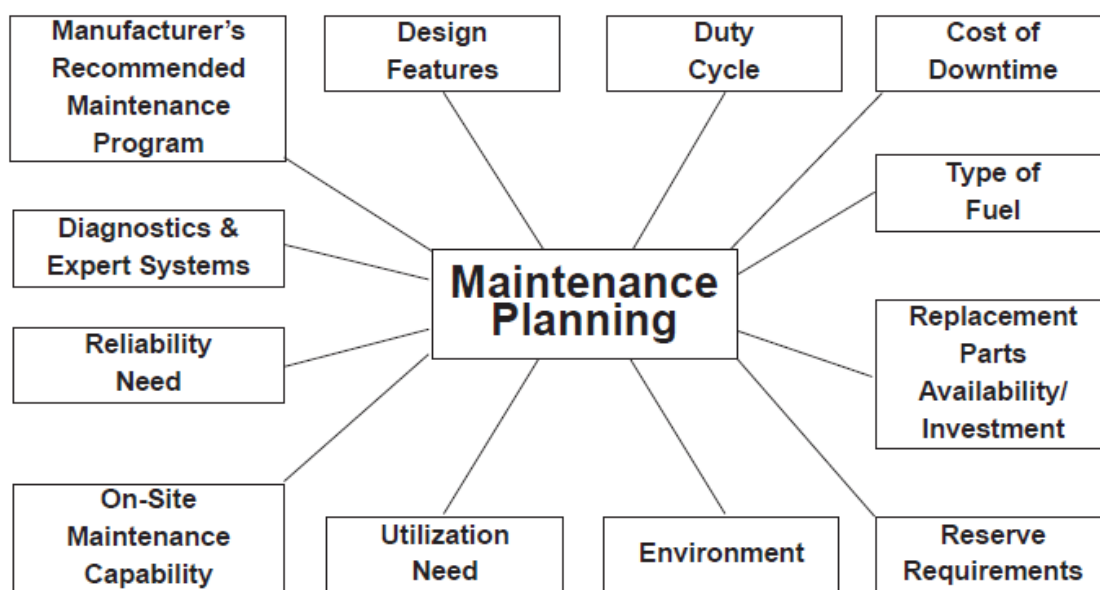
Όπου:

P: Η περίοδος λειτουργίας της μηχανής σε ώρες, η οποία συνήθως είναι 8760 ώρες.

S: Ώρες διακοπής της λειτουργίας της μηχανής για προγραμματισμένη συντήρηση.

F: Ώρες αναγκαστικής διακοπής της λειτουργίας της μηχανής για την επισκευή της οποιασδήποτε βλάβης που προέκυψε.

Για να επιτευχθούν οι παραπάνω απαιτήσεις, στο μέγιστο δυνατό βαθμό, είναι απαραίτητο ένα καλά σχεδιασμένο και μελετημένο πρόγραμμα συντήρησης.



Σχήμα 2.1: Παράγοντες προγράμματος σχεδιασμού συντήρησης. (Robert Hoefl, GER-3620J).

Στο Σχήμα 2.1, απεικονίζονται οι κυριότεροι παράγοντες που συντελούν στη διαμόρφωση της διαδικασίας συντήρησης, όπως είναι το είδος του καυσίμου, η διαθεσιμότητα ανταλλακτικών, το προτεινόμενο από τον κατασκευαστή πρόγραμμα συντήρησης κ.α. Οι παράγοντες αυτοί, επηρεάζουν το σχεδιασμό του προγράμματος συντήρησης σε διαφορετικό βαθμό ο καθένας, δηλαδή ο καθένας συνοδεύεται από ένα διαφορετικό συντελεστή βαρύτητας. Οι συντελεστές αυτοί, καθορίζονται από τον τρόπο και το είδος λειτουργίας του κινητήρα, το οποίο έχει αποφασιστεί από το χρήστη. Για παράδειγμα, αν ο Αεριστρόβιλος αποτελεί κινητήρα βάσης, δηλαδή απαιτείται η συνεχής λειτουργία του σε σταθερό φορτίο, τότε ο παράγοντας της διαθεσιμότητας των ανταλλακτικών και κατ' επέκταση ο χρόνος, όπου θα είναι εκτός λειτουργίας η μηχανή σε περίπτωση βλάβης ή συντήρησης, συνοδεύεται από αρκετά υψηλό συντελεστή βαρύτητας.



Σύμφωνα με το εγχειρίδιο της General Electric, (Robert Hoeft, GER-3620)), τα είδη των επιθεωρήσεων συντήρησης των Αεριοστροβίλων διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

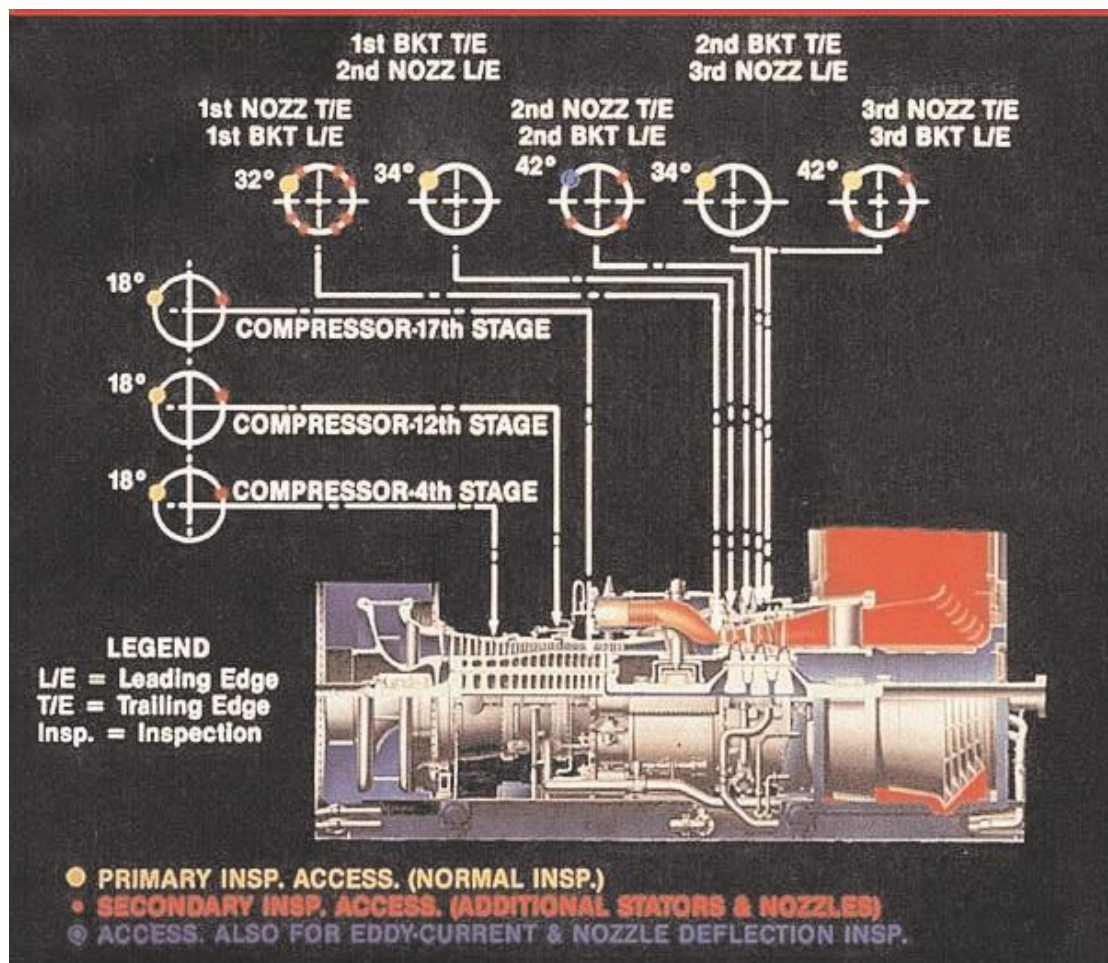
1. Επιθεωρήσεις όταν η μηχανή είναι σε αναμονή δηλαδή είναι εκτός λειτουργίας (Standby Inspections). Το είδος αυτό, των επιθεωρήσεων, πραγματοποιείται σε όλων των ειδών τους Αεριοστροβίλους, και κυρίως σε Αεριοστροβίλους των οποίων η λειτουργία είναι διακοπτόμενη, δηλαδή προορίζονται για την κάλυψη αναγκών σε περιόδους αιχμής. Η επιθεώρηση αυτή περιλαμβάνει έλεγχο του συστήματος μπαταριών (battery system), του επιπέδου και κατάστασης λαδιών, αλλαγή φίλτρων (αέρα εισόδου, λαδιών κτλ.), καθαρισμό αυτόματων ρυθμιστών παροχής ηλεκτρικού ρεύματος (cleaning relays), και έλεγχο της ακρίβειας της μετρητικής ικανότητας των μετρητικών οργάνων. Η κατάλληλη περίοδος για την εφαρμογή της επιθεώρησης είναι σε περιόδους μικρής ζήτησης, δηλαδή όχι σε περιόδους αιχμής, διατηρώντας με αυτό τον τρόπο τη διαθεσιμότητα της μηχανής στο μέγιστο δυνατό ποσοστό. Τέλος, απαραίτητο στοιχείο της επιθεώρησης είναι και ο τακτικός έλεγχος του συστήματος εκκίνησης του Αεριοστροβίλου, αφού η αξιοπιστία του συστήματος αυτού είναι πρωτίστου ενδιαφέροντος για μηχανές που η χρήση τους προορίζεται για περιόδους αιχμής.
2. Επιθεωρήσεις όταν η μηχανή είναι σε λειτουργία (Running Inspections). Η επιθεώρηση κατά τη λειτουργία της μηχανής στηρίζεται στη συνεχή παρατήρηση χαρακτηριστικών παραμέτρων που περιγράφουν τη λειτουργία της. Για την εφαρμογή της επιθεώρησης αυτής είναι απαραίτητος ο καθορισμός τυπικών τιμών κάποιων παραμέτρων που συνδέονται με την "υγεία" του κινητήρα (Κ.Μαθιουδάκης, 2007), ή αλλιώς κάποιων δεδομένων "αναφοράς". Τα δεδομένα αυτά, έχουν συλλεχθεί κατά την αρχική εκκίνηση της μηχανής και ανανεώνονται μετά από κάθε εργασία μείζονος επιθεώρησης (Major Event), η οποία θα αναλυθεί στη συνέχεια. Με βάση αυτά τα δεδομένα "αναφοράς" και τη χρήση κατάλληλου διαγνωστικού συστήματος, είναι δυνατή η πρόβλεψη πιθανής μελλοντικής χειροτέρευσης της μηχανής. Η συνεχής παρατήρηση της μηχανής προϋποθέτει τη συνεχή καταγραφή και αποθήκευση των κατάλληλων μετρήσεων-παραμέτρων λειτουργίας, όπως είναι: το φορτίο σε αντιστοίχιση με τη θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων, οι κραδασμοί, παροχή και πίεση καυσίμου, η θερμοκρασία των εδράνων, η πίεση του λιπαντικού λαδιού, η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων, εύρος διακύμανσης θερμοκρασίας εξόδου καυσαερίων, οι αντίστοιχες χρονικές στιγμές της λήψης των μετρήσεων ή

υπολογισμού των παραμέτρων, κ.α..Ένα αναλυτικό διάγραμμα των ποσοτήτων αυτών ακολουθεί στο Σχήμα 2.2.

- 
- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Speed</li> <li>• Load</li> <li>• Fired Starts</li> <li>• Fired Hours</li> <li>• Site Barometric Reading</li> <li>• Temperatures           <ul style="list-style-type: none"> <li>– Inlet Ambient</li> <li>– Compressor Discharge</li> <li>– Turbine Exhaust</li> <li>– Turbine Wheelspace</li> <li>– Lube Oil Header</li> <li>– Lube Oil Tank</li> <li>– Bearing Metal</li> <li>– Bearing Drains</li> <li>– Exhaust</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pressures           <ul style="list-style-type: none"> <li>– Compressor Discharge</li> <li>– Lube Pump(s)</li> <li>– Bearing Header</li> <li>– Cooling Water</li> <li>– Fuel</li> <li>– Filters (Fuel, Lube, Inlet Air)</li> </ul> </li> <li>• Vibration Data for Power Train</li> <li>• Generator           <ul style="list-style-type: none"> <li>– Output Voltage      – Field Voltage</li> <li>– Phase Current      – Field Current</li> <li>– VARS              – Stator Temp.</li> <li>– Load              – Vibration</li> </ul> </li> <li>• Start-Up Time</li> <li>• Coast-Down Time</li> </ul> |
|---|--|

**Σχήμα 2.2: Παράμετροι δεδομένων λειτουργίας κατά την επιθεώρηση. (Robert Hoefft, GER-3620)).**

3. Επιθεωρήσεις όταν η μηχανή είναι εκτός λειτουργίας και απαιτείται αποσυναρμολόγηση αυτής ή κάποιου τμήματος αυτής (Disassembly Inspections). Πριν αναλυθούν οι κατηγορίες της επιθεώρησης αυτής, πρέπει να γίνει αναφορά στην Βοροσκοπική επιθεώρηση (Borescope Inspection). Με τη Βοροσκοπική επιθεώρηση μπορούμε να έχουμε εικόνα του εσωτερικού της μηχανής όταν αυτή είναι εκτός λειτουργίας, χωρίς να απαιτείται το άνοιγμα κανενός κελύφους. Η ύπαρξη οπών σε συγκεκριμένα σημεία του κελύφους δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη, με τη βοήθεια ειδικού ενδοσκοπικού οργάνου, να έχει εικόνα από διάφορα σημεία του εσωτερικού του κινητήρα, όπως στα διαστήματα μεταξύ των ακίνητων και κινητών πτερυγίων του συμπιεστή και του στροβίλου. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 2.3 φαίνονται τα σημεία υποδοχής του ενδοσκοπικού οργάνου για τον κινητήρα MS7001E.



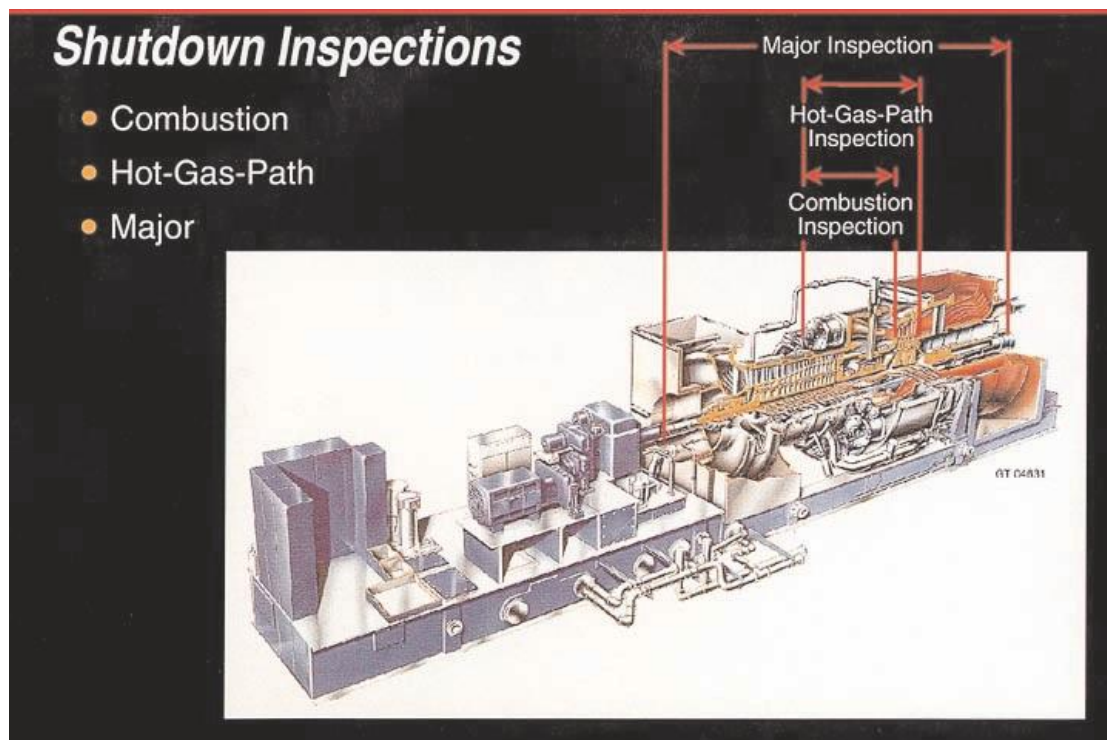
Σχήμα 2.3: Σημεία Βοροσκοπικής επιθεώρησης Στον κινητήρα MS7001E. (Robert Hoeft, GER-3620J).

Η σημαντικότητα της βοροσκοπικής επιθεώρησης, φαίνεται από το ότι δίνει τη δυνατότητα για έγκαιρη επέμβαση σε όλα τα τμήματα των συνιστωσών του κινητήρα, ή και για πρόβλεψη τυχόν βλάβης πριν από τις καθορισμένες επιθεωρήσεις. Αυτό έχει σαν συνέπεια την επίτευξη μεγίστης διαθεσιμότητας της μηχανής και την ικανότητα πρόβλεψης για μελλοντική ανάγκη σε ανταλλακτικά συγκεκριμένων τμημάτων, αυξάνοντας και πάλι τη διαθεσιμότητα της μηχανής αφού περιορίζεται η χρονική διάρκεια της επόμενης συντήρησης. Η βοροσκοπική επιθεώρηση πραγματοποιείται είτε κατά την επιθεώρηση του θαλάμου Καύσης, που θα αναλυθεί στη συνέχεια, είτε μία συγκεκριμένη ημερομηνία του χρόνου που έχει οριστεί ανάλογα με το ποιο από τα δύο συμβάντα προηγείται χρονικά. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει το χρονικό καθορισμό των βοροσκοπικών επιθεωρήσεων είναι και το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιείται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4:

Borescope	Gas and Distillate Fuel Oil	At Combustion Inspection or Annually, Whichever Occurs First
	Heavy Fuel Oil	At Combustion Inspection or Semiannually, Whichever Occurs First

Σχήμα 2.4: Πρόγραμμα Βοροσκοπικών Επιθεωρήσεων. (Robert Hoef, GER-3620J).

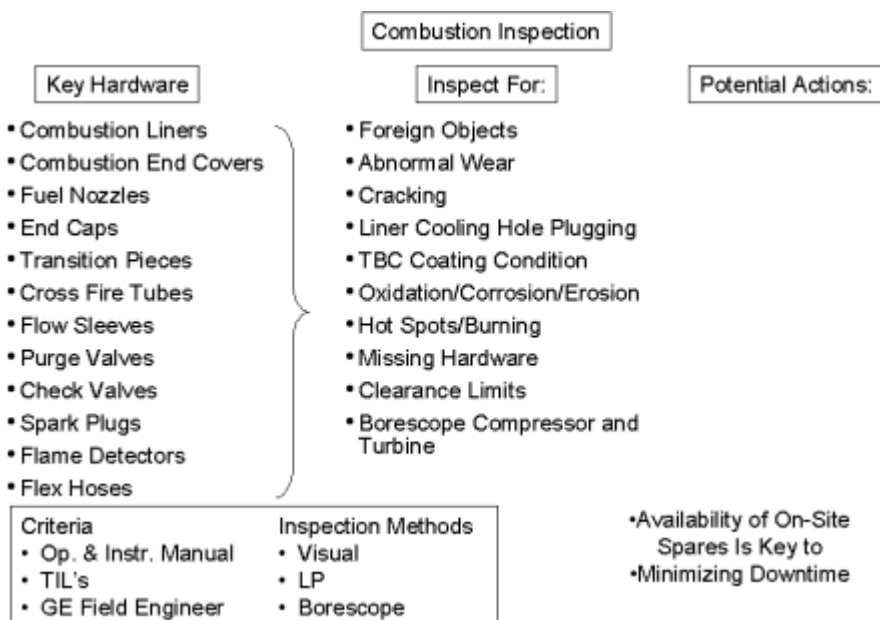
Τρεις διαφορετικές υποκατηγορίες επιθεωρήσεων συγκροτούν την επιθεώρηση με αποσυναρμολόγηση της μηχανής, οι οποίες διακρίνονται ανάλογα με την έκταση της επιθεώρησης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5 που ακολουθεί:



Σχήμα 2.5: Επιθεωρήσεις που απαιτούν άνοιγμα της μηχανής. (Robert Hoef, GER-3620J).

- Επιθεώρηση του Θαλάμου Καύσης του κινητήρα (Combustion Inspection). Κατά την επιθεώρηση αυτήν απαιτείται άνοιγμα της μηχανής, δηλαδή αφαίρεση του κελύφους της, για τον έλεγχο εσωτερικών τμημάτων. Μερικοί κατασκευαστές βιομηχανικών Αεριοστροβίλων τοποθετούν το Θάλαμο Καύσης εξωτερικά του κινητήρα, με συνέπεια την πιο εύκολη επιθεώρηση, συντήρηση και επισκευή τμημάτων με βλάβη, αφού δεν απαιτείται αφαίρεση του κελύφους της μηχανής. (Κ.Μαθιουδάκης, Λειτουργία

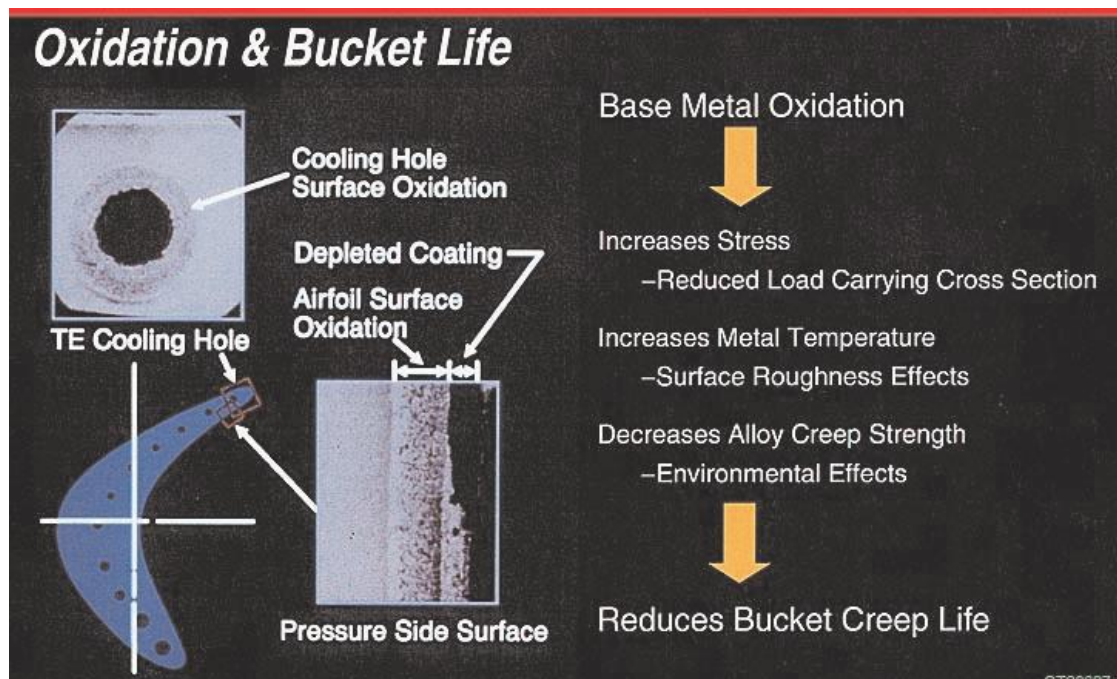
Αεριοστροβίλων και Ατμοστροβίλων, 2007). Η επιθεώρηση αυτή επικεντρώνεται κυρίως στον έλεγχο για τυχόν επισκευή ή αντικατάσταση των μανδυνών ή αλλιώς φλογοσωλήνων (combustion liners), στα τμήματα μετάδοσης της φλόγας (transition pieces), στους εγχυτήρες του καυσίμου (fuel nozzles) και στα καλύμματα στην έξοδο των καυσαερίων πριν την είσοδο τους στο στρόβιλο (end caps). Η σημασία της σωστής και πλήρους επιθεώρησης και συντήρησης των παραπάνω τμημάτων, καθώς και των υπολοίπων που αποτελούν το Θάλαμο Καύσης, είναι αρκετά μεγάλη, διότι με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται αύξηση του χρόνου ζωής των τμημάτων που βρίσκονται κατάντι του Θαλάμου Καύσης, όπως είναι η πρώτη βαθμίδα του στροβίλου. Τα τμήματα που απαιτούν έλεγχο και συντήρηση κατά την επιθεώρηση αυτή φαίνονται αναλυτικά στο Σχήμα 2.6 που ακολουθεί:



**Σχήμα 2.6: Τμήματα ελέγχου κατά την επιθεώρηση του Θαλάμου Καύσης. (Robert Hoeft, GER-3620J).**

- Επιθεώρηση του θερμού τμήματος της μηχανής (Hot-Gas Path Inspection). Σκοπός της συγκεκριμένης επιθεώρησης είναι ο έλεγχος της κατάστασης των τμημάτων εκείνων που εκτίθενται στα αέρια που εξέρχονται από το Θάλαμο Καύσης. Για το λόγο αυτό, στην επιθεώρηση αυτή, πέρα από το Θάλαμο Καύσης, συμπεριλαμβάνεται και ο λεπτομερής έλεγχος των κινητών και ακίνητων πτερυγίων του στροβίλου καθώς και του κελύφους των τελευταίων. Οι υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες εκτίθενται οι στάτορες της πρώτης βαθμίδας του στροβίλου, έχουν συχνά σαν αποτέλεσμα τη

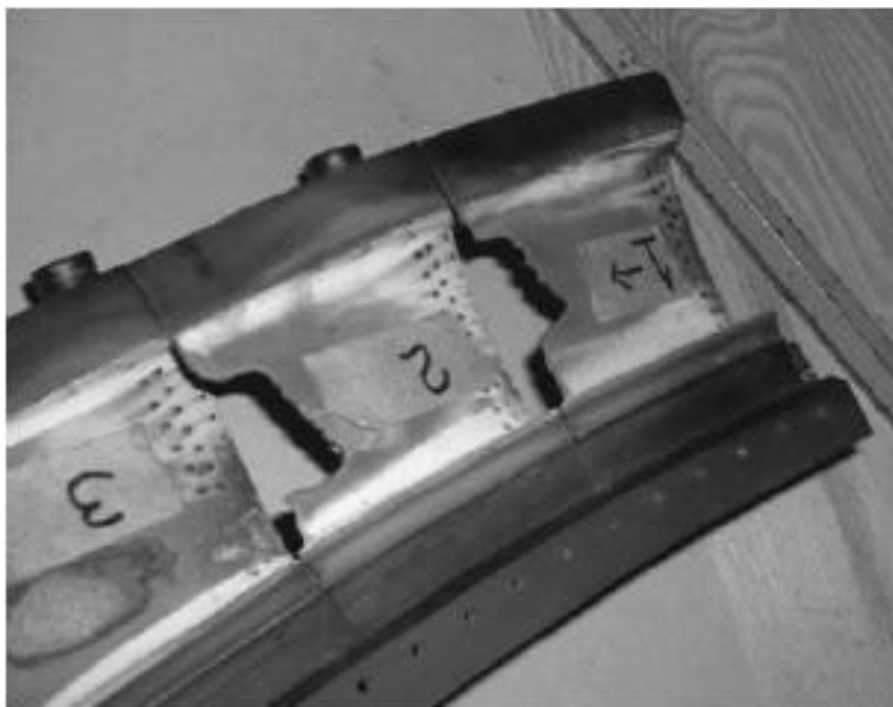
δημιουργία ρωγμών, αλλά και την εμφάνιση του φαινομένου της οξείδωσης, άρα και της διάβρωσης αυτών, μειώνοντας το χρόνο ζωής τους, Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Ρωγμές στα πτερύγια λόγω του φαινομένου της οξείδωσης. (Robert Hoelt, GER-3620J).

Επίσης, η συνεχής έκθεση των ακίνητων πτερυγίων του στροβίλου σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, καθιστά την ψύξη αυτών, κατά τη λειτουργία της μηχανής, απαραίτητη για την αύξηση του χρόνου ζωής τους. Ένας δυνατός τρόπος για την επίτευξη της ψύξης είναι με ρεύματα αέρα προερχόμενα από το συμπιεστή της μονάδας, τα οποία περνούν εσωτερικά από το κέλυφος και στη συνέχεια ψύχουν τα ακίνητα πτερύγια, διερχόμενα από οπές που βρίσκονται πάνω σε αυτά. Είναι, όμως, αρκετά πιθανό το ενδεχόμενο κάποιος από τους αγωγούς από τους οποίους διέρχεται ο αέρας ψύξης να βουλώσει με συνέπεια σ' εκείνο το σημείο του κελύφους ή του πτερυγίου, την ανάπτυξη μεγάλων θερμοκρασιακών διαφορών (Boyce, 2006). Το γεγονός αυτό θα έχει σαν άμεσο αποτέλεσμα την εμφάνιση του φαινομένου του ερπυσμού. Ο ερπυσμός είναι το φαινόμενο της συνεχούς παραμόρφωσης, το οποίο εκδηλώνεται πιο έντονα σε υψηλές θερμοκρασίες και με την άσκηση μηχανικής καταπόνησης για παρατεταμένο χρονικό διάστημα. Οι θερμοκρασίες έκθεσης του υλικού είναι αρκετά μικρότερες από τη θερμοκρασία τήξης του και η τάση που του ασκείται μικρότερη από το όριο διαρροής του. Έτσι, ο ερπυσμός οδηγεί στην εμφάνιση ρωγμών είτε στο ίδιο το ακίνητο πτερύγιο είτε στο κέλυφος που το στηρίζει. Γι' αυτό και ο

έλεγχος του κελύφους αποτελεί βασικό παράγοντα αυτού του είδους της επιθεώρησης. Παραδείγματα εμφάνισης ζημιάς σε πτερύγια ή σε κέλυφος λόγω της εμφάνισης θερμοκρασιακών διαφορών, φαίνονται στο Σχήμα 2.8 και στο Σχήμα 2.9, αντίστοιχα.



Σχήμα 2.8: Βλάβη στα πτερύγια λόγω Θερμοκρασιακής Διαφοράς. (Boyce, 2006).

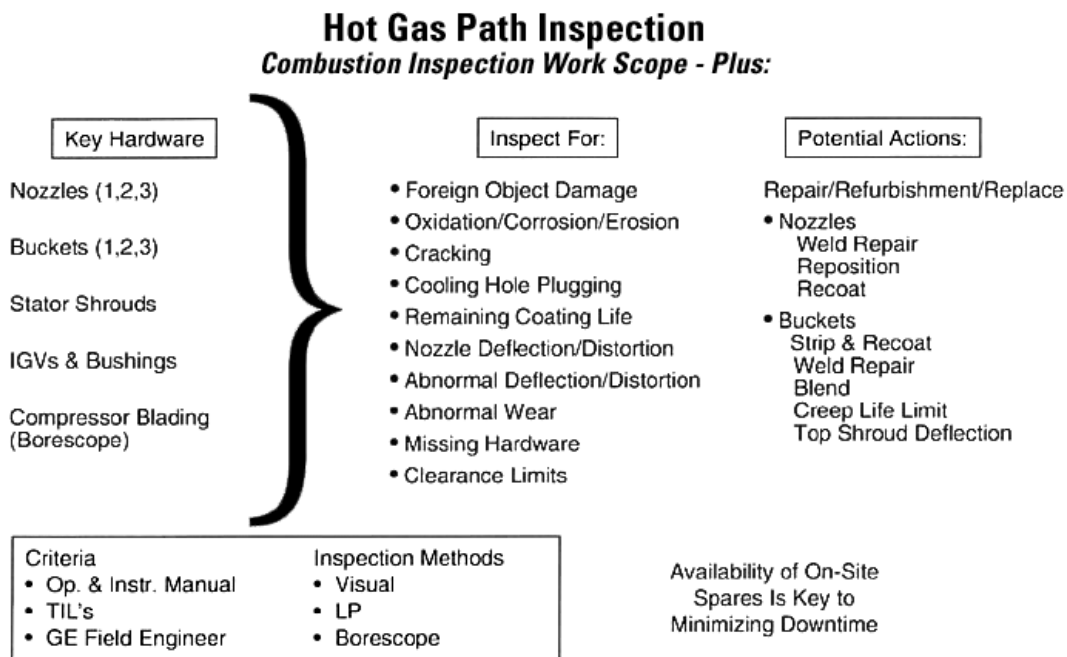


Σχήμα 2.9: Βλάβη στο κέλυφος (εσωτερικά) λόγω Θερμοκρασιακής Διαφοράς. (Boyce, 2006).

Επιπλέον, ο έλεγχος των θερμοστοιχείων, τα οποία είναι υπεύθυνα για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στα διάκενα μεταξύ κελύφους και κινητών

πτερυγίων, είναι πολύ σημαντικός, αφού οι ενδείξεις αυτών είναι πολύ καθοριστικές για την επιθεώρηση της μηχανής όταν αυτή είναι σε λειτουργία.

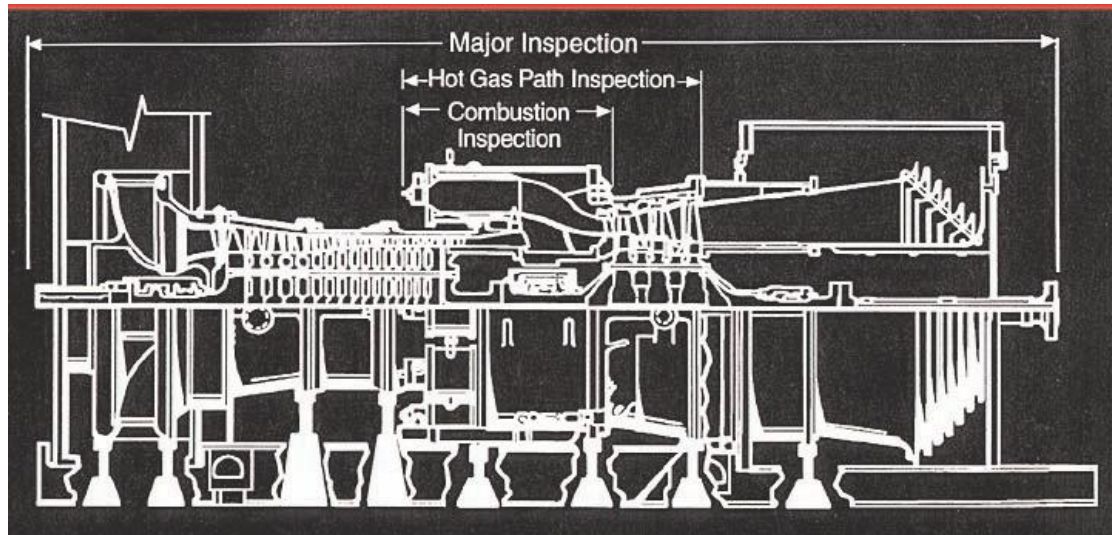
Πιο αναλυτικά, όλα τα βήματα για τον επιθεώρηση της διαδρομής των θερμών αερίων (Hot-Gas Path Inspection), φαίνονται στο Σχήμα 2.10, που ακολουθεί:



**Σχήμα 2.10: Τμήματα ελέγχου κατά την επιθεώρηση της διαδρομής θερμών αερίων.  
(Robert Hoeft, GER-3620J).**

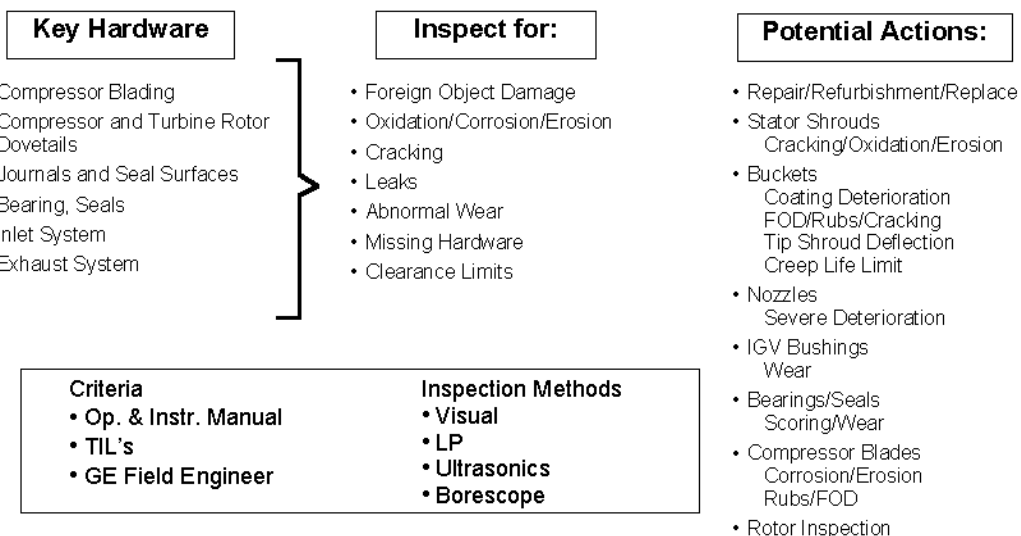
- **Μείζων Επιθεώρηση (Major Inspection):** Κατά την Μείζονα Επιθεώρηση γίνεται έλεγχος της κατάστασης όλων των ακίνητων και κινητών τμημάτων του κινητήρα, από την είσοδο μέχρι την έξοδο του. Ο καθορισμός της χρονικής στιγμής που θα πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη επιθεώρηση γίνεται με βάση τις οδηγίες του κατασκευαστή, τις επιλογές του ίδιου του χρήστη, καθώς και από τα αποτελέσματα των άλλων επιθεωρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πρόσφατο παρελθόν, όπως αυτή του Θαλάμου Καύσης, της διαδρομής θερμών αερίων, αλλά και της βοροσκοπικής επιθεώρησης, η οποία αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο του κεφαλαίου αυτού. Η έκταση της Μείζονος Επιθεώρησης φαίνεται στο Σχήμα 2.11 που ακολουθεί.





Σχήμα 2.11: Έκταση Μείζονος Επιθεώρησης. (Robert Hoefl, GER-3620J).

Στη Μείζονα Επιθεώρηση, πέρα από όλα τα βήματα της επιθεώρησης του θερμού τμήματος του αεριοστροβίλου περιλαμβάνονται και άλλα, εκ των οποίων τα κυριότερα είναι: έλεγχος όλων των ακτινικών και αξονικών διακένων και σύγκριση τους με τις αρχικές τιμές, διεξοδικός έλεγχος για ρωγμές και διαβρώσεις στα κελύφη κάθε συνιστώσας, όπως και στα περύγια του συμπιεστή και του στροβίλου, έλεγχος για επικαθήσεις σε όλα τα περύγια, έλεγχος όλων των εδράνων στήριξης, και έλεγχος της ευθυγράμμισης αεριοστροβίλου-γεννήτριας και αεριοστροβίλου-κιβώτιου ταχυτήτων. Αναλυτικά, τα τμήματα της Μείζονος Επιθεώρησης φαίνονται στο Σχήμα 2.12 που ακολουθεί:



Σχήμα 2.12: Τμήματα ελέγχου κατά τη Μείζονα Επιθεώρηση. (Robert Hoefl, GER-3620J).

Κλείνοντας την περιγραφή των συντηρήσεων της μηχανής, όταν αυτή είναι εκτός λειτουργίας και απαιτείται η αποσυναρμολόγηση της ή κάποιου τμήματος αυτής (Disassembly Inspections), πρέπει να τονισθεί η σημασία της διαθεσιμότητας των ανταλλακτικών, ανεξάρτητα της υποκατηγορίας της συντήρησης που πραγματοποιείται. Για παράδειγμα, μία προγραμματισμένη διακοπή του κινητήρα για επιθεώρηση του Θαλάμου Καύσης (Combustion Inspection) , κανονικά, διαρκεί από δύο έως πέντε μέρες, ενώ η έλλειψη ανταλλακτικών μπορεί να την αυξήσει σε κάποιες εβδομάδες (Robert Hoeft, GER-3620J).

# 3

## Επεξεργασία μετρήσεων Μονάδας Παραγωγής III του ΑΗΣ Λαυρίου

### 3.1 Αναλυτική περιγραφή αεριοστροβίλων μονάδας παραγωγής III του ΑΗΣ Λαυρίου της ΔΕΗ

Η Μονάδα Παραγωγής III του ΑΗΣ Λαυρίου είναι Μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου συνολικής ονομαστικής ισχύος 180.000 kW. Αποτελείται από :

- Δύο Αεριοστροβίλους με τις Γεννήτριες τους.
- Δύο Λέβητες Ανάκτησης Θερμότητας (ΛΑΘ).
- Έναν Ατμοστρόβιλο με τη Γεννήτρια του.

Τα καυσαέρια, από την έξοδο κάθε Αεριοστροβίλου, οδηγούνται στον αντίστοιχο Λέβητα. Οι Λέβητες είναι ρυθμισμένοι σε σταθερή πίεση (64,10 bar abs). Οι μεταβολές του φορτίου του Αεριοστροβίλου επηρεάζουν άμεσα τη ροή και τη θερμοκρασία καυσαερίων εξόδου του Αεριοστροβίλου. Στην συνέχεια, ο παραγόμενος ατμός από τους Λέβητες οδηγείται στον Ατμοστρόβιλο. Ο έλεγχος της Μονάδας πραγματοποιείται από τον Κεντρικό Θάλαμο Ελέγχου (σύστημα DCS).

Οι δύο αεριοστρόβιλοι της Μονάδας Παραγωγής III του Ατμοηλεκτρικού Σταθμού (ΑΗΣ ) Λαυρίου είναι κατασκευής του οίκου GEC UK Ltd. τύπου EM 610 B. Κατά την κανονική λειτουργία αυτών, το κύριο καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι Φυσικό Αέριο (ΦΑ) και σαν εναλλακτικό καύσιμο ελαφρύ πετρέλαιο (Diesel). (ΔΕΗ, 2003)

Οι αεριοστρόβιλοι είναι απλής ατράκτου, και πιο συγκεκριμένα ο καθένας αποτελείται από ένα διβάθμιο στρόβιλο, έναν καυστήρα ο οποίος συγκροτείται από δέκα (10) θαλάμους καύσης και ένα συμπιεστή δεκατριών (13) βαθμίδων. Ο άξονας του συμπιεστή και του στροβίλου κάθε αεριοστροβίλου είναι κοινός, ενώ τα έδρανα εδράσεως σε κάθε άξονα είναι δύο.

Η γεννήτρια εναλλασσομένου ρεύματος βρίσκεται προς την πλευρά του συμπιεστή. Για την εκκίνηση του αεριοστροβίλου είναι εγκατεστημένος μηχανισμός εκκίνησης (εκκινητής) με ηλεκτροκινητήρα.

Στον 13-βάθμιο αξονικό συμπιεστή επιτυγχάνεται λόγος πίεσης 1:8,13. Η παροχή του αέρα είναι ίση με 290 kg/sec, ενώ η πίεση εξόδου από το συμπιεστή είναι ίση με 8,5 bar και η αντίστοιχη θερμοκρασία αέρα ίση με 285 °C.

Η καύση του φυσικού αερίου γίνεται στους καυστήρες που είναι τοποθετημένοι σε δέκα (10) θαλάμους καύσεως. Η τροφοδοσία γίνεται από τον κεντρικό αγωγό της Δημόσιας Επιχείρησης Αερίου (ΔΕΠΑ) μέσω του "Κλάδου Λαυρίου". Η πίεση στο εθνικό δίκτυο μεταφοράς είναι 50 bar, αλλά στον Κλάδο Λαυρίου έχει γίνει υποβιβασμός της στα 38 bar. Για την κατανάλωση του Φυσικού Αερίου, η πίεση υποβιβάζεται εκ νέου, στο "Σταθμό Υποβιβασμού Πίεσης" (Gas Receiving Station - GRS) της Μονάδας III, στα 21 bar με τελική πίεση προ καυστήρων τα 19,1 bar.

Για την μέτρηση και τον έλεγχο των ποσοτήτων φυσικού αερίου που καταναλώνεται στο Ενεργειακό Κέντρο Ηλεκτροπαραγωγής Λαυρίου υπάρχει μετρητικός Σταθμός ιδιοκτησίας της ΔΕΠΑ. Για τη μέτρηση μεγάλων ποσοτήτων ΦΑ, ο μετρητικός σταθμός διαθέτει μετρητές τύπου "orifice", ενώ μετρητές τύπου "ultrasonic" είναι υπεύθυνοι για τη μέτρηση μικρών ποσοτήτων. Επίσης, η εγκατάσταση δύο χρωματογράφων (ο ένας είναι εφεδρικός) συντελεί στον συνεχή προσδιορισμό της θερμογόνου ικανότητας του, μέσω της στοιχειομετρικής του ανάλυσης. Η χημική σύσταση του φυσικού αερίου (προέλευσης Ρωσίας) που καταναλώνεται είναι: μεθάνιο  $\cong$  96,5%, αιθάνιο  $\cong$  3%, και το υπόλοιπο  $\cong$  1% αποτελείται από προπάνιο, βουτάνιο, πεντάνιο και άλλους υδρογονάνθρακες (θερμογόνος ικανότητα: ανωτέρα 42.000  $\cong$  kJ/Nm<sup>3</sup>, κατωτέρα 39.900 kJ/Nm<sup>3</sup>).

Τυπική ωριαία κατανάλωση φυσικού αερίου, για πλήρες φορτίο, είναι περίπου 42.000 Nm<sup>3</sup> (21.000 Nm<sup>3</sup> κάθε αεριοστρόβιλος).

Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων του αεριοστροβίλου σε φορτίο βάσης είναι 514 °C.

Η επιτήρηση του φορτίου του αεριοστροβίλου επιτυγχάνεται μέσω συστήματος θερμοκρασιακής ρύθμισης με εγκατεστημένα θερμοστοιχεία στην έξοδο των καυσαερίων, με στόχο την αποφυγή μη επιτρεπόμενων θερμοκρασιών στο στρόβιλο που μπορεί να αποδειχθεί καταστροφική.

Για ακριβή και σταθερό έλεγχο στροφών-φορτίου το σύστημα περιλαμβάνει έναν ηλεκτρονικό ρυθμιστή.

Τέλος, ειδικό εγκατεστημένο σύστημα πλύσεως είναι υπεύθυνο για τον καθαρισμό του συμπιεστή του Αεριοστροβίλου είτε όταν αυτός δε λειτουργεί (Of-Line), είτε είναι σε λειτουργία (On-Line). (ΔΕΗ, 2003)

### 3.1.1 Περιγραφή διαγνωστικού συστήματος



**Σχήμα 3.1: Εγκατεστημένο διαγνωστικό σύστημα στη Μονάδα ΙΙΙ του Λαυρίου από το ΕΘΣ/ΕΜΠ. (ΕΘΣ/ΕΜΠ, 2005)**

Στη συγκεκριμένη παράγραφο, γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση του διαγνωστικού συστήματος που αναπτύχθηκε από το Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΘΣ/ΕΜΠ) και εγκαταστάθηκε τους δύο αεριοστροβίλους της μονάδας ΙΙΙ του ΑΗΣ Λαυρίου.

Σκοπός του διαγνωστικού συστήματος είναι η παρουσία μιας εικόνας της κατάστασης του αεριοστροβίλου, η οποία βασίζεται στην ανάλυση των δεδομένων και των μετρήσεων, των οποίων η πρόσκτηση γίνεται από το ίδιο το σύστημα.

Οι βασικές λειτουργίες του συστήματος είναι οι εξής:

- Μέτρηση φυσικών ποσοτήτων οι οποίες χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του αεριοστροβίλου, όπως αεροθερμοδυναμικά μεγέθη και κραδασμούς.
- Επεξεργασία μετρήσεων και εξαγωγή διαγνωστικής πληροφορίας με την εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων διαγνωστικής, κάποιες εκ των οποίων έχουν αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών.
- Εκτίμηση πληροφορίας και ενημέρωση χρήστη για την κατάσταση της μηχανής, αλλά και για τη θέση της και το είδος της πιθανής βλάβης.

Πιο αναλυτικά, το σύστημα πρόσκτησης δεδομένων (Data Acquisition), πραγματοποιεί απευθείας μετρήσεις θερμοδυναμικών μεγεθών και μετρήσεις που αφορούν τη μηχανική συμπεριφορά του κινητήρα (κραδασμοί). Τη μέτρηση των παραπάνω μεγεθών ακολουθεί η επεξεργασία τους ώστε να διαπιστωθεί η αξιοπιστία τους και ταυτόχρονα να εντοπιστεί πιθανή βλάβη μετρητικού οργάνου. Στη συνέχεια, οι προσκεκτημένες μετρήσεις αποθηκεύονται ανά προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα σε τρεις βάσεις δεδομένων, τύπου Microsoft Access, ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία της από ευρέως διαδεδομένα εμπορικά πακέτα. Οι τρεις βάσεις διαφέρουν ως προς το χρονικό διάστημα μεταξύ των δεδομένων. Η βάση δεδομένων που μελετάται στην παρούσα εργασία έχει μετρήσεις ανά 5 λεπτά, για όλο το χρονικό διάστημα που είναι εγκατεστημένο το διαγνωστικό σύστημα, δηλαδή από το 2004, μέχρι και σήμερα.

Η θερμοδυναμική ανάλυση (Thermodynamic Analysis) περιλαμβάνει την επεξεργασία των προσκεκτημένων μετρήσεων, που αφορούν θερμοδυναμικά μεγέθη, με τη μέθοδο της προσαρμοσμένης μοντελοποίησης. Με αυτόν τρόπο, πραγματοποιείται προσδιορισμός του πλήρη κύκλου της μηχανής, αλλά και παραμέτρων ενδεικτικών για τη λειτουργία της μηχανής. Ο καθορισμός της κατάστασης του κινητήρα προκύπτει από τη σύγκριση των τιμών των λειτουργικών παραμέτρων με αντίστοιχες προκαθορισμένες τιμές αναφοράς που αντιστοιχούν σε υγιή μηχανή.

Βασική λειτουργία του διαγνωστικού συστήματος αποτελεί και η παρακολούθηση της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων (EGT Monitoring). Η συγκεκριμένη θερμοκρασία συνιστά ένδειξη της κατάστασης του θαλάμου καύσης. Το διαγνωστικό σύστημα εκτελεί απευθείας ανάλυση (On-Line) του θερμοκρασιακού προφίλ που καταγράφεται από τα 10 θερμοστοιχεία, που είναι τοποθετημένα στην έξοδο του στροβίλου. Η ένδειξη κάθε θερμοστοιχείου αντιστοιχεί σε κάθε έναν από τους 10 καυστήρες του σωληνωειδούς θαλάμου καύσης. Ο εντοπισμός κάποιας βλάβης στο θάλαμο καύσης ή κάποιου θερμοστοιχείου γίνεται με την εφαρμογή τριών μεθόδων. Η πρώτη είναι η παρακολούθηση του EGT Spread, δηλαδή της διαφοράς της μέγιστης από την ελάχιστη τιμή της μετρούμενης θερμοκρασίας, ενώ η δεύτερη είναι η παρατήρηση της μέγιστης απόκλισης από τη μέση τιμή (Maximum deviation from average). Τέλος, η τρίτη μέθοδος είναι ο υπολογισμός των ανηγμένων θερμοκρασιακών διαφορών (RTD: Reduced Temperature Deviations) μεταξύ του τρέχοντος θερμοκρασιακού προφίλ και του προφίλ αναφοράς, δηλαδή του προφίλ που αντιστοιχεί στην υγιή κατάσταση της μηχανής. Ο χρήστης ενημερώνεται άμεσα από το σύστημα για την υγιή ή μη κατάσταση της μηχανής.

Επίσης, λειτουργία του συστήματος αποτελεί η ανάλυση κραδασμών (vibration analysis) και η προσομοίωση λειτουργίας (Engine Simulation). Κάποια από τα κύρια χαρακτηριστικά της ανάλυσης κραδασμών είναι ο έλεγχος ορίων συναγεργμού των συνολικών επιπέδων κραδασμού, η ανάλυση φάσματος των

χρονικών σημάτων κραδασμού με σκοπό τον εντοπισμό της πηγής των κραδασμών και η ανάλυση πρόγνωσης, δηλαδή η πρόβλεψη του χρόνου όπου το συνολικό κραδασμών θα ξεπεράσει το επίπεδο συναγερμού.

Με την προσομοίωση λειτουργίας δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη για προσομοίωση του κινητήρα σε επιλεγμένες συνθήκες. Ειδικότερα, ο χρήστης μπορεί να εξετάσει την επίδραση των λειτουργικών συνθηκών, της κατάστασης των συνιστωσών του κινητήρα αλλά και των μηχανικών παραμέτρων, όπως ο τύπος του καυσίμου, στη λειτουργία της μηχανής. (ΕΘΣ/ΕΜΠ, 2005)

### **3.2 Ανάλυση και επεξεργασία μετρήσεων αεριοστροβίλων Λαυρίου III, και σχολιασμός αυτών**

Στην παράγραφο αυτή, γίνεται παρουσίαση της επεξεργασίας των μετρήσεων, όπως αυτές δόθηκαν από τη ΔΕΗ, για την περίοδο 2004 – 2011. Δηλαδή, από τη στιγμή που εγκαταστάθηκε το Διαγνωστικό Σύστημα στους αεριοστροβίλους από το ΕΘΣ, μέχρι και το 2011.

#### **3.2.1 Καταγραφή μετρήσεων και συμβάντων.**

Στη βάση δεδομένων, γίνεται καταγραφή ενός συνόλου μετρήσεων από το Διαγνωστικό Σύστημα, χωριστά για κάθε έναν από τους δύο αεριοστροβίλους, ανά διάστημα πέντε λεπτών, εκτός από τα έτη 2007 και 2008, όπου το διάστημα μεταξύ των μετρήσεων είναι δέκα λεπτά. Οι μετρήσεις αυτές, είναι είτε μετρήσεις συνολικών επιδόσεων, είτε αεροθερμοδυναμικές, είτε αφορούν τη μηχανική συμπεριφορά του κινητήρα. Οι μετρήσεις συνολικών επιδόσεων, όπως είναι η ταχύτητα περιστροφής και η ισχύς εξόδου, δίνουν άμεσα μία εικόνα για την γενική κατάσταση λειτουργίας της μηχανής. Οι αεροθερμοδυναμικές μετρήσεις, όπως είναι η πίεση και η θερμοκρασία, περιγράφουν την κατάσταση του ρευστού σε διάφορες θέσεις της μηχανής. Τέλος, πραγματοποιούνται και αποθηκεύονται μετρήσεις, όπως η θερμοκρασία των εδράνων και οι κραδασμοί του κελύφους, που αφορούν τη μηχανική συμπεριφορά του κινητήρα. (Κ.Μαθιουδάκης, Διαγνωστική Αεριοστροβίλων, 2007).

Στις παραγράφους που ακολουθούν, γίνεται ανάλυση και επεξεργασία των αεροθερμοδυναμικών μετρήσεων. Οι συνολικές μετρήσεις, μαζί με τις επεξηγήσεις, φαίνονται στο Σχήμα 3.2 που ακολουθεί:

Μέγεθος	Περιγραφή
Pamb (mbar)	Πίεση περιβάλλοντος
Tamb (°C)	Θερμοκρασία περιβάλλοντος
RH (%)	Υγρασία περιβάλλοντος
DPFilter (mbar)	Διαφορά πίεσης φίλτρων
Pt-Ps1 (mbar)	Διαφορά πίεσης μετά τα φίλτρα και πριν τα IGVs
Ps1-Ps2 (mbar)	Διαφορά πίεσης και μετά τα IGVs
Tinlet (°C)	Θερμοκρασία εισόδου
GTSpeed (Rpm)	Στροφές
GTLoad (MW)	Ισχύς γεννήτριας
CDPAv (barg)	Πίεση εξόδου συμπιεστή
CDTAv (°C)	Μέση θερμοκρασία εξόδου συμπιεστή
TurbExhPres (mbar)	Πίεση εξόδου στροβίλου
EGTAv (°C)	Μέση θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων
CompVib (mils)	Κραδασμοί συμπιεστή
TurbVib (mils)	Κραδασμοί στροβίλου
Gen(Tur)Vib (mils)	Κραδασμοί γεννήτριας πλευράς στροβίλου
Gen(Exc)Vib (mils)	Κραδασμοί γεννήτριας πλευράς διεγέρτη
ExcVib (mils)	Κραδασμοί διεγέρτη
ThrustWear (mils)	Φθορά ωστικού εδράνου
CompBearTemp (°C)	Θερμοκρασία εδράνου συμπιεστή
TurbBearTemp (°C)	Θερμοκρασία εδράνου στροβίλου
Gen(Tur)BearTemp (°C)	Θερμοκρασία εδράνου γεννήτριας πλευράς στροβίλου
Gen(Exc)BearTemp (°C)	Θερμοκρασία εδράνου γεννήτριας πλευράς διεγέρτη
ExcBearTemp (°C)	Θερμοκρασία εδράνου διεγέρτη
ThrustBearTemp (°C)	Θερμοκρασία ωστικού εδράνου
1stNozRingTemp (°C)	Θερμοκρασία δακτυλίου ακροφυσίων πρώτης βαθμίδας
1stCoolTempUp (°C)	Θερμοκρασία αέρα ψύξης πρώτης βαθμίδας ανάντι
1stCoolTempDw (°C)	Θερμοκρασία αέρα ψύξης πρώτης βαθμίδας κατόντι
2ndCoolTempUp (°C)	Θερμοκρασία αέρα ψύξης δεύτερης βαθμίδας ανάντι



2ndCoolTempDw (°C)	Θερμοκρασία αέρα ψύξης δεύτερης βαθμίδας κατάντι
TurbCoolTemp (°C)	Θερμοκρασία αέρα ψύξης στροβίλου
SGSHInTemp (°C)	Θερμοκρασία εισόδου Λέβητα Ανάκτησης
SGInPres (kPa)	Πίεση εισόδου Λέβητα Ανάκτησης

**Σχήμα 3.2: Μετρούμενα μεγέθη και περιγραφή τους.**

Για την επεξεργασία των μετρήσεων και τη μελέτη της τάσης και του τρόπου μεταβολής αυτών, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια, είναι απαραίτητη η γνώση των ημερομηνιών που πραγματοποιήθηκαν οι επεμβάσεις στους δύο αεριοστροβίλους. Σαν επέμβαση θεωρείται οποιαδήποτε ενέργεια έγινε στους κινητήρες, όπως κάποια μορφή συντήρησης. Πιο συγκεκριμένα, όμως, η προσοχή εστιάζεται στις αλλαγές των φίλτρων του αέρα εισόδου και στα Off-Line πλύσιμα των συμπιεστών των δύο αεριοστροβίλων, οι οποίες έχουν άμεσο αντίκτυπο στις μεταβολές θερμοδυναμικών μεγεθών και μεγεθών επίδοσης όπως τα DPFilter, CDP, EGT, CDT, GTLoad. Η μελέτη και επεξεργασία της μεταβολής των μεγεθών αυτών είναι αντικείμενο της επόμενης παραγράφου.

Στα σχήματα 3.3 και 3.4 που ακολουθούν, αναγράφονται οι ακριβείς ημερομηνίες κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκαν επεμβάσεις στους δύο κινητήρες αντίστοιχα, καθώς και το είδος αυτών, δηλαδή αν είναι αλλαγή φίλτρων, Off-Line πλύσιμο των συμπιεστών ή και τα δύο μαζί.

Αεριοστροβίλος 1	
Ημερομηνία	Ενέργεια
4/05/2004	Αλλαγή Φίλτρων
4/10/2004	»
2/09/2005	»
1/02/2006	Αλλαγή Φίλτρων + Off-Line Πλύσιμο
16/09/2006	» »
1/06/2007	» »
24/09/2007	» »
1/09/2008	» »
8/08/2009	» »
8/09/2009	Αλλαγή Φίλτρων
16/05/2010	Off-Line Πλύσιμο
6/11/2010	Αλλαγή Φίλτρων

**Σχήμα 3.3: Ενέργειες στον αεριοστροβίλο 1.**

Αεριοστρόβιλος 2	
Ημερομηνία	Ενέργεια
24/12/2004	Αλλαγή Φίλτρων
15/07/2005	Off-Line Πλύσιμο
2/09/2005	Αλλαγή Φίλτρων
10/02/2006	» »
1/03/2006	Off-Line Πλύσιμο
10/09/2006	Αλλαγή Φίλτρων
1/06/2007	Αλλαγή Φίλτρων + Off-Line Πλύσιμο
24/09/2007	Off-Line Πλύσιμο
28/03/2008	Αλλαγή Φίλτρων
8/09/2009	Αλλαγή Φίλτρων + Off-Line Πλύσιμο
16/05/2010	Off-Line Πλύσιμο
6/11/2010	Αλλαγή Φίλτρων

**Σχήμα 3.4: Ενέργειες στον αεριοστρόβιλο 2.**

Ενδεικτικά, στην εικόνα 3.5 φαίνεται στιγμιότυπο κατά τον ψεκασμό του συμπιεστή του GT32, στο Off-Line πλύσιμο στις 15/7/2005, ενώ στην εικόνα Σχήμα 3.6.3.6 φαίνονται οι πρώτες βαθμίδες του συμπιεστή μετά το πλύσιμο.



**Σχήμα 3.5: Στιγμιότυπο ψεκασμού κατά τη διάρκεια Off-Line πλυσίματος συμπιεστή του GT32 στις 15/7/2005**



Σχήμα 3.6: Πρώτες βαθμίδες του συμπιεστή του GT32, μετά το Off-Line πλύσιμο στις 15/7/2005.

### 3.2.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση στη διόρθωση μετρήσεων αεριοστροβίλων.

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μία αναφορά από τη βιβλιογραφία, στους δυνατούς τρόπους διόρθωσης των αεροθερμοδυναμικών μετρήσεων, αλλά και των μετρήσεων συνολικών επιδόσεων των αεριοστροβίλων.

Για μια οποιαδήποτε κατάσταση λειτουργίας της μηχανής, οι επιδόσεις της διαφέρουν από αυτές στην ονομαστική λειτουργία. Αυτό οφείλεται είτε στη διαφορά από τις ονομαστικές συνθήκες, είτε στη μη υγιή λειτουργία της μηχανής. Για να εξαλειφθεί ο παράγοντας των διαφορετικών συνθηκών, πραγματοποιείται διόρθωση. Με τον όρο διόρθωση, εννοείται η αναγωγή των επιδόσεων της παρούσας κατάστασης σε αυτήν υπό συνθήκες αναφοράς. Έτσι, θεωρητικά, οι μεταβολές των διορθωμένων επιδόσεων με αυτές υπό συνθήκες αναφοράς οφείλονται μόνο στη χειροτέρευση των επιδόσεων των συνιστωσών(βλάβη). Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τους συμπιεστές των δύο υπό μελέτη αεριοστροβίλων το πρόβλημα εστιάζεται στο γεγονός ότι αυτοί αναρροφούν ατμοσφαιρικό αέρα με

θερμοκρασία, πίεση, και υγρασία των οποίων οι τιμές μπορεί να μεταβάλλονται σημαντικά. Αυτό έχει κατά συνέπεια επίδραση και στις υπόλοιπες συνιστώσες της μηχανής. Ειδικότερα, η μεταβολή της υγρασίας του αέρα οδηγεί σε σημαντική αλλαγή της σύνθεσης του εργαζόμενου μέσου. Επομένως, οι διορθώσεις που λαμβάνουν χώρα αφορούν τη θερμοκρασία, την πίεση και την υγρασία. Οι μεταβολές, των μεγεθών αυτών, οφείλονται, προφανώς, στην μεταβλητή κατάσταση του ατμοσφαιρικού αέρα σε συνάρτηση με την αλλαγή των εποχών. Έτσι τα μεγέθη που θα μελετηθούν ανάγονται στις συνθήκες αναφοράς, ή αλλιώς συνθήκες τυπικής ημέρας, οι οποίες είναι (Κ.Μαθιουδάκης, Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Ατμοστροβίλων, 2007) :

Πίεση:  $P_{amb,ref} = 101325 \text{ N/m}^2 = 1,01325 \text{ bar}$

Θερμοκρασία:  $T_{amb,ref} = 15 \text{ }^\circ\text{C} = 288,15 \text{ K}$

Σχετική Υγρασία:  $RH_{ref} = 60\%$

Με αυτόν τον τρόπο, στην ουσία παύει η εξάρτηση των μετρούμενων μεγεθών από τις συνθήκες περιβάλλοντος. Δηλαδή, η μεταβολή των υπό μελέτη μεγεθών θα εξαρτάται από την κατάσταση του αεριοστροβίλου αποκλειστικά, ενώ θα δίνουν μία πιο "καθαρή" εικόνα της χειροτέρευσης του κινητήρα ή αντίστοιχα της βελτίωσης της απόδοσης του, λόγω των συντηρήσεων.

Τα μεγέθη τα οποία επεξεργάστηκαν σε αυτήν τη διπλωματική εργασία, άρα και μελετήθηκε η διόρθωση τους είναι η πίεση CDP (Compressor Discharge Pressure) και η θερμοκρασία CDT (Compressor Discharge Temperature) στην έξοδο του συμπιεστή, η θερμοκρασία των καυσαερίων EGT στην έξοδο του στροβίλου (Exhaust Gas Temperature) και το φορτίο του αεριοστροβίλου. Επίσης, μελετήθηκε και η διαφορά πίεσης DPF στα φίλτρα εισόδου, χωρίς να γίνει διόρθωση αυτής.

Αρχικά, η πρώτη μέθοδος στην οποία θα γίνει αναφορά είναι η διόρθωση μεγεθών κατά A.J.Volponi. Με τη μέθοδο, αυτή, γίνεται διόρθωση των υπό εξέταση θερμοδυναμικών μεγεθών CDP, CDT και EGT με τη βοήθεια των αδιάστατων παραμέτρων  $\theta$  και  $\delta$ . Όπου  $\theta$ , είναι η αδιάστατη παράμετρος της θερμοκρασίας και  $\delta$  η αδιάστατη παράμετρος της πίεσης, οι οποίες ορίζονται ως εξής:

$$\theta = \frac{T_{amb,meas}}{T_{amb,ref}} \quad (3.1)$$

και

$$\delta = \frac{P_{amb,meas}}{P_{amb,ref}} \quad (3.2)$$

Στον αριθμητή των δύο λόγων βρίσκονται, οι μετρήσεις θερμοκρασίας και πίεσης περιβάλλοντος αντίστοιχα, ενώ στον παρανομαστή οι τιμές αναφοράς ή αλλιώς η θερμοκρασία και η πίεση τυπικής ημέρας.

Οι τύποι διόρθωσης των μεγεθών, που χρησιμοποιεί η μέθοδος Volponi, φαίνονται στο Σχήμα 3.7 που ακολουθεί:

Μέγεθος	Ανηγμένο Μέγεθος
Παροχή Μάζας Αέρα, $m_a$	$m_a^* = \frac{m_a \cdot \sqrt{\theta}}{\delta}$
Ισχύς $P_C$ ή $P_T$ και συνεπώς $P_{GT}$	$P_{GT}^* = \frac{P_{GT}}{\sqrt{\theta} \cdot \delta}$
Θερμοκρασία, $T$	$T^* = \frac{T}{\theta}$
Πίεση, $P$	$P^* = \frac{P}{\delta}$
Δυναμική Πίεση, $q$	$q^* = \sqrt{\frac{q}{\delta}}$

Σχήμα 3.7: Διορθώσεις μεγεθών αεροστροβίλου. (Volponi, 1999)

Στη συνέχεια, ακολουθεί μία περιληπτική περιγραφή της διόρθωσης κατά P.P.Walsh και P.Fletcher. Στη συγκεκριμένη μέθοδο, γίνεται αναγωγή όχι μόνο στη θερμοκρασία και στην πίεση τυπικής ημέρας, αλλά και στην υγρασία. Λαμβάνεται, δηλαδή υπ' όψιν και η αλλαγή στη σύσταση του εργαζόμενου μέσου. Στο Σχήμα 3.8 φαίνεται αναλυτικά η διαδικασία μετατροπής των υπό εξέταση μεγεθών σε ανηγμένα μεγέθη στις συνθήκες αναφοράς, ή αλλιώς στα διορθωμένα μεγέθη, (P.P.Walsh):

Μέγεθος	Ανηγμένο Μέγεθος
Ισχύς, $P_C$ ή $P_T$	$P^* = \frac{P}{\gamma \cdot P_{amb} \cdot \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_{amb}}} \cdot \gamma_{ref} \cdot P_{amb,ref} \cdot \sqrt{\gamma_{ref} \cdot R_{ref} \cdot T_{amb,ref}}$
Θερμοκρασία, $T$	$T^* = \left( \frac{\gamma_{ref} \cdot R_{ref}}{Cp_{ref}} \cdot \frac{Cp \cdot \left( \frac{T}{T_{amb}} - 1 \right)}{\gamma \cdot R} + 1 \right) \cdot T_{amb,ref}$

Πίεση, $P$	$P^* = \left[ \frac{\gamma_{ref} \cdot R_{ref}}{Cp_{ref}} \cdot \frac{Cp \cdot \left( \left( \frac{P}{P_{amb}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)}{\gamma \cdot R} + 1 \right]^{\frac{\gamma_{ref}}{\gamma_{ref}-1}} \cdot P_{amb,ref}$
------------	--

Σχήμα 3.8: Διορθώσεις μεγεθών αεροστροβίλου (P.P.Walsh).

Όπου,  $R$  είναι η σταθερά του αέρα,  $Cp$  η θερμοχωρητικότητα του αέρα υπό σταθερή πίεση, και  $\gamma$  ο λόγος των θερμοχωρητικοτήτων  $Cp$  προς  $Cv$ , δηλαδή:

$$\gamma = \frac{Cp}{Cv} \quad (3.3)$$

Όπως, αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο του κεφαλαίου αυτού, η συνεχής μεταβολή της θερμοκρασίας, της πίεσης και κυρίως της υγρασίας του αέρα περιβάλλοντος, έχει σαν άμεση συνέπεια την αλλαγή της σύστασης του αέρα. Έτσι, για τον υπολογισμό των διορθωμένων μεγεθών απαιτείται ο υπολογισμός των μεγεθών  $\gamma$ ,  $Cp$ , και  $R$  για κάθε χρονική στιγμή που πραγματοποιείται λήψη μετρήσεων. Ο υπολογισμός των μεγεθών αυτών, έγινε με τη βοήθεια αλγορίθμου του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών. Οι τιμές αναφοράς, δηλαδή οι τιμές που αντιστοιχούν στις συνθήκες τυπικής ημέρας, φαίνονται παρακάτω:

$$\begin{aligned} \gamma_{ref} &= 1,4 \\ R_{ref} &= 287,05 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} \\ Cp_{ref} &= 1005 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (3.4)$$

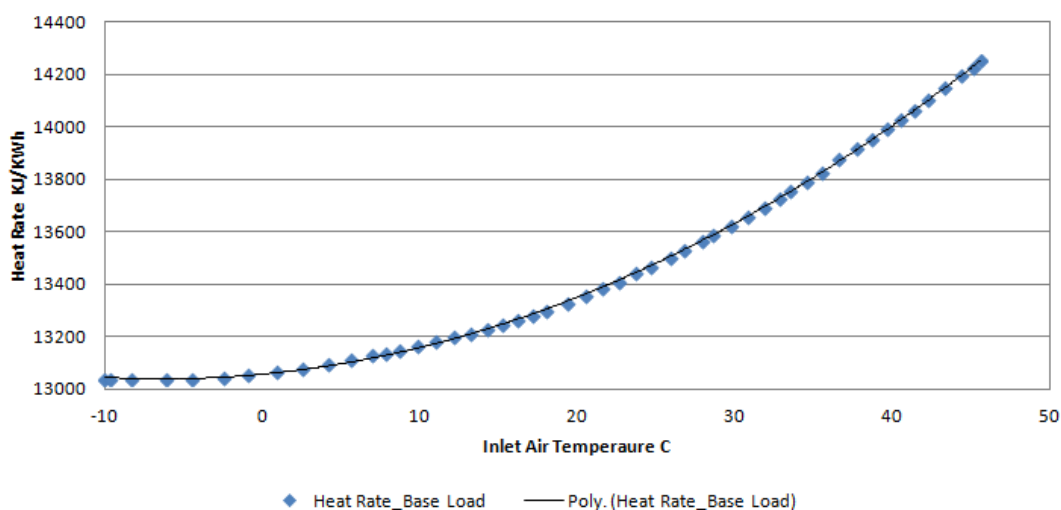
Η πίεση  $P_{amb}$  συμβολίζει την ατμοσφαιρική πίεση, ανά πάσα χρονική στιγμή που πραγματοποιείται η μέτρηση, ενώ η  $T_{amb}$  την αντίστοιχη ατμοσφαιρική θερμοκρασία. Όπως φαίνεται από το σχέση της διόρθωσης του φορτίου, ο τύπος αποτελεί, στην πραγματικότητα, προέκταση του αντίστοιχου τύπου από τη μέθοδο κατά A.J.Volponi.

Η διόρθωση κατά P.Boyce αποτελεί τον τρίτο τρόπο διόρθωσης που θα περιγραφεί. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.9 που ακολουθεί, η διόρθωση της πίεσης και της θερμοκρασίας γίνεται με τη χρήση των αδιάστατων παραμέτρων  $\theta$  και  $\delta$ , ακριβώς όπως στη διόρθωση κατά A.J.Volponi, ενώ η διόρθωση του φορτίου διαφέρει.

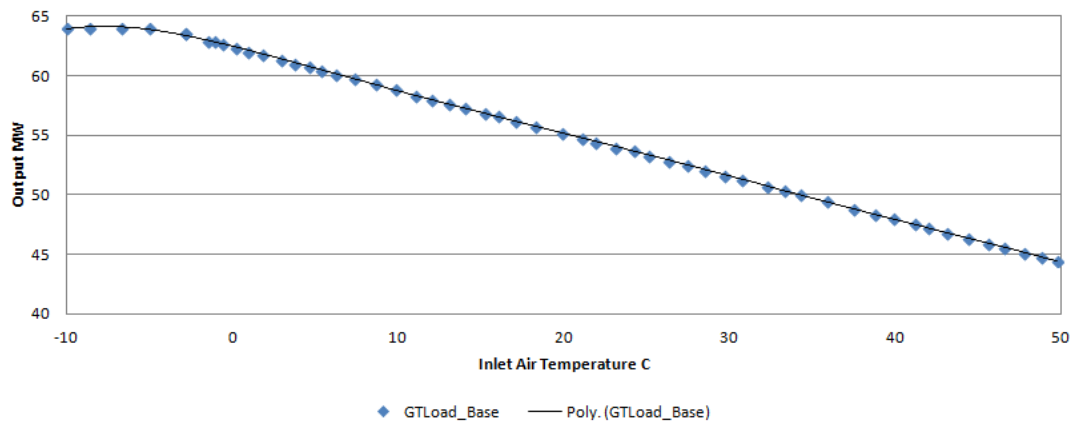
Μέγεθος	Ανηγμένο Μέγεθος
Φορτίο, $GTLoad$	$GTLoad^* = \frac{GTLoad \cdot \theta}{\delta}$
Θερμοκρασία, $T$	$T^* = \frac{T}{\theta}$
Πίεση, $P$	$P^* = \frac{P}{\delta}$

Σχήμα 3.9: Διορθώσεις μεγεθών αεριοστροβίλου. (Boyce, 2006)

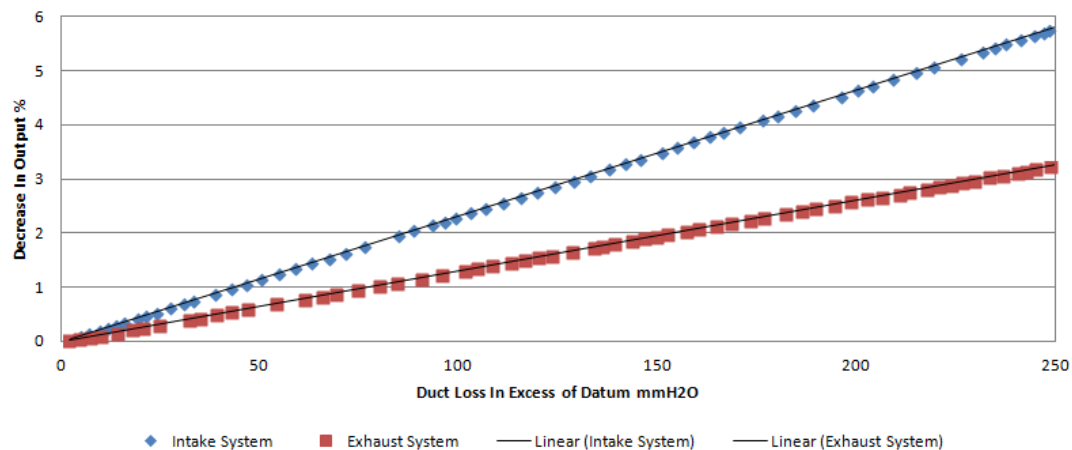
Η τελευταία μέθοδος διόρθωσης, που θα περιγραφεί είναι με τη χρήση των καμπυλών διόρθωσης. Οι καμπύλες διόρθωσης συνιστούν τον πιο σίγουρο τρόπο διόρθωσης, δεδομένου ότι έχουν δοθεί από την κατασκευάστρια εταιρία και έχουν δημιουργηθεί ύστερα από δοκιμές πάνω στον ίδιο αεριοστρόβιλο. Για το λόγο αυτό, κάθε διορθωτική καμπύλη αντιστοιχεί αποκλειστικά στο μοντέλο κινητήρα για το οποίο κατασκευάστηκε. Στη συνέχεια, στα σχήματα 3.10, 3.11, 3.12 που ακολουθούν δίνονται οι καμπύλες διόρθωσης που δόθηκαν από την εταιρία GE για τους δύο αεριοστροβίλους EM610B της μονάδας III του Λαυρίου, και δίνουν τη διόρθωση της Ροής Θερμότητας (Heat Rate), του φορτίου και της επί τοις εκατό μείωσης του φορτίου εξαιτίας της πτώσης πίεσης στους αγωγούς εισόδου και εξόδου. Οι διορθώσεις της πίεσης CDP και των θερμοκρασιών CDT και EGT, έγινε με τη χρήση των αδιάστατων παραμέτρων  $\theta$  και  $\delta$ , όπως περιγράφεται από τους A.J.Volroni και P.Boyce.



Σχήμα 3.10: Καμπύλη διόρθωσης Ροής Θερμότητας (Heat Rate) συναρτήσει θερμοκρασίας εισόδου στον αεριοστρόβιλο (GEC).



Σχήμα 3.11: Καμπύλη διόρθωσης φορτίου αεριοστροβίλου συναρτήσει θερμοκρασίας εισόδου στον αεριοστρόβιλο (GEC).



Σχήμα 3.12: Καμπύλη διόρθωσης της επί τοις εκατό μείωσης του φορτίου αεριοστροβίλου συναρτήσει της πτώσης πίεσης στους αγωγούς εισόδου και εξόδου του αεριοστροβίλου (GEC).

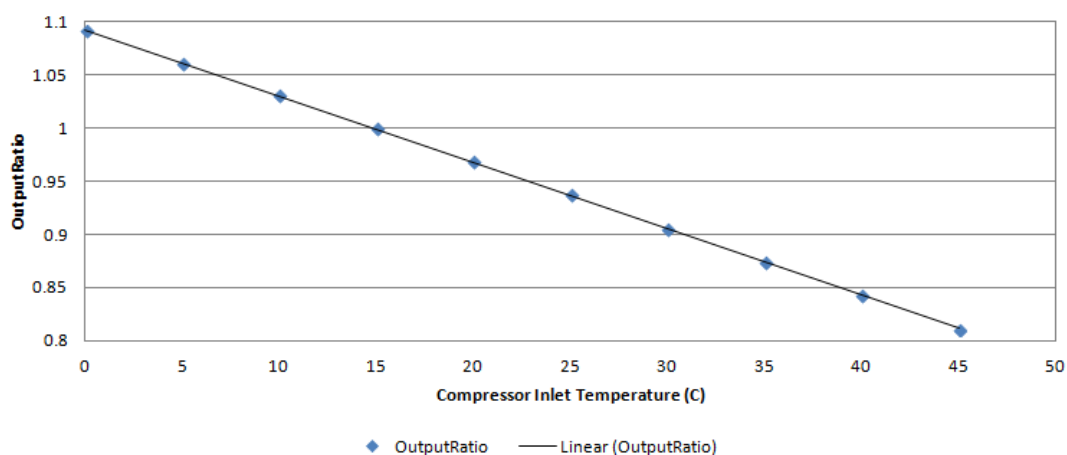
Στο Σχήμα 3.11, η καμπύλη διόρθωσης αφορά την αναγωγή μόνο του ονομαστικού φορτίου στις συνθήκες τυπικής ημέρας. Καμπύλες για τη διόρθωση όλων των φορτίων δεν έχουν δοθεί από τον κατασκευαστή. Για το λόγο αυτό, θεωρώντας ότι η καμπύλη διόρθωσης του ονομαστικού φορτίου έχει την ίδια μορφή – κλίση με τις καμπύλες των μερικών φορτίων, υπολογίστηκαν παράγοντες διόρθωσης για όλα τα φορτία. Πιο αναλυτικά, κάθε παράγοντας διόρθωσης (*OutputRatio*) ισούται με το λόγο του διορθωμένου ονομαστικού φορτίου στην αντίστοιχη θερμοκρασία προς το ονομαστικό φορτίο στη θερμοκρασία τυπικής ημέρας.

$$OutputRatio = \frac{P_{Nom,corr}}{P_{NomRef,corr}} \quad (3.5)$$



Για κάθε θερμοκρασία περιβάλλοντος, οι αντίστοιχες τιμές των διορθωμένων ονομαστικών φορτίων υπολογίστηκαν από το Σχήμα 3.11. Έτσι, προέκυψε το Σχήμα 3.13, από το οποίο προκύπτουν οι παράγοντες διόρθωσης όλων των φορτίων για κάθε θερμοκρασία. Πλέον, η διόρθωση κάθε φορτίου γίνεται με τη διαίρεση του με τον παράγοντα που προκύπτει για την αντίστοιχη θερμοκρασία.

$$P^* = \frac{P_{Tamb}}{OutputRatio_{Tamb}} \quad (3.6)$$



Σχήμα 3.13: Παράγοντες διόρθωσης φορτίου.

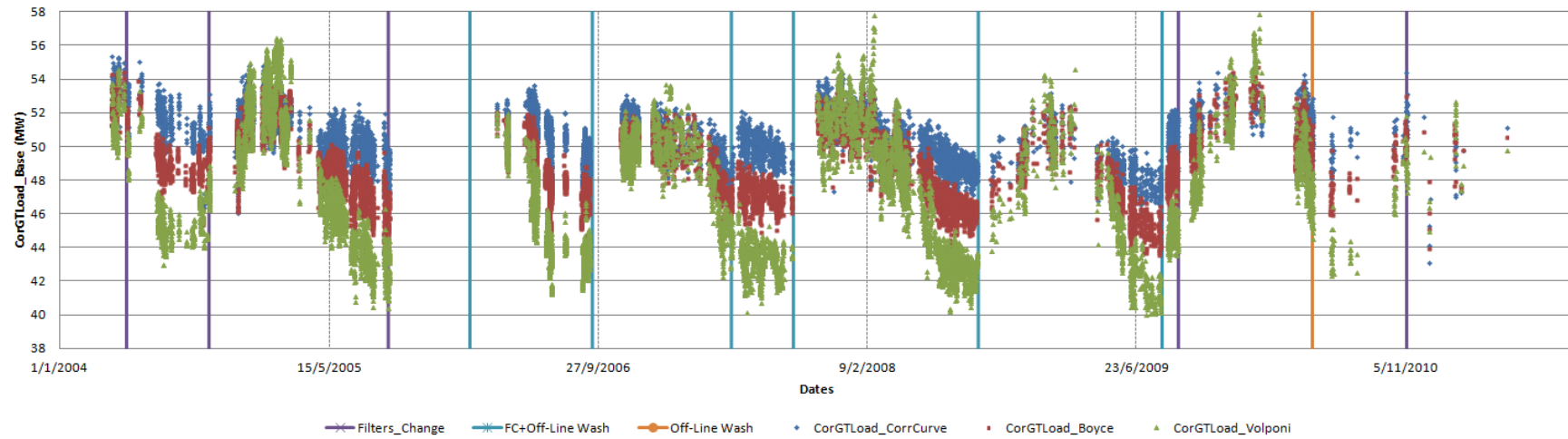
Για την επιλογή της πιο έγκυρης και αξιόπιστης μεθόδου διόρθωσης, έγινε διόρθωση του φορτίου των δύο μηχανών με όλες τις μεθόδους. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην ίδια γραφική παράσταση, για κάθε αεριοστρόβιλο χωριστά. Παραλείπεται η διόρθωση φορτίου κατά P.P.Walsh & P.Fletcher, η οποία όπως έχει ήδη αναφερθεί, γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως γίνεται και κατά A.J.Volponi.

Το διορθωμένο φορτίο που απεικονίζεται στα σχήματα 3.14 και 3.15 έχει φιλτραριστεί ώστε να φαίνεται μόνο το ονομαστικό φορτίο με σκοπό τη δημιουργία πιο απλοποιημένης και καλύτερης εικόνας της διακύμανσης του. Επίσης, για τον ίδιο λόγο έχουν αφαιρεθεί όλες οι τιμές μετρήσεων μεταβατικής κατάστασης (transit state) των δύο μηχανών. Δηλαδή, χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι τιμές σταθερής λειτουργίας αυτών (steady state) και για φορτίο βάσης, που είναι ίσο με το 100% του ονομαστικού (57MW).

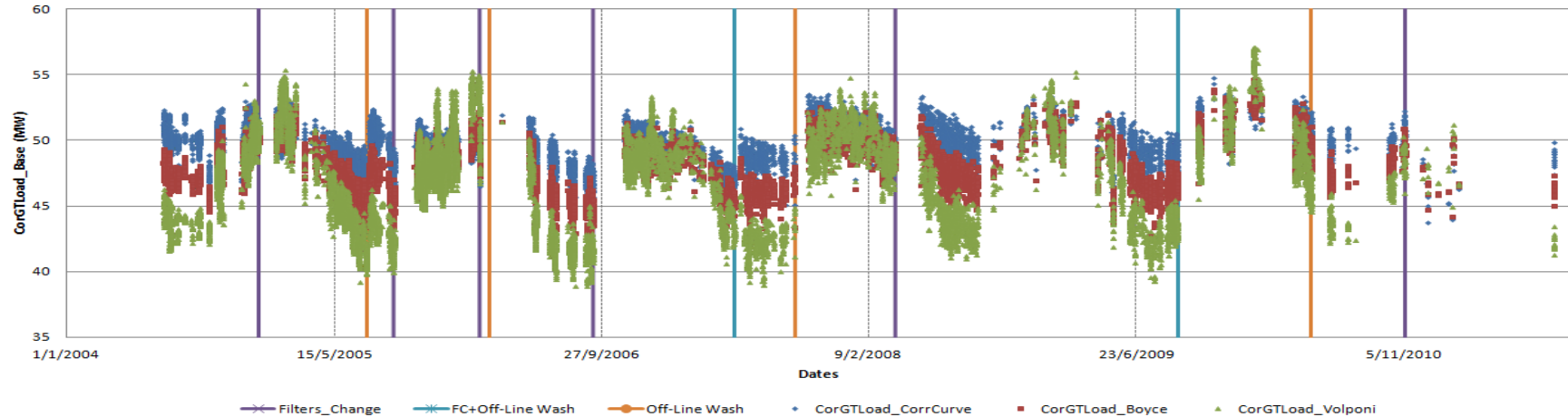
Παρατηρώντας, τα σχήματα 3.14 και 3.15 φαίνεται το μεγάλο εύρος διακύμανσης του διορθωμένου φορτίου κατά A.J.Volponi (πράσινο), άρα και η αβεβαιότητα που θα προσφέρει η χρήση αυτής της διόρθωσης. Οι κάθετες γραμμές συμβολίζουν τα χρονικά σημεία στα οποία πραγματοποιήθηκαν συντηρήσεις. Ανάλογα με το είδος της συντήρησης, η γραμμή έχει αντίστοιχο χρώμα όπως φαίνεται και από το σχετικό υπόμνημα.

Τα αποτελέσματα κατά P.Boyce (κόκκινο) δίνουν αρκετά μικρό εύρος διακύμανσης, όμως με τη διόρθωση του φορτίου με βάση τις καμπύλες διόρθωσης του κατασκευαστή (μπλε) παρατηρείται το μικρότερο εύρος, σε σύγκριση με τη διόρθωση του φορτίου κατά A.J. Volroni και κατά P.Boyce. Για το λόγο αυτόν, το φορτίο που θα χρησιμοποιηθεί και για την επεξεργασία άλλων μετρήσεων σε επόμενες παραγράφους έχει υποστεί διόρθωση, σύμφωνα με τις καμπύλες διόρθωσης του κατασκευαστή.

Επίσης, από την παρατήρηση της μεταβολής του φορτίου των δύο κινητήρων διακρίνεται η σταδιακή χειροτέρευση των επιδόσεων τους στα χρονικά διαστήματα ενδιάμεσα των συντηρήσεων, αλλά και της ανάκτησης των τιμών σε επιθυμητά επίπεδα μετά από μία συντήρηση. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, θα μελετηθεί και η συμπεριφορά άλλων αεροθερμοδυναμικών μετρούμενων μεγεθών, με σκοπό την εκτίμηση της κατάστασης του κινητήρα από την παρατήρηση των μεγεθών αυτών.

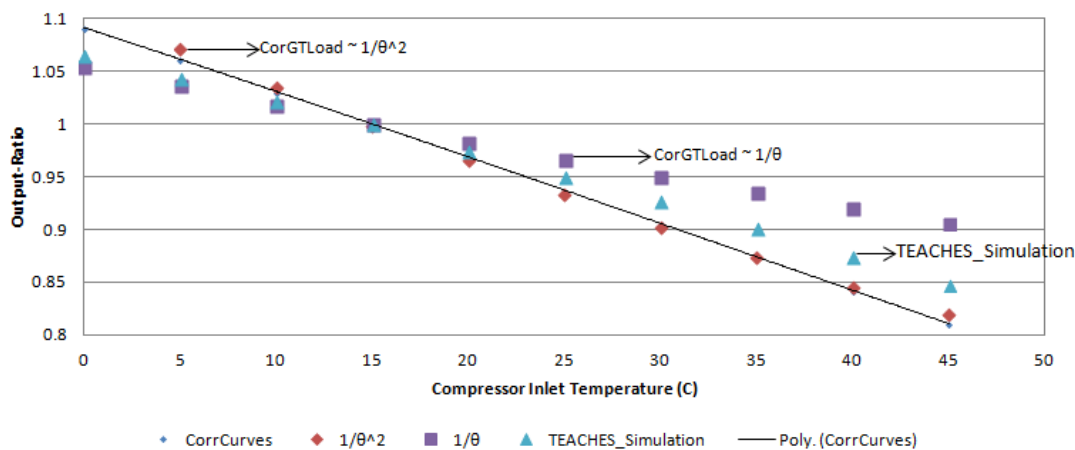


Σχήμα 3.14: Διορθωμένο φορτίο GT31, κατά A.J.Volponi (πράσινο), P.Boyce (κόκκινο) και καμπύλες διόρθωσης (μπλε).



Σχήμα 3.15: Διορθωμένο φορτίο GT32, κατά A.J.Volponi (πράσινο), P.Boyce (κόκκινο) και καμπύλες διόρθωσης (μπλε).

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 3.16 που ακολουθεί, φαίνεται η καμπύλη των παραγόντων διόρθωσης του φορτίου, όπως προέκυψε από την καμπύλη διόρθωσης που δίνεται από την κατασκευαστή εταιρία, αλλά και άλλες καμπύλες οι οποίες προέκυψαν από δοκιμές.



**Σχήμα 3.16: Σύγκριση καμπύλης διόρθωσης φορτίου από κατασκευαστή με καμπύλες που προκύπτουν από δοκιμές.**

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για την προσέγγιση της καμπύλης διόρθωσης του φορτίου, και όπως φαίνεται και από την παρατήρηση του σχήματος, αυτή πετυχαίνεται σε αρκετά ικανοποιητικό ποσοστό. Συγκεκριμένα, με δοκιμές βρέθηκε ότι η καμπύλη  $\frac{P_{Nom,corr}}{P_{NomRef,corr}} = \frac{1}{\theta^2}$ , πλησιάζει πολύ κοντά στην καμπύλη του κατασκευαστή, και σχεδόν ταυτίζεται με αυτήν. Αυτό σημαίνει, ότι αν η διόρθωση του φορτίου γίνει συναρτήσει του λόγου  $1/\theta^2$ , τότε θα έχει επιτευχθεί διόρθωση σχεδόν ταυτόσημη με αυτήν που προτείνει ο κατασκευαστής.

Επίσης, αρκετά ικανοποιητικά προσεγγίζεται η καμπύλη διόρθωσης του κατασκευαστή και από την καμπύλη που διαμορφώνεται από τις τιμές του φορτίου που προκύπτουν από την προσομοίωση λειτουργίας του κινητήρα από το λογισμικό TEACHES. Περιγραφή του λογισμικού γίνεται στην παράγραφο 3.3. Πιο αναλυτικά τα σημεία προέκυψαν από το λόγο του φορτίου που υπολογίζει το λογισμικό για την εκάστοτε θερμοκρασία εισόδου στη μηχανή, προς το φορτίο στις συνθήκες αναφοράς.

Τέλος, παρουσιάζεται και η καμπύλη  $\frac{P_{Nom,corr}}{P_{NomRef,corr}} = \frac{1}{\theta}$  η οποία, επίσης,

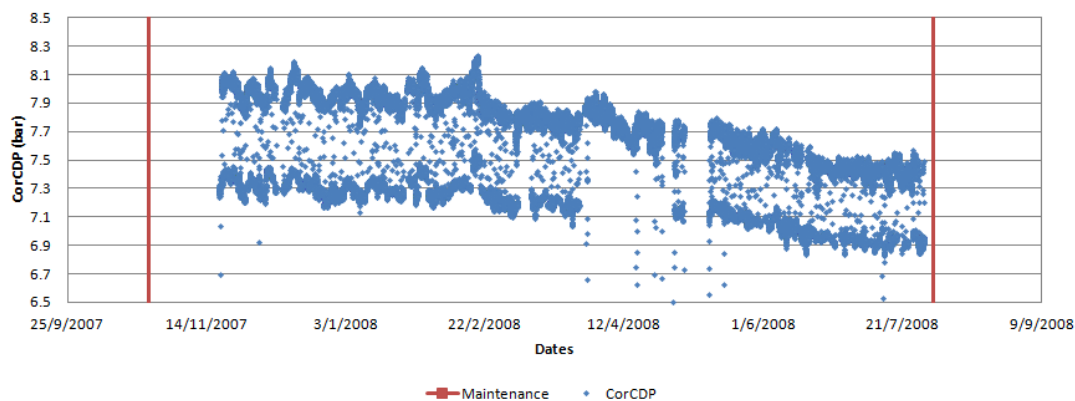
προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό την καμπύλη διόρθωσης του κατασκευαστή, αλλά η απόκλιση μεγαλώνει για υψηλές θερμοκρασίες, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.16.

### **3.2.3 Αναγωγή διορθωμένων μετρήσεων σε σταθερό φορτίο.**

Στην παράγραφο αυτή, γίνεται μία περιγραφή της μεθόδου της αναγωγής των διορθωμένων μετρήσεων σε σταθερό φορτίο.

Οι δύο αεριοστρόβιλοι της μονάδας III συνδυασμένου κύκλου της ΔΕΗ στο Λαύριο δουλεύουν με συνεχή εναλλαγή φορτίου, και συγκεκριμένα με συνεχή εναλλαγή μεταξύ ονομαστικού φορτίου (57 MW) και μερικού, το οποίο ισούται περίπου με το 50% του ονομαστικού (30 MW). Η συνεχής αυτή μεταβολή του φορτίου έχει άμεσο αντίκτυπο και στα μετρούμενα μεγέθη. Για την επεξεργασία των μετρήσεων, αλλά και τη μελέτη της συμπεριφοράς των δύο κινητήρων από την παρατήρηση των μετρήσεων, είναι αναγκαία η απομόνωση των μετρήσεων από τη συνεχή εναλλαγή του φορτίου. Για το λόγο αυτό γίνεται εφαρμογή της μεθόδου της αναγωγής των διορθωμένων μετρήσεων σε σταθερό φορτίο. Από τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την εφαρμογή της μεθόδου της αναγωγής, οποιαδήποτε μεταβολή στα μετρούμενα μεγέθη θα οφείλεται πλέον στην κατάσταση του κινητήρα. Υπενθυμίζεται ότι έχει προηγηθεί και η διαδικασία της διόρθωσης ως προς τις συνθήκες περιβάλλοντος.

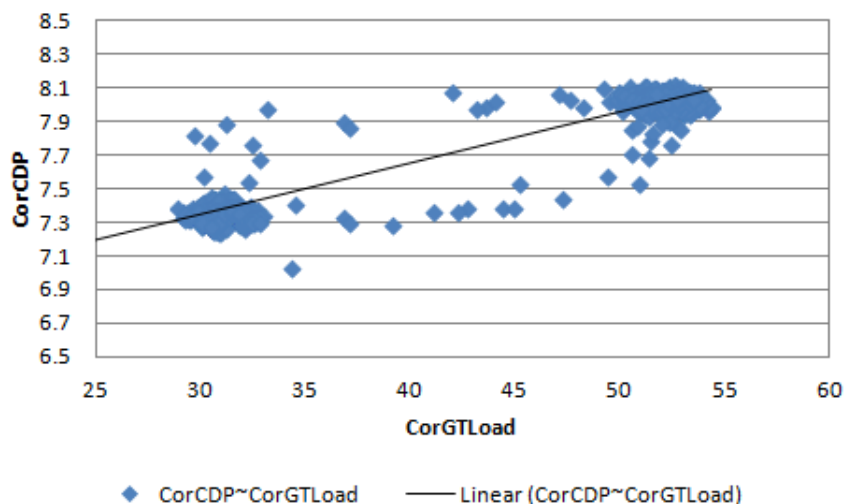
Τα δεδομένα διαχωρίστηκαν κατά τέτοιο τρόπο, ώστε από συντήρηση (Event) σε συντήρηση να αποτελούν μία ξεχωριστή ομάδα για μελέτη. Εφαρμόζοντας, τη μέθοδο της αναγωγής σε σταθερό φορτίο, σε κάθε ομάδα δεδομένων ξεχωριστά, επιτυγχάνεται καλύτερη προσέγγιση της τάσης του εκάστοτε μεγέθους. Αυτό συμβαίνει, διότι αποφεύγεται η σύγχυση, των μεγεθών που χειροτερεύουν με το χρόνο, με τα βελτιωμένα μεγέθη μετά τη συντήρηση, κατά την εφαρμογή της μεθόδου. Ενδεικτικά, στο σχήμα 3.17 απεικονίζεται μία ομάδα μετρήσεων της πίεσης εξόδου από το συμπιεστή (CDP) του GT31, μεταξύ των συντηρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στις 24/9/2007 και 1/9/2008. Χρησιμοποιήθηκαν όλες οι μετρήσεις, και σταθερής και μεταβατικής κατάστασης, η διόρθωση του φορτίου έγινε με τη χρήση των διορθωτικών καμπυλών, ενώ οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις διορθώθηκαν με τη βοήθεια των αδιάστατων παραμέτρων  $\theta$  και  $\delta$ , όπως αναφέρεται στην παράγραφο 3.2.2.



Σχήμα 3.17: Διορθωμένες μετρήσεις CDP στον GT31 μεταξύ δύο συντηρήσεων.

Στο σχήμα 3.17, οι τιμές της πίεσης CDP χωρίζονται σε δύο ομάδες κατά μήκος του άξονα X. Η "πάνω" ομάδα είναι οι τιμές της πίεσης για λειτουργία της μηχανής σε ονομαστικό φορτίο, και η "κάτω" ομάδα για μερικό φορτίο (50% του ονομαστικού). Είναι φανερή η αλληλεξάρτηση της μεταβολής του φορτίου με τη μεταβολή της πίεση. Για την απομόνωση αυτής της εξάρτησης της πίεσης από τη μεταβολή του φορτίου, εφαρμόστηκε η μέθοδος της αναγωγής σε σταθερό φορτίο με χρήση της τεχνικής της γραμμικής προσέγγισης ελαχίστων τετραγώνων. Συγκεκριμένα, η κάθε ομάδα μετρήσεων ενδιάμεσα των συντηρήσεων χωρίστηκε σε επιμέρους υποομάδες, στις οποίες εφαρμόστηκε η τεχνική της γραμμικής προσέγγισης ελαχίστων τετραγώνων μεταξύ του διορθωμένου μετρούμενου μεγέθους και του διορθωμένου φορτίου (σχήμα 3.18).

Στόχος ήταν η απεικόνιση της τάσης μεταβολής των μετρούμενων μεγεθών ανεξάρτητα από τη μεταβολή του φορτίου. Πιο αναλυτικά, η τεχνική της προσέγγισης εφαρμόστηκε σε υποομάδες των 3000 και των 1000 μετρήσεων. Οι 3000 μετρήσεις ισοδυναμούν χρονικά με 10 μέρες, περίπου, συνεχούς λειτουργίας του κινητήρα, ενώ οι 1000 μετρήσεις με 3,5 μέρες, περίπου. Το διάστημα λήψης μέτρησης, είναι σταθερό και ίσο με 5 λεπτά, εκτός από τα έτη 2007 και 2008, όπου το διάστημα διπλασιάζεται στα 10 λεπτά.



**Σχήμα 3.18:** Υποομάδα για εφαρμογή της τεχνικής της γραμμικής προσέγγισης μεταξύ της πίεσης στην έξοδο του συμπιεστή (CDP) και του φορτίου.

Εξαιτίας του μεγάλου όγκου των δεδομένων και κατά συνέπεια την ύπαρξη θορύβου και τη μεγάλη απόκλιση των τιμών, είναι χρήσιμη η εφαρμογή τεχνικής αριθμητικής προσέγγισης. Αρχικά, τα δεδομένα φιλτραρίστηκαν απαλείφοντας μη φυσικές τιμές και τιμές εκτός των ορίων των μετρητικών οργάνων. Στη συνέχεια, τα εναπομείναντα δεδομένα προσεγγίστηκαν με μια ευθεία γραμμή μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων. Επίσης, με την εφαρμογή της τεχνικής της προσέγγισης, είναι δυνατό να αντιμετωπιστεί και το πρόβλημα υπολογισμού της τιμής κάποιου υπό εξέταση μεγέθους για κάποια τιμή εισόδου διαφορετική από αυτές που υπάρχουν στη βάση δεδομένων (Κ.Χ.Γιαννάκογλου, 2003).

Εν γένει, μια τέτοια καμπύλη που προσεγγίζει καλά τα δεδομένα και ειδικά όταν αυτά δεν παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πρόγνωση και στη διάγνωση βλαβών. Στην παρούσα εργασία, δεν είναι στόχος η εύρεση της καμπύλης που προσεγγίζει βέλτιστα τα δεδομένα αλλά χρησιμοποιείται ευθεία γραμμή. Η γραμμή αυτή παρέχει την πληροφορία της τάσης με αποτέλεσμα να διακρίνεται η συσχέτιση των δεδομένων με τις συντηρήσεις και όχι της τιμής που αυτά πρέπει να έχουν.

Πιο αναλυτικά, στην παρούσα διπλωματική εργασία, έγινε προσέγγιση των υπό εξέταση μεγεθών συναρτήσεως του φορτίου, του οποίου οι τιμές είναι είτε ελαχίστου φορτίου είτε μεγίστου (βάσης), ανάλογα με τις ανάγκες ζήτησης. Όπου ελάχιστο και μέγιστο φορτίο είναι 30MW και 57 MW, αντίστοιχα, δηλαδή το ελάχιστο φορτίο είναι το μισό (περίπου) του μεγίστου. Δηλαδή, η μηχανή λειτουργεί πάντα στο 100% ή στο 50%, εκτός φυσικά των μεταβατικών καταστάσεων.

Η τεχνική που εφαρμόστηκε είναι η γραμμική προσέγγιση ελαχίστων τετραγώνων (straight-line least squares approximation) και έγινε σε περιβάλλον Matlab. Όπως αναφέρθηκε ήδη, η καμπύλη που χρησιμοποιήθηκε είναι ευθεία.

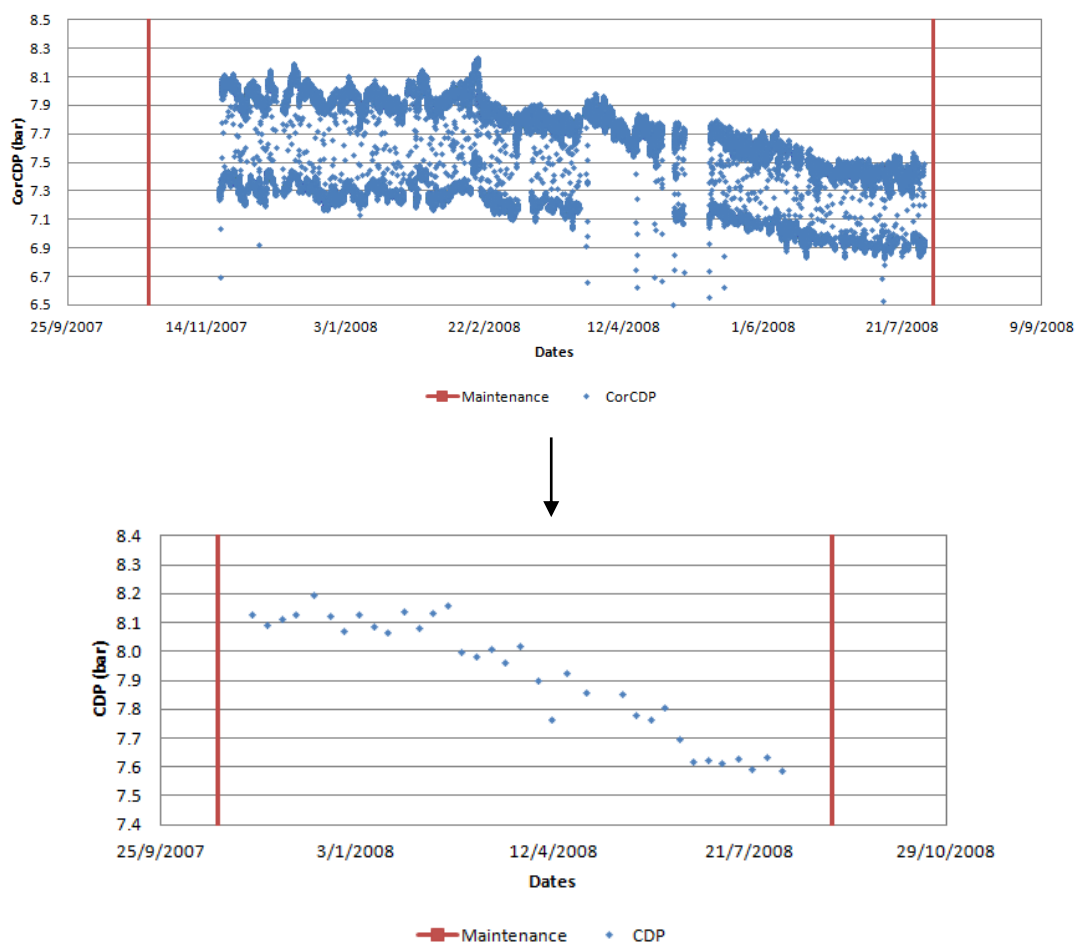
Σαν έξοδος του κώδικα, προκύπτουν οι δύο συντελεστές της ευθείας που προσεγγίζει τις εκάστοτε μετρήσεις, δηλαδή η κλίση  $a_0$  και ο σταθερός όρος  $a_1$  από την γενική εξίσωση της ευθείας:

$$y = a_0 \cdot x + a_1 \quad (3.7)$$

Όπου  $x$  το φορτίο και  $y$  το εξεταζόμενο μέγεθος.

Δηλαδή, για κάθε χρονικό διάστημα μίας υποομάδας η αντίστοιχη παραχθείσα εξίσωση δίνει μια τιμή του αντίστοιχου μεγέθους. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται συναρτήσει του χρόνου στα διαγράμματα 3.20 έως 3.29.

Με αυτό τον τρόπο προσδιορίζεται η ευθεία που αναπαριστά τα διάφορα μεγέθη συναρτήσει του φορτίου για κάθε χρονικά διαδοχική υποομάδα. Αν για κάποιο μέγεθος, εφαρμοστούν οι αντίστοιχες παραχθείσες εξισώσεις κάθε χρονικά διαδοχικής υποομάδας, χρησιμοποιώντας το ονομαστικό φορτίο, παράγεται η χρονική εξέλιξη του μεγέθους αυτού, όπως φαίνεται ενδεικτικά στο δεύτερο διάγραμμα του σχήματος 3.19.



**Σχήμα 3.19:** Χρονική μεταβολή CDP πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου της αναγωγής σε σταθερό φορτίο.



Στο σχήμα 3.19, φαίνεται η αρκετά πιο απλοποιημένη εικόνα που προέκυψε από την εφαρμογή της μεθόδου της αναγωγής σε σταθερό φορτίο. Χαρακτηριστικά απεικονίζεται η πίεση CDP, οι τιμές της οποίας υπολογίστηκαν από τη σχέση 3.7 θέτοντας όπου  $x$  το ονομαστικό φορτίο. Οι τιμές των συντελεστών  $\alpha_0$  και  $\alpha_1$  προέκυψαν από την εφαρμογή της τεχνικής της γραμμικής προσέγγισης ελαχίστων τετραγώνων σε κάθε υποομάδα ενδιάμεσα των συντηρήσεων, όπως φάνηκε και στο σχήμα 3.18. Επίσης, στο σχήμα 3.19 είναι φανερή η σταδιακή πτώση της πίεσης CDP του GT31, άρα και της γενικής χειροτέρευσης του κινητήρα. Στη συνέχεια, η τεχνική της γραμμικής προσέγγισης εφαρμόστηκε σε κάθε χρονικά διαδοχική υποομάδα ενδιάμεσα των συντηρήσεων.

Τα μεγέθη που, κατά κύριο λόγο μελετήθηκαν, είναι η διαφορά πίεσης στα φίλτρα εισόδου ή αλλιώς η πτώση πίεσης πριν και μετά τα φίλτρα (DPF), η πίεση εξόδου του συμπιεστή (CDP), η θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή (CDT) και η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από το στρόβιλο (EGT). Ο λόγος που επιλέχθηκαν αυτά τα μεγέθη, είναι ότι αντικατοπτρίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό οποιαδήποτε παρέμβαση στη μηχανή, η οποία έχει να κάνει με αλλαγή των φίλτρων στην είσοδο του αγωγού εισόδου ή καθαρισμό του συμπιεστή, και, προφανώς, επειδή είναι άμεσα διαθέσιμες από το σύστημα (Digital Control System). Κάτι τέτοιο είναι εφικτό, εξαιτίας της δυνατότητας τοποθέτησης μετρητικών οργάνων, άρα και της λήψης μετρήσεων, στις συγκεκριμένες θέσεις που κρίνεται αναγκαίο, όπως είναι στα φίλτρα εισόδου της μηχανής, και στην έξοδο του συμπιεστή και του στρόβιλου.

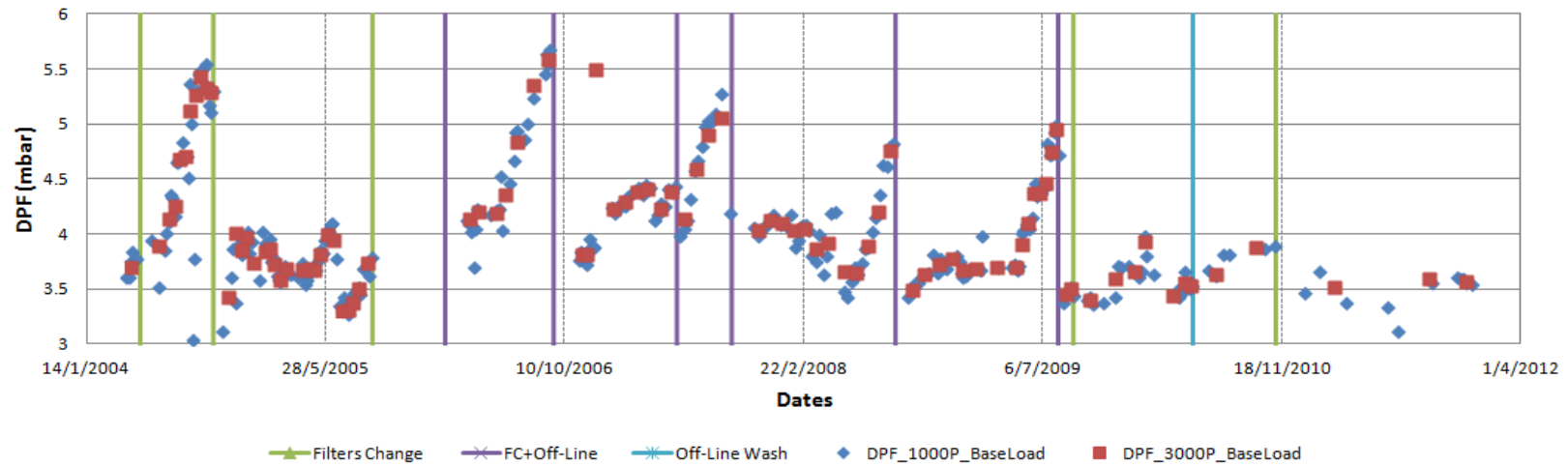
Παρακάτω, ακολουθούν τα διαγράμματα (3.20 έως 3.29) που προέκυψαν, μετά την επεξεργασία των μετρήσεων, παράλληλα για τον αεριοστρόβιλο 1 ή αλλιώς GT31 (1<sup>ος</sup> αεριοστρόβιλος της Μονάδας III του Λαυρίου) και για τον Αεριοστρόβιλο 2 ή αλλιώς GT32 (2<sup>ος</sup> αεριοστρόβιλος της Μονάδας III του Λαυρίου). Στα ίδια διαγράμματα φαίνονται και οι συντηρήσεις στους αεριοστρόβιλους, οι οποίες συμβολίζονται με κάθετες γραμμές. Ανάλογα με το είδος της συντήρησης, κάθε γραμμή έχει και αντίστοιχο χρώμα.

Ακολούθως, παρουσιάζονται σε γραφήματα (3.20 και 3.21), σε συνάρτηση με το χρόνο η διαφορά πίεσης πριν και μετά τα φίλτρα εισόδου, και του φορτίου.

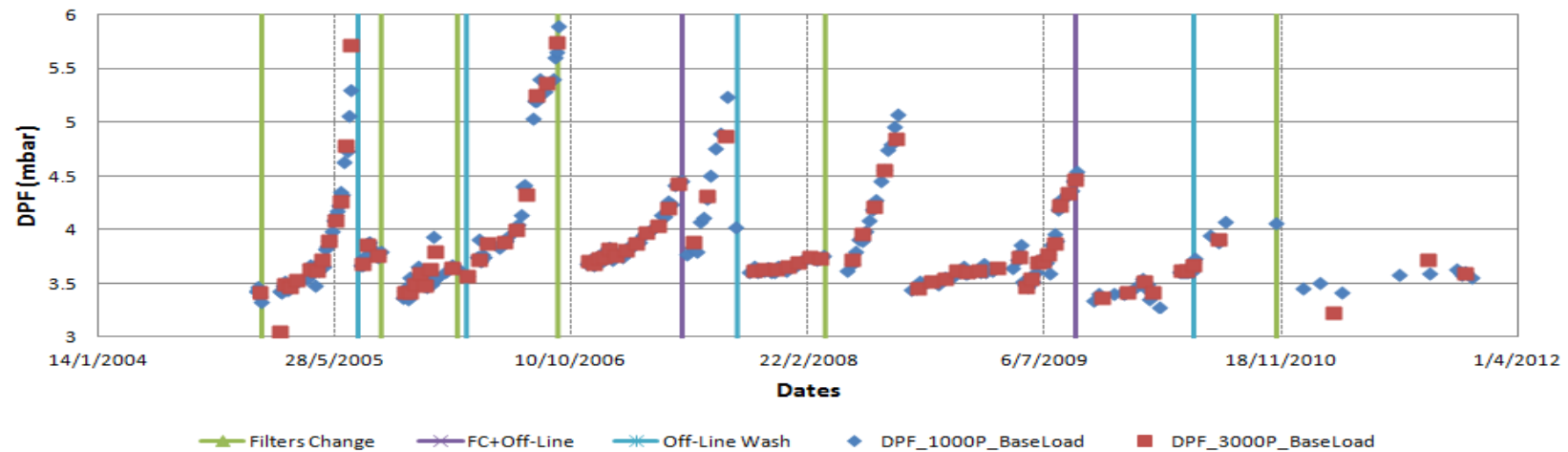
Η μέτρηση DPF, δείχνει τη διαφορά πίεσης, σε mbar του αέρα, πριν και μετά τα φίλτρα που βρίσκονται στην είσοδο της μηχανής. Σκοπός της ύπαρξης των φίλτρων είναι η κατακράτηση σωματιδίων, τα οποία περιέχονται στον ατμοσφαιρικό αέρα, αποφεύγοντας με αυτόν τον τρόπο σοβαρές ζημιές, αλλά και επικαθήσεις στα πτερύγια του συμπιεστή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, εκτός από την εμφάνιση σοβαρών βλαβών, και τη σταδιακή χειροτέρευση της απόδοσης του κινητήρα. Όπως είναι αναμενόμενο, με τη διέλευση του από τα φίλτρα, ο αέρας χάνει ποσοστό της ενέργειάς του, γεγονός που είναι φανερό από την πτώση της ολικής του πίεσης. Με την πάροδο του χρόνου, και με τη συσσώρευση σωματιδίων

στα φίλτρα, η διερχόμενη παροχή αέρα από αυτά συνεχώς μειώνεται, ενώ ταυτόχρονα χάνεται όλο και μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας του, που έχει σαν αντίκτυπο την ακόμα μεγαλύτερη πτώση της ολικής του πίεσης ανάντι των φίλτρων, άρα και την αύξηση της διαφοράς DPF.

Στο σχήμα 3.20 που ακολουθεί φαίνεται η μεταβολή της διαφοράς πίεσης πριν και μετά τα φίλτρα (DPF) για τον αεριοστρόβιλο 1 (GT31), ενώ στο σχήμα 3.21 φαίνεται η αντίστοιχη μεταβολή για τον αεριοστρόβιλο 2 (GT32). Στη μέθοδο της αναγωγής σε σταθερό φορτίο, του μεγέθους DPFilter, χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις, όπως είναι, χωρίς καμία επεξεργασία ή διόρθωση (Raw Measurements). Το φορτίο έχει υποστεί διόρθωση. Από την παρατήρηση της χρονικής μεταβολής του DPF, είναι ορατή και για τους δύο αεριοστροβίλους η συνεισφορά των συντηρήσεων, και συγκεκριμένα της αλλαγής των φίλτρων εισόδου, στη μείωση της διαφοράς πίεσης DPF, στα επιθυμητά επίπεδα. Επιπλέον, από το σχήμα 3.21, παρατηρείται μία ξαφνική μείωση της πτώσης πίεσης του GT32 την περίοδο του φθινόπωρου του 2008. Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται σε πιθανή αλλαγή φίλτρων που έγινε στον κινητήρα και δεν έχει καταγραφεί στο ιστορικό των συμβάντων.



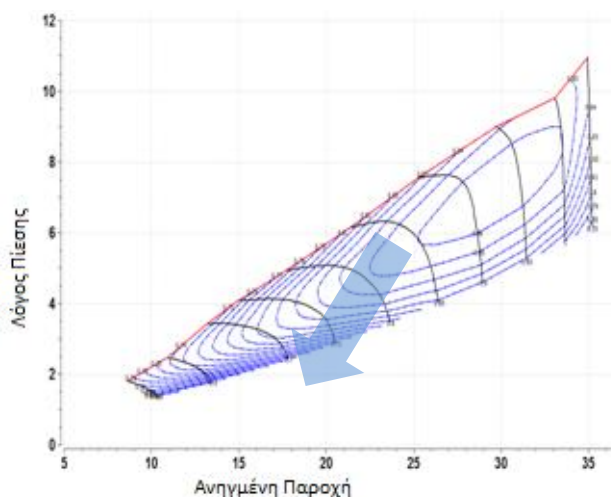
Σχήμα 3.20: Αποτελέσματα γραμμικής προσέγγισης DPF με φορτίο στον GT31.



Σχήμα 3.21: Αποτελέσματα γραμμικής προσέγγισης DPF με φορτίο στον GT32.

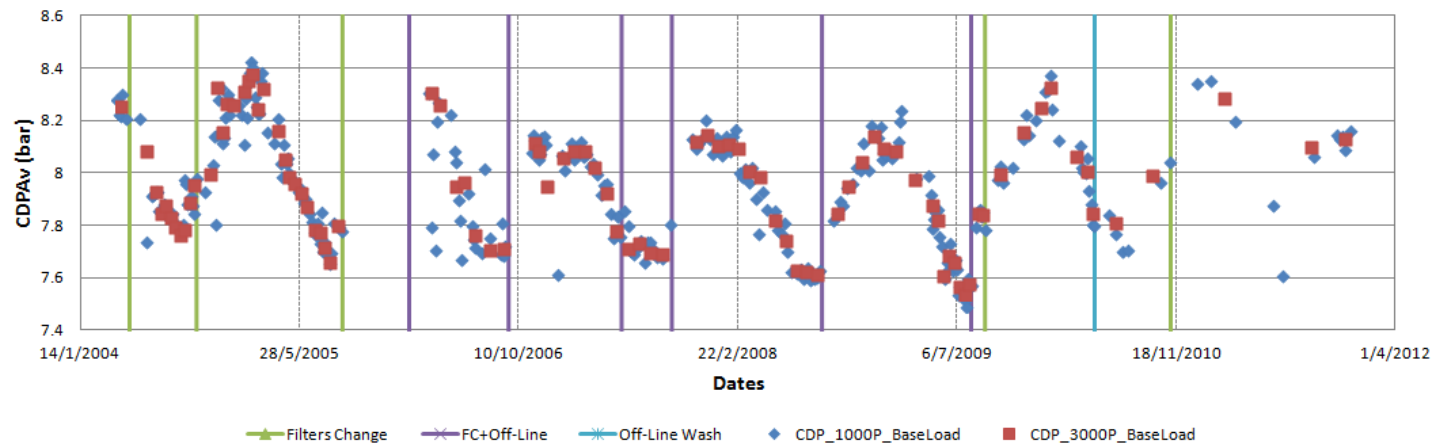
Ο συμπιεστής, όπως είναι γνωστό, με την αδιαβατική συμπίεση που πραγματοποιείται σε αυτόν, προσδίδει ενέργεια στο ρευστό, κάτι που επιτυγχάνεται με την αύξηση της ολικής του πίεσης και θερμοκρασίας. Η συμπίεση του ρευστού, κατά τη διέλευση του από το συμπιεστή, δεν μπορεί να χαρακτηριστεί αδιαβατική, αφού ένα ποσό της θερμότητας του χάνεται, λόγω των απωλειών δι' ακτινοβολίας από το κέλυφος της μηχανής. Είναι δυνατόν, όμως, η συμπίεση να θεωρηθεί αδιαβατική χωρίς ιδιαίτερο σφάλμα, διότι όταν έχει ομαλοποιηθεί η ροή του ρευστού στη μηχανή, τα πτερύγια και το κέλυφος του στροβίλου έχουν αποκτήσει τη θερμοκρασία του ρευστού (αδιαβατική θερμοκρασία), με αποτέλεσμα οι απώλειες θερμότητας του ρευστού να είναι ελάχιστες.

Η πτώση των επιδόσεων του συμπιεστή μπορεί να οφείλεται σε πολλούς λόγους όπως το βρώμισμα των φίλτρων εισόδου, και οι επικαθήσεις στα πτερύγια του συμπιεστή που επιφέρουν αλλαγή στη γεωμετρία των πτερυγίων. Επίσης, άλλος λόγος μπορεί να είναι η διάβρωση (χημική ή μηχανική) καθώς επίσης και η αύξηση των ακτινικών διακένων. Αναπόφευκτη συνέπεια, της εμφάνισης των προαναφερθέντων φαινομένων είναι η μείωση της παροχής που διέρχεται από το συμπιεστή και η μείωση του βαθμού απόδοσής του με αποτέλεσμα τη μείωση της πίεσης εξόδου από αυτόν (CDP), άρα και του λόγου πίεσης. Η χειροτέρευση του συμπιεστή, φαίνεται χαρακτηριστικά και από τη μετατόπιση του χάρτη του συμπιεστή προς τα κάτω και αριστερά.

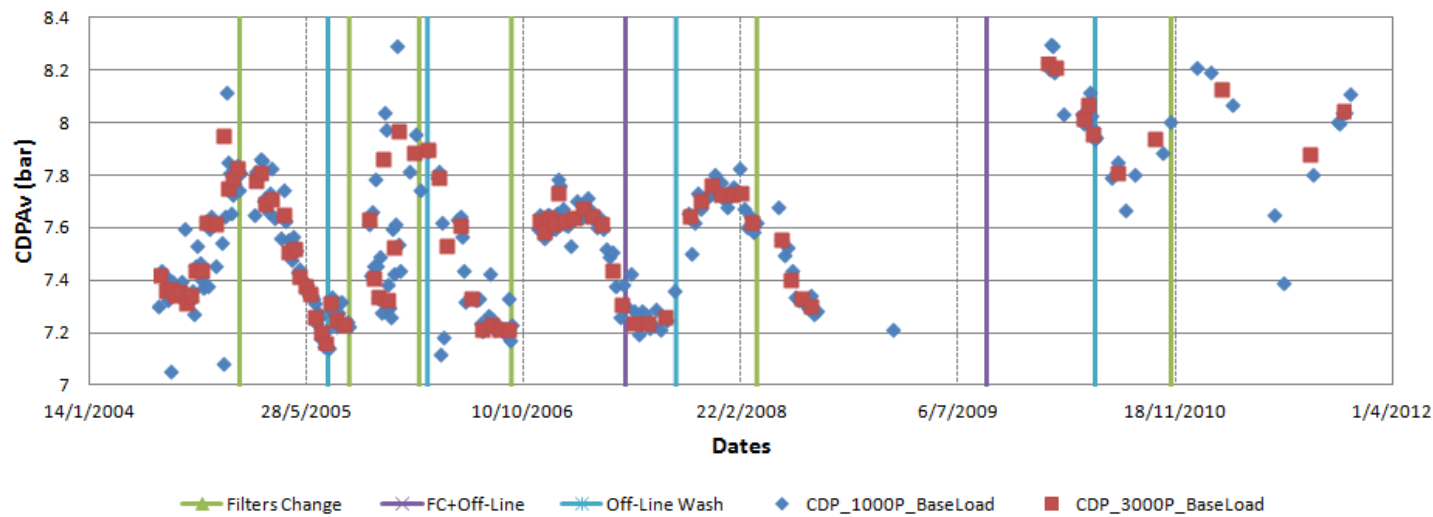


**Σχήμα 3.22: Μετατόπιση χάρτη συμπιεστή λόγω χειροτέρευσης του κινητήρα (παράδειγμα).**

Στο σχήμα 3.23 απεικονίζεται η χρονική μεταβολή της διορθωμένης πίεσης εξόδου του συμπιεστή (CDP) στον Αεριστρόβιλο 1, ενώ στο σχήμα 3.24 η αντίστοιχη μεταβολή στον αεριστρόβιλο 2.



Σχήμα 3.23: Αποτελέσματα γραμμικής προσέγγισης CDP με φορτίο στον GT31.



Σχήμα 3.24: Αποτελέσματα γραμμικής προσέγγισης CDP με φορτίο στον GT32

Από το σχήμα 3.23, φαίνεται χαρακτηριστικά, η βελτίωση που επιφέρει οποιαδήποτε μορφή συντήρησης στις επιδόσεις του συμπιεστή, και συγκεκριμένα στην πίεση εξόδου του, αφού μετά από κάθε συντήρηση παρατηρείται αύξηση της. Ενώ, ταυτόχρονα, παρατηρείται και η σταδιακή επιβάρυνση του με την πάροδο του χρόνου, που προκαλείται εξαιτίας της εμφάνισης των φαινομένων που προαναφέρθηκαν.

Αντίστοιχα, στο σχήμα 3.24, φαίνονται οι μεταβολές της πίεσης εξόδου CDP στον αεριοστρόβιλο 2, οι οποίες ακολουθούν τη μορφή που αναφέρθηκε και για τον αεριοστρόβιλο 1. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι με τη βοήθεια των συντηρήσεων και συγκεκριμένα με τα Off-Line πλυσίματα του συμπιεστή και την αλλαγή φίλτρων αέρα εισόδου, η πίεση εξόδου από το συμπιεστή επανέρχεται σε επιθυμητά επίπεδα, όμως η σταδιακή χειροτέρευση των κινητήρων με την πάροδο του χρόνου είναι εμφανής. Πιο συγκεκριμένα, η πίεση CDP μετά από κάθε συντήρηση πλησιάζει την τιμή αναφοράς των 8,5 bar, όπως ειπώθηκε και στην παράγραφο 3.1, ενώ παράλληλα, με την πάροδο του χρόνου, και παρά τις συντηρήσεις, οι τιμές των μετρήσεων απομακρύνονται όλο και περισσότερο από την τιμή των 8,5 bar, εξαιτίας της φυσιολογικής "γήρανσης" του κινητήρα.

Από τις 18/08/2008 μέχρι και τις 15/01/2010, η ανυπαρξία σημείων στο σχήμα 3.24 οφείλεται στην ανυπαρξία μετρήσεων λόγω βλάβης των μετρητικών οργάνων, η οποία αν και επισημάνθηκε από τις περιοδικές και ετήσιες εκθέσεις του ΕΘΣ, άργησε να επισκευαστεί.

Τέλος, παρατηρείται και η εμφάνιση κάποιων ακραίων τιμών (outliers) και στα δύο διαγράμματα. Οι στιγμές εμφάνισης τέτοιων τιμών είναι, κυρίως, μετά από περιόδους κατά τις οποίες οι συγκεκριμένοι κινητήρες ήταν εκτός λειτουργίας, ή κατά την εκκίνηση των κινητήρων μετά από περιόδους παύσης. Για το λόγο αυτό, και με τη μέθοδο της προσέγγισης, όταν αυτή εφαρμόζεται ανά 3000 σημεία, φιλτράρονται πολλές τέτοιες τιμές. Ενώ, αυτό δε συμβαίνει στον ίδιο βαθμό, όταν γίνεται προσέγγιση ανά 1000 μετρήσεις, όπως φαίνεται και από τα σχήματα 3.23 και 3.24. Επίσης, και κατά την αρχική περίοδο της εγκατάστασης του διαγνωστικού συστήματος στους δύο Αεριοστροβίλους, από το ΕΘΣ, είναι έντονο το φαινόμενο της εμφάνισης ακραίων τιμών, κάτι που μπορεί να οφείλεται στην κακή βαθμονόμηση των οργάνων, σε κάποια βλάβη στα μετρητικά όργανα, είτε σε κάποιο λάθος στη συνδεσμολογία, με συνέπεια τη λανθασμένη πρόσκτηση δεδομένων.

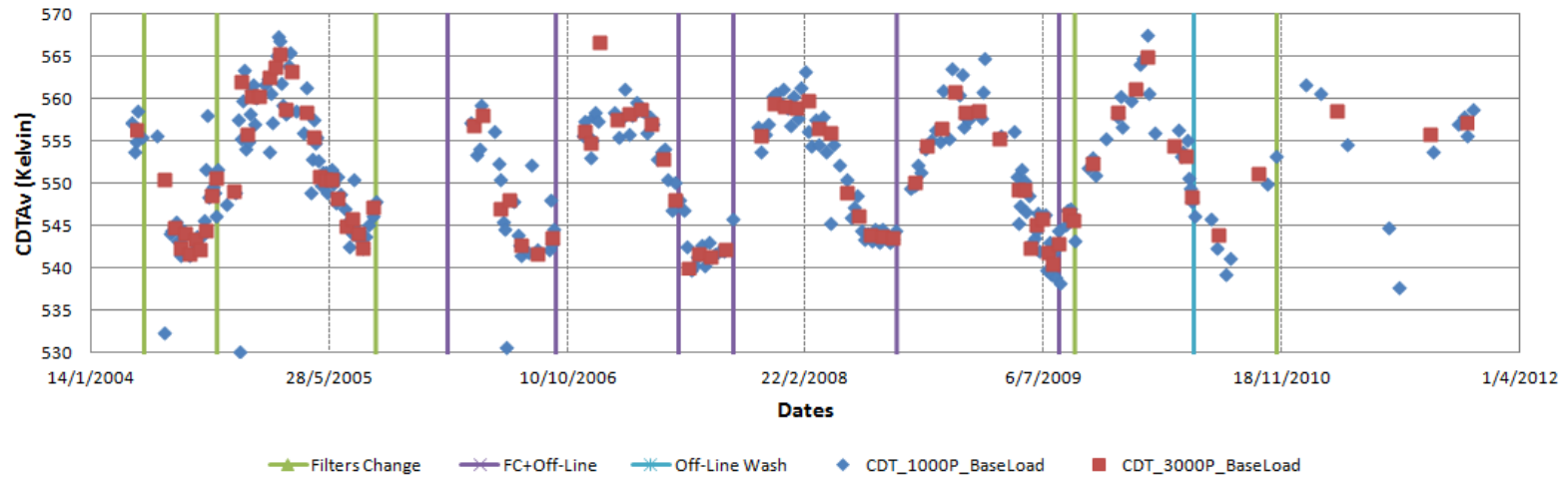
Η παρουσία ακραίων τιμών πριν και μετά τις παύσεις λειτουργίας των συγκεκριμένων αεριοστροβίλων, αλλά και κατά την αρχική περίοδο εγκατάστασης του διαγνωστικού συστήματος, είναι κοινό στοιχείο για όλα τα μεγέθη όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα (3.25 έως 3.29) που ακολουθούν.

Όπως, έχει ήδη αναφερθεί προηγουμένως, στο συμπιεστή προσδίδεται ενέργεια στο ρευστό μέσω της αδιαβατικής συμπίεσης που πραγματοποιείται κατά μήκος αυτού, και εκφράζεται με την αύξηση της ολικής πίεσης και

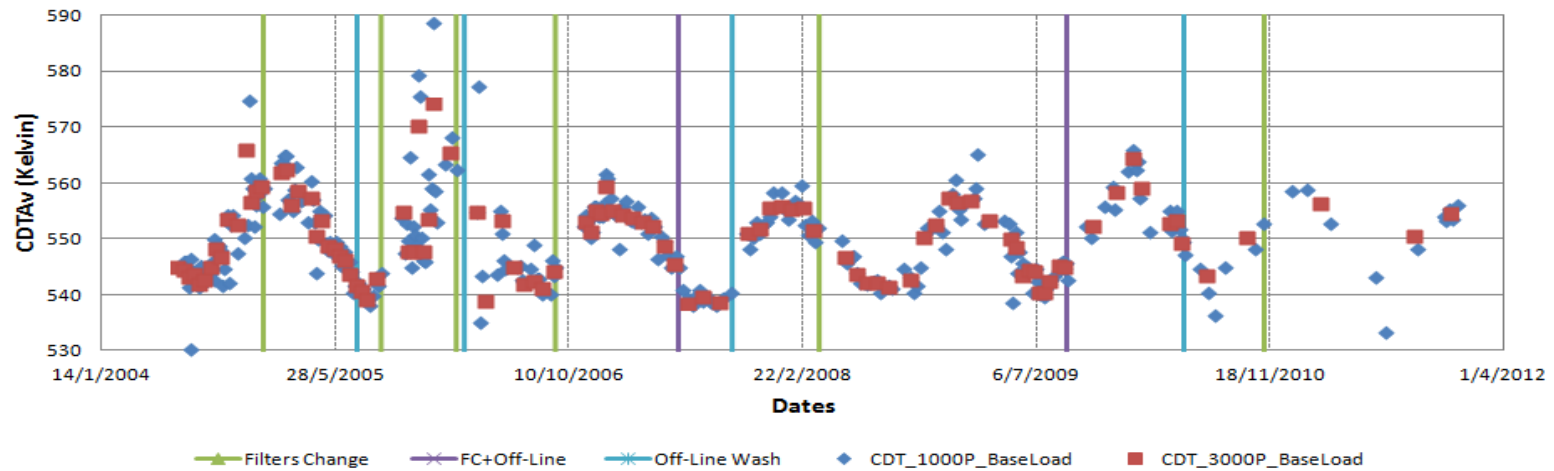
Θερμοκρασίας του ρευστού στην έξοδο του συμπιεστή. Το βρώμισμα των φίλτρων, και , κυρίως, οι επικαθήσεις στα πτερύγια του συμπιεστή συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση της απόδοσης του συμπιεστή, και κατά συνέπεια στη μείωση της προσδιδόμενης ενέργειας από το συμπιεστή στο εργαζόμενο μέσο. Το φαινόμενο αυτό γίνεται αντιληπτό και από τη σταδιακή πτώση της θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από το συμπιεστή (CDT), αντικατοπτρίζοντας τη σταδιακή χειροτέρευση της λειτουργίας του συμπιεστή. Οι τιμές των μετρήσεων λαμβάνονται από τέσσερα (4) διαφορετικά σημεία στην έξοδο του συμπιεστή, ενώ στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται ο μέσος όρος αυτών. Αντίστοιχα, μετά από συντηρήσεις, και κυρίως μετά από Off-Line πλύσιμο του συμπιεστή, οι τιμές της θερμοκρασίας εξόδου του αέρα (CDT) επανέρχονται, σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό, σε επίπεδα υγιούς μηχανής.

Εν συνεχεία, στα διαγράμματα 3.25 και 3.26 που ακολουθούν, απεικονίζονται, σε συνάρτηση με το χρόνο, τα αποτελέσματα της αναγωγής σε σταθερό φορτίο της θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από το συμπιεστή (CDT), για τον αεριοστροβίλο 1 και 2 αντίστοιχα.

Η θετική επίδραση των συντηρήσεων φαίνεται, κυρίως από το σχήμα 3.25, όπου απεικονίζεται η χρονική μεταβολή της διορθωμένης θερμοκρασίας εξόδου από το συμπιεστή (CDT), του αεριοστροβίλου 1. Αντίθετα, στο σχήμα 3.26, φαίνονται τα αποτελέσματα για τον αεριοστροβίλο 2. Πιο συγκεκριμένα, δεν αποτυπώνεται καθαρή εικόνα της συμβολής των συντηρήσεων, ούτε γενικά κάποια χειροτέρευση ή πιθανή βελτίωση της απόδοσης του κινητήρα GT32, από τη μεταβολή της θερμοκρασίας CDT.



Σχήμα 3.25: Αποτελέσματα γραμμικής προσέγγισης CDT με φορτίο στον GT31.



Σχήμα 3.26: Αποτελέσματα γραμμικής προσέγγισης CDT με φορτίο στον GT32



Μέσω του στροβίλου, γίνεται αδιαβατική εκτόνωση, κατά την οποία η μηχανή απορροφά ενέργεια από το ρευστό, κάτι που διαπιστώνεται από την πτώση της ολικής πίεσης και θερμοκρασίας του ρευστού. Στο στρόβιλο η εκτόνωση δεν είναι αδιαβατική, αφού ένα ποσό θερμότητας χάνεται κυρίως μέσω ακτινοβολίας από το κέλυφος της μηχανής. Μπορεί, όμως να θεωρηθεί αδιαβατική χωρίς ιδιαίτερο σφάλμα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι στο στρόβιλο, όταν έχει ομαλοποιηθεί η ροή, το κέλυφος και τα πτερύγια έχουν αποκτήσει τη θερμοκρασία του ρευστού (αδιαβατική θερμοκρασία), με συνέπεια οι απώλειες θερμότητας από το ρευστό, στην πράξη να είναι ελάχιστες.

Στο στρόβιλο, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται στην έξοδο του. Στην είσοδο του, η τοποθέτηση μετρητικών οργάνων είναι ασύμφορη, λόγω του μεγάλου κόστους τους, αφού απαιτούνται υλικά εξαιρετικά μεγάλης αντοχής, εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στο θάλαμο καύσης. Για το λόγο αυτό, οι τιμές των αεροθερμοδυναμικών μεγεθών στη θέση αυτή προσεγγίζονται μόνο υπολογιστικά.

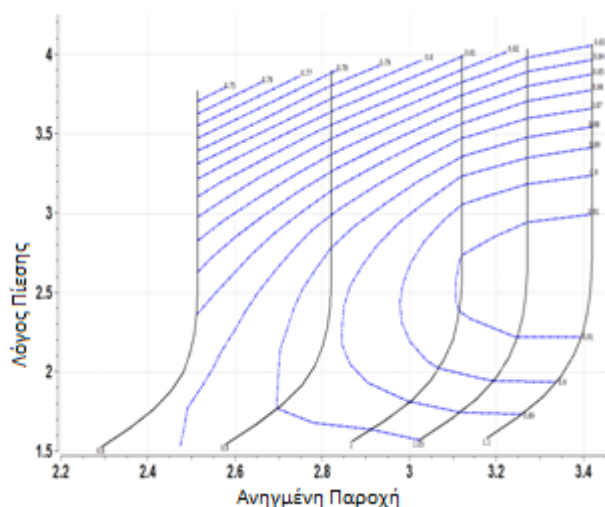
Για τη διάγνωση βλαβών, αλλά και γενικά για την επόπτευση της κατάστασης του θερμού τμήματος του κινητήρα, δηλαδή του θαλάμου καύσης και του στροβίλου, οι μετρήσεις στην έξοδο του στροβίλου, και συγκεκριμένα της θερμοκρασίας (EGT), παρέχουν σημαντικές δυνατότητες. Καταρχήν, η θερμοκρασία που μετράται είναι η μέση τιμή από μετρήσεις που λαμβάνονται από έναν αριθμό αισθητήρων, που είναι τοποθετημένοι περιφερειακά στην έξοδο του στροβίλου (Κ.Μαθιουδάκης, Διαγνωστική Αεριοστροβίλων, 2007). Οι αισθητήρες, αυτοί, είναι σχεδόν πάντα, θερμοζεύγη. Ενδιαφέρον για τη διαγνωστική, παρουσιάζει η μελέτη της κατανομής της θερμοκρασίας στις θέσεις μέτρησης. Στην παράγραφο 3.1, αναφέρθηκε ότι ο θάλαμος καύσης είναι σωληνοειδούς μορφής, αποτελούμενος από 10 καυστήρες. Το σημαντικό στοιχείο, που προκύπτει από την επεξεργασία της κατανομής θερμοκρασίας εξόδου, είναι η δυνατότητα εντοπισμού αλλαγών στην κατάσταση είτε των θαλάμων καύσης είτε του στροβίλου. Για παράδειγμα, το σβήσιμο της φλόγας σε έναν από τους καυστήρες, αποτυπώνεται στο θερμοκρασιακό προφίλ εξόδου ως μία ψυχρή περιοχή, που γίνεται αμέσως αντιληπτή από τους αισθητήρες. Με αυτόν τον τρόπο, προλαμβάνονται σοβαρές βλάβες οι οποίες μπορούν να αποδειχθούν καταστροφικές σε μικρό χρονικό διάστημα, της τάξεως των δέκα λεπτών (Κ.Μαθιουδάκης, Διαγνωστική Αεριοστροβίλων, 2007).

Στην εργασία αυτή μελετάται η μέση τιμή των θερμοκρασιών όλων των θερμοστοιχείων. Οι αιτίες παρουσίας μεταβολών στη μέση τιμή του θερμοκρασιακού προφίλ είναι ποικίλες. Οι μεταβολές μπορεί να οφείλονται στη μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας του αεριοστροβίλου, είτε στην εμφάνιση κάποιας βλάβης στο θάλαμο καύσης ή σε τροποποίηση της γεωμετρίας των πτερυγώσεων του συμπιεστή ή του στροβίλου, είτε στη φυσιολογική φθορά του

αεριοστρόβιλου (Κ.Μαθιουδάκης, Διαγνωστική Αεριοστρόβιλων, 2007). Είναι άξιο να σημειωθεί, ότι με τη μελέτη των μεταβολών του θερμοκρασιακού προφίλ, και την κατάλληλη επεξεργασία είναι δυνατό όχι μόνο να εντοπιστεί η πιθανή βλάβη αλλά και η αναγνώριση του είδους αυτής.

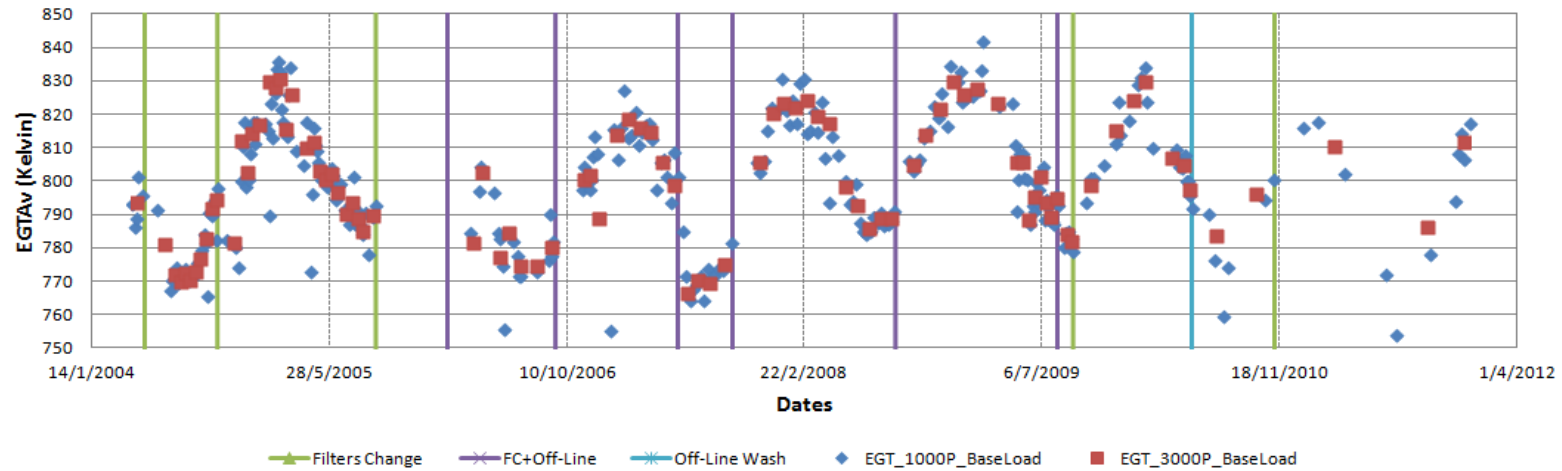
Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, ο στρόβιλος απορροφά ενέργεια από το ρευστό, και αυτό φαίνεται από την πτώση της ολικής πίεσης και θερμοκρασίας στην έξοδο του. Προφανώς, όσο πιο μεγάλη είναι η διαφορά των μεγεθών στην έξοδο από την είσοδο, τόσο καλύτερα γίνεται η εκμετάλλευση της ενέργειας του ρευστού από τον κινητήρα.

Και στο στρόβιλο, ακριβώς όπως αναφέρθηκε και για το συμπιεστή, η σταδιακή χειροτέρευση του στρόβιλου, λόγω της εμφάνισης κάποιων εκ των προαναφερθέντων φαινομένων, θα οδηγήσει και πάλι σε μείωση της παροχής που διέρχεται από αυτόν, αλλά και γενικά σε πτώση του βαθμού απόδοσης του στρόβιλου, άρα και όλης της μηχανής. Έτσι, και πάλι, ο χάρτης λειτουργίας του στρόβιλου θα μετατοπιστεί σε περιοχές με μικρότερο λόγο πίεσης  $P_1$  και μικρότερη ανηγμένη παροχή. Η μόνη περίπτωση βλάβης, κατά την οποία η παροχή του στρόβιλου θα αυξηθεί, αντί να μειωθεί, είναι η παρουσία διάβρωσης στα πτερύγια του στρόβιλου, και άρα της αύξησης των ακτινικών διακένων.

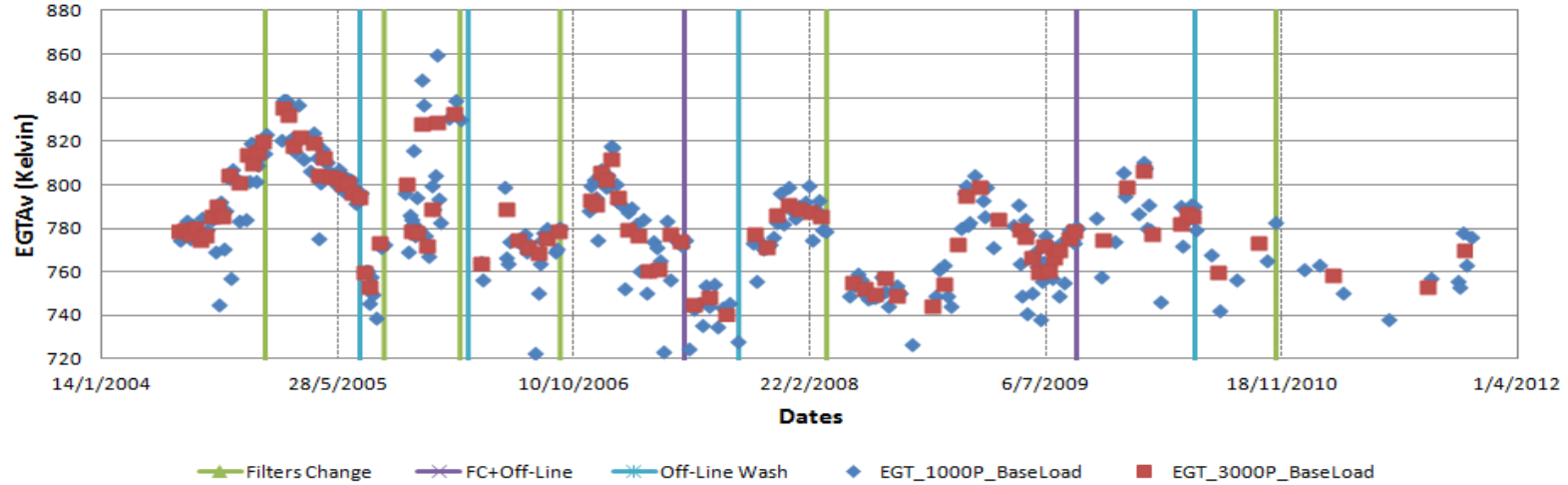


Σχήμα 3.27: Χάρτης στρόβιλου (παράδειγμα).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της χρονικής εξέλιξης του EGT, τα οποία προέκυψαν από την ήδη περιγραφείσα διαδικασία. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 3.28 φαίνεται η χρονική εξέλιξη του EGT για τον αεριοστρόβιλο 1 και στο σχήμα 3.29, η αντίστοιχη μεταβολή για τον αεριοστρόβιλο 2.



Σχήμα 3.28: Αποτελέσματα γραμμικής προσέγγισης EGT με φορτίο στον GT31.



Σχήμα 3.29: Αποτελέσματα γραμμικής προσέγγισης EGT με φορτίο στον GT32.

Στο σχήμα 3.28, παρατηρείται ότι η συμβολή των συντηρήσεων δεν αντικατοπτρίζεται καθαρά στη μεταβολή της θερμοκρασίας EGT του GT31, αφού αυτή σχηματίζει όπως φαίνεται καμπύλη και όχι ανοδική πορεία, δηλαδή πορεία χειροτέρευσης. Όμως, η γενική χειροτέρευση της μηχανής λόγω γήρανσης, φαίνεται παρατηρώντας το ολικό χρονικό διάστημα, αφού οι κατώτερες και οι ανώτερες τιμές του EGT αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου. Από την άλλη, στα αντίστοιχα αποτελέσματα της μεθόδου για τον κινητήρα GT32 υπάρχει έντονη σύγχυση στη μεταβολή του EGT, αφού δεν είναι ευδιάκριτες οι συντηρήσεις. Επιπλέον, οι τιμές του EGT, γενικά, ακολουθούν καθοδική πορεία, γεγονός αντίθετο με την ανοδική πορεία εξαιτίας της φυσιολογικής γήρανσης του κινητήρα.

Ο λόγος για το ότι η θερμοκρασία EGT δεν ακολουθεί τη λογική της χειροτέρευσης με το χρόνο, είναι η εξάρτηση της από τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο, TIT (Turbine Inlet Temperature). Πιο αναλυτικά, με την σταδιακή επιβάρυνση της μηχανής στο ενδιάμεσο διάστημα μεταξύ των συντηρήσεων, η μηχανή για την παραγωγή του ίδιου φορτίου αναγκάζεται να δουλέψει σε πιο ψηλές θερμοκρασίες. Όμως, εξαιτίας της περιορισμένης αντοχής των υλικών στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες, από το αυτοματοποιημένο σύστημα παρακολούθησης των αεριοστροβίλων τίθεται ένα ανώτατο όριο στις τιμές της θερμοκρασίας TIT, οπότε είναι αναπόφευκτη η σταδιακή μείωση του φορτίου.

Τέλος, από τα διαγράμματα 3.20 έως 3.29, παρατηρείται ότι κάποιες συγκεκριμένες χρονικές περιόδους τα μεγέθη και των δύο αεριοστροβίλων ακολουθούν περίεργη συμπεριφορά. Οι χρονικές περίοδοι στις οποίες γίνεται αναφορά είναι το φθινόπωρο του 2004, η άνοιξη του 2007 και ο χειμώνας του 2009. Κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων παρατηρείται συνεχής τάση βελτίωσης των υπό μελέτη μεγεθών και στους δύο αεριοστροβίλους. Για παράδειγμα, παρατηρείται τάση βελτίωσης του CDP και του CDT. Ο λόγος είναι ότι τις συγκεκριμένες περιόδους οι μηχανές δουλεύουν (σχεδόν) με σταθερό φορτίο. Δεν υπάρχει, δηλαδή, εναλλαγή μεταξύ ονομαστικού (100%) και μερικού φορτίου (50%), όπως συμβαίνει για το υπόλοιπο χρονικό διάστημα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη λάθος εφαρμογή της γραμμικής προσέγγισης για αυτές τις περιόδους.

Επιπλέον, τις περιόδους του χειμώνα 2004-2005 και το φθινόπωρο του 2008 παρατηρείται μία βελτίωση στις επιδόσεις του GT31, η οποία αποτυπώνεται στη μεταβολή των μετρήσεων CDP, CDT, και EGT, όπως φαίνεται από τα σχήματα 3.23, 3.25 και 3.28 αντίστοιχα, και είναι πιθανό να οφείλονται σε Off-Line πλύσιμο του συμπιεστή, το οποίο δεν έχει καταχωρηθεί στα ημερολόγια της μηχανής (Logbooks). Στα σχήματα 3.21 και 3.26, όπου απεικονίζεται η χρονική μεταβολή του DPF και του CDT για τον GT32, παρατηρείται βελτίωση και των δύο μεγεθών το φθινόπωρο του 2008, γεγονός που υποδυκνύει την πραγματοποίηση συντήρησης (αλλαγή φίλτρων και Off-Line πλύσιμο συμπιεστή).

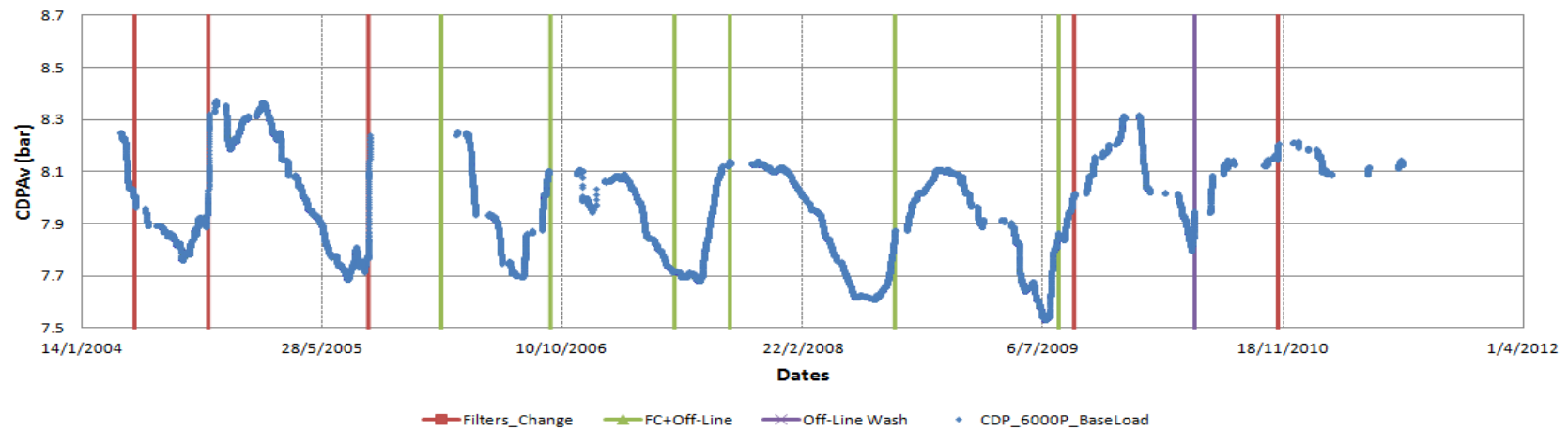
### **3.2.4 Επεξεργασία δεδομένων χωρίς να ληφθούν υπόψιν οι συντηρήσεις, σχολιασμός και σύγκριση.**

Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των θερμοδυναμικών μετρήσεων, χωρίς όμως να ληφθούν υπόψιν οι συντηρήσεις, όπως έγινε με την επεξεργασία των διορθωμένων μεγεθών σύμφωνα με τις καμπύλες διόρθωσης από τον κατασκευαστή (GEC). Η διόρθωση των πιέσεων και των θερμοκρασιών έγινε και εδώ με τη χρήση των αδιάστατων παραμέτρων  $\theta$  και  $\delta$  (Volponi, 1999), ενώ το φορτίο και πάλι προέκυψε από τις καμπύλες διόρθωσης. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε, είναι, όπως και στην παράγραφο 3.2.3, η αναγωγή των διορθωμένων μετρήσεων CDP, CDT, EGT σε σταθερό φορτίο. Το γεγονός ότι, σε αυτό το σημείο, οι συντηρήσεις δεν συμπεριελήφθησαν στη μελέτη και επεξεργασία των μετρήσεων, σημαίνει ότι δεν έγινε διάκριση των δεδομένων σε ομάδες μεταξύ των συντηρήσεων. Αντιθέτως, μελετήθηκαν σαν να μην υπάρχει καμία γνώση γύρω από το ιστορικό των συμβάντων των δύο μηχανών.

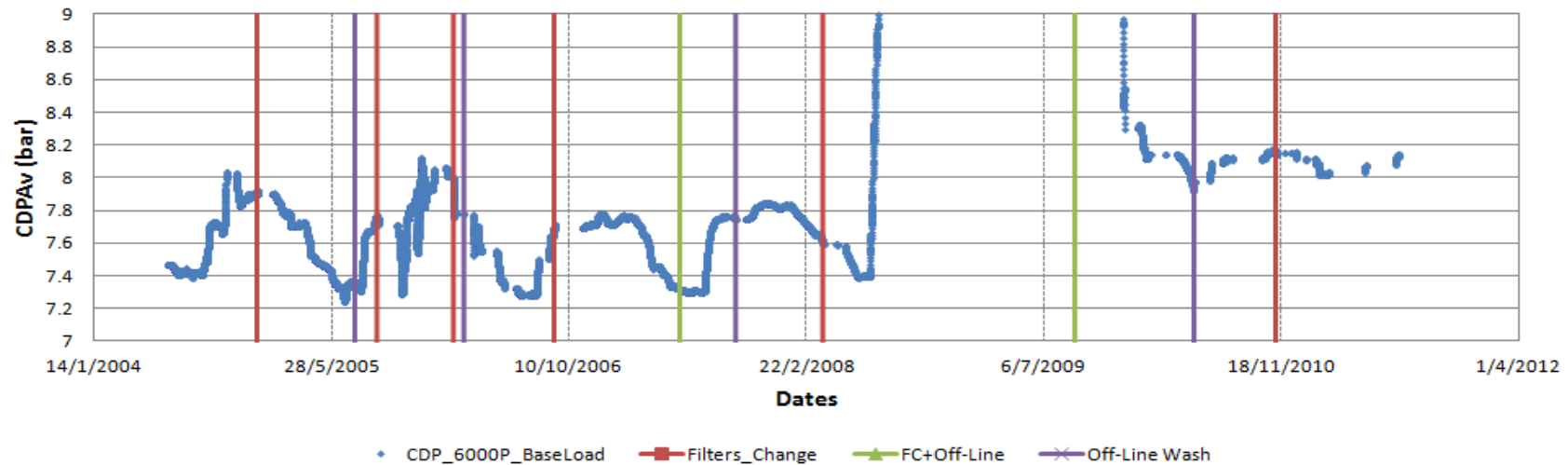
Σκοπός της επεξεργασίας με αυτόν τον τρόπο, είναι να διαπιστωθεί κατά πόσο και αν συνεισφέρει στην καλύτερη απεικόνιση των μεγεθών και της μεταβολής της τάσης αυτών, η γνώση και χρήση των ημερομηνιών που πραγματοποιήθηκαν οι συντηρήσεις. Καθώς, και αν είναι δυνατόν να εντοπιστούν χρονικά οι συντηρήσεις από την παρατήρηση των διαγραμμάτων που προκύπτουν.

Για την επεξεργασία, εφαρμόστηκε η μέθοδος της αναγωγής σε σταθερό φορτίο με χρήση της τεχνικής της γραμμικής προσέγγισης με ελάχιστα τετράγωνα, σε περιβάλλον Matlab. Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε διαδοχικά σε όλα τα δεδομένα, με σταθερό βήμα (moving average). Συγκεκριμένα, το βήμα σε αυτή την περίπτωση ήταν 6000 μετρήσεις, ισοδύναμο χρονικά με 20, περίπου, μέρες. Το πρόγραμμα σάρωσε όλα τα δεδομένα, δημιουργώντας ομάδες των 6000 μετρήσεων ξεκινώντας από την πρώτη μέτρηση.

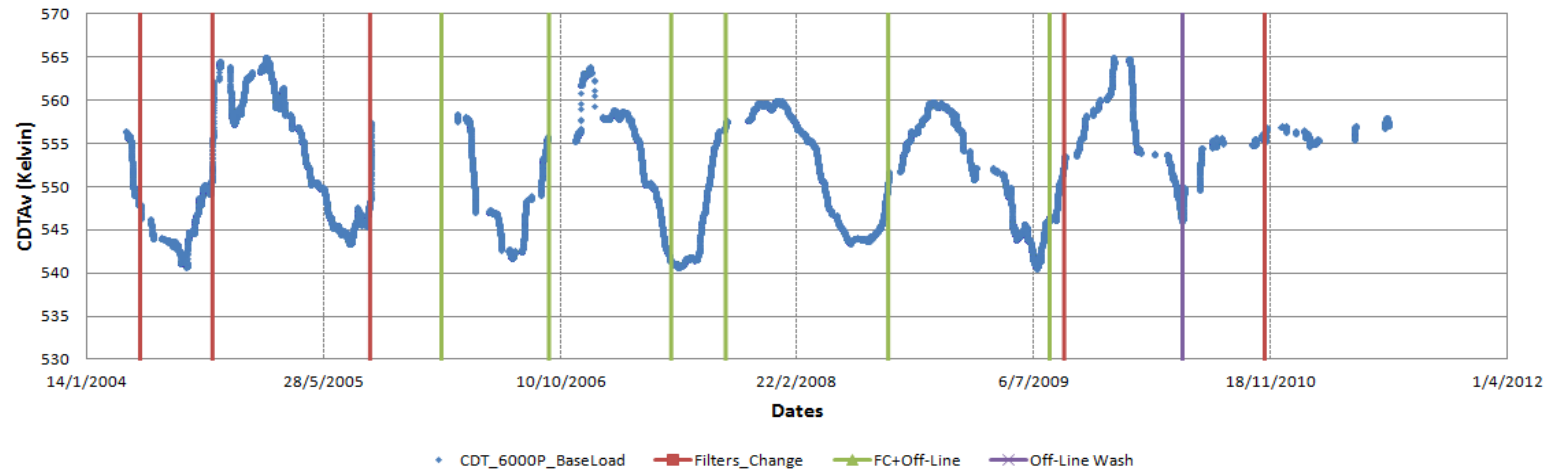
Στα σχήματα 3.30, 3.32 αναπαριστώνται σχηματικά τα αποτελέσματα της αναγωγής της διορθωμένης πίεσης (CDP) και θερμοκρασίας (CDT) στην έξοδο του συμπιεστή σε σταθερό φορτίο, για τον αεριοστρόβιλο GT31. Ενώ, στο σχήμα 3.34 φαίνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου μεταξύ της διορθωμένης θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων (EGT) και του διορθωμένου φορτίου του GT31. Στα σχήματα 3.31, 3.33, και 3.35 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τον αεριοστρόβιλο GT32. Τέλος, στα σχήματα 3.36 και 3.37 απεικονίζονται οι μεταβολές της διαφοράς πίεσης στα φίλτρα εισόδου για τους δύο κινητήρες, αντίστοιχα. Σε όλα τα διαγράμματα, έχουν προστεθεί και οι διαδικασίες συντήρησης με τη μορφή κάθετων γραμμών. Το χρώμα είναι ανάλογο της συντήρησης όπως δείχνει και το υπόμνημα.



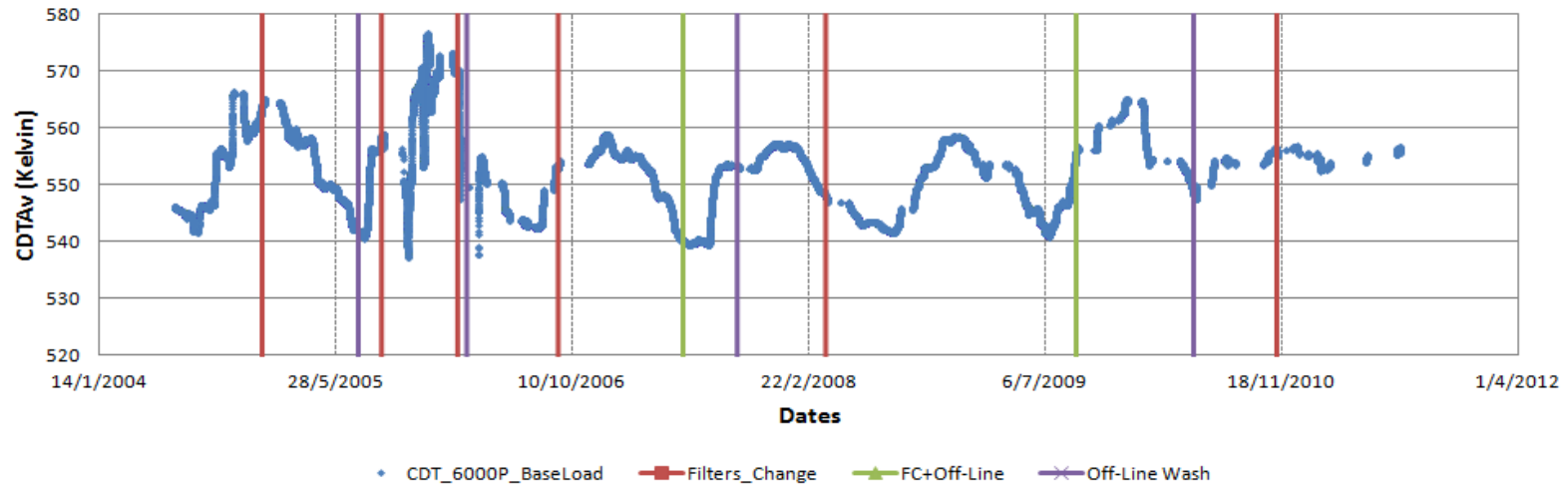
Σχήμα 3.30: Αποτελέσματα γραμμικής προσέγγισης CDP με φορτίο στον GT31 (moving average).



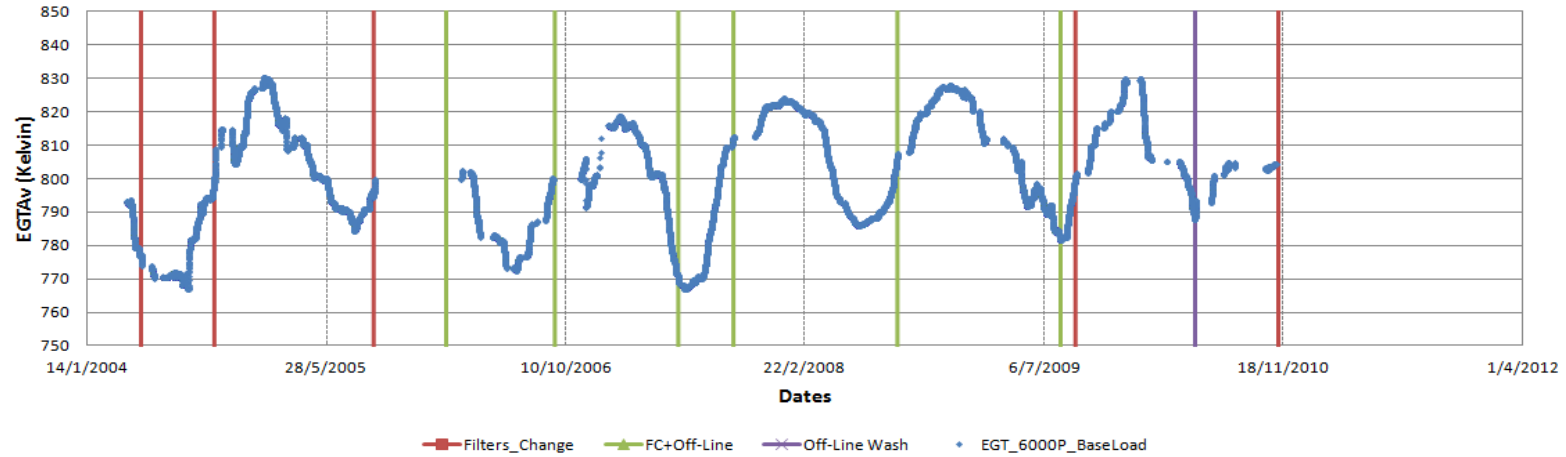
Σχήμα 3.31: Αποτελέσματα γραμμικής προσέγγισης CDP με φορτίο στον GT32 (moving average).



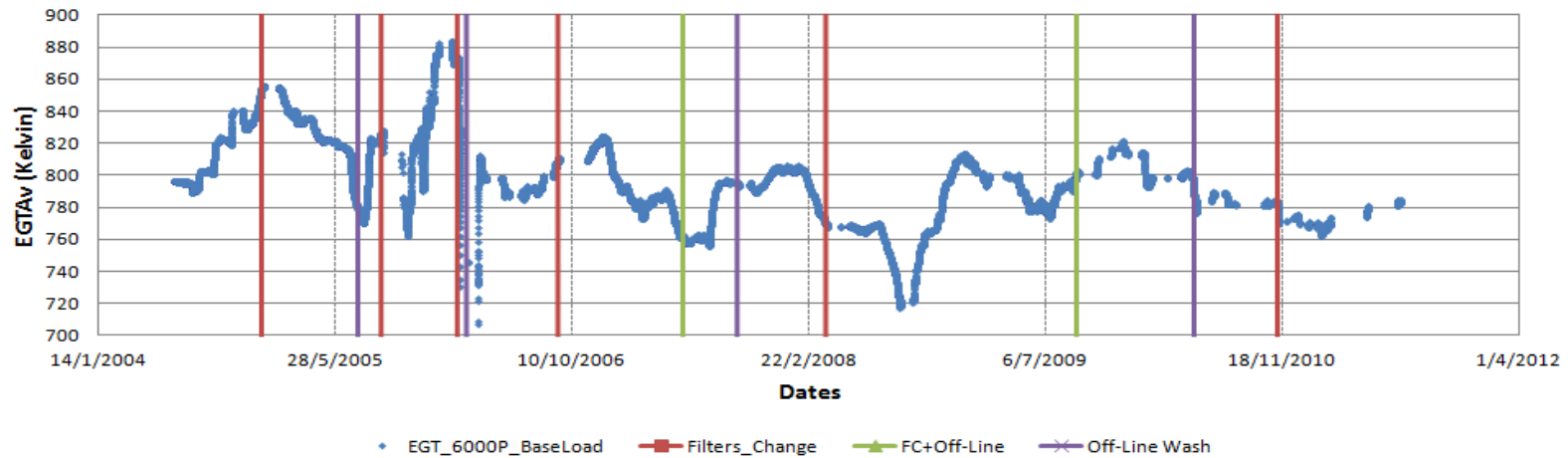
Σχήμα 3.32: Αποτελέσματα γραμμικής προσέγγισης CDT με φορτίο στον GT31 (moving average).



Σχήμα 3.33: Αποτελέσματα γραμμικής προσέγγισης CDT με φορτίο στον GT32 (moving average).

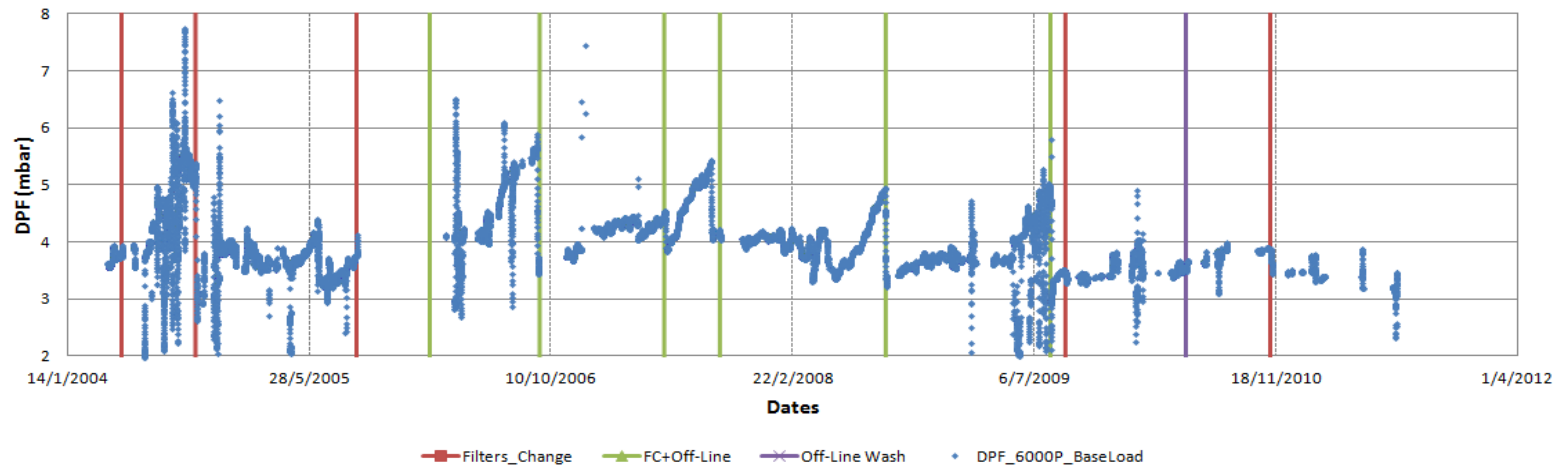


Σχήμα 3.34: Αποτελέσματα γραμμικής προσέγγισης EGT με φορτίο στον GT31 (moving average).

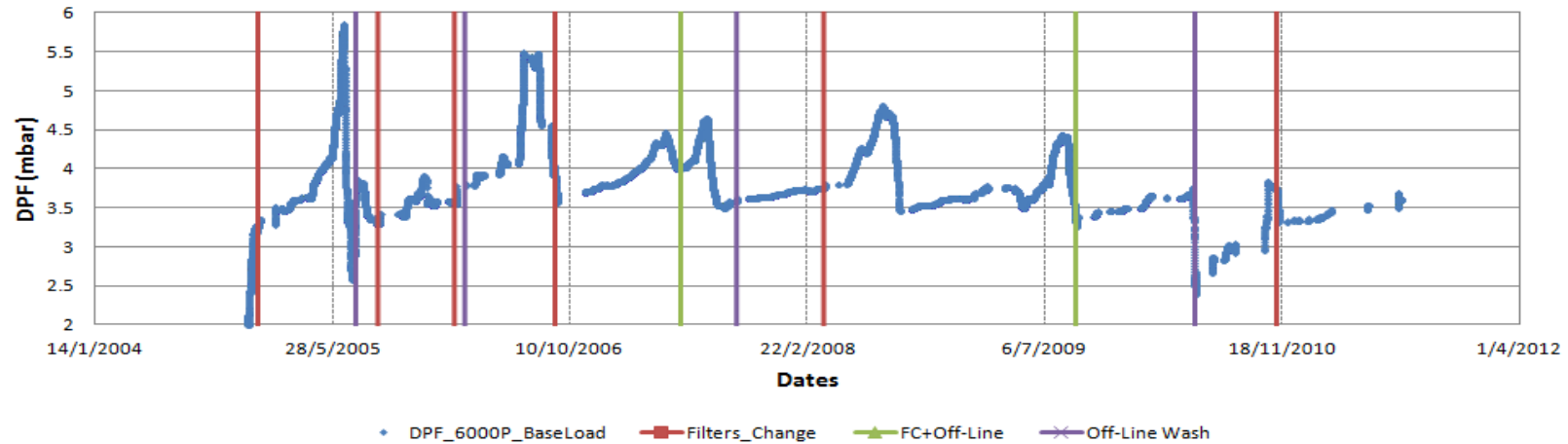


Σχήμα 3.35: Αποτελέσματα γραμμικής προσέγγισης EGT με φορτίο στον GT32 (moving average).





Σχήμα 3.36: Αποτελέσματα γραμμικής προσέγγισης DPF με φορτίο στον GT31 (moving average).



Σχήμα 3.37: Αποτελέσματα γραμμικής προσέγγισης DPF με φορτίο στον GT32 (moving average).

Από την παρατήρηση των γραφικών παραστάσεων (3.30 έως 3.37), προκύπτει ότι δεν είναι εύκολος ο ακριβής προσδιορισμός των ημερομηνιών που έγιναν οι συντηρήσεις. Αρκετά καλή εικόνα διαμορφώνεται από τα διαγράμματα όπου απεικονίζεται η μεταβολή των πέσεων CDP, DPF και της θερμοκρασίας CDT και για τις δύο μηχανές και κυρίως για τον αεριοστροβίλο GT31. Η πίεση CDP ακολουθεί πτωτική πορεία, εξαιτίας της σταδιακής χειροτέρευσης του κινητήρα, ενώ κάποιες στιγμές υπάρχει επαναφορά σε αποδεκτά επίπεδα τιμών. Οι εκτός ορίων τιμές της πίεσης για τον GT32 τα έτη 2008 και 2009, οφείλονται στη λανθασμένη πρόσκτηση των μετρήσεων από το σύστημα. Αντίστοιχα, η θερμοκρασία εξόδου από το συμπιεστή ακολουθεί επίσης πτωτική πορεία, εξαιτίας της επιβάρυνσης του κινητήρα, ενώ κάποια χρονικά σημεία οι τιμές επανέρχονται σε φυσιολογικά επίπεδα. Οι χρονικές, αυτές, στιγμές ταυτίζονται σε έναν ποσοστό και όχι απόλυτα, με τις ημερομηνίες διεξαγωγής συντηρήσεων.

Επιπλέον, στα διαγράμματα 3.36, 3.37 που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για τη διαφορά πίεσης στα φίλτρα εισόδου, συμπίπτουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό οι μεταβολές με τις ημερομηνίες των συντηρήσεων.

Από την άλλη πλευρά, στα διαγράμματα της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων και των δύο αεριοστροβίλων, είναι έντονη η σύγκριση μεταξύ της τάσης μεταβολής των μετρήσεων και των ημερομηνιών των συντηρήσεων. Ο λόγος είναι ότι η τεχνική της γραμμικής προσέγγισης με ελάχιστα τετράγωνα, εφαρμόστηκε σε όλο το πλήθος των δεδομένων χωρίς αυτά να διαχωριστούν σε ομάδες με βάση τις συντηρήσεις. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την ανάμιξη των δεδομένων που χρονικά βρίσκονταν πριν τις συντηρήσεις με τα δεδομένα που χρονικά ήταν μετά από αυτές. Άρα και της αποτύπωσης εσφαλμένης εικόνας της μεταβολής της τάσης των υπό μελέτη μεγεθών. Αυτό ήταν αναμενόμενο και εξαιτίας του ότι, όπως φαίνεται από τα σχήματα 3.28 και 3.29 της παραγράφου 3.2.3, οι μεταβολές της θερμοκρασίας EGT δεν συμβαδίζουν με τις συντηρήσεις, παρά το γεγονός ότι αυτές είχαν ληφθεί υπόψιν κατά την επεξεργασία, εξαιτίας της άμεσης εξάρτησης της από τη θερμοκρασία εισόδου στο στροβίλο, ΤΙΤ. Τα αποτελέσματα με σύγκριση από την εφαρμογή της μεθόδου της προσέγγισης μεταξύ των σημείων πριν τις συντηρήσεις και των σημείων μετά από τις συντηρήσεις ελαχιστοποιούνται μικραίνοντας το διάστημα εφαρμογής της μεθόδου (π.χ. 500 σημεία αντί για 3000 που εφαρμόστηκε).

Συνεπώς, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η γνώση και η χρήση των ημερομηνιών των συντηρήσεων στην επεξεργασία των δεδομένων συνεισφέρει καταλυτικά στην εξαγωγή καλύτερης ποιότητας αποτελεσμάτων, άρα και στην καλύτερη και πιο καθαρή απεικόνιση της μεταβολής της τάσης των μεγεθών που μελετώνται.

Επίσης, ο προσδιορισμός των χρονικών σημείων που πραγματοποιήθηκαν οι συντηρήσεις δεν είναι εύκολος. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα της παραγράφου αυτής με τα διαγράμματα της παραγράφου 3.2.3, φαίνεται έντονα η κάλυψη της

πλειοψηφίας των συντηρήσεων. Για παράδειγμα, η συντήρηση που διεξήχθη στις 16/9/2006 στον κινητήρα GT31 στο διάγραμμα μεταβολής της πίεσης CDP δεν είναι ορατή στο σχήμα 3.30, κάτι που δεν ισχύει για το διάγραμμα 3.23.

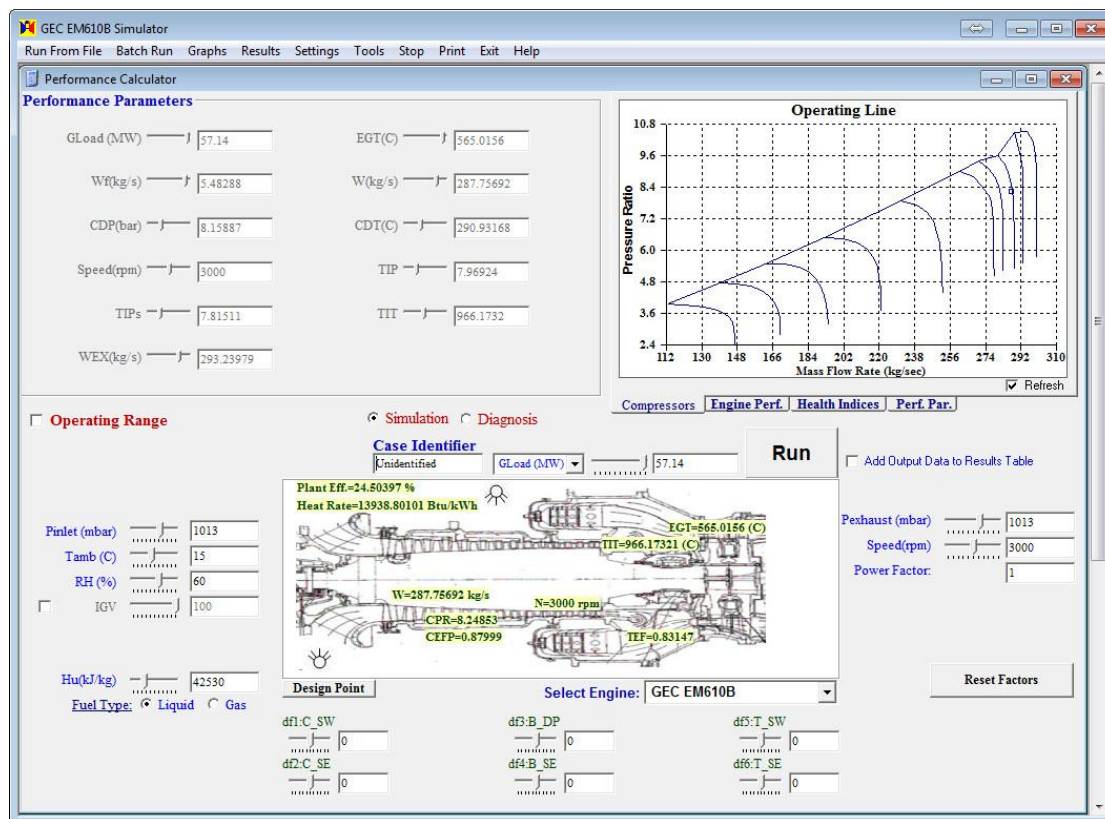
### **3.3 Παρεμβάσεις και βελτιώσεις του μοντέλου της μηχανής στο λογισμικό TEACHES.**

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία περιγραφή του λογισμικού TEACHES, καθώς και των παρεμβάσεων που πραγματοποιήθηκαν σε αυτό με σκοπό τη βελτίωση της λειτουργίας του μοντέλου της συγκεκριμένης μηχανής.

#### **3.3.1 Σύνοψη παρουσίαση του λογισμικού TEACHES.**

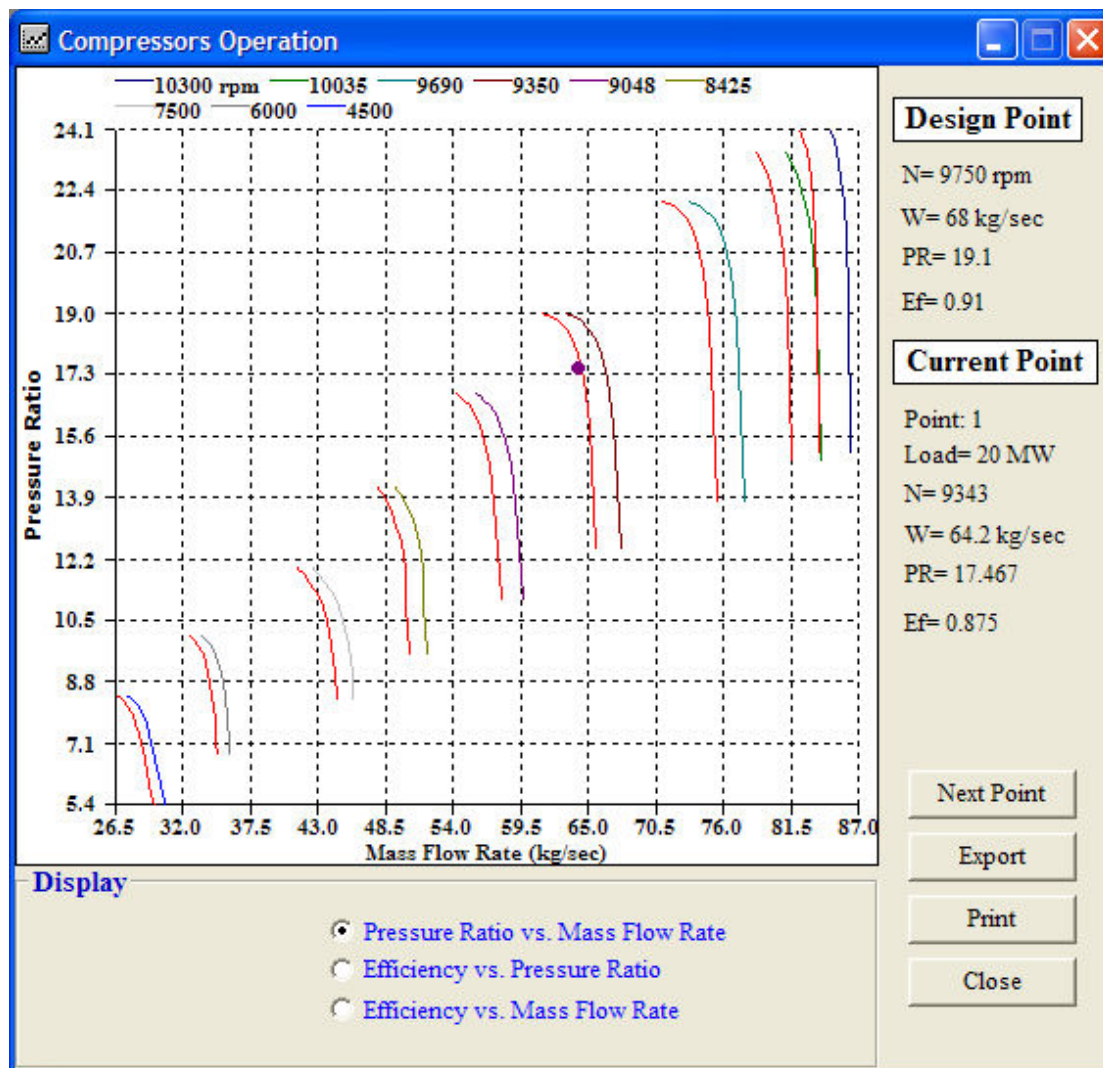
Το TEACHES είναι ένα λογισμικό που έχει αναπτυχθεί από το Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ, και προσφέρει τη δυνατότητα για προσομοίωση της λειτουργίας πολλών μοντέλων αεριοστροβίλων (ένας εκ των οποίων είναι και το GEC EM 610B της μονάδας III του Λαυρίου) σε οποιαδήποτε κατάσταση υγείας. Ειδικότερα, με την εισαγωγή κατάλληλων δεδομένων μπορεί να πραγματοποιήσει ευθεία προσομοίωση της λειτουργίας στροβιλομηχανής σε οποιοδήποτε σημείο λειτουργίας επιθυμεί ο χρήστης (Simulation Mode), ή και να κάνει διάγνωση της κατάστασης των συνιστωσών της μηχανής με την επεξεργασία διαθέσιμων μετρήσεων (Diagnostic Mode).

Από την κύρια επιφάνεια εργασίας του λογισμικού, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει το είδος της λειτουργίας που επιθυμεί, αλλά και να διαχειριστεί τα δεδομένα εισόδου και εξόδου, όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.38 που ακολουθεί. Επίσης, ο ρόλος των διαφόρων τμημάτων της κύριας επιφάνειας του λογισμικού διαφέρει ανάλογα με το είδος λειτουργίας που έχει επιλέξει ο χρήστης. Πιο συγκεκριμένα, τα σημεία λειτουργίας είναι πάντα δεδομένα εισόδου, ενώ οι μετρήσεις είναι αρχεία εξόδου σε λειτουργία προσομοίωσης και εισόδου σε λειτουργία διάγνωσης.



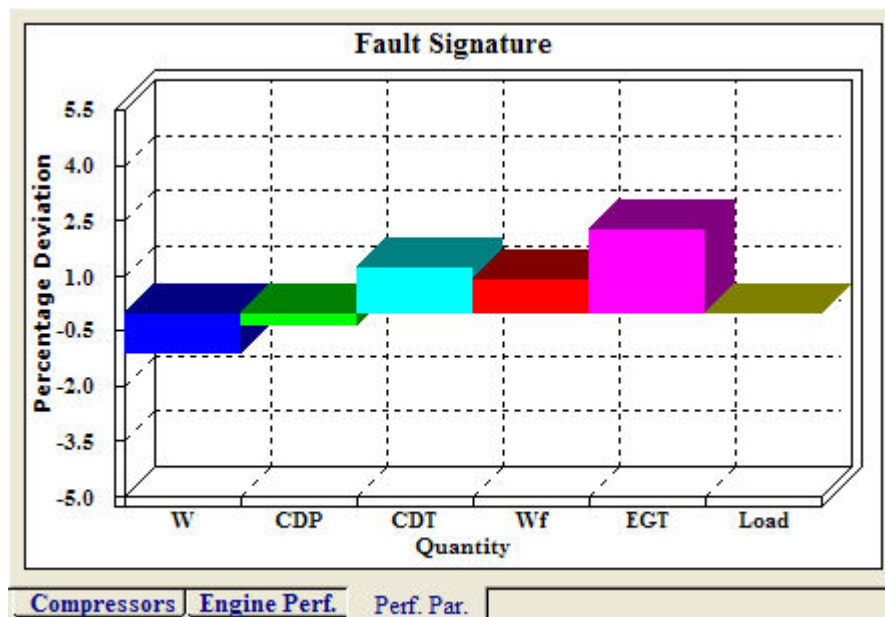
Σχήμα 3.38: Κύρια επιφάνεια του λογισμικού TEACHES.

Επιπλέον, με το TEACHES δίνεται η δυνατότητα για προσομοίωση βλάβης και συγκεκριμένα την επίδραση διαφόρων βλαβών στην λειτουργία των συνιστωσών (συμπιεστή-στροβίλου) του αεριοστροβίλου. Αυτό επιτυγχάνεται με τις κατάλληλες τροποποιήσεις στις χαρακτηριστικές των συνιστωσών. Οι χαρακτηριστικές που προκύπτουν μπορούν να απεικονιστούν στο ίδιο διάγραμμα με τις αρχικές, οπτικοποιώντας καλύτερα τη μεταξύ τους διαφορά (σχήμα 3.39).



Σχήμα 3.39: Σύγκριση χαρακτηριστικών συμπιεστή με βλάβη και χωρίς βλάβη.

Οι αποκλίσεις από την ονομαστική λειτουργία μιας συνιστώσας εισάγονται στην κύρια επιφάνεια του λογισμικού. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η αποτύπωση της "υπογραφής" μίας βλάβης. Για παράδειγμα, για επιλογή της τιμής 0.97 για την παράμετρο υγείας  $f_1$ , η οποία δηλώνει μείωση της απορροφόμενης παροχής από το συμπιεστή κατά 3% αποτυπώνεται από το λογισμικό η "υπογραφή" της συγκεκριμένης βλάβης, δηλαδή η συμπεριφορά των υπό μελέτη μετρήσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.40.



Σχήμα 3.40: Υπογραφή βλάβης για μείωση της παροχής του συμπιεστή κατά 3%.

### 3.3.2 Παρεμβάσεις στο μοντέλο μηχανής στο λογισμικό TEACHES.

Αρχικά, πρέπει να σημειωθεί ότι οι δύο κινητήρες της μονάδας III του Λαυρίου λειτουργούν σε σταθερό φορτίο, και συγκεκριμένα είτε σε φορτίο βάσης, δηλαδή στο ονομαστικό φορτίο, είτε στο 50% αυτού. Αυτό εξαρτάται από τη ζήτηση την εκάστοτε χρονική περίοδο. Επίσης, οι μηχανικές στροφές των δύο κινητήρων μπορούν να θεωρηθούν πρακτικά σταθερές, και ίσες με 3000.

Ο υπάρχων χάρτης λειτουργίας του συμπιεστή αποτελείται μόνο από τρεις χαρακτηριστικές. Υπενθυμίζεται, ότι κατά μήκος μίας καμπύλης στο χάρτη λειτουργίας, οι στροφές παραμένουν σταθερές. Ενώ, από αριστερά προς τα δεξιά του χάρτη, δηλαδή με την αύξηση της ανηγμένης παροχής, αυξάνονται και οι ανηγμένες στροφές.

Το διαγνωστικό πρόγραμμα TEACHES, χρησιμοποιεί τον χάρτη του συμπιεστή του αεριοστροβίλου κατά τη διαδικασία της προσμοίωσης, με σκοπό την εικονική λειτουργία του κινητήρα και τον υπολογισμό παραμέτρων και μεγεθών, που χαρακτηρίζουν την κατάσταση του. Επομένως, αν ο χάρτης του συμπιεστή δεν είναι πλήρης, τότε και η προσμοίωση από το λογισμικό θα είναι ελλιπής. Ο χάρτης λειτουργίας του συμπιεστή θεωρείται πλήρης, όταν καλύπτει πολλά και διαφορετικά σημεία λειτουργίας του αεριοστροβίλου.

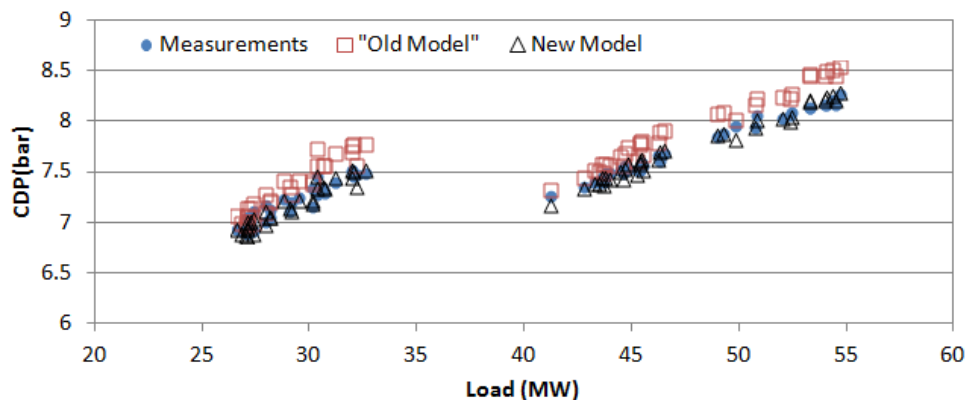
Για να λυθεί το πρόβλημα αυτό, είναι αναγκαίο να κατασκευαστούν επιπλέον καμπύλες λειτουργίας στο χάρτη του συμπιεστή. Αυτό

πραγματοποιήθηκε από το ΕΘΣ, με τη χρήση δεδομένων για διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν τα δεδομένα του αεριοστροβίλου GT31 για το έτος 2007 όπου η λειτουργία του καλύπτει σχεδόν ολόκληρο το ημερολογιακό έτος, άρα και το εύρος των θερμοκρασιών περιβάλλοντος ήταν το μεγαλύτερο δυνατό. Έτσι, παρά τις σταθερές μηχανικές στροφές, οι ανηγμένες στροφές μεταβάλλονται, όπως προκύπτει από τον ορισμό τους (Volponi, 1999):

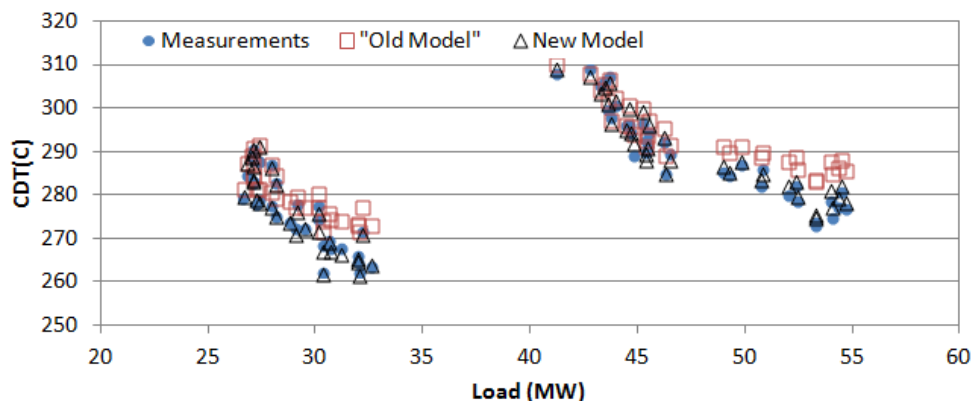
$$N_{corrected} = \frac{N}{\sqrt{\theta}} \quad (3.8)$$

Όπου  $N$  οι μηχανικές στροφές σε RPM και  $\theta$  ο λόγος  $\frac{T_{amb,meas}}{T_{ref}}$ . Ο αριθμητής είναι η εκάστοτε θερμοκρασία περιβάλλοντος και ο παρανομαστής η θερμοκρασία τυπικής ημέρας, που είναι ίση με 288.15 Kelvin.

Με τον τρόπο αυτόν, οι νέοι χάρτες λειτουργίας των συμπιεστών των δύο κινητήρων, που δημιουργήθηκαν από το ΕΘΣ, αποτελούνται από περισσότερες καμπύλες λειτουργίας. Το λογισμικό TEACHES που χρησιμοποιεί τους νέους χάρτες λειτουργίας, πετυχαίνει πλέον καλύτερη προσομοίωση. Στα δύο σχήματα (3.41-3.42) που ακολουθούν παρουσιάζεται ενδεικτικά η βελτιωμένη προσομοίωση που παρέχει το μοντέλο της μηχανής στο λογισμικό TEACHES. Χαρακτηριστικά στο σχήμα 3.41 όπου απεικονίζεται η πίεση εξόδου του συμπιεστή (CDP) του GT31 συναρτήσει του φορτίου, φαίνεται καθαρά ότι οι εκτιμώμενες τιμές από το νέο μοντέλο σχεδόν ταυτίζονται με τις μετρήσεις, ενώ παράλληλα φαίνονται και οι εκτιμήσεις του παλιού μοντέλου. Ενώ, στο σχήμα 3.42 φαίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη θερμοκρασία CDT του GT31. Και πάλι είναι διακριτά τα βελτιωμένα αποτελέσματα της νέας προσομοίωσης. Στις επόμενες παραγράφους θα γίνει μία παρουσίαση των αποτελεσμάτων της νέας προσαρμογής από το TEACHES.



Σχήμα 3.41: Σύγκριση αποτελεσμάτων παλιάς και νέας προσομοίωσης με μετρήσεις CDP στον GT31.



Σχήμα 3.42: Σύγκριση αποτελεσμάτων παλιάς και νέας προσομοίωσης με μετρήσεις CDT στον GT31.

### 3.3.3 Αποτελέσματα βελτιωμένης προσομοίωσης από το TEACHES για τον αεριοστρόβιλο GT31.

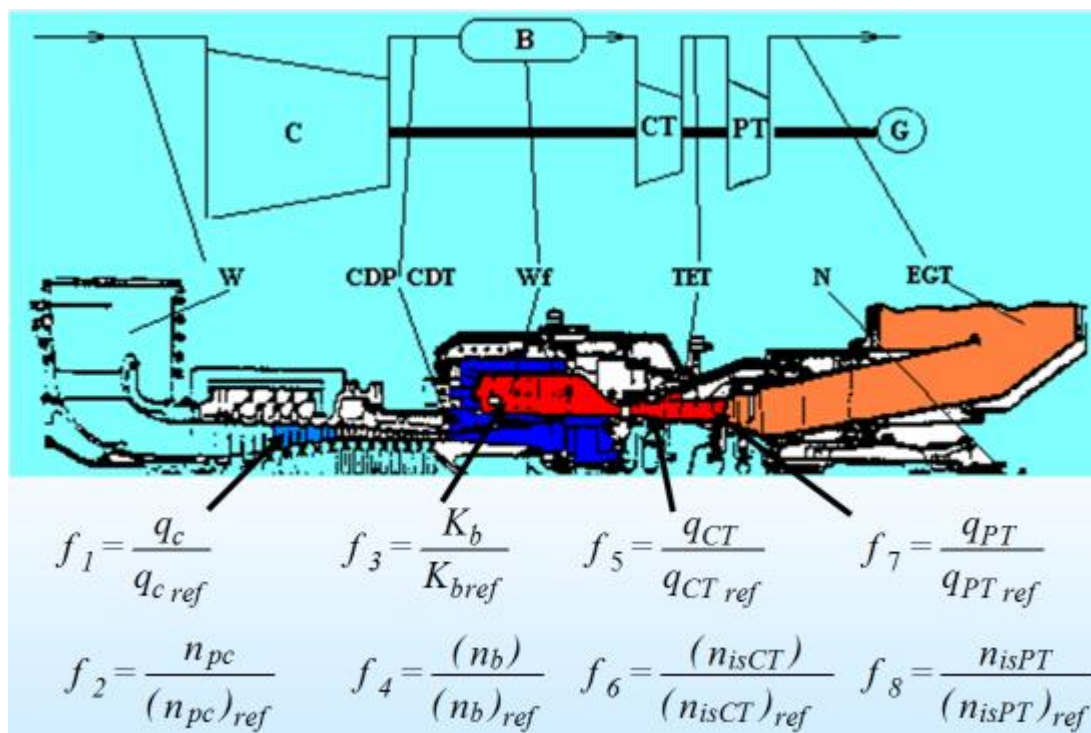
Στην παράγραφο αυτή, θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων της βελτιωμένης προσομοίωσης που πραγματοποιεί το λογισμικό TEACHES για τον κινητήρα GT31.

Σκοπός είναι η λειτουργία του λογισμικού σε λειτουργία διάγνωσης, γι αυτό και σαν δεδομένα εισόδου, δημιουργήθηκαν αρχεία από το σύνολο των μετρήσεων τα οποία προέρχονται από περιόδους σταθερής λειτουργίας των αεριοστροβίλων (Steady state) είτε σε φορτίο βάσης είτε στο 50% αυτού, απορρίπτοντας μετρήσεις κατά την μεταβατική λειτουργία (Transit state). Επίσης, κατά την προσομοίωση της λειτουργίας των δύο αεριοστροβίλων υπολογίστηκαν από το λογισμικό οι παράμετροι υγείας  $f_1, f_2$  και  $f_6$ , με τη χρήση των μετρήσεων CDP, CDT και EGT. Ως παράμετρος υγείας ορίζεται ο λόγος της μετρούμενης τιμής του μεγέθους προς την τιμή του στην υγιή λειτουργία. Προφανώς, όσο πιο υγιής είναι η συνιστώσα, τόσο οι παράμετροι τείνουν στη μονάδα.

$$f_i = \frac{f_{meas}}{f_{ref}} \quad (3.9)$$

Οι παράμετροι υγείας  $f_1, f_2$  αποτελούν ένδειξη της παροχής και του βαθμού απόδοσης του συμπιεστή, ενώ ο  $f_6$  του βαθμού απόδοσης του στροβίλου, όπως φαίνεται από το σχήμα 3.43.

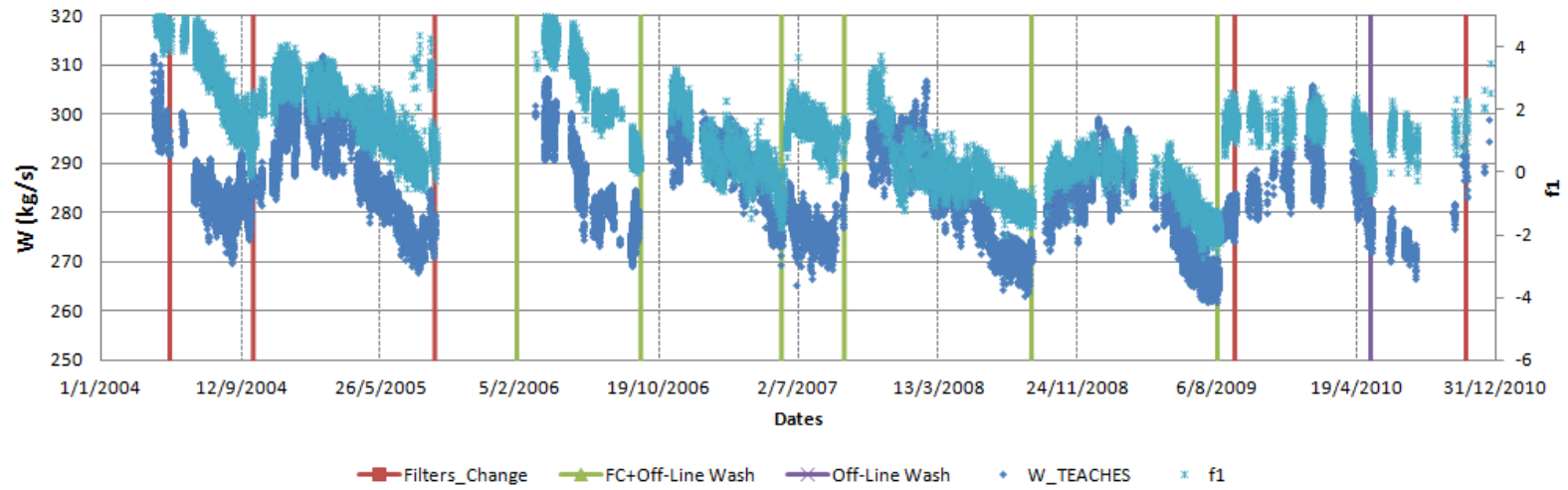




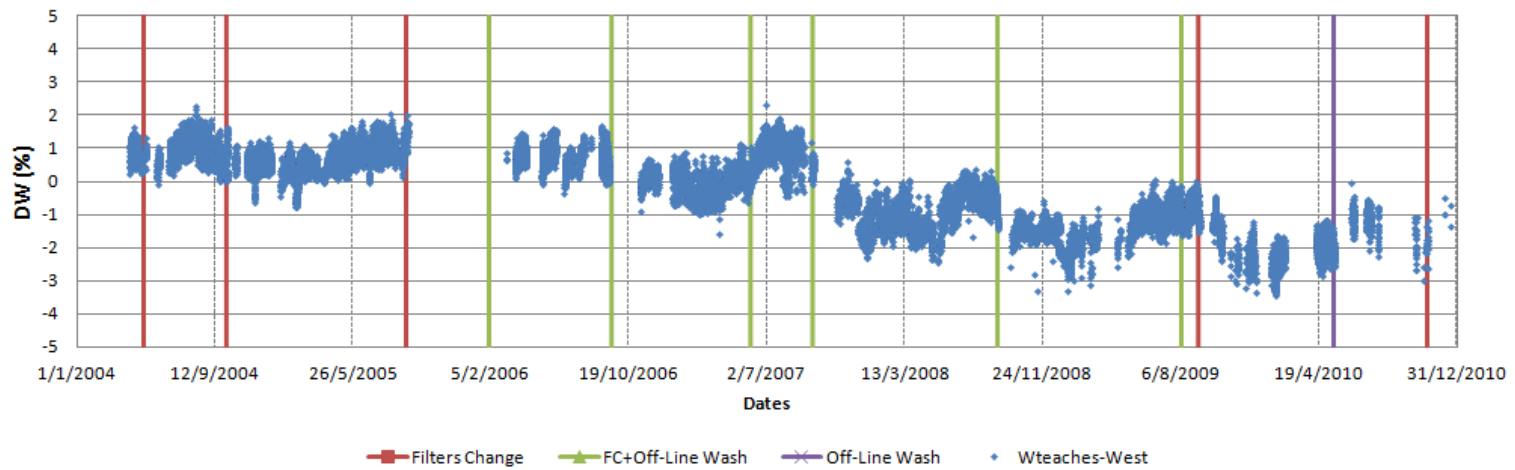
Σχήμα 3.43: Παράμετροι υγείας αεριοστροβίλου (Κ.Μαθιουδάκης, Διαγνωστική Αεριοστροβίλων, 2007).

Ως αρχείο εξόδου σε λειτουργία διάγνωσης, προκύπτουν ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία και υπολογισμούς από το λογισμικό, μεγέθη τα οποία είναι ενδεικτικά της κατάστασης του κινητήρα αλλά και του πώς αυτή μεταβάλλεται. Ένα τέτοιο μέγεθος είναι η παροχή του αέρα που απορροφά ο συμπιεστής.

Στη συνέχεια, στο σχήμα 3.44 απεικονίζονται η μεταβολή της παροχής που υπολογίζεται από το TEACHES, καθώς και η μεταβολή της αντίστοιχης παραμέτρου υγείας  $f_1$ . Η παράμετρος  $f_1$  ακολουθεί σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό την τάση της παροχής.



Σχήμα 3.44: Εκτιμώμενη (TEACHES) παροχή εισόδου στο συμπιεστή και παράμετρος υγείας f1 για τον GT31.



Σχήμα 3.45: Ποσοστιαία διαφορά εκτιμώμενης παροχής (TEACHES) και υπολογισμένης παροχής για τον GT31.

Στο σχήμα 3.45 παρουσιάζεται σε ποσοστό επί τοις εκατό, η διαφορά της υπολογιζόμενης παροχής από την εκτιμώμενη από το λογισμικό TEACHES, παροχή αέρα εισόδου στο συμπιεστή. Ο υπολογισμός της παροχής έγινε με τη χρήση της δυναμικής πίεσης Pt-Ps1. Η μέτρηση, αυτή, είναι διαθέσιμη από το σύστημα, όπως φαίνεται και από τον πίνακα 3.2, και δείχνει τη διαφορά πίεσης μετά τα φίλτρα και πριν τα οδηγία πτερύγια IGVs. Ο ορισμός της δυναμικής πίεσης, όπως είναι γνωστό, είναι (Κ.Δ. Παπαηλιού, 2000):

$$DP = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 \quad (3.10)$$

Όπου  $u$  είναι η ταχύτητα του εργαζόμενου μέσου και  $\rho$  η πυκνότητα αυτού, όπως υπολογίζεται από τη σχέση (3.11 με χρήση των μετρήσεων περιβάλλοντος, και της σταθεράς  $R$  των αερίων ( $R=287$  J/kgK).

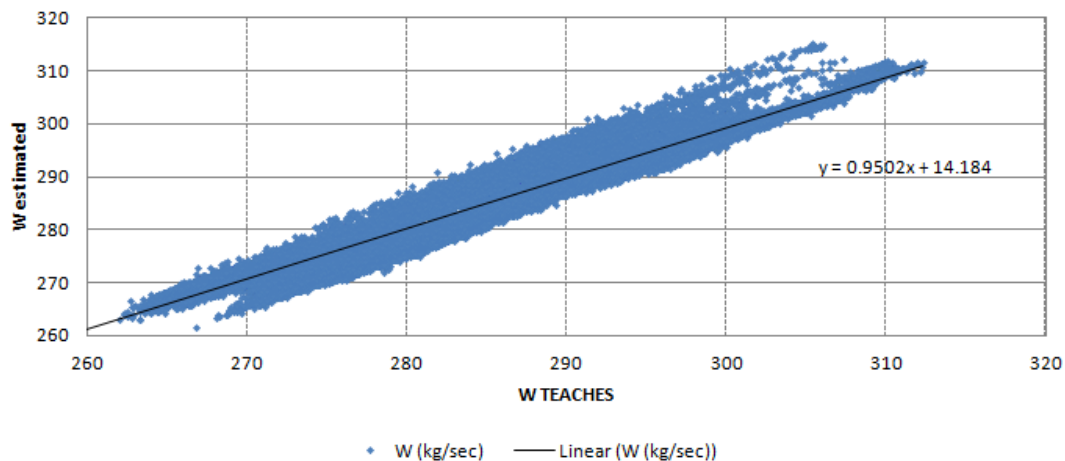
$$\rho = \frac{P_{amb}}{R \cdot T_{amb}} \quad (3.11)$$

Στη συνέχεια, αφού υπολογιστεί η ταχύτητα  $u$  από τη σχέση (3.10, γίνεται εκτίμηση της παροχής εισόδου από τη σχέση (3.12 (Κ.Δ. Παπαηλιού, 2000), όπου  $A$  είναι η διατομή εισόδου (περίπου  $1.65$  m<sup>2</sup>):

$$w = \rho \cdot u \cdot A \quad (3.12)$$

Σκοπός της σύγκρισης των δύο παροχών, είναι να εκτιμηθεί πόσο επιτυχημένα γίνεται η προσομοίωση από το TEACHES. Παρατηρώντας τη ποσοστιαία διαφορά των δύο παροχών, προκύπτει ότι η προσομοίωση γίνεται σε αρκετά ικανοποιητικά βαθμό, αφού η απόκλιση κυμαίνεται κατά κύριο λόγο στο 1%, ενώ μερικές φορές φτάνει, αλλά δεν ξεπερνάει το 3%.

Στο διάγραμμα 3.46, απεικονίζεται η εκτιμώμενη παροχή από το TEACHES στον άξονα των τετμημένων και η υπολογιζόμενη στον άξονα των τεταγμένων. Η πολύ καλή προσέγγιση της παροχής από το TEACHES φαίνεται από το γεγονός ότι η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει τα σημεία, είναι πολύ κοντά στη μονάδα (0.9502).



**Σχήμα 3.46: Συσχέτιση εκτιμώμενης από το TEACHES παροχής και υπολογιζόμενης από μετρήσεις, του κινητήρα GT31.**

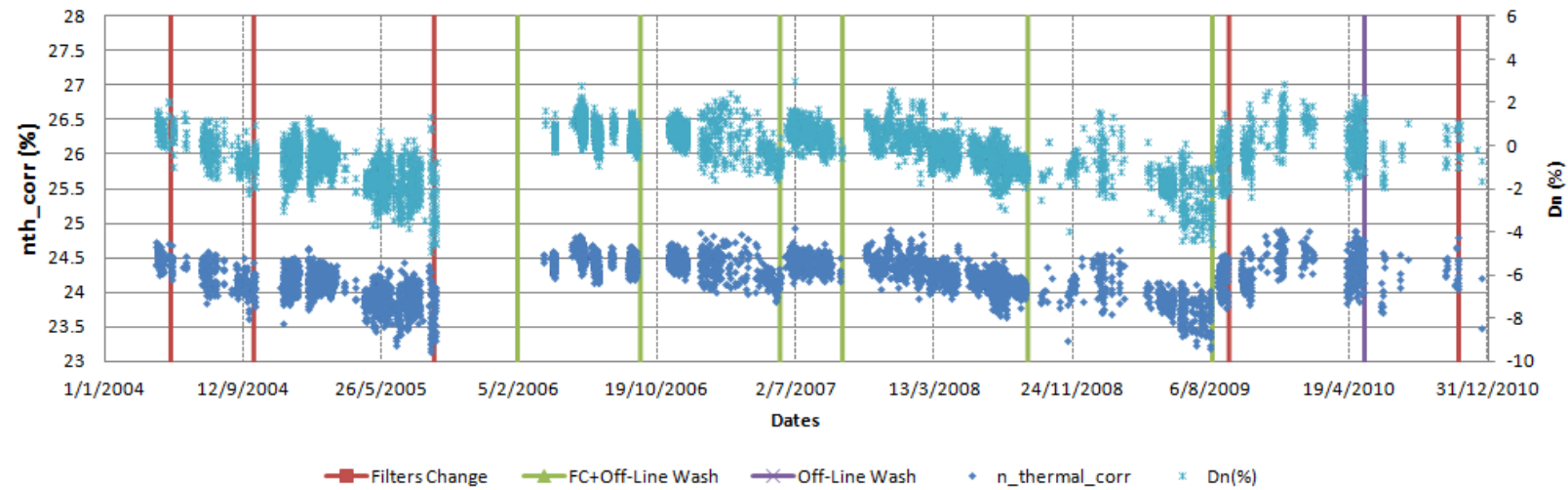
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του θερμικού βαθμού απόδοσης του αεριοστροβίλου GT31, όπως υπολογίστηκε από το λογισμικό TEACHES, καθώς και οι παράμετροι υγείας  $f_2$ ,  $f_6$ , οι οποίοι αντιστοιχούν στο βαθμό απόδοσης του συμπιεστή και του στροβίλου, αντίστοιχα.

Για τη δημιουργία καλύτερης εικόνας γύρω από τη συμπεριφορά και την τάση μεταβολής του θερμικού βαθμού απόδοσης, ήταν αναγκαία η διόρθωση του στις συνθήκες αναφοράς. Η διόρθωση έγινε με τη χρήση της Ροής Θερμότητας (Heat Rate), όπως αυτή υπολογίστηκε από την αντίστοιχη καμπύλη διόρθωσης (Σχήμα 3.10, GEC) και με τη χρήση του τύπου:

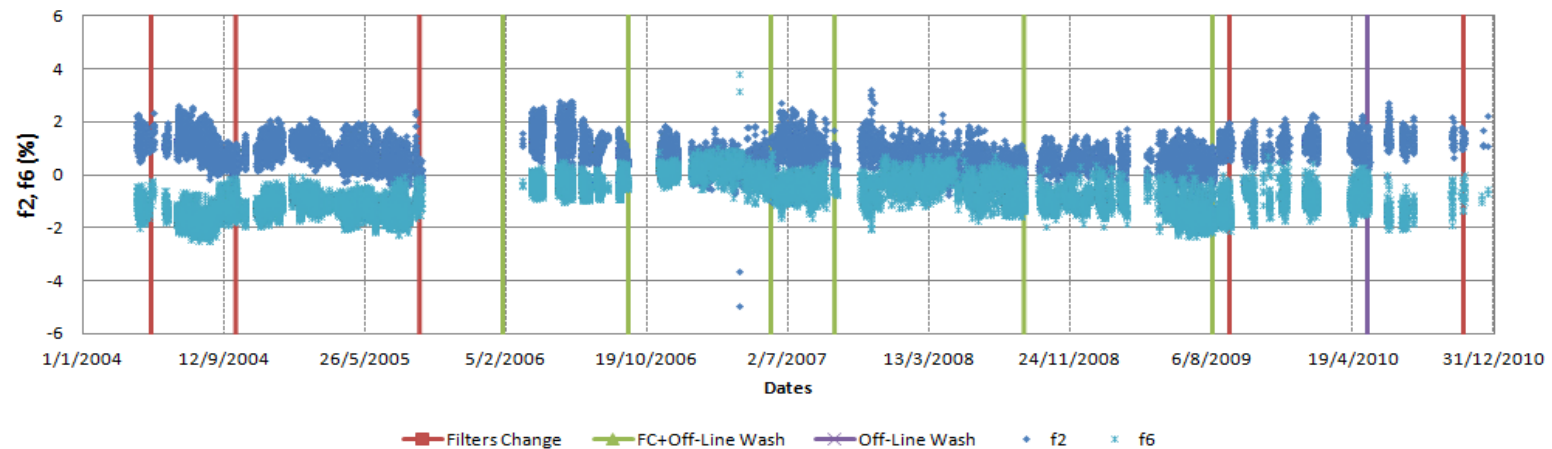
$$n_{th,corr} = n_{th} \cdot \frac{HR_{meas}}{HR_{ref}} \quad (3.13)$$

Στο διάγραμμα 3.47, που ακολουθεί απεικονίζεται ο διορθωμένος θερμικός βαθμός απόδοσης του κινητήρα GT31, ενώ παράλληλα παρουσιάζεται και η διαφορά του, επί τοις εκατό, από τον βαθμό απόδοσης χωρίς αυτός να έχει υποστεί διόρθωση. Οι εκτιμήσεις αφορούν μετρήσεις, όταν ο κινητήρας δούλευε σε φορτίο βάσης.

Στο σχήμα 3.48, παριστάνεται γραφικά η μεταβολή των παραγόντων υγείας  $f_2$  και  $f_6$  οι οποίοι εκφράζουν την κατάσταση του βαθμού απόδοσης του συμπιεστή και του στροβίλου, αντίστοιχα. Είναι φανερή η θετική επίδραση των συντηρήσεων, στις δύο συνιστώσες, και κυρίως στο συμπιεστή, όπως είναι λογικό, αφού οι συντηρήσεις, αφορούν κατά κύριο λόγο την κατάσταση του (Off-Line πλύσιμο).



Σχήμα 3.47: Διορθωμένος βαθμός απόδοσης και επί τοις εκατό διαφορά του από τον εκτιμώμενο (TEACHES), για τον GT31.



Σχήμα 3.48: Παράμετροι υγείας f2,f6 για τον κινητήρα GT31.

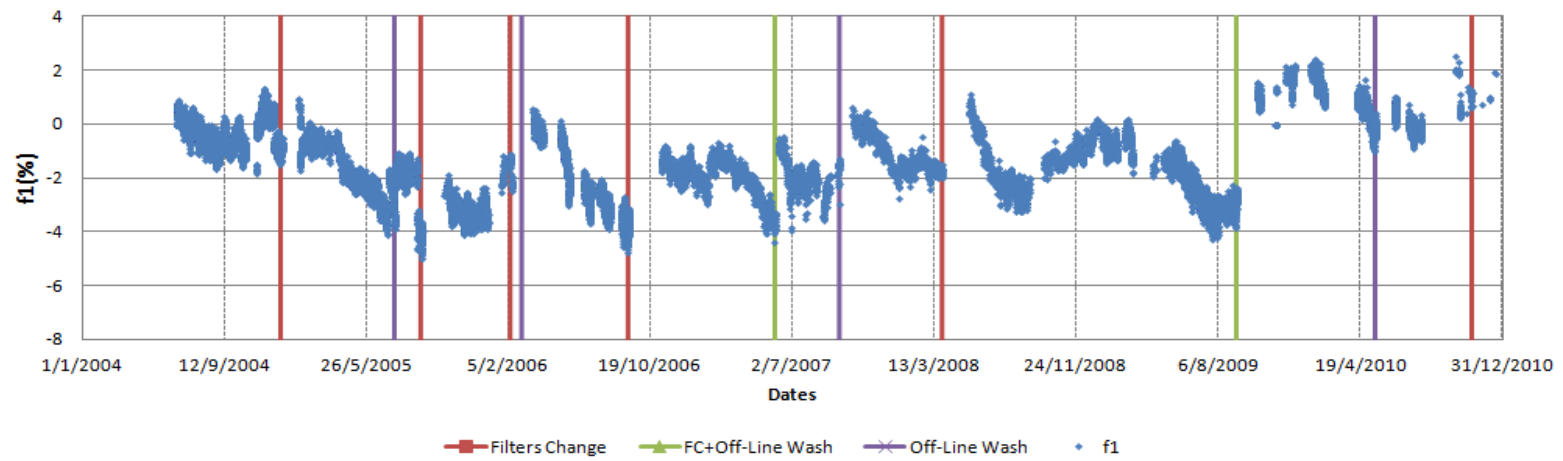
### **3.3.4 Αποτελέσματα βελτιωμένης προσομοίωσης από το TEACHES για τον αεριοστρόβιλο GT32.**

Στην παράγραφο αυτή, γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τον αεριοστρόβιλο GT32, όπως έγινε για τον GT31 στην παράγραφο 3.3.3.

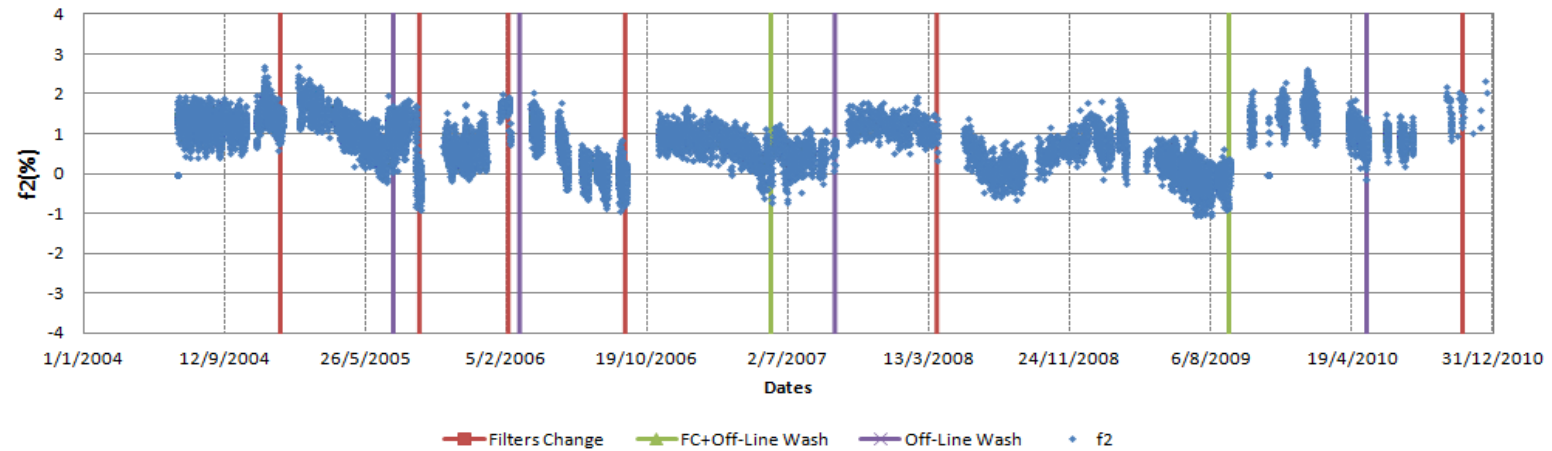
Ο λόγος που παρουσιάζονται ξεχωριστά, είναι ότι η λειτουργία προσομοίωσης από το TEACHES έγινε με τη χρήση διαφορετικών μετρήσεων, και συγκεκριμένα των θερμοκρασιών CDT, EGT και της παροχής  $W$  αντί για την πίεση CDP, της οποίας η τιμή, όπως είχε αναφερθεί και στην παράγραφο 3.2.3, τα έτη 2008 και 2009 βρίσκεται εκτός ορίων, πιθανόν λόγω βλάβης του υπεύθυνου μετρητικού οργάνου. Και πάλι η παροχή υπολογίζεται από το λογισμικό υπολογίζονται, όπως και οι ίδιοι παράμετροι υγείας  $f1$ ,  $f2$  και  $f6$ .

Στα σχήματα 3.49, 3.50, και 3.451 που ακολουθούν, φαίνεται η μεταβολή με το χρόνο των παραμέτρων  $f1$ ,  $f2$ , και  $f6$ , αντίστοιχα. Από την παρατήρηση των  $f1$ ,  $f2$  είναι αισθητή η συμβολή των συντηρήσεων, και κυρίως στον παράγοντα  $f1$  που αντιστοιχεί στην παροχή που διέρχεται από το συμπιεστή του GT32.

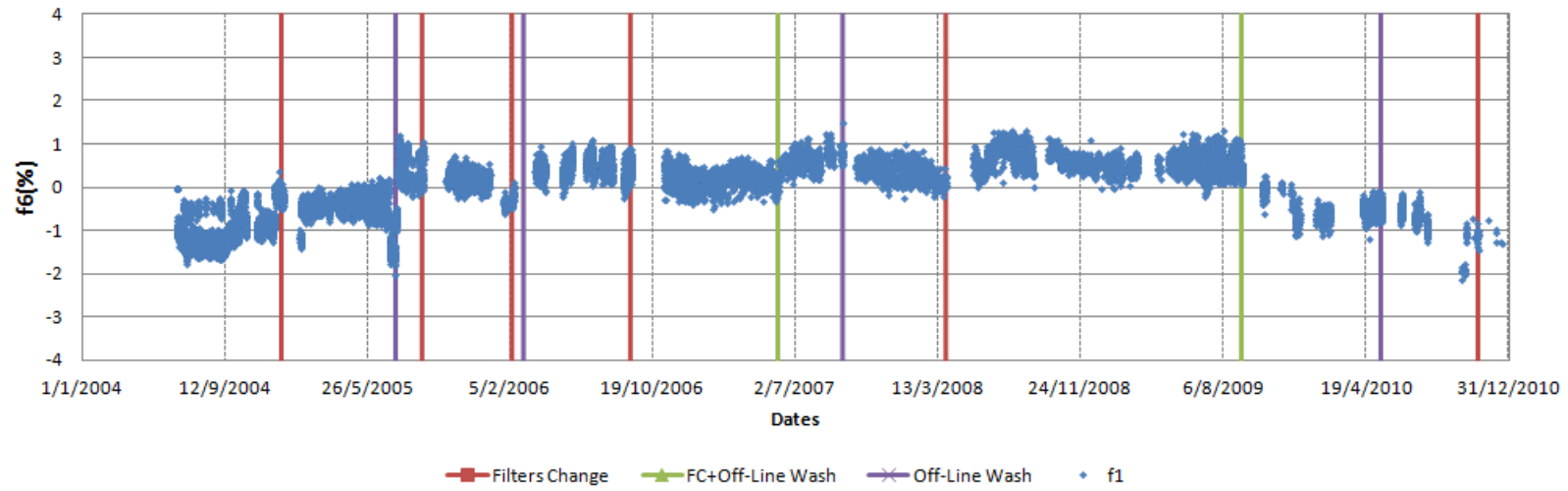
Την ίδια λογική ακολουθεί και ο θερμικός βαθμός απόδοσης του σχήματος 3.52, ο οποίος έχει υπολογιστεί από το λογισμικό TEACHES και έχει διορθωθεί με βάση τη σχέση (3.13).



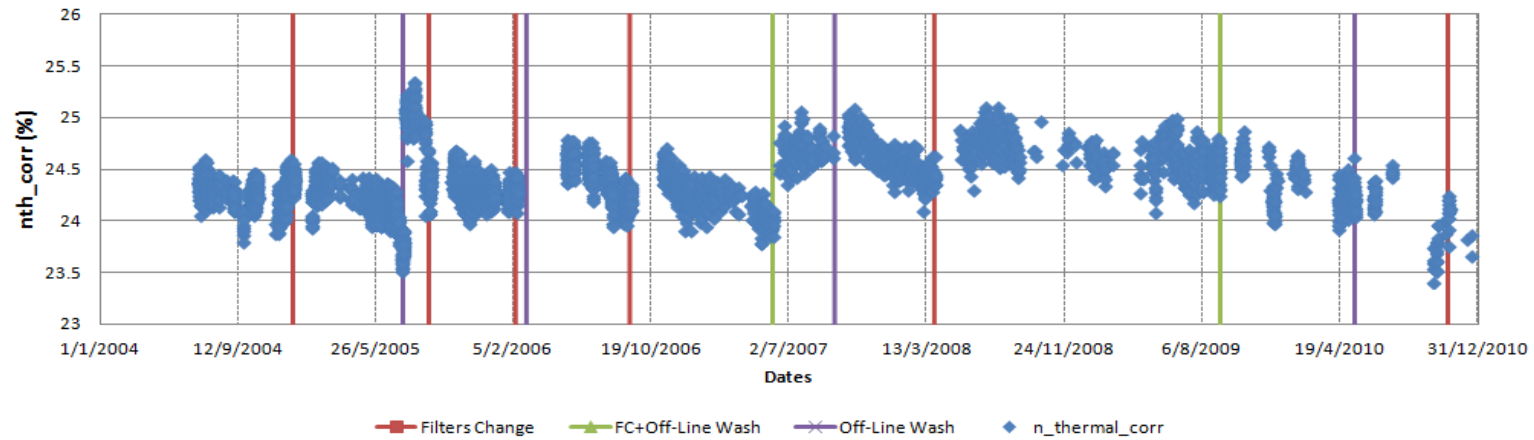
Σχήμα 3.49: Μεταβολή παράγοντα υγείας  $f_1$  αεριοστροβίλου GT32.



Σχήμα 3.50: Μεταβολή παράγοντα υγείας  $f_2$  αεριοστροβίλου GT32.



Σχήμα 3.51: Μεταβολή παράγοντα υγείας  $f_6$  για τον αεριοστρόβιλο GT32.



Σχήμα 3.52: Διορθωμένος θερμικός βαθμός απόδοσης αεριοστρόβιλου GT32.

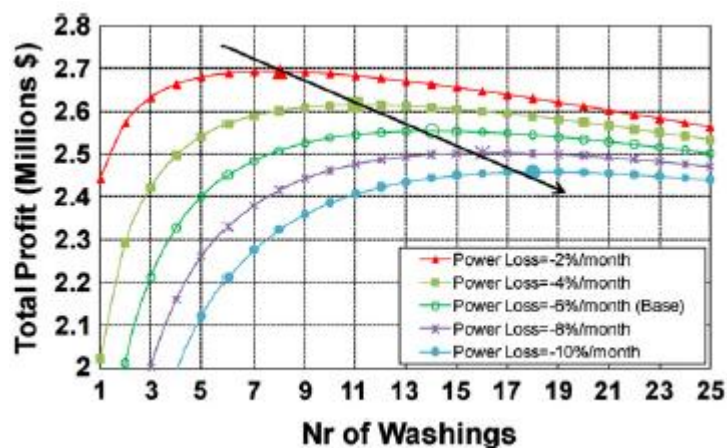


### 3.3.5 Αποτελέσματα και σύγκριση μεγεθών συνολικών επιδόσεων για τους αεριοστροβίλους GT31 και GT32.

Στην συγκεκριμένη παράγραφο μελετώνται οι μεταβολές του φορτίου και του βαθμού απόδοσης των δύο μηχανών.

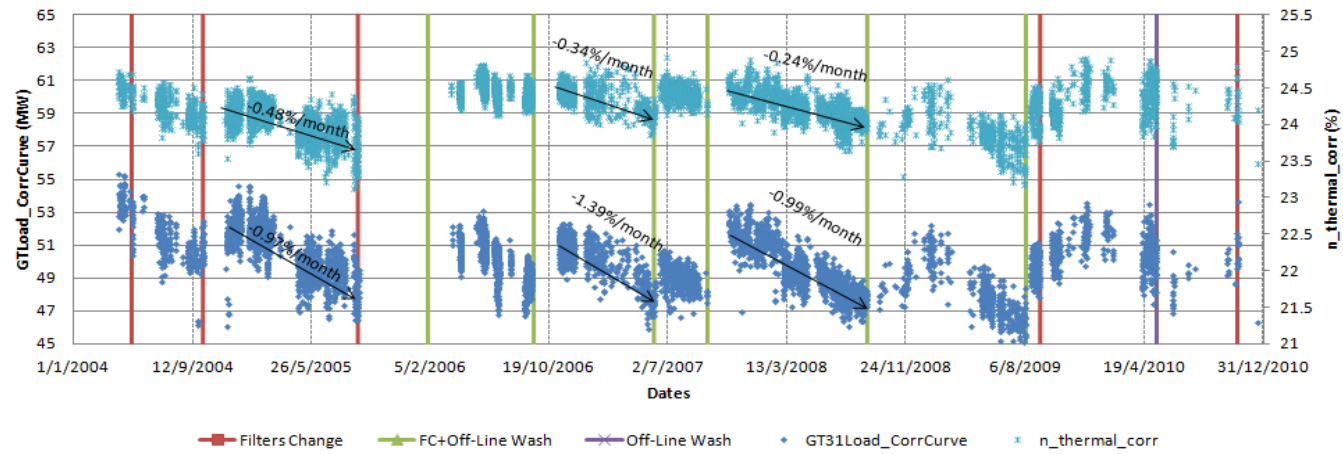
Τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στις γραφικές παραστάσεις 3.54 και 3.55 έχουν φιλτραριστεί ώστε να απεικονίζεται μόνο το διορθωμένο φορτίο βάσης και ο αντίστοιχος διορθωμένος θερμικός βαθμός απόδοσης κάθε αεριοστροβίλου, στο ίδιο διάγραμμα. Η διόρθωση του φορτίου έγινε με τις καμπύλες διόρθωσης (GEC), ενώ του βαθμού απόδοσης από τη σχέση (3.13).

Είναι ορατή η σταδιακή χειροτέρευση των δύο κινητήρων, καθώς και η βελτίωση που προσφέρουν οι συντηρήσεις. Επίσης, έχουν επιλεγεί διαστήματα για κάθε αεριοστροβίλο, όπου υπολογίζεται ο ρυθμός υποβάθμισης του βαθμού απόδοσης και του φορτίου. Μία μέση τιμή του ρυθμού υποβάθμισης του φορτίου, για τον αεριοστροβίλο GT31, είναι 1.12% ανά μήνα λειτουργίας, ενώ για τον GT32 είναι περίπου 1.54%. Με βάση τα ποσοστά υποβάθμισης του φορτίου κάθε κινητήρα, και του σχήματος 3.53 προκύπτει ότι ο βέλτιστος αριθμός Off-Line πλυσιμάτων του κάθε συμπιεστή είναι περίπου 7 το χρόνο, αν η μηχανή λειτουργεί καθόλη τη διάρκεια του (N.Αρετάκης, 2012). Ο βέλτιστος αριθμός πλυσιμάτων προκύπτει με βάση το μέγιστο κέρδος που θα αποφέρει η εφαρμογή των πλυσιμάτων αυτών, όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.53. Ο αριθμός των πλυσιμάτων είναι προσεγγιστικός, δεδομένου ότι η συγκεκριμένη βιβλιογραφία αναφέρεται σε άλλο μοντέλο κινητήρα. Σε αυτό το σημείο, πρέπει να σημειωθεί ότι, με βάση το διαθέσιμο ιστορικό των συντηρήσεων, ο μέγιστος αριθμός Off-Line πλυσιμάτων των συμπιεστών των δύο μηχανών είναι 2 ανά έτος, ενώ ο ρυθμός των ON-Line πλυσιμάτων, ήταν σταθερός και συγκεκριμένα ήταν ένα πλύσιμο ανά επτά ημέρες συνεχής λειτουργίας του αεριοστροβίλου.

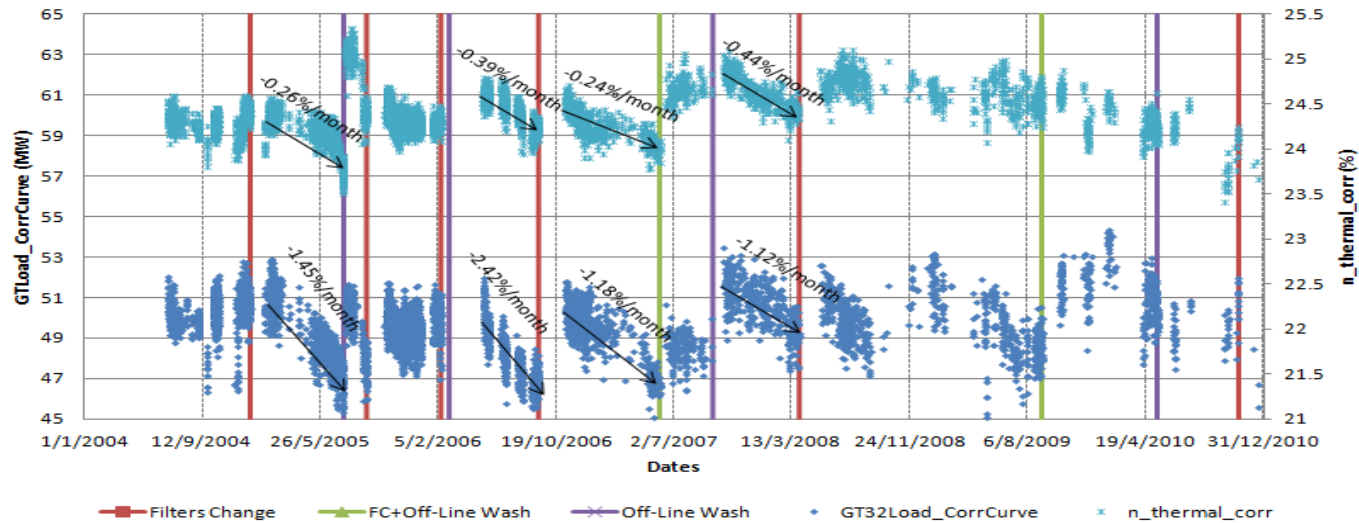


Σχήμα 3.53: Βέλτιστος αριθμός Off-Line πλυσιμάτων ανά χρόνο σε συνάρτηση του ρυθμού υποβάθμισης του φορτίου του αεριοστροβίλου GE LM6000 (N.Αρετάκης, 2012).

Επιπλέον, υπολογίζεται και μία μέση τιμή του ρυθμού υποβάθμισης του θερμικού βαθμού απόδοσης κάθε κινητήρα, όπου για τον GT31 προκύπτει περίπου ίσος με 0.35% ανά μήνα λειτουργίας, ενώ για τον GT32 ίσος με 0.33%. Επίσης, είναι ορατό από τα δύο διαγράμματα και των δύο κινητήρων, ότι κατά τους θερινούς μήνες υπάρχει επιβάρυνση με μεγαλύτερο ρυθμό σε σχέση με τους υπόλοιπους μήνες του έτους.



Σχήμα 3.54: Μεταβολή φορτίου και θερμικού βαθμού απόδοσης στον GT31.



Σχήμα 3.55: Μεταβολή φορτίου και θερμικού βαθμού απόδοσης στον GT32.



# 4

## Επεξεργασία μετρήσεων και καμπύλες διόρθωσης, για διαγνωστικούς σκοπούς στο Αλουμίνιο της Ελλάδας (ΑτΕ).

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται μία περιγραφή της διαδικασίας επεξεργασίας των μετρήσεων και της χρήσης των διαγνωστικών καμπυλών για διαγνωστικούς σκοπούς στους δύο αεριοστρόβιλους του σταθμού συνδυασμένου κύκλου του Αλουμινίου της Ελλάδας, που βρίσκεται στην περιοχή Αγίου Νικολάου Βοιωτίας.

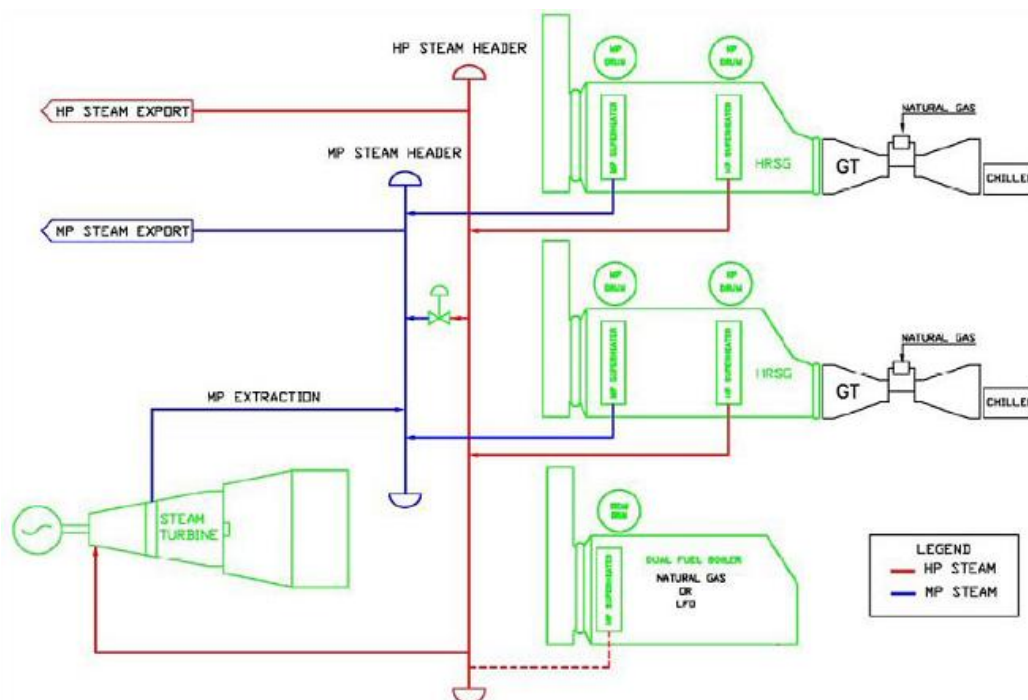
### **4.1 Περιγραφή αεριοστρόβιλων.**

Αρχικά, σε αυτήν την παράγραφο θα γίνει μία σύντομη περιγραφή του σταθμού και των δύο αεριοστρόβιλων αυτού (ΕΘΣ/ΕΜΠ, ΕΝΤΥΠΟ ΥΠΟΒΟΛΗΣ\_ΕΘΣ-ΕΣΗΕ-ΜΕΤΚΑ, 2009).

Η συνολική ισχύς του σταθμού συνδυασμένου κύκλου είναι 321MW, και αποτελείται, από δύο αεριοστρόβιλους, δύο Λέβητες Ανάκτησης Θερμότητας (ΛΑΘ-HRSG) και έναν ατμοστρόβιλο. Οι αεριοστρόβιλοι έχουν κατασκευαστεί από την εταιρία General Electric και είναι τύπου PG9171. Η καθαρή παραγόμενη ισχύς κάθε αεριοστρόβιλου, δηλαδή η ισχύς η οποία εκμεταλλεύεται η γεννήτρια, είναι ίση με 124 MW. Ενώ, η αντίστοιχη καθαρή Ροή Θερμότητας (Heat Rate) για κάθε κινητήρα είναι ίση με 10800 kJ/kWh. Το κύριο καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι φυσικό αέριο, ενώ είναι διαθέσιμο αν χρειαστεί ελαφρύ μαζούτ. Τα καυσαέρια, από την έξοδο κάθε αεριοστρόβιλου, οδηγούνται στον αντίστοιχο Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας (HRSG). Για την εξασφάλιση της απαιτούμενης παροχής ατμού στον ατμοστρόβιλο υπάρχει εναλλακτική πηγή παροχής ατμού από λέβητα διπλού καυσίμου, σε περίπτωση που και οι δύο HRSG ή οι δύο αεριοστρόβιλοι τεθούν εκτός λειτουργίας την ίδια χρονική στιγμή. Επίσης, ο συγκεκριμένος λέβητας είναι

διπλού καυσίμου, έχει δηλαδή τη δυνατότητα να λειτουργεί και με ελαφρύ μαζούτ, αν διακοπεί η παροχή φυσικού αερίου. Ο παραγόμενος ατμός από καθέναν από τους δύο λέβητες ανάκτησης θερμότητας, σε κανονική κατάσταση λειτουργίας, πέραν του ότι τροφοδοτεί σ' ένα ποσοστό τον ατμοστρόβιλο, καλύπτει και τις απαιτήσεις της μονάδας παραγωγής αλουμινίου.

Ο έλεγχος της λειτουργίας του σταθμού συμπαραγωγής γίνεται με αυτοματοποιημένο τρόπο με τη χρήση του συστήματος επόπτευσης της λειτουργίας της εγκατάστασης, Foxboro I/A Series Distributed Control Systems. Το συγκεκριμένο σύστημα επόπτευσης συλλέγει πληροφορίες για την κατάσταση του σταθμού από μετρητικά όργανα που είναι εγκατεστημένα σε όλες τις απαραίτητες θέσεις. Στο Σχήμα 4.1 που ακολουθεί φαίνεται το απλοποιημένο μονογραμμικό διάγραμμα της εγκατάστασης του σταθμού συμπαραγωγής στο Αλουμίνιο της Ελλάδας.



Σχήμα 4.1: Απλοποιημένο μονογραμμικό διάγραμμα σταθμού συμπαραγωγής στο Αλουμίνιο της Ελλάδας (ΕΘΣ/ΕΜΠ, ΕΝΤΥΠΟ ΥΠΟΒΟΛΗΣ\_ΕΘΣ-ΕΣΗΕ-ΜΕΤΚΑ, 2009).

#### 4.2 Διόρθωση φορτίου, με χρήση καμπυλών διόρθωσης, και σχολιασμός αποτελεσμάτων.

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μία περιγραφή γύρω από την επεξεργασία των μετρήσεων με στόχο τη διόρθωση του φορτίου με τη βοήθεια των καμπυλών διόρθωσης, παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν και σχολιασμός αυτών.

Οι καμπύλες διόρθωσης (Correction Curves) δίνονται από την εταιρία που είναι υπεύθυνη για την κατασκευή των αεριοστροβίλων, και δημιουργούνται ξεχωριστά για το εκάστοτε μοντέλο. Οι καμπύλες που μελετήθηκαν στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, δόθηκαν από την General Electric. Σκοπός είναι ο υπολογισμός του διορθωμένου φορτίου και για τους δύο αεριοστροβίλους της εγκατάστασης του Αλουμινίου της Ελλάδας, το οποίο προκύπτει από τη διόρθωση συγκεκριμένων μεγεθών, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Οποιαδήποτε χειροτέρευση στις επιδόσεις του αεριοστροβίλου, είτε αυτή οφείλεται σε βλάβη είτε στη φυσιολογική γήρανση του κινητήρα, αποτυπώνεται με την υποβάθμιση, και γενικά με τη μεταβολή κάποιων συγκεκριμένων μεγεθών. Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 3.2.2, η διόρθωση των υπό μελέτη μεγεθών, δηλαδή η αναγωγή τους στις συνθήκες αναφοράς, στοχεύει στην απομόνωση της εξάρτησης αυτής της μεταβολής, από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο, αποκτάται μία πιο "καθαρή" εικόνα της βλάβης ή της γήρανσης, αφού έχει απομονωθεί η επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών στα μεγέθη που σχετίζονται με τη συγκεκριμένη λειτουργία.

Στον επόμενο πίνακα φαίνονται οι τιμές αναφοράς όλων των παραμέτρων διόρθωσης, που είναι βασικές για τον υπολογισμό του διορθωμένου φορτίου.

<b>Correction Parameter</b>	<b>Rated Value</b>
Ambient air temperature	15 °C
Compressor inlet air temperature	15 °C
Ambient air relative humidity	60%
Barometric pressure	1013 mbar
Gas turbine shaft speed	3000 rpm
Generator power factor	0.80 (lagging)
Gas turbine conditions	New and Clean, ≤ 200 Fired Hours
Inlet system pressure drop	90 mmH <sub>2</sub> O
Exhaust system pressure drop	325 mmH <sub>2</sub> O
Compressor air extraction	0 kg/s
Inlet bleed heat flow rate	0 kg/s
Fuel	Natural Gas

Fuel supply temperature	27 °C
Fuel composition	% volume
• Methane (CH <sub>4</sub> )	80.5
• Ethane (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	12
• Propane (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	4
• N-Butane (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	2.5
• N-Pentane (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	1
Fuel H/C ratio	3.521

Σχήμα 4.2: Τιμές αναφοράς παραμέτρων διόρθωσης (GE, 2006).

Στη συνέχεια, ακολουθεί ο υπολογισμός του διορθωμένου φορτίου για τους δύο αεριοστροβίλους της εγκατάστασης με τη βοήθεια των καμπυλών διόρθωσης. Η διαδικασία του υπολογισμού έγινε σύμφωνα με τις οδηγίες του εγχειριδίου, το οποίο παρέιχε η κατασκευάστρια εταιρία (GE, 2006).

Για τον υπολογισμό του διορθωμένου φορτίου, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός 12 παραγόντων που σχετίζονται με τη διόρθωση συγκεκριμένων μεγεθών. Αν  $F_{iP}$ , είναι ο εκάστοτε παράγοντας, GNPO το καθαρό φορτίο εξόδου του αεριοστροβίλου (Gas turbine generator Net Power Output), και CGNPO το αντίστοιχο διορθωμένο φορτίο, τότε:

$$CGNPO = GNPO \times \prod_{i=1}^{12} F_{iP} \quad (4.1)$$

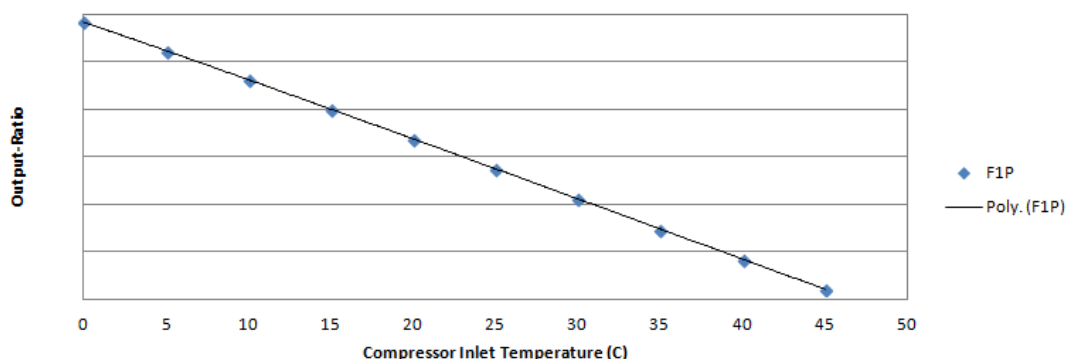
Η τιμή του εκάστοτε παράγοντα  $F_{iP}$  προκύπτει από την αντίστοιχη καμπύλη διόρθωσης που δίνει ο κατασκευαστής. Ο ορισμός των παραγόντων διόρθωσης, δίνεται στη σχέση (GE, 2006):

$$F_{iP} = \frac{F_{iP(a)}}{F_{iP(b)}} \quad (4.2)$$

Όπου στον αριθμητή είναι ο παράγοντας διόρθωσης που προκύπτει για τις συνθήκες τυπικής ημέρας, ενώ στον παρανομαστή ο παράγοντας για τις συνθήκες στις οποίες πραγματοποιείται η μέτρηση.

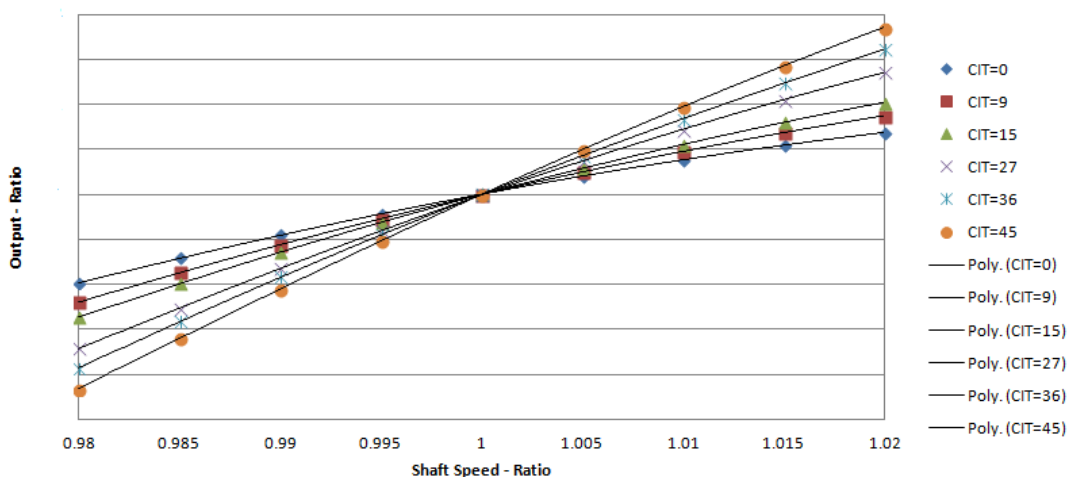
Ενδεικτικά, θα γίνει περιγραφή του προσδιορισμού δύο παραγόντων, του  $F_{1P}$  και του  $F_{4P}$ . Ο παράγοντας  $F_{1P}$  είναι υπεύθυνος για τη διόρθωση της ισχύος από τη μετρούμενη θερμοκρασία εισόδου στο συμπιεστή (CIT) στην αντίστοιχη θερμοκρασία αναφοράς. Στο Σχήμα 4.3 που ακολουθεί, απεικονίζεται η σχετική καμπύλη διόρθωσης.





Σχήμα 4.3: Καμπύλη διόρθωσης για προσδιορισμό παράγοντα αναγωγής φορτίου σε CITrated (GE, 2006).

Στη συνέχεια, απεικονίζεται η καμπύλη διόρθωσης για τον υπολογισμό του παράγοντα  $F4_P$ . Ο παράγοντας αυτός είναι υπεύθυνος για τη διόρθωση του φορτίου από τη μετρούμενη ταχύτητα περιστροφής του άξονα του αεριοστροβίλου, στην αντίστοιχη ταχύτητα αναφοράς.



Σχήμα 4.4: Καμπύλη διόρθωσης για προσδιορισμό παράγοντα αναγωγής φορτίου σε Shaft Speed rated (GE, 2006).

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.4 η τιμή του παράγοντα  $F4_P$  εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία εισόδου στο συμπιεστή (CIT). Για ενδιαμέσες τιμές θερμοκρασίας CIT από τις προκαθορισμένες, εφαρμόστηκε η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής, ενώ για λόγους ταχύτητας περιστροφής του άξονα που ξεπερνούν τα όρια του άξονα των τετμημένων εφαρμόστηκε γραμμική προσέγγιση

αυτών (extrapolation). Με την έννοια λόγος ταχύτητας περιστροφής του άξονα, εννοείται το κλάσμα:

$$SSRatio = \frac{SS_{meas}}{SS_{rated}} \quad (4.3)$$

Όπου στον αριθμητή είναι οι μετρούμενες στροφές, ενώ στον παρανομαστή οι ονομαστικές στροφές.

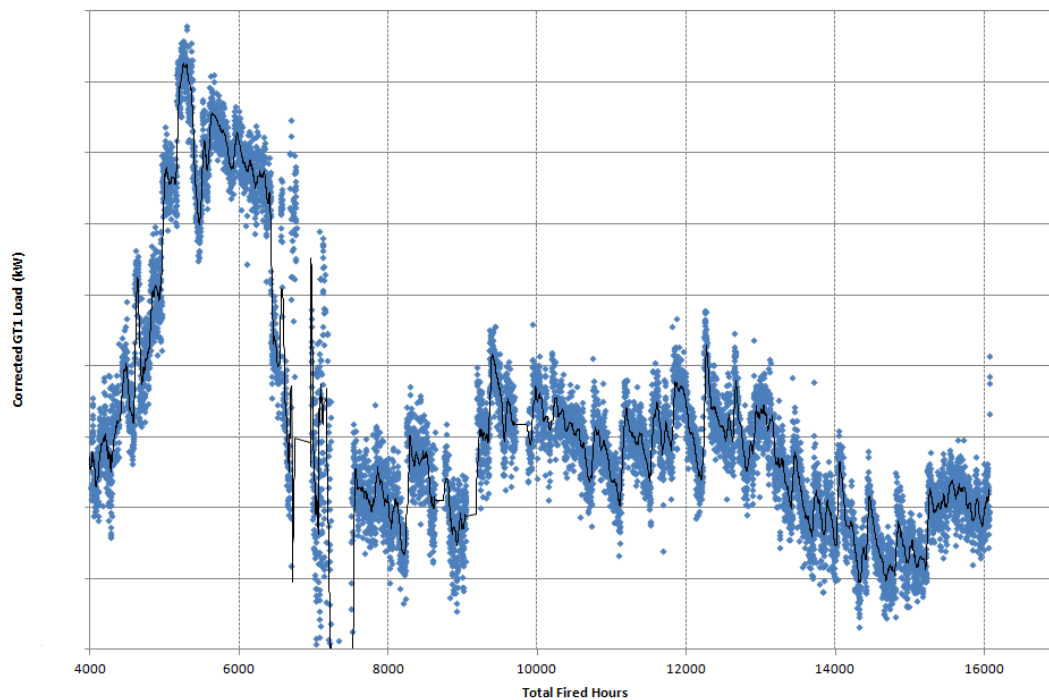
Όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί έγιναν με τη χρήση VBA (Visual Basic Applications).

Στον παρακάτω πίνακα καταγράφονται όλοι οι παράγοντες που υπολογίζονται με σκοπό τη διόρθωση του φορτίου, καθώς και το μέγεθος για τη διόρθωση του οποίου είναι ο καθένας υπεύθυνος.

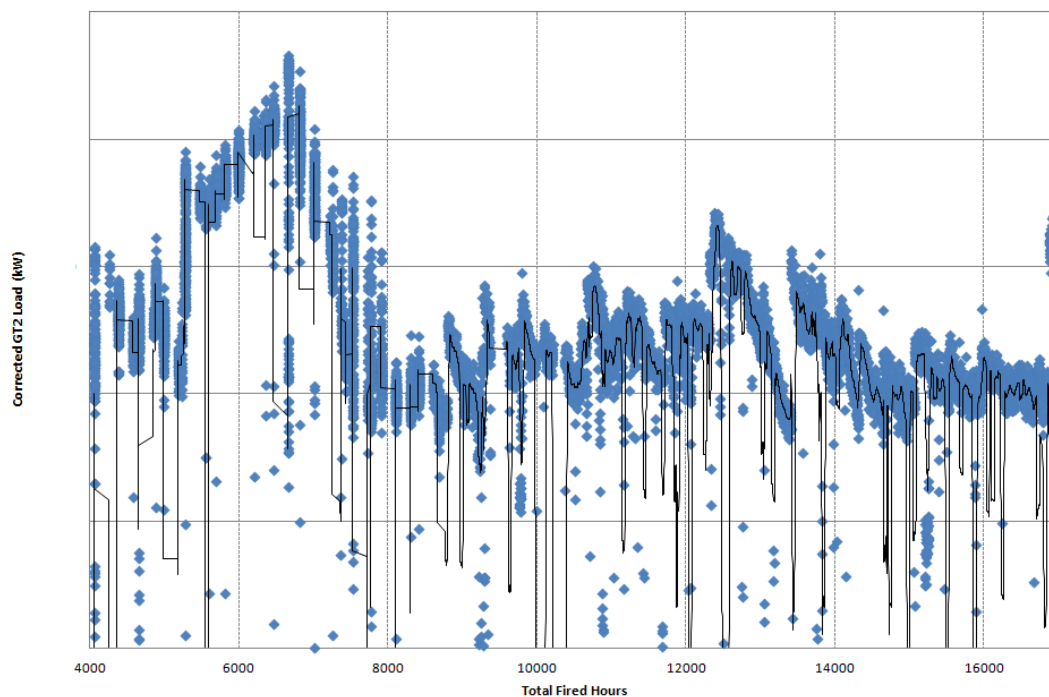
Correction Factor	Effect of
F1 <sub>p</sub>	Compressor Inlet Temperature
F2 <sub>p</sub>	Compressor Inlet Relative Humidity
F3 <sub>p</sub>	Barometric Pressure
F4 <sub>p</sub>	Shaft Speed
F5 <sub>p</sub>	Generator Power Factor
F6 <sub>p</sub>	Total Fired Hours
F7 <sub>p</sub>	Inlet System Pressure Drop
F8 <sub>p</sub>	Exhaust System Back Pressure
F9 <sub>p</sub>	Steam Injection Flow Rate
F10 <sub>p</sub>	Water Injection Flow Rate
F11 <sub>p</sub>	Fuel Composition
F12 <sub>p</sub>	Fuel Supply Temperature

Σχήμα 4.5: Παράγοντες διόρθωσης φορτίου και οι επιδράσεις αυτών (GE, 2006).

Οι μετρήσεις οι οποίες καταγράφηκαν και επεξεργάστηκαν, για τον υπολογισμό της τιμής του διορθωμένου φορτίου των δύο αεριοστροβίλων της εγκατάστασης του Αλουμινίου της Ελλάδας, ξεκινούν χρονικά από τις 29/10/2008 και καταλήγουν στις 8/3/2012. Τα αποτελέσματα και για τις δύο μηχανές, αναπαριστώνται στα διαγράμματα 4.6 και 4.7 που ακολουθούν. Στον άξονα των τετμημένων εμφανίζονται οι συνολικές ώρες λειτουργίας.



Σχήμα 4.6: Μεταβολή διορθωμένου φορτίου, αεριοστροβίλου GT1, ως προς τις συνολικές ώρες λειτουργίας.

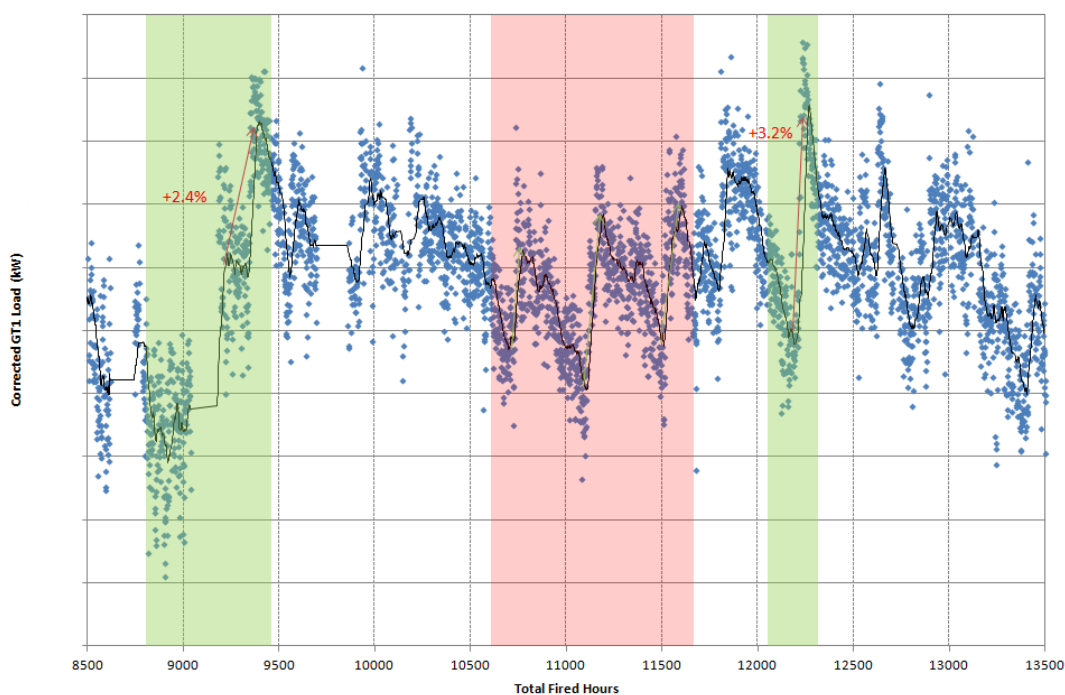


Σχήμα 4.7: Μεταβολή διορθωμένου φορτίου, αεριοστροβίλου GT2, ως προς τις συνολικές ώρες λειτουργίας.

Στα δύο σχήματα έχουν προστεθεί οι γραμμές τάσεις, με σκοπό να αποτυπωθούν καλύτερα και πιο καθαρά οι τάσεις μεταβολής του φορτίου. Εξαιτίας του μεγάλου όγκου των δεδομένων και της μεγάλης πυκνότητας αυτών

είναι δύσκολο να εντοπισθεί και να γίνει διάκριση της τάσης μεταβολής. Όπως φαίνεται, στο σχήμα 4.6 η γραμμή τάσης του φορτίου του αεριοστροβίλου GT1, δίνει μία ικανοποιητική εικόνα της μεταβολής του μεγέθους. Αντίθετα, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στο Σχήμα 4.7, όπου παρουσιάζεται η μεταβολή του φορτίου του GT2. Οι μεγάλες διακυμάνσεις που εμφανίζει η γραμμή τάσης οφείλονται στη μεγάλη διασπορά του διορθωμένου φορτίου. Η μεγάλη διασπορά του διορθωμένου φορτίου οφείλεται, με τη σειρά της, στη μεγάλη διασπορά του φορτίου όπως αυτό καταγράφεται στη βάση δεδομένων.

Επίσης, παρατηρώντας το σχήμα 4.6 του αεριοστροβίλου GT1, είναι έντονα οράτα δύο σημεία στα οποία υπάρχει σημαντική μεταβολή του φορτίου, και συγκεκριμένα αύξηση αυτού. Τα δύο αυτά σημεία είναι στις 9000 και 12200 ώρες λειτουργίας, αντίστοιχα. Η παρατήρηση αυτή, φαίνεται καλύτερα, στο σχήμα 4.8 που ακολουθεί, το οποίο εστιάζει στη συγκεκριμένη περίοδο.

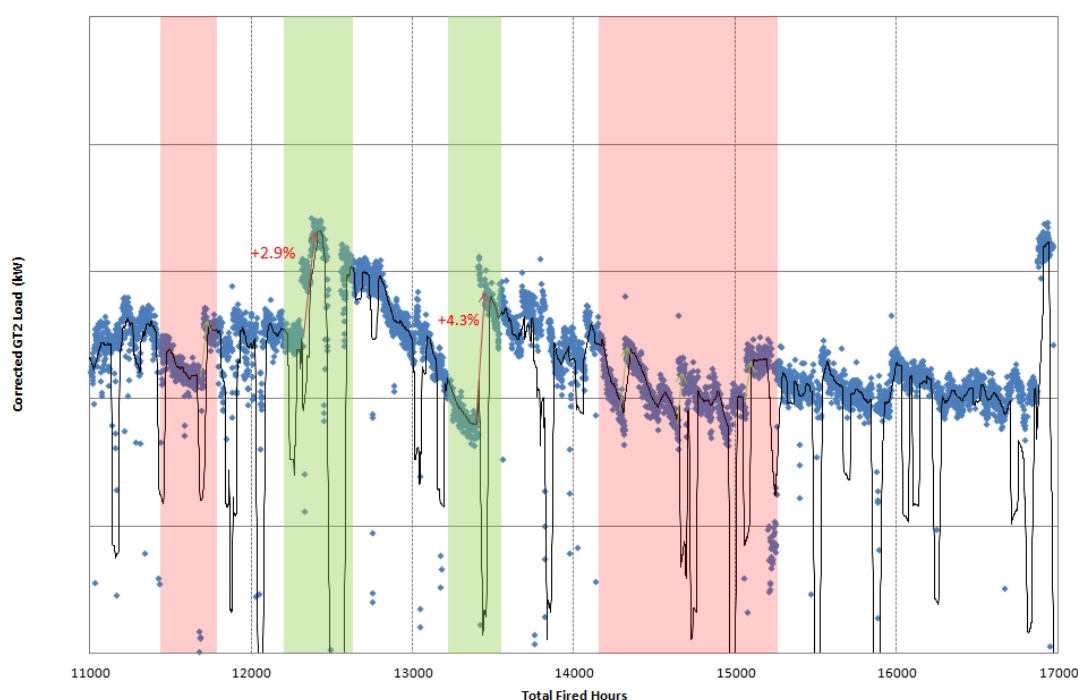


**Σχήμα 4.8: Εστίαση και επισήμανση περιοχών με έντονη αύξηση φορτίου (πράσινο) και περιοχών με μικρότερες αυξήσεις (κόκκινο) σε συνάρτηση με τις συνολικές ώρες λειτουργίας, για τον αεριοστρόβιλο GT1 .**

Ειδικότερα στις πράσινες περιοχές, όπου αντιστοιχούν σημεία 9000 και 12200 ωρών λειτουργίας, η αντίστοιχη αύξηση του φορτίου είναι 2.4% και 3.2%. Το ΕΘΣ δεν έχει στη διάθεση του στοιχεία για παρεμβάσεις στους αεριοστροβίλους, οπότε εικάζεται ότι μία πιθανή αιτία για αυτήν την αύξηση του διορθωμένου φορτίου είναι το Off-Line πλύσιμο του συμπιεστή. Επίσης, με τη βοήθεια του ίδιου σχήματος, είναι καλύτερα διακριτές και μικρότερες αυξήσεις του φορτίου, οι οποίες

κυμαίνονται από 1.3% έως 2.2%. Χαρακτηριστικά επισημαίνονται τρεις περιπτώσεις μικρότερων αυξήσεων του φορτίου στην κόκκινη περιοχή του σχήματος 4.8. Πιθανή αιτία για αυτές τις μεταβολές είναι το On-Line πλύσιμο του συμπιεστή.

Στη συνέχεια, στο σχήμα 4.7, το οποίο απεικονίζει την μεταβολή του διορθωμένου φορτίου του αεριοστροβίλου GT2, παρατηρούνται δύο σημαντικές αυξήσεις, στις 12300 και στις 13400 ώρες λειτουργίας, της τάξης του 2.9% και 4.3% αντίστοιχα. Το Σχήμα 4.9 που ακολουθεί αποτελεί μία εστίαση του σχήματος 4.7, στις συγκεκριμένες περιοχές (πράσινο). Όπως αναφέρθηκε και για τη μηχανή GT1, έτσι και στην περίπτωση της GT2, οι συγκεκριμένες αυξήσεις ενδέχεται να οφείλονται σε Off-Line πλύσιμο του συμπιεστή.



**Σχήμα 4.9: Εστίαση και επισήμανση περιοχών με έντονη αύξηση φορτίου (πράσινο) και περιοχών με μικρότερες αυξήσεις (κόκκινο) σε συνάρτηση με τις συνολικές ώρες λειτουργίας, για τον αεριοστρόβιλο GT2 .**

Παράλληλα, με την μεγέθυνση που προσφέρει το Σχήμα 4.9, διακρίνονται πλέον και μικρότερες μεταβολές του φορτίου, οι οποίες δεν ήταν ευδιάκριτες στο Σχήμα 4.7, και είναι πιθανό να οφείλονται σε On-Line πλύσιμο του συμπιεστή. Οι περιοχές που αντιστοιχούν σε αυτές τις μεταβολές έχουν κόκκινο χρώμα, και οι αυξήσεις του φορτίου κυμαίνονται από 1.6% έως και 2.5%.

Μεταξύ αυτών των διαστημάτων, είτε είναι Off-Line είτε On-Line πλυσίματα του συμπιεστή των δύο αεριοστροβίλων είναι έντονα ορατή η σταδιακή χειροτέρευση του κινητήρα, με την ανάλογη πτώση του φορτίου, καθώς και η ανάλογη βελτίωση που επιφέρει στις επιδόσεις το εκάστοτε πιθανό πλύσιμο.

Για τη δημιουργία πιο ολοκληρωμένης εικόνας γύρω από τις μεταβολές του διορθωμένου φορτίου που μόλις σχολιάστηκαν είναι απαραίτητη η παράλληλη παρατήρηση της μεταβολής του διορθωμένου μεγέθους της Ροής Θερμότητας (Heat Rate), η οποία μελετάται στην επόμενη παράγραφο.

#### **4.3 Υπολογισμός και διόρθωση Ροής Θερμότητας (Heat Rate), με χρήση καμπυλών διόρθωσης, και σχολιασμός αποτελεσμάτων.**

Στην παράγραφο αυτή, γίνεται περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού της Ροής Θερμότητας, της διόρθωσης της με τη χρήση των καμπυλών διόρθωσης και σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

Η ροή θερμότητας αποτελεί ενδεικτικό μέγεθος της απόδοσης ενός αεριοστροβίλου. Εκφράζει τη θερμότητα που απαιτείται να δοθεί στη μηχανή για την παραγωγή ισχύος ίσης με 1kWh (Saravanamuttoo, 2009). Μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε κατά την επεξεργασία σε αυτήν τη διπλωματική εργασία είναι το kJ/kWh. Η θερμότητα προσδίδεται στον κινητήρα μέσω της καύσης του καυσίμου. Προφανώς, καύσιμο υψηλής θερμογόνου ικανότητας αντιστοιχεί σε μικρότερες τιμές Ροής Θερμότητας.

Για τον υπολογισμό της Ροής της Θερμότητας, χρησιμοποιήθηκε ο ορισμός (P.P.Walsh):

$$HR = \frac{\dot{m}_f \times Hu}{GNPO} \times 3600 \quad (4.4)$$

Οι τιμές της παροχής καυσίμου,  $\dot{m}_f$ , όπως και του καθαρού φορτίου στην έξοδο του αεριοστροβίλου GNPO (Gas turbine generator Net Power Output) που χρησιμοποιήθηκαν, είναι αυτές από τη βάση δεδομένων του ΕΘΣ. Η τιμή της κατώτερης Θερμογόνου Ικανότητας διατηρήθηκε σταθερή, λόγω του ότι δεν υπήρχε πληροφορία για τη χημική σύσταση του καυσίμου, βάση της οποίας προκύπτει η τιμή της.

Ο υπολογισμός των διορθωμένων τιμών της Ροής Θερμότητας, για κάθε χρονική στιγμή, έγινε με τη χρήση των καμπυλών διόρθωσης. Η διαδικασία υπολογισμού, όπως και με τον υπολογισμό του διορθωμένου φορτίου, βασίστηκε στο εγχειρίδιο της κατασκευάστριας εταιρίας για τα συγκεκριμένα μοντέλα αεριοστροβίλων (GE, 2006). Η διορθωμένη Ροή Θερμότητας (Corrected Gas turbine generator Net Heat Rate) δίνεται από:

$$CGNHR = GNHR \times \prod_{i=1}^{12} Fi_{HR} \quad (4.5)$$

Όπου GNHR (Gas turbine generator Net Heat Rate) είναι η Ροή Θερμότητας όπως προκύπτει από τη σχέση (4.4), και  $Fi_{HR}$  είναι δώδεκα παράγοντες διόρθωσης που προκύπτουν από τις αντίστοιχες καμπύλες διόρθωσης. Ο ορισμός των παραγόντων διόρθωσης της Ροής Θερμότητας δίνεται από την σχέση που ακολουθεί (GE, 2006):

$$Fi_{HR} = \frac{Fi_{HR(a)}}{Fi_{HR(b)}} \quad (4.6)$$

$Fi_{HR(a)}$  είναι ο παράγοντας διόρθωσης στις συνθήκες αναφοράς, ενώ  $Fi_{HR(b)}$  ο παράγοντας στις συνθήκες της μέτρησης.

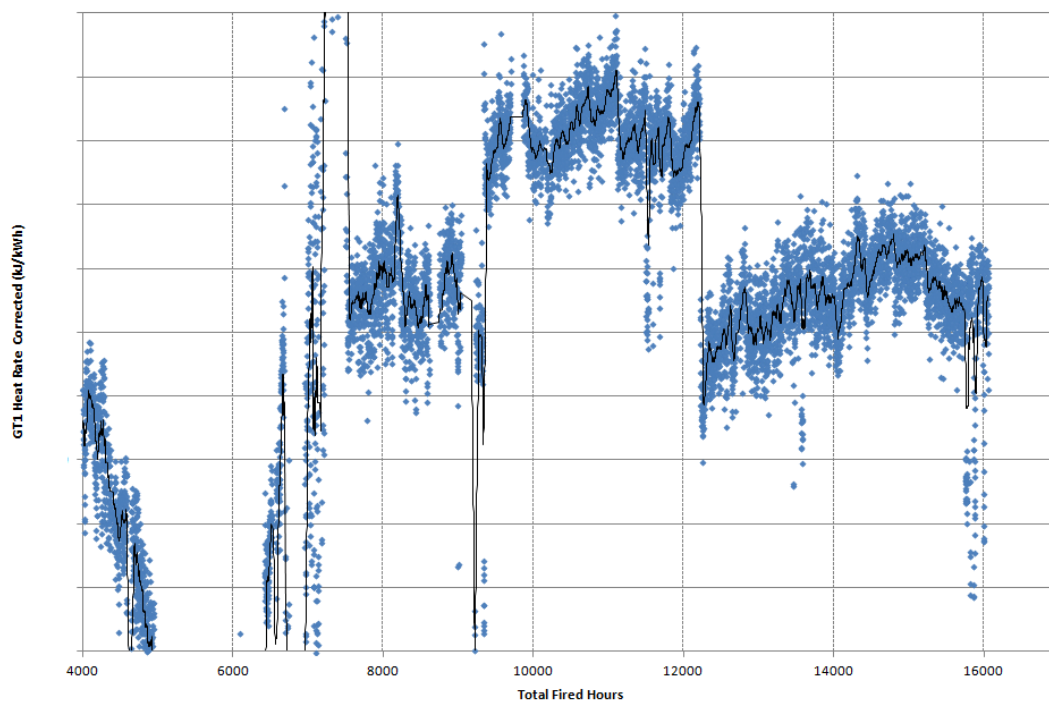
Η τεχνική υπολογισμού των παραγόντων αυτών είναι ίδια με αυτήν που εφαρμόστηκε και στην παράγραφο 4.2. Όλοι οι παράγοντες που ήταν απαραίτητοι να υπολογιστούν για τη διόρθωση της Ροής Θερμότητας, καθώς και τα μεγέθη για τη διόρθωση των οποίων είναι υπεύθυνοι, φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Correction Factor	Effect of
F1 <sub>HR</sub>	Compressor Inlet Temperature
F2 <sub>HR</sub>	Compressor Inlet Relative Humidity
F3 <sub>HR</sub>	Barometric Pressure
F4 <sub>HR</sub>	Shaft Speed
F5 <sub>HR</sub>	Generator Power Factor
F6 <sub>HR</sub>	Total Fired Hours
F7 <sub>HR</sub>	Inlet System Pressure Drop
F8 <sub>HR</sub>	Exhaust System Back Pressure
F9 <sub>HR</sub>	Steam Injection Flow Rate
F10 <sub>HR</sub>	Water Injection Flow Rate
F11 <sub>HR</sub>	Fuel Composition
F12 <sub>HR</sub>	Fuel Supply Temperature

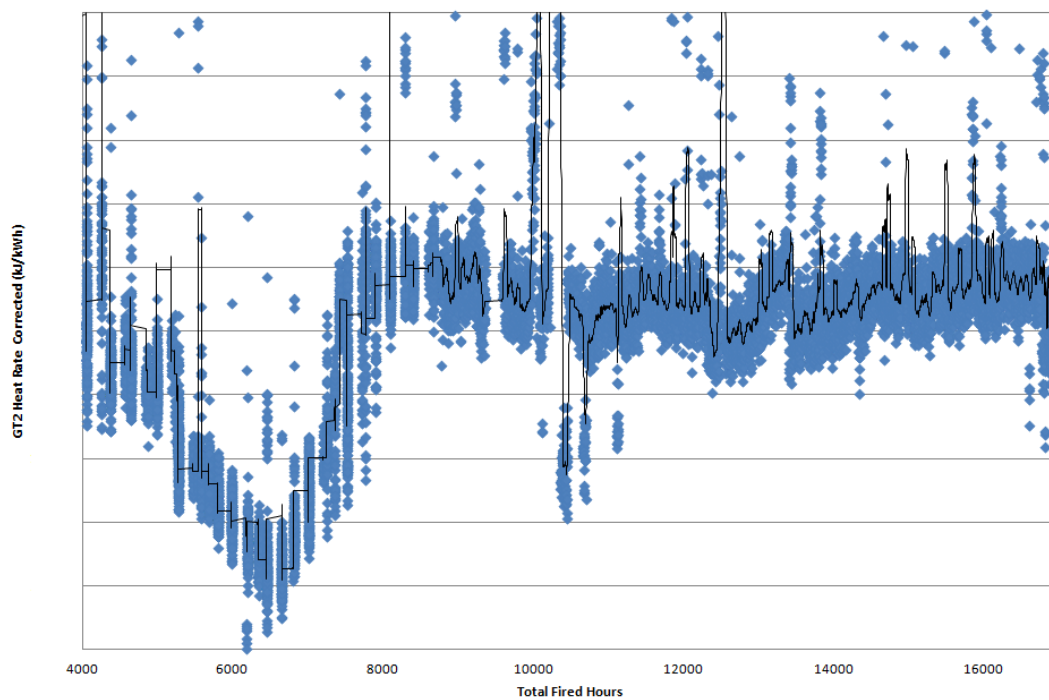
Σχήμα 4.10: Παράγοντες διόρθωσης Ροής Θερμότητας (Heat Rate) και οι επιδράσεις αυτών (GE, 2006).

Οι μετρήσεις που επεξεργάστηκαν για τον υπολογισμό της διορθωμένης Ροής Θερμότητας, όπως και για το διορθωμένο φορτίο, περιλαμβάνουν την περίοδο από 29/10/2008 μέχρι και 8/3/2012. Τα αποτελέσματα της διόρθωσης και για

τους δύο αεριοστροβίλους αναπαριστώνται γραφικά στα σχήματα 4.11 και 4.12 που ακολουθούν. Στον άξονα Χ είναι οι συνολικές ώρες λειτουργίας.



**Σχήμα 4.11: Μεταβολή διορθωμένης Ροής Θερμότητας (Heat Rate), αεριοστροβίλου GT1, ως προς τις συνολικές ώρες λειτουργίας.**



**Σχήμα 4.12: Μεταβολή διορθωμένης Ροής Θερμότητας (Heat Rate), αεριοστροβίλου GT2, ως προς τις συνολικές ώρες λειτουργίας.**



Στο Σχήμα 4.11, που αναπαριστά τη διορθωμένη Ροή Θερμότητας του αεριοστροβίλου GT1, είναι ευδιάκριτες δύο έντονες μεταβολές στις 9000 και 12200, οποίες ταυτίζονται χρονικά με τις μεταβολές του διορθωμένου φορτίου στο Σχήμα 4.6. Αυτό φαίνεται καλύτερα στο σχήμα 4.13 που ακολουθεί, το οποίο εστιάζει στην ίδια χρονική περίοδο με αυτήν του σχήματος 4.8. Επίσης, μεταξύ των σχημάτων 4.13 και 4.8, βρίσκονται σε αντιστοιχία οι πράσινες και κόκκινες περιοχές.



**Σχήμα 4.13: Εστίαση και επισήμανση περιοχών με έντονη μεταβολή Ροής Θερμότητας (πράσινο) και περιοχών με μικρότερες μεταβολές (κόκκινο) σε συνάρτηση με τις συνολικές ώρες λειτουργίας, για τον αεριοστρόβilo GT1.**

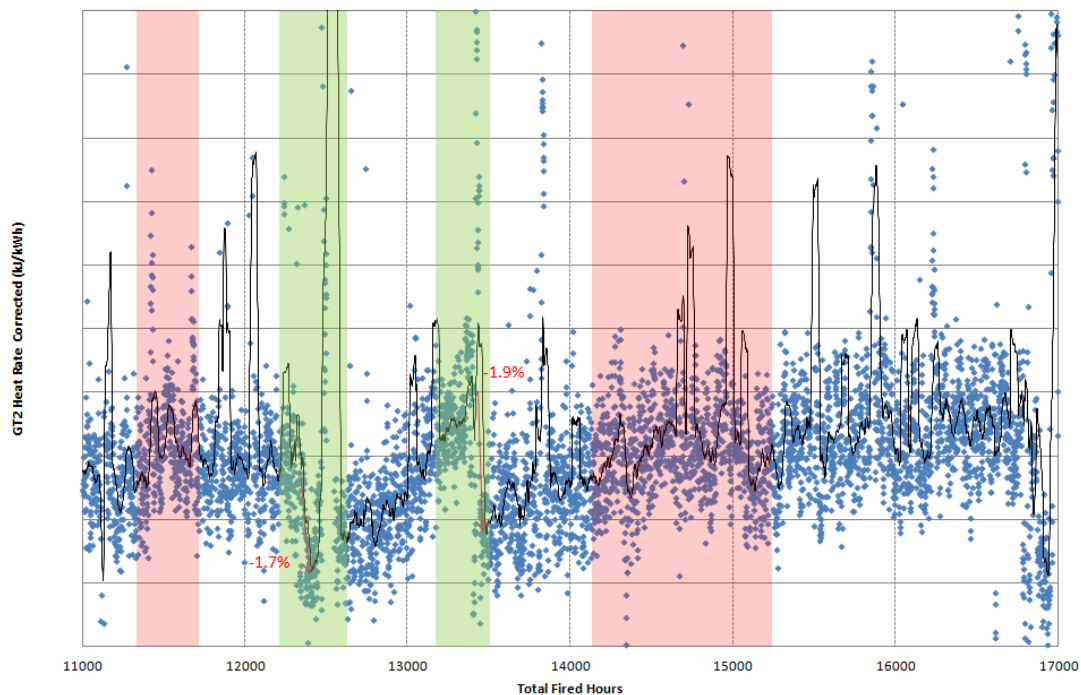
Οι μεταβολές που καλύπτονται στο διάγραμμα με πράσινο χρώμα είναι της τάξης του 3% και 3.6%, αντίστοιχα. Οι μεταβολές αυτές είναι πολύ κοντά ποσοτικά με τις αντίστοιχες μεταβολές του διορθωμένου φορτίου, που είναι 2.4% και 3.2%. Αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού για τον υπολογισμό της Ροής Θερμότητας από τον ορισμό (σχέση (4.4)) χρησιμοποιείται το φορτίο. Επίσης, οι τιμές της παροχής καυσίμου και της κατώτερης θερμογόνου ικανότητας είναι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του διορθωμένου φορτίου.

Στις 9000 και στις 12200 ώρες λειτουργίας (πράσινες περιοχές) παρατηρείται στο Σχήμα 4.8 σημαντική αύξηση του διορθωμένου φορτίου, ενώ στις αντίστοιχες περιοχές του σχήματος 4.13, υπάρχει αύξηση και μείωση αντίστοιχα της Ροής Θερμότητας. Δηλαδή, στις 9000 ώρες λειτουργίας η αύξηση της Ροής Θερμότητας υποδεικνύει μία χειροτέρευση στη λειτουργία του κινητήρα, αφού για την παραγωγή ίδιας ισχύος απαιτείται μεγαλύτερο ποσό θερμότητας από

τη μηχανή. Ενώ, αντίστοιχα στις 12200 ώρες λειτουργίας υπάρχει βελτίωση της λειτουργίας, αφού η Ροή της Θερμότητας μειώνεται. Για το λόγο αυτό, είναι δύσκολο οι μεταβολές αυτές να προκαλούνται, όπως αναφέρθηκε από Off-Line πλύσιμο του συμπιεστή, αφού δεν έχουμε βελτίωση των επιδόσεων του κινητήρα τις δύο χρονικές στιγμές, αλλά πρώτα χειροτέρευση και στη συνέχεια βελτίωση. Πιθανή αιτία, είναι η αλλαγή της ποιότητας του καυσίμου για την περίοδο 9000-12200 ώρες λειτουργίας, δηλαδή να έγινε χρήση φυσικού αερίου με διαφορετική χημική σύσταση και συγκεκριμένα κατώτερης θερμογόνου ικανότητας. Επιπλέον στις 12200 ώρες λειτουργίας μαζί με τη μείωση της Ροής Θερμότητας, υπάρχει και αύξηση του φορτίου. Οπότε, είναι πιθανό μαζί με την αλλαγή της σύστασης του καυσίμου να έγινε και Off-Line πλύσιμο του συμπιεστή. Από τη βάση δεδομένων, προκύπτει ότι τις συγκεκριμένες ώρες λειτουργίας (9000, 12000), έγινε παύση της λειτουργίας του αεριοστροβίλου από τις 5/5 έως τις 16/5/2011 και από τις 24/9 έως τις 8/10/2011, γεγονός ενδεικτικό των παρεμβάσεων που έγιναν στη μηχανή.

Επίσης, η κόκκινη περιοχή του σχήματος 4.13 συμπίπτει χρονικά με την αντίστοιχη κόκκινη περιοχή του σχήματος 4.8. Φαίνεται χαρακτηριστικά η αντιστοιχία των τριών διαδοχικών και σταδιακών πτώσεων του φορτίου με τις τρεις διαδοχικές αυξήσεις της Ροής της Θερμότητας. Δηλαδή, είναι προφανής η χειροτέρευση των επιδόσεων του κινητήρα και από τα δύο διαγράμματα. Όμως, είναι προφανής και η επαναφορά των επιδόσεων του κινητήρα σε ικανοποιητικά επίπεδα, μετά από πιθανές παρεμβάσεις σε αυτόν. Το On-Line πλύσιμο του συμπιεστή αποτελεί μία πιθανή εξήγηση για αυτήν τη συμπεριφορά των επιδόσεων. Ειδικότερα, η δεύτερη στη σειρά αύξηση της Ροής της Θερμότητας στην κόκκινη περιοχή συνοδεύεται από σημαντική πτώση, η οποία συμβαδίζει πλήρως με την αντίστοιχη μεταβολή του διορθωμένου φορτίου. Οπότε, ίσως, αυτό να αποτελεί αποτέλεσμα ενός Off-Line πλυσίματος του συμπιεστή. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι στις 7/3/2011, ο αεριοστροβίλος ήταν εκτός λειτουργίας για δώδεκα ώρες, διάστημα ικανοποιητικό για Off-Line πλύσιμο του συμπιεστή.

Το σχήμα 4.14 που ακολουθεί, αποτελεί μεγέθυνση του σχήματος 4.12, και συγκεκριμένα επικεντρώνεται στις ίδιες ώρες λειτουργίας με αυτές του σχήματος 4.9, με σκοπό την αντιστοίχιση των μεταβολών της Ροής Θερμότητας του αεριοστροβίλου GT2 με τις μεταβολές του διορθωμένου φορτίου.



**Σχήμα 4.14: Εστίαση και επισήμανση περιοχών με έντονη μεταβολή Ροής Θερμότητας (πράσινο) και περιοχών με μικρότερες μεταβολές (κόκκινο) σε συνάρτηση με τις συνολικές ώρες λειτουργίας, για τον αεριοστρόβιλο GT2.**

Στις πράσινες περιοχές του σχήματος 4.14, η Ροή Θερμότητας παρουσιάζει έντονες μεταβολές, που είναι ίσες με 1.7% και 1.9%, οι οποίες αντιστοιχούν στις 12300 και 13400 ώρες λειτουργίας. Πιο αναλυτικά, οι μειώσεις αυτές συμπίπτουν χρονικά με τις αντίστοιχες αυξήσεις του φορτίου, που απεικονίζονται στο Σχήμα 4.9, αλλά η ποσοστιαία μεταβολή είναι μικρότερη από αυτήν του φορτίου. Δηλαδή, η πτώση κατά 1.7% της Ροής της Θερμότητας αντιστοιχεί σε 2.9% άυξηση του φορτίου στις 12300 ώρες, ενώ στις 13400 ώρες η πτώση κατά 1.9% αντιστοιχεί σε αύξηση φορτίου της τάξης του 4.3%. Αυτό σημαίνει, ότι και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει βελτίωση της απόδοσης του κινητήρα, η οποία μπορεί να οφείλεται είτε σε On-Line πλύσιμο του συμπιεστή είτε σε Off-Line. Όμως, από τη βάση δεδομένων φαίνεται ότι για τις συγκεκριμένες ώρες λειτουργίας αντιστοιχούν χρονικά κενά μίας ημέρας (9/2/2011 και 20/6/2011, αντίστοιχα), που σημαίνει ότι πραγματοποιήθηκαν Off-Line πλυσίματα και στις δύο περιπτώσεις.

Στη συνέχεια, οι κόκκινες περιοχές του σχήματος 4.9, οι οποίες εκφράζουν μικρές αυξήσεις του διορθωμένου φορτίου του αεριοστρόβιλου 2 δεν έχουν αντίκρουσμα στη Ροή Θερμότητας, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.14, οπότε είναι πιθανό να οφείλονται σε On-Line πλύσιμο, αφού κατά τη συγκεκριμένη μεταβολή του φορτίου η μηχανή ήταν εν λειτουργία.



# 5

## Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα.

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μία σύντομη ανακεφαλαίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Θα γίνει αναφορά στα σημαντικότερα στοιχεία και στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν.

### 5.1 Ανακεφαλαίωση.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε επεξεργασία πραγματικών μετρήσεων από αεριοστροβίλους με σκοπό τη συσχέτιση τους με τις διαδικασίες συντήρησης, αλλά και τη διάγνωση της κατάστασης τους.

Πιο συγκεκριμένα, αφού έγινε βιβλιογραφική αναφορά στους τρόπους διόρθωσης των αεροθερμοδυναμικών μεγεθών, επιλέχθηκε ο πιο αξιόπιστος. Στη συνέχεια, στις μετρήσεις από τους αεριοστροβίλους της μονάδας III του Λαυρίου, εφαρμόστηκε η μέθοδος της αναγωγής σε σταθερό φορτίο, με χρήση της τεχνικής της γραμμικής προσέγγισης ελαχίστων τετραγώνων, ώστε να απεικονισθεί η τάση μεταβολής των υπό μελέτη μεγεθών, αλλά και να υπολογισθεί η συσχέτιση της με τις δεδομένες διαδικασίες συντήρησης. Ακολουθώντας, με την επιλογή των κατάλληλων μετρήσεων από τη βάση δεδομένων, πραγματοποιήθηκε βελτίωση του μοντέλου της συγκεκριμένης μηχανής στο λογισμικού TEACHES. Το TEACHES έχει αναπτυχθεί από το Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών ΕΜΠ, και έχει τη δυνατότητα για λειτουργία προσομοίωσης αλλά και διάγνωσης πολλών τύπων αεριοστροβίλων. Έτσι με τη βελτιωμένη έκδοση πραγματοποιήθηκε διάγνωση της κατάστασης των δύο κινητήρων. Αυτό έγινε με τον υπολογισμό των παραμέτρων υγείας, αλλά και μεγεθών που αντικατοπτρίζουν την κατάσταση της μηχανή όπως ο βαθμός απόδοσης, η παροχή και το φορτίο. Επίσης, υπολογίστηκε και ο ρυθμός υποβάθμισης του βαθμού απόδοσης και του φορτίου, βάσει του οποίου προτάθηκε ένας βέλτιστος αριθμός Off-Line πλυσιμάτων των δύο συμπιεστών.

Στη συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγινε επεξεργασία των μετρήσεων των αεριοστροβίλων του σταθμού στο Αλουμίνιο της Ελλάδας. Ειδικότερα, δημιουργήθηκε κώδικας (VBA) για τον υπολογισμό του διορθωμένου φορτίου και της διορθωμένης Ροής Θερμότητας (Heat Rate), μεγέθη ενδεικτικά για την κατάσταση των μηχανών. Με την παρατήρηση της μεταβολής των μεγεθών

αυτών, εξήχθησαν συμπεράσματα γύρω από τις πιθανές παρεμβάσεις στους κινητήρες, χωρίς βέβαια να υπάρχει διαθέσιμο ιστορικό.

### **5.2 Συμπεράσματα.**

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξήχθησαν ορισμένα βασικά συμπεράσματα, τα κυριότερα από τα οποία είναι:

- Η πλήρης καταγραφή των συμβάντων και συντηρήσεων σε έναν αεριοστρόβιλο αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για τη παρακολούθηση λειτουργίας της μηχανής.
- Η ανάλυση των μετρήσεων πριν και μετά από κάθε συμβάν βοηθάει στην δημιουργία γνώσης γύρω από την συμπεριφορά της μηχανής στο συγκεκριμένο γεγονός, ενώ παρέχει και πολύτιμη πληροφορία σχετικά με την αποδοτικότητα της επέμβασης σε περίπτωση συντήρησης.
- Για να συγκρίνουμε δύο διαφορετικές καταστάσεις μιας μηχανής είναι απαραίτητη η διόρθωση των επιδόσεων της μηχανής σε συνθήκες αναφοράς. Η βέλτιστη μέθοδος διόρθωσης των επιδόσεων μια μηχανής είναι οι καμπύλες διόρθωσης που παρέχονται από τον κατασκευαστή.
- Σε περίπτωση μη διαθεσιμότητας των καμπυλών αυτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατάλληλο μοντέλο προσομοίωσης λειτουργίας της μηχανής που παρέχει αντίστοιχη πληροφορία καθώς και επιπλέον δυνατότητες, όπως απευθείας διάγνωση με χρήση των διαθέσιμων μετρήσεων.
- Οι διαδικασίες συντήρησης μιας μηχανής έχουν άμεσο αντίκτυπο στα μετρούμενα μεγέθη καθώς και στα μεγέθη επιδόσεων. Ιδιαίτερα αυτό φαίνεται στο φορτίο, στην κατανάλωση καυσίμου, στην πίεση και θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή και στην πτώση πίεσης στα φίλτρα. Άρα η χρήση των μετρήσεων αυτών μπορεί να βοηθήσει τη διάγνωση της κατάστασης της μηχανής.
- Όσον αφορά την θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων οι μεταβολές που παρατηρούνται λόγω χειροτέρευσης της μηχανής δεν είναι διακριτές λόγω του τρόπου ελέγχου της μηχανής όπου πραγματοποιείται με διατήρηση της θερμοκρασίας εισόδου του στροβίλου.

# 6

## Βιβλιογραφία

### Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Boyce, M. P. (2006). *Gas Turbine Engineering Handbook*. UK: Gulf Professional Publishing.
- GE. (2006). *GT NU Thermal Performance Test Procedure RevA*. France.
- GEC. *GEC GAS TURBINES*.
- P.P.Walsh, P. *Gas Turbine Performance*. Blackwell.
- Robert Hoefl, J. J. (GER-3620J). *Heavy Duty Gas Turbine Operating and Maintenance Considerations*. Atlanta, GA: GE Energy Services.
- Saravanamuttoo. (2009). *Gas Turbine Theory*.
- Volponi, A. (1999). *Gas Turbine Parameter Correction*. ASME.

### Ελληνική Βιβλιογραφία

- ΔΕΗ. (2003). *LavrionIII\_Description*. Λαύριο.
- ΕΘΣ/ΕΜΠ. (2005). *ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΜΟΝΑΔΑΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΝοIII ΤΟΥ ΑΗΣ ΛΑΥΡΙΟΥ*. Αθήνα.
- ΕΘΣ/ΕΜΠ. (2009). *ΕΝΤΥΠΟ ΥΠΟΒΟΛΗΣ\_ΕΘΣ-ΕΣΗΕ-ΜΕΤΚΑ*. Αθήνα.
- Κ.Δ. Παπαηλιού, Κ. Μ. (2000). *Εισαγωγή στις Θερμικές Στροβιλομηχανές*. Αθήνα: ΕΘΣ ΕΜΠ.
- Κ.Μαθιουδάκης. (2007). *Διαγνωστική Αεριοστροβίλων*. Αθήνα.
- Κ.Μαθιουδάκης. (2007). *Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Ατμοστροβίλων*. Αθήνα.
- Κ.Χ.Γιαννάκογλου, Ι. (2003). *Αριθμητική Ανάλυση για Μηχανικούς*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Ν.Αρετάκης, Ι. Γ. (2012). Compressor washing economic analysis and optimization for power generation. *Elsevier* , 11.

