



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**«ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ, ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ»**

Διδακτορική διατριβή από τον

Γεώργιο Μ. Τζολάκη
Μηχανολόγο Μηχανικό

Υποβλήθηκε για την απόκτηση του τίτλου του
Διδάκτορα του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας

Επιβλέπων: Ανανίας Τομπουλίδης, Καθηγητής

ΚΟΖΑΝΗ 2009

*Στους γονείς μου, Μιχάλη και Νατάσα
και στην αδερφή μου Ειρήνη.*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή ξεκίνησε επίσημα τον Μάιο του 2005 στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας (ΠΔΜ) και συγκεκριμένα στο Εργαστήριο Θερμοδυναμικής και Θερμικών Μηχανών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών (ΤΜΜ). Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε, εντάχθηκε στο ερευνητικό πρόγραμμα του εργαστηρίου, με αντικείμενο την «Εξοικονόμηση ενέργειας, μείωση εκπομπών, βελτίωση λειτουργικών χαρακτηριστικών και βαθμού απόδοσης ΑΗΣ, με την ανάπτυξη και εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογιών ανάλυσης, παρακολούθησης και βελτιστοποίησης». Η έρευνά υλοποιήθηκε στα πλαίσια του Επιχειρηματικού Προγράμματος ΠΕΝΕΔ 2003 (ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ, Ε.Π. ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ) και χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΚΤ) κατά 75% και το Ελληνικό Δημόσιο (ΥΠΑΝ-ΓΓΕΤ) κατά 25%.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που με βοήθησαν και μου συμπαραστάθηκαν σε όλη την πορεία της διδακτορικής μου διατριβής, από την αρχή μέχρι και την ολοκλήρωσή της. Ιδιαίτερα, θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντά μου κ. Τομπουλίδη Ανανία, για την τιμή που μου έκανε να συνεργαστώ μαζί του. Επίσης για την άριστη καθοδήγηση που μου προσέφερε, τη διαρκή ενασχόληση και ενδιαφέρον που επέδειξε από την αρχή της διατριβής μου, την στήριξή του σε δύσκολες στιγμές αλλά και την συμμετοχή του σε ευχάριστες στιγμές.

Συνεχίζοντας, θέλω να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς μου επιτροπής κ. Τουρλιδάκη Αντώνιο και Σαμαρά Νικόλαο οι οποίοι με την παρουσία τους και την συνεχή επικοινωνία που είχαμε μαζί, βοήθησαν στην αντιμετώπιση εξειδικευμένων προβλημάτων στην πορεία του διδακτορικού καθώς και στην προώθηση της δουλειάς προς τα έξω, μέσω συνεδρίων και δημοσιεύσεων, σε συνεννόηση πάντα με τον επιβλέπον.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ θέλω να πω στον Δρ. Κολοκοτρώνη Δημήτριο ο οποίος με την συνεχή του παρακολούθηση και βοήθεια συνέβαλλε στην ομαλή και σωστή εξέλιξη της διδακτορικής διατριβής και στην αντιμετώπιση καθημερινών αλλά και εξειδικευμένων προβλημάτων ανά πάσα στιγμή και ανεξαρτήτως ώρας. Η συμβολή του στην ομαλή εξέλιξη της διατριβής ήταν ζωτικής σημασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστώ τους καθηγητές κ. Γεωργιάδη Μιχαήλ και Brian Elmegaard. Το κ. Γεωργιάδη για την καιρία συμβολή του στην επιλογή του προγράμματος gPROMS για την βελτιστοποίηση το οποίο επικράτησε τελικά ως ένα εκ των δύο προγραμμάτων που τελικά και χρησιμοποιήσαμε. Επίσης για την τεχνική υποστήριξη που μου πρόσφερε ο ίδιος είτε μέσω ατόμων με τα οποία με έφερε σε επαφή και είχαν την απαιτούμενη τεχνογνωσία. Τον κ. Elmegaard γιατί ως ένας εκ των δημιουργών του D.N.A. (το δεύτερο πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε) βοήθησε τόσο με την προμήθεια της τελευταίας μη δημοσιευμένης έκδοσης του προγράμματος όσο και με απαντήσεις σε ερωτήσεις τεχνικής φύσεως του προγράμματος.

Επίσης ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να δώσω στους κύριους Dragan Nikolic`, Δρ. Πολίτη Μαυρίκιο, Παπανικολάου Περικλή και Παναγιωτίδη Ιωάννη. Τους δύο πρώτους για την τεχνικής φύσεως βοήθεια και υποστήριξη με το gPROMS, τον κ. Παπανικολάου για την βοήθεια του σε θέματα σχετικά με το D.N.A. αλλά και με την εγκυρότητα των δεδομένων από την Μονάδα IV του Α.Η.Σ. Καρδιάς σε συνεργασία

με τον κ. Παναγιωτίδη αλλά και το υπόλοιπο προσωπικό της μονάδας τους οποίους ευχαριστώ θερμά.

Ειδική μνεία θέλω να κάνω στον καθηγητή κ. Κάλφα Ανέστη και τον αγαπητό φίλο και συνάδερφο από τα φοιτητικά χρόνια Μητάκο Δημήτριο, χωρίς την συμβολή των οποίων η επαφή μου με τον κ. Τομπουλίδη δεν θα είχε πραγματοποιηθεί.

Είμαι ευγνώμων στους συναδέλφους και φίλους, Γκατζούλη Αθανάσιο, Κόνια Φώτη, Αγαλερίδου Ελένη, Βακουφτσή Ελένη, Πετρίδου Μελίνα, Κοπανίδη Τάσο, Τσοτουλίδη Γεώργιο, Νασερεντίν Βασίλη, Ιωαννίδου Αλεξάνδρα, Μαυρίδου Σοφία και Θεοδωρίδη Αντώνη για τις υποδείξεις, την βοήθεια, τη στήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια καθώς και τις ωραίες στιγμές που περάσαμε μαζί.

Ευχαριστώ επίσης θερμά την Βύρλιου Φωτεινή, η οποία στάθηκε στο πλευρό μου και με στήριξε χωρίς ποτέ να με εγκαταλείψει.

Τέλος, δεν βρίσκω λόγια να εκφράσω τις πιο θερμές μου ευχαριστίες στους γονείς μου, Μιχάλη και Νατάσα και την αδερφή μου Ειρήνη, για τη σημαντική υποστήριξη και την υπομονή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Τζολάκης Γεώργιος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μια από τις σημαντικότερες πηγές εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα είναι η ηλεκτροπαραγωγή από ορυκτά καύσιμα (λιγνίτης, λιθάνθρακας, πετρέλαιο, κ.τ.λ.). Το 84% της ηλεκτρικής παραγωγής στην Ελλάδα (πηγή: Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας) προέρχεται από την καύση λιγνίτη. Συνεπώς, βέλτιστη λειτουργία του συστήματος μετατροπής θα έχει σαν αποτέλεσμα υψηλότερη αποδοτικότητα της καύσης και του κυκλώματος νερού-ατμού. Με αυτό τον τρόπο, ίδια ηλεκτρική ισχύς μπορεί να παραχθεί με μικρότερη απαίτηση σε καύσιμο άρα και χαμηλότερες εκπομπές. Ο παραπάνω λόγος ήταν και το κίνητρο για την μοντελοποίηση, προσομοίωση και βελτιστοποίηση μίας λιγνιτικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής μέγιστης παραγόμενης ισχύος 300MW (παρόμοια με την μονάδα IV του Α.Η.Σ. Καρδιάς).

Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο λογισμικά τα οποία χρησιμοποιούν επαναληπτικούς λύτες. Το πρώτο από αυτά ήταν το ανοιχτού πηγαίου κώδικα (open source code) λογισμικό D.N.A. (Dynamic Network Analysis) και το δεύτερο ήταν το gPROMS της Process System Enterprise. Το πρώτο από αυτά έχει το πλεονέκτημα ότι διαθέτει έτοιμη βιβλιοθήκη με τα μοντέλα των επιμέρους στοιχείων από τα οποία αποτελείται μία μονάδα ηλεκτροπαραγωγής καθώς και των ιδιοτήτων νερού, καυσίμου και καυσαερίων αλλά δεν διαθέτει λύτη βελτιστοποίησης. Αντίθετα, το δεύτερο, διαθέτει και λύτη για βελτιστοποίηση αλλά όλα τα μαθηματικά μοντέλα έπρεπε να κωδικοποιηθούν από την αρχή. Ο λύτης της βελτιστοποίησης είναι μη-γραμμικός. Το χαρακτηριστικό αυτό ήταν αναγκαίο δεδομένης της μη γραμμικής φύσης του προβλήματος βελτιστοποίησης βαθμού απόδοσης.

Η προσομοίωση σε σταθερή κατάσταση για το μέγιστο φορτίο ήταν επιτυχής για το απλοποιημένο – ως προς το λέβητα με τους υπερθερμαντές και αναθερμαντές - κύκλωμα νερού-ατμού και με τα δύο λογισμικά σε σύγκριση με τα μετρημένα δεδομένα της μονάδας με την απόκλιση σε καμία περίπτωση να μην ξεπερνάει το 5%. Η εφαρμογή του αλγόριθμου βελτιστοποίησης παρουσίασε αύξηση κατά ~1,42% στο βαθμό απόδοσης του κυκλώματος νερού-ατμού με μεταβλητές ελέγχου τις παροχές των απομαστεύσεων από τις διάφορες βαθμίδες των στροβίλων. Μετέπειτα πραγματοποιήθηκε αναλυτική μοντελοποίηση και προσομοίωση στο κύκλωμα του λέβητα με τους υπερθερμαντές και αναθερμαντές. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ήταν και εδώ επιτυχής σε σύγκριση με τα μετρημένα δεδομένα και με αποκλίσεις μικρότερες του 5%. Τέλος μοντελοποίηση, προσομοίωση και βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε και στο ολοκληρωμένο κύκλωμα της μονάδας, το αποτελούμενο από το απλοποιημένο κύκλωμα του νερού-ατμού στο οποίο έχει γίνει αντικατάσταση του λέβητα με το αναλυτικό μοντέλο του κυκλώματος του λέβητα με υπερθερμαντές και αναθερμαντές που προσομοιώθηκε προηγουμένως. Η προσομοίωση ήταν και εδώ επιτυχής. Συγκεκριμένα η απόκλιση των αποτελεσμάτων δεν ξεπέρασε το 1% στο κύκλωμα του λέβητα και το 2% στο κύκλωμα του νερού ατμού. Μία εξαίρεση στο δεύτερο αποτέλεσε η αντλία μετά τον συμπυκνωτή. Η απόκλιση ήταν στο 6% λόγω της προηγουμένως υπόθεσης σταθερής τιμής η οποία πλέον εξισώνονταν από τις σχέσεις του αναλυτικού κυκλώματος του λέβητα.

Η βελτιστοποίηση του συνολικού κυκλώματος ήταν και αυτή επιτυχής με την βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης ολόκληρης της μονάδας να βελτιώνεται κατά

0,55% κατά απόλυτη τιμή, αύξηση η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική καθότι συνεπάγεται μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 11,5 τόνους ανά ώρα περίπου και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 4,8 τόνους ανά ώρα περίπου.

Συμπερασματικά, πραγματοποιήθηκε η μαθηματική μοντελοποίηση και βελτιστοποίησης ολόκληρης της μονάδας λιγνιτικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής στο λογισμικό βελτιστοποίησης. Για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκαν σαν μεταβλητές βελτιστοποίησης οι απομαστεύσεις των βαθμίδων των ατμοστροβίλων δίνοντας την δυνατότητα να γνωρίσουμε σε βάθος την επίδραση αυτών στις διεργασίες που πραγματοποιούνται σε μία μονάδα ηλεκτροπαραγωγής και να προσδιορίσουμε και αξιολογήσουμε τόσο τις μεταβολές αυτών όσο και την επίδρασή τους στην αντικειμενική συνάρτηση, δηλαδή τον βαθμό απόδοσης της μονάδας. Επίσης δημιουργήθηκαν εξωτερικά στοιχεία τα οποία δύνανται να συνεργαστούν με το gPROMS για τον υπολογισμό ιδιοτήτων μετάδοσης θερμότητας τόσο του νερού – ατμού όσο και των καυσαερίων και των καυσίμων. Παράλληλα δίνεται η δυνατότητα για δημιουργία ενός ευέλικτου λογισμικού το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση και άλλων μονάδων ή διεργασιών με απλές τροποποιήσεις, την χρήση επιπλέον διαφορετικών αλγόριθμων βελτιστοποίησης και προσομοίωσης καθώς και εναλλακτικών σεναρίων βελτιστοποίησης τόσο μικρής όσο και μεγάλης κλίμακας. Επιπλέον δύναται να χρησιμοποιηθεί σαν εργαλείο αποφάσεων στο κέντρο ελέγχου μέσω της τροφοδοσίας on-line δεδομένων από την μονάδα καθότι είναι δυνατή και η δυναμική προσομοίωση και βελτιστοποίηση.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1.	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΟΝ ΧΩΡΟ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ	1
1.2.	ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΙΣ ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΓΙΑ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	5
1.2.1.	<i>Συστήματα και μέθοδοι μέτρησης βαθμού απόδοσης θερμικών μονάδων</i>	<i>5</i>
1.2.2.	<i>Νευρωνικά δίκτυα</i>	<i>10</i>
1.2.3.	<i>Γενετικοί Αλγόριθμοι</i>	<i>13</i>
1.2.4.	<i>Μαθηματικός Προγραμματισμός</i>	<i>15</i>
1.2.4.1.	<i>Μη – γραμμικός προγραμματισμός</i>	<i>17</i>
1.2.4.2.	<i>Δυναμική βελτιστοποίηση</i>	<i>21</i>
1.3.	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ – ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	22
2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΟΝΑΔΑΣ.....	27
2.1.	ΦΥΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	27
2.1.1.	<i>Κύκλωμα νερού ατμού</i>	<i>27</i>
2.1.2.	<i>Κύκλωμα λέβητα – υπερθερμαντών.....</i>	<i>30</i>
2.1.3.	<i>Συνολικό μοντέλο σταθμού παραγωγής ενέργειας</i>	<i>32</i>
2.2.	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	34
2.2.1.	<i>Θερμοδυναμικές σχέσεις και σχέσεις μετάδοσης θερμότητας των ρευστών</i>	<i>34</i>
2.2.1.1.	<i>Θερμοδυναμικές ιδιότητες των ρευστών</i>	<i>34</i>
2.2.1.2.	<i>Σχέσεις μετάδοσης θερμότητας</i>	<i>35</i>
2.2.2.	<i>Επιμέρους μοντέλα μονάδας</i>	<i>39</i>
2.2.2.1.	<i>Κύκλωμα νερού – ατμού</i>	<i>39</i>
2.2.2.2.	<i>Κύκλωμα λέβητα – υπερθερμαντών, αναθερμαντών</i>	<i>45</i>
2.2.2.3.	<i>Ολοκληρωμένο κύκλωμα μονάδας.....</i>	<i>62</i>
3	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	63
3.1.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.....	63
3.1.1.	<i>Αλγόριθμοι επίλυσης προσομοίωσης</i>	<i>63</i>
3.1.1.1.	<i>Παραγοντοποίηση LU</i>	<i>63</i>
3.1.1.2.	<i>Μέθοδος Newton.....</i>	<i>65</i>
3.1.1.3.	<i>Αλγόριθμοι προς τα πίσω διαφοροποίησης (Backward Differentiation Formulae – BDF).....</i>	<i>68</i>
3.1.2.	<i>Αλγόριθμοι επίλυσης βελτιστοποίησης</i>	<i>70</i>
3.1.2.1.	<i>Αλγόριθμος ακολουθιακού δευτεροβάθμιου προγραμματισμού (Sequential Quadratic Programming - SQP).....</i>	<i>70</i>
3.1.2.2.	<i>Παραμετροποίηση διανύσματος μεταβλητών ελέγχου (Control Vector Parameterization – CVP).....</i>	<i>75</i>
3.2.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	75
3.2.1.	<i>D.N.A.....</i>	<i>76</i>
3.2.1.1.	<i>Φυσικό μοντέλο.....</i>	<i>77</i>
3.2.1.2.	<i>Μαθηματικό μοντέλο</i>	<i>80</i>
3.2.1.3.	<i>Αριθμητικές μέθοδοι στις προσομοιώσεις</i>	<i>81</i>
3.2.1.4.	<i>Αξιολόγηση του D.N.A.....</i>	<i>84</i>
3.2.2.	<i>gPROMS.....</i>	<i>84</i>
3.2.2.1.	<i>Μεθοδολογία προσομοίωσης</i>	<i>86</i>
3.2.2.2.	<i>Μεθοδολογία βελτιστοποίησης</i>	<i>89</i>
4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	92
4.1.	ΚΥΚΛΩΜΑ ΝΕΡΟΥ – ΑΤΜΟΥ	92
4.1.1.	<i>Σταθερά Στροβίλου CT.....</i>	<i>93</i>
4.1.2.	<i>Πολυτροπικός Βαθμός Απόδοσης.....</i>	<i>97</i>
4.2.	ΚΥΚΛΩΜΑ ΛΕΒΗΤΑ – ΥΠΕΡΘΕΡΜΑΝΤΩΝ, ΑΝΑΘΕΡΜΑΝΤΩΝ.....	100
4.2.1.	<i>Απλοποιήσεις και παραδοχές των μοντέλων προσομοίωσης</i>	<i>102</i>
4.2.1.1.	<i>D.N.A.....</i>	<i>102</i>
4.2.1.2.	<i>gPROMS</i>	<i>104</i>
4.2.2.	<i>Προσομοίωση μοντέλου D.N.A.....</i>	<i>108</i>
4.2.2.1.	<i>D.N.A.....</i>	<i>108</i>
4.2.2.2.	<i>gPROMS</i>	<i>110</i>

4.2.3.	<i>Προσομοίωση μοντέλου gPROMS</i>	116
4.2.3.1.	Χρήση στροβίλου HP με σταθερά CT.....	116
4.2.3.2.	Χρήση στροβίλου HP με πολυτροπικό βαθμό απόδοσης.....	120
4.3.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΟΝΑΔΑΣ ΣΤΟ GPROMS	122
4.3.1.	<i>Νερό - ατμός</i>	123
4.3.2.	<i>Λέβητας</i>	126
4.4.	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΣΤΟ GPROMS	129
4.4.1.	<i>Δημιουργία εξωτερικού προγράμματος συνεργασίας με το gPROMS (FOREIGN OBJECT - FO)</i>	131
4.4.2.	<i>Αποτελέσματα προσομοίωσης εναλλακτικού μοντέλου</i>	132
4.4.2.1.	Σύγκριση των υπολογισμών μεμονωμένων των ιδιοτήτων	132
4.4.2.2.	Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης μονάδας	133
5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	138
5.1.	ΚΥΚΛΩΜΑ ΝΕΡΟΥ - ΑΤΜΟΥ.....	138
5.1.1.	<i>Χαρακτηριστική στροβίλου CT</i>	140
5.1.2.	<i>Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου</i>	144
5.2.	ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΟΝΑΔΑΣ	152
5.2.1.	<i>Παρουσίαση αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης ολοκληρωμένου κυκλώματος μονάδας</i>	155
5.2.2.	<i>Αποτελέσματα προσομοίωσης της μονάδας με χρήση των τιμών της βελτιστοποίησης του κυκλώματος νερού – ατμού</i>	164
5.2.3.	<i>Επίδραση εκλογής κατάλληλων περιορισμών</i>	171
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	175
6.1.	ΣΤΟΧΟΙ ΠΟΥ ΕΠΙΤΕΥΧΘΗΚΑΝ	175
6.2.	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΟΥΛΕΙΑ.....	179
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	182
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	1
A.	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ	1

ΣΗΜΕΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΛΑΤΙΝΙΚΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΕΣ

A	Εμβαδόν επιφάνειας	[m ²]
B	Εκπομπή ακτινοβολίας από επιφάνεια	[kW/m ²]
c_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα	[kJ/kgK]
F	Παράγοντας όψης	[-]
F^o_p	Παράγοντας διόρθωσης για πολικότητα μορίων	[-]
F^o_Q	Παράγοντας διόρθωσης για κβαντικά φαινόμενα	[-]
f	Συντελεστής τριβής	[-]
g	Επιτάχυνση βαρύτητας	[m/s ²]
H	Εκπομπή ακτινοβολίας προς επιφάνεια	[kW/m ²]
h	Ειδική ενθαλπία	[kJ/kg]
h	χρονικό βήμα	[s]
J	Ιακωβιανός πίνακας	[-]
L	Μέσο μήκος κύματος ακτινοβολίας για αέρια	[m]
l	Μήκος	[m]
\dot{m}	Ροή μάζας	[kg/s]
M	Γραμμομοριακό βάρος	[k]
Nu	Αριθμός Nusselt	[-]
p	Πίεση	[bar]
p_c	Κρίσιμη πίεση	[bar]
P_{CO2}	Μερική πίεση διοξειδίου του άνθρακα	[bar]
P_{H2O}	Μερική πίεση αερίου νερού	[bar]
Pr	Αριθμός Prandtl	[-]
\dot{Q}	Θερμοροή	[kW]
R	Παγκόσμια σταθερά αερίων	[kJ/kmole K]
R_{foul}	Συντελεστής ρύπανσης	[kW/K]
r	Ακτίνα	[m]
Re	Αριθμός Reynolds	[-]
ΔT	Διαφορά θερμοκρασίας	[K]
ΔT_{lm}	Λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας	[K]
T	Θερμοκρασία	[K]
T_c	Κρίσιμη θερμοκρασία	[K]
T_r	Αδιάστατη θερμοκρασία	[-]
T_g	Θερμοκρασία αερίου	[K]
T_w	Θερμοκρασία επιφάνειας	[K]
V	Όγκος θαλάμου	[m ³]
Y	Ειδικός όγκος	[m ³ /kg]
v_c	Κρίσιμος ειδικός όγκος	[m ³ /kg]
W	Ταχύτητα	[m/s]
Y	διάνυσμα Nordisiek	

ΕΛΛΗΝΙΚΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΕΣ

α	Απορροφητικότητα αερίου	[-]
α	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας	[kW/m ² K]
β	Αδιάστατη πίεση	[-]
β	Σταθερές μεθόδου BDF	
ϵ	Βαθμός μεταφοράς θερμότητας	[-]
ϵ	Εκπεμνιμότητα	[-]
ϵ_g	Εκπεμνιμότητα αερίου	[-]
ζ	Ανοιγμένη ελεύθερη ενέργεια Gibbs	[kJ/kg]
η	Βαθμός απόδοσης κυλώματος νερού - ατμού	[-]
η -thermal	Βαθμός απόδοσης κυλώματος λέβητα	[-]
η -total	Βαθμός απόδοσης συνολικής μονάδας	[-]
θ	Αδιάστατη θερμοκρασία	[-]
λ	Θερμική αγωγιμότητα	[kW/mK]
ν	Κινηματικό ιξώδες	[m ² /s]
ρ	Ανακλαστικότητα	[-]
ρ	Πυκνότητα	[kg/m ³]
σ	Ανοιγμένη εντροπία	[kJ/kgK]
σ	Σταθερά Boltzman	[kW/m ² K ⁴]
τ	Διαπερατότητα	[-]
χ	Αδιάστατος ειδικός όγκος	[-]
ψ	Ανοιγμένη ενέργεια Helmholtz	[kJ/kg]
ω	Παράγοντας εκκεντρότητας	[-]

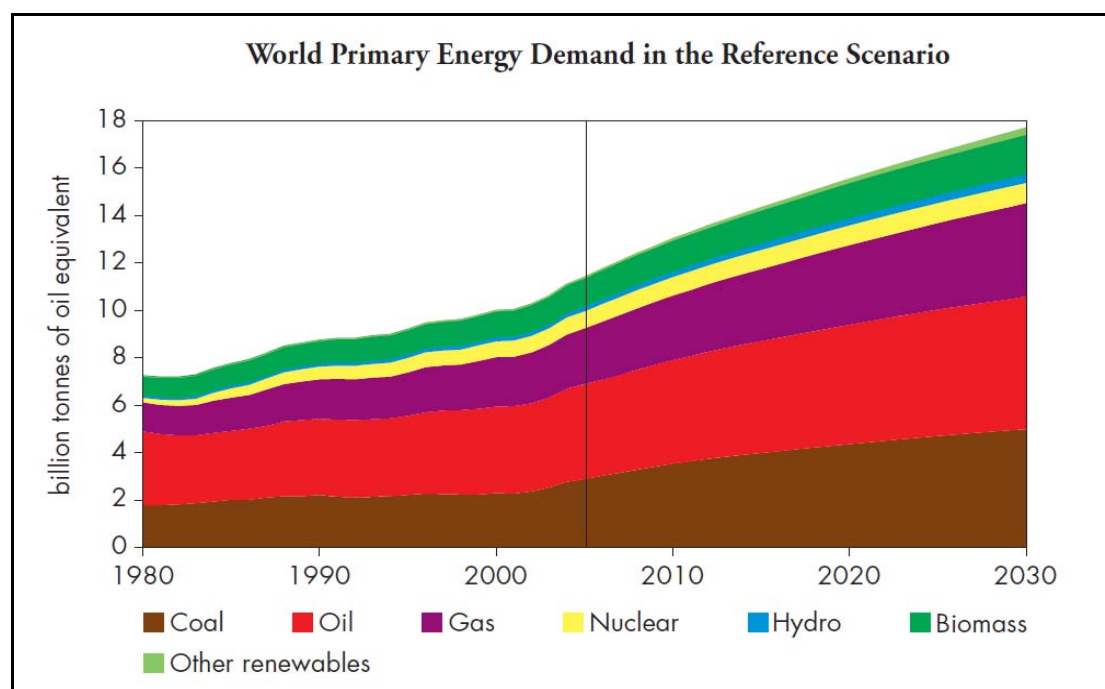
ΔΕΙΚΤΕΣ

f	φλόγα
g	αέριο
in	είσοδος
out	έξοδος
par	σωματίδια
S	στερεό τοίχωμα

1 Εισαγωγή

1.1. Κατάσταση στον χώρο της ενέργειας – σύγχρονες τάσεις

Παρακολουθώντας κανείς τις παγκόσμιες ενεργειακές εξελίξεις και την τάση που επικρατεί στην απαίτηση ενέργειας, η πρόβλεψη για διπλασιασμό αυτής μέχρι το 2030, το οποίο φαίνεται και στην Εικόνα 1-1, παρουσιάζεται ρεαλιστική. 55% αύξηση αναμένεται για την περίοδο 2005-2030 με βάση την πρόβλεψη από την έκθεση της IEA (2007) ποσοστό το οποίο πέφτει με τις εκτιμήσεις της έκθεσης του 2008 στο 45%, επίσης πολύ υψηλό.



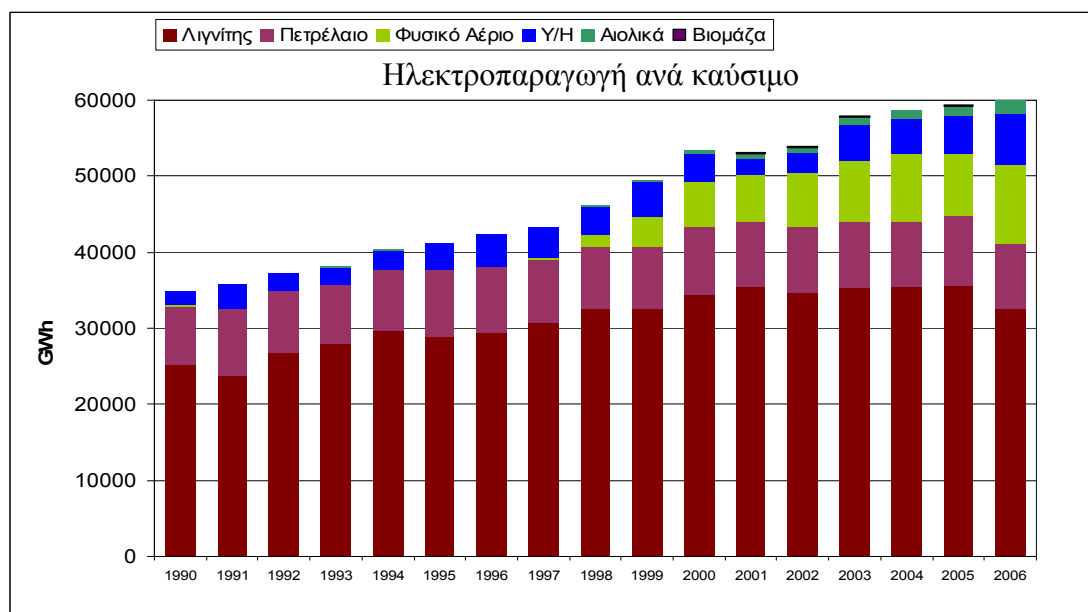
Εικόνα 1-1 Πρόβλεψη πρωτογενούς ενεργειακής απαίτησης ανά καύσιμο μέχρι το 2030 (World Energy Outlook 2007, International Energy Agency).

Στο διάστημα αυτό τα ορυκτά καύσιμα θα είναι τα κυρίαρχα καθώς και αυτά με το μεγαλύτερο ποσοστό αύξησης συμμετοχής για την κάλυψη της προαναφερθείσας ενεργειακής απαίτησης καθώς το ποσοστό αυτό θα παραμείνει υψηλό και της τάξης του 84% της συνολικής αύξησης. Από αυτά αν και το πετρέλαιο είναι το κυρίαρχο, η συμμετοχή του θα μειωθεί κατά 3% ενώ κατά το ίδιο ποσοστό θα αυξηθεί αυτή του κάρβουνου. Η ηλεκτροπαραγωγή, συγκεκριμένα στο διάστημα αυτό, αναμένεται να διπλασιασθεί οπότε αυξάνεται και η απαίτηση για πρωτογενή ενέργεια από 17% σε 22% της συνολικής παραγόμενης.

Αυτό όμως που έχει αλλάξει σε σχέση με το παρελθόν, είναι ο γνώμονας που έχει τεθεί στην σύγχρονη παραγωγική διαδικασία, ο οποίος είναι η προστασία του περιβάλλοντος με ιδιαίτερη έμφαση στις εκπομπές του CO₂, του κυριότερου αερίου που συνεισφέρει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Από την ίδια έκθεση, η αύξηση αυτή ανάγκης ορυκτών καυσίμων θα οδηγήσει σε αύξηση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα κατά 57% για την ίδια χρονική περίοδο.

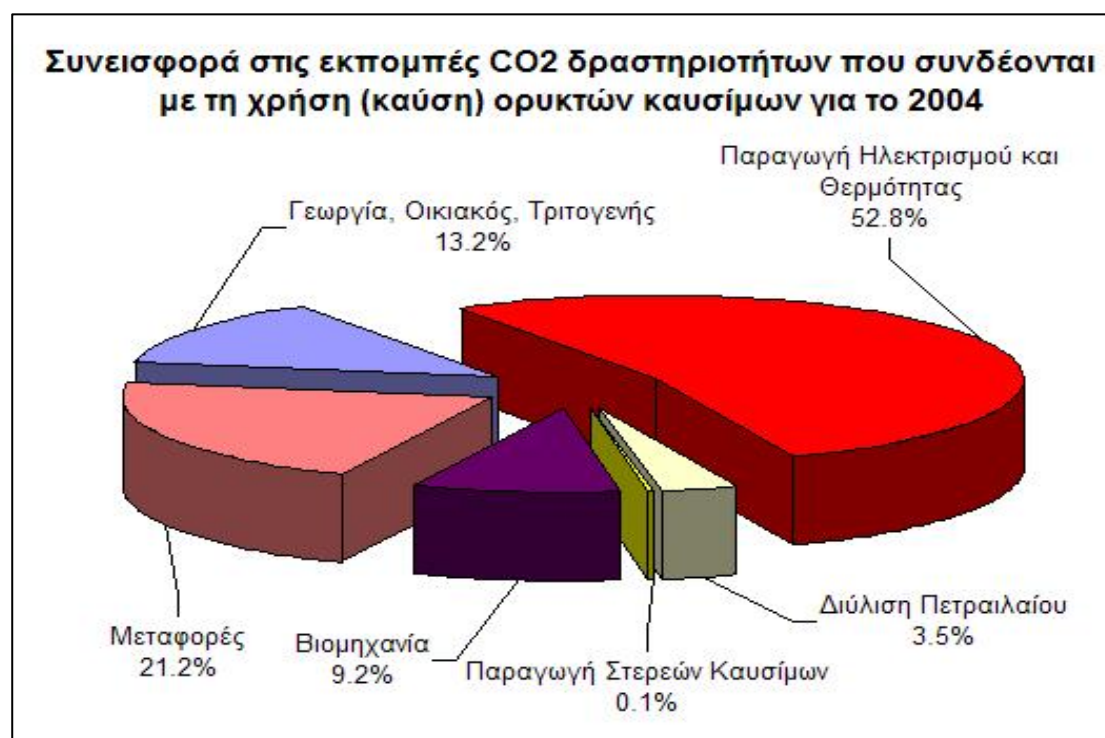
Σε ότι αφορά την περίπτωση της Ευρώπης, τα ορυκτά καύσιμα κατέχουν την κυρίαρχη θέση στην παραγωγή ενέργειας, τα οποία είναι και οι κύριοι παραγωγοί CO₂ άρα και επηρεάζουν περισσότερο τις κλιματικές αλλαγές. Έπειτα και από την υπογραφή της συνθήκης του Κιότο, η οποία θέτει σαν στόχο την μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου κατά 8% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, μέχρι το 2008-2012, η πρόκληση η οποία εμφανίζεται είναι η συνέχιση χρησιμοποίησης των διαθέσιμων ορυκτών καυσίμων με παράλληλη εξάλειψη των εκπομπών του CO₂ και γενικότερα των αερίων του θερμοκηπίου.

Όσον αφορά τώρα τα ελληνικά δεδομένα είναι εμφανές από το διάγραμμα της Εικόνας 1-2 (Υπουργείο Ανάπτυξης, 2007) ότι το μεγαλύτερο ποσοστό συμμετοχής στην ηλεκτροπαραγωγή για την Ελλάδα το κατέχει ο λιγνίτης σε ποσοστό 62%, κάτι το οποίο και ήταν αναμενόμενο από την στιγμή που η Ελλάδα είναι ο 4^{ος} μεγαλύτερος παραγωγός λιγνίτη στον κόσμο, μετά από κολοσσούς όπως η Γερμανία, η Αμερική και η Ρωσία.



Εικόνα 1-2 Συμμετοχή των διαφόρων καυσίμων για την ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα για το διάστημα 1990-2006.

Παρατηρώντας τον παράγοντα που ενδιαφέρει επιπλέον την παραγωγή ενέργειας, δηλαδή τις εκπομπές κυρίως του CO₂, είναι εμφανές στην Εικόνα 1-3 (Υπουργείο Ανάπτυξης, 2007) το σημαντικό ποσοστό που κατέχει στην παραγωγή τους η ηλεκτροπαραγωγή το οποίο ξεπερνάει το 50%, επομένως αποτελεί τον πρώτο τομέα που πρέπει να εξετασθεί για μείωση εκπομπών. Δεδομένου του αποθεματικού που διαθέτει η Ελλάδα σε λιγνίτη, το οποίο από τον Πίνακα 1-1 δίνει μια εκτίμηση λειτουργίας για άλλα 44 χρόνια με βάση τους σημερινούς ρυθμούς παραγωγής (Υπουργείο Ανάπτυξης, 2007), δεν μπορεί ακόμα να αντικατασταθεί πλήρως η χρήση του από άλλα, εισαγόμενα καύσιμα, όπως το φυσικό αέριο, τον λιθάνθρακα και τις ανανεώσιμες των οποίων το κόστος είναι μεγαλύτερο.



Εικόνα 1-3 Συμμετοχή των διαφόρων δραστηριοτήτων στην παραγωγή CO₂ στην Ελλάδα για το 2004.

Πίνακας 1-1 Εκτίμηση Αποθεμάτων Λιγνίτη (2004).

Περιοχή Ορυχείου	Τοποθεσία	Παραγωγή 2004 (Mt)	Απομένοντα Εκμεταλλεύσιμα Αποθέματα (Mt)	Απομένοντα Έτη Λειτουργίας με τον Σημερινό Ρυθμό Παραγωγής
Πτολεμαίδα (ΔΕΗ)	Δυτική Μακεδονία	46.08	1 280.7	28
Αμύνταιο (ΔΕΗ)	Δυτική Μακεδονία	8.52	165.3	19
Μεγαλόπολις (ΔΕΗ)	Πελοπόννησος	14.44	251.1	17

Φλώρινα (ΔΕΗ)	Δυτική Μακεδονία		138.4	161
Δράμα	Δυτική Μακεδονία		900	
Ελασσόνα (ΔΕΗ)	Κεντρική Ελλάδα		169	
Κομνηνά (ΔΕΗ)	Δυτική Μακεδονία		100	
Ιδιωτικά Ορυχεία	Δυτική Μακεδονία	2.02	191	95
ΣΥΝΟΛΟ		71.92	3 195.5	44

Με βάση τα παραπάνω επομένως, απαιτείται κυρίως η μείωση των εκπομπών του CO₂ από την χρήση του λιγνίτη. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι με βελτίωση του βαθμού απόδοσης των υφισταμένων μονάδων. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται αρχικά μείωση της κατανάλωσης καυσίμου για την ίδια ηλεκτροπαραγωγή η οποία συνεπάγεται μείωση της απαιτούμενης εξόρυξης σε πρώτη ύλη ανά έτος, άρα και αύξηση του εναπομένου χρόνου λειτουργίας. Παράλληλα όμως, μείωση της κατανάλωσης συνεπάγεται και μείωση των εκπομπών του CO₂ λόγω της μείωσης του παραγόμενου όγκου καυσαερίων, το οποίο είναι και το ζητούμενο της συνθήκης του Κιότο.

Ειδικά για την περίπτωση της Ελλάδας, όπου τα κοιτάσματα λιγνίτη τα οποία διατίθενται είναι εξαιρετικά χαμηλής ποιότητας (φτωχής θερμογόνου δύναμης), η απαιτούμενη παροχή λιγνίτη είναι αυξημένη ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή παροχή θερμικής ενέργειας για την ζητούμενη ηλεκτροπαραγωγή. Συνεπώς βελτίωση του βαθμού απόδοσης σε μία μονάδα τροφοδοτούμενη από τέτοιο λιγνίτη συνεπάγεται αισθητή μείωση στην κατανάλωση καυσίμου.

Αρκετές εργασίες έχουν γίνει κατά καιρούς οι οποίες έχουν σταθεί τόσο στην προσομοίωση όσο και στην βελτιστοποίηση λιγνιτικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Πρώτα από όλα, ο Elmegaard (1999), στη διδακτορική του διατριβή, επέκτεινε τις δυνατότητες του DNA, το οποίο είναι ένα λογισμικό που προσομοιώνει ατμοηλεκτρικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έτσι ώστε να περιλαμβάνει και δυνατότητες προσομοίωσης για δυναμική συμπεριφορά των ατμολεβήτων. Με τις προσθήκες που έκανε σε αυτόν τον “ανοιχτό” (open source) πηγαίο κώδικα προσομοίωσε ατμολέβητα μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Δανία με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στον ίδιο τομέα, δηλαδή της προσομοίωσης, ο Rodrigues *et al.* (2005) πραγματεύτηκε την προσομοίωση του θαλάμου καύσης μέσα στον ατμολέβητα. Δημιούργησε ένα μονοδιάστατο ψευδό-ομογενές μαθηματικό

μοντέλο με μεταβλητές τις φυσικές ιδιότητες, βασισμένο σε διατήρηση μάζας και ενέργειας. Το μοντέλο αυτό το έβαλε στο λογισμικό gPROMS και η σύνθεση των καυσαερίων μετά την καύση υπολογίστηκε ικανοποιητικά.

Πέρα από την προσομοίωση, ο Pettin (2007) προχώρησε και στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας παραγωγής ενέργειας. Αφού την μαθηματοποίησε στο λογισμικό MATLAB, εκτέλεσε την προσομοίωση σε μονάδα 500 MW με ικανοποιητικά αποτελέσματα, με μοναδική εξαίρεση την παροχή ατμού στην έξοδο του στροβίλου υψηλής πίεσης όπου παρουσιαζόταν απόκλιση μεταξύ της πραγματικής τιμής της και της υπολογισμένης περίπου 11%. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του συγκεκριμένου λογισμικού, έδωσε ένα σημείο λειτουργίας για ελάχιστο κόστος καυσίμου με μεταβολές της παροχής του καυσίμου και του αέρα. Θερμό-οικονομική ανάλυση για ατμοηλεκτρική μονάδα παραγωγής ενέργειας στην Κίνα έχει γίνει από τον Zhang *et al.* (2006), η οποία κατέληξε σε χρήσιμα συμπεράσματα για τους σχεδιαστές και διαχειριστές μονάδων παραγωγής ενέργειας και οι συγγραφείς ισχυρίζονται την υπεροχή της θερμό-οικονομικής ανάλυσης σε σχέση με ανάλυση καθαρά βασισμένη στον πρώτο και δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο.

Ενδεικτικό της σημασίας που έχει η προσομοίωση και η βελτιστοποίηση τέτοιων διεργασιών είναι η χρηματοδότηση που δίδεται από το Υπουργείο Εμπορίας και Βιομηχανίας της μεγάλης Βρετανίας για την δημιουργία ενός εικονικού μοντέλου μονάδας παραγωγής ενέργειας με σκοπό την προσομοίωση καινοτόμων κύκλων παραγωγής ενέργειας (Patel & Wang, 2007)

1.2. Ανασκόπηση στις υπάρχουσες τεχνικές για επίτευξη βελτιστοποίησης υφιστάμενης μονάδας ηλεκτροπαραγωγής.

Βελτιστοποίηση των υφιστάμενων μονάδων μπορεί να επιτευχθεί με ποικίλους τρόπους οι οποίοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε μεθόδους παρακολούθησης και υπολογιστικές μεθόδους. Αυτές παρουσιάζονται στην συνέχεια μαζί με μία πιο αναλυτική περιγραφή του μαθηματικού προγραμματισμού όπου είναι και η μέθοδος η οποία θα χρησιμοποιηθεί.

1.2.1. Συστήματα και μέθοδοι μέτρησης βαθμού απόδοσης θερμικών μονάδων

Υπάρχουν αρκετά συστήματα μέτρησης βαθμού απόδοσης θερμικών μονάδων συνδυασμένα με συστήματα παρακολούθησης των λειτουργικών χαρακτηριστικών.

Αρχικά δίνεται ο ορισμός του βαθμού απόδοσης σε μια διεργασία μετατροπής ενέργειας, ο οποίος είναι ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς την προσαγόμενη ενέργεια μέσω του καύσιμου (Παπαγεωργίου, 1991). Η παραπάνω μέθοδος προσδιορισμού του βαθμού απόδοσης είναι η πιο απλή και κλασσική μέθοδος (Input/Output Method) η οποία όμως είναι για υπολογισμό μόνο μέσω των τιμών. Ο υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας μετράτε εύκολα από την μονάδα με αισθητήρια στην έξοδο της γεννήτριας που συνδέεται στην είσοδό της με τον στρόβιλο. Το δύσκολο κομμάτι είναι αυτό της εύρεσης του ρυθμού εισαγωγής ενέργειας από το καύσιμο.

Συστήματα μέτρησης πραγματικού χρόνου έχουν αναπτυχθεί αρκετά τα οποία παρά τις διαφορετικές αρχές λειτουργίας τους έχουν παραπλήσιες δυνατότητες. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν κατά κανόνα μεθοδολογίες έμμεσου προσδιορισμού του βαθμού απόδοσης. Με άλλα λόγια, δεν απαιτούν γνώση δεδομένων εισόδου του καυσίμου στον λέβητα για υπολογισμό προσδιδόμενης ενέργειας. Αμεσότητα στις μετρήσεις των μεγεθών για τα οποία προορίζονται είναι πλέον εφικτή με την ανάπτυξη νέων τεχνικών μετρήσεων που χρησιμοποιούν, όπως η χρήση αισθητήρων πολλαπλών μηκών κύματος βασισμένων σε συγχρονισμένες - σχεδόν - υπέρυθρες διοδικές ακτίνες λέιζερ (Tunable near-infrared Diode Lasers, TDL) (Hanson *et al.*, 2006) οι οποίες επιτρέπουν ταυτόχρονες μετρήσεις θερμοκρασίας και συγκεντρώσεις ατμού, οξυγόνου και μονοξειδίου του άνθρακα

Μεθοδολογίες εύρεσης και παρακολούθησης βαθμού απόδοσης είναι η μέθοδος βαθμού απόδοσης κυκλωμάτων λέβητα / στροβίλου (Boiler/Turbine-Cycle Efficiency, BTCE), η μέθοδος παραγόμενης ενέργειας / απωλειών (Output/Loss) η μέθοδος F-Factor καθώς και η μέθοδος Εισόδου / Απωλειών (Input/Loss Method)

Από αυτές η πρώτη (Lehigh University, 1996) βρίσκει τους βαθμούς απόδοσης λέβητα και στροβίλου και σε συνδυασμό των δύο βρίσκει αυτόν της μονάδας. Για τις απαιτούμενες μετρήσεις χρειάζονται πέρα από τους τυπικούς αισθητήρες της μονάδας, επιπλέον όργανα για το άκαυστο καύσιμο και για την ανάλυση του κύκλου του στροβίλου καθώς και μετρήσεις για την ισχύ των ανεμιστήρων και των μύλων. Για ακριβή αποτελέσματα απαιτούνται τακτικές μετρήσεις, προσοχή στον καθορισμό της συμβατότητας του βαθμού απόδοσης στροβίλου με αυτόν του λέβητα και προσοχή στη σύζευξη του κύκλου του στροβίλου με το λέβητα.

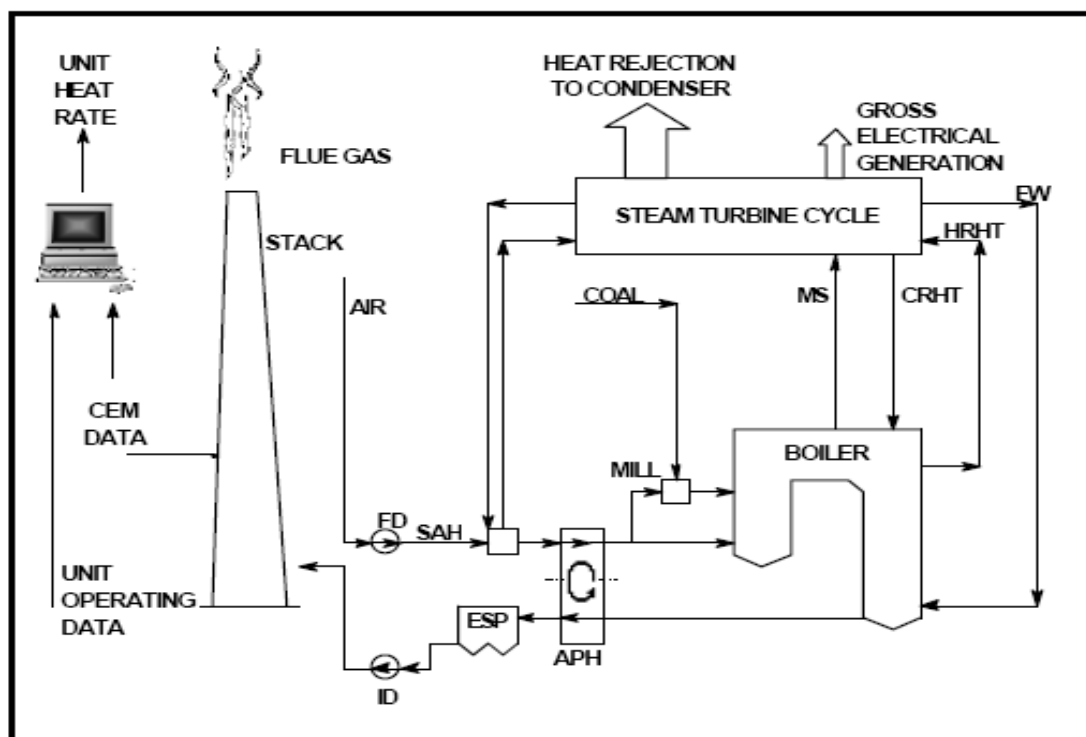
Η δεύτερη μέθοδος η οποία εφαρμόστηκε και από τους Munukulta *et al.*, (2006) και Kantubhukta *et al.* (2004) βασίζεται στον υπολογισμό του θερμικού φορτίου του λέβητα και των απωλειών του και χρησιμοποιείται για εύρεση βαθμού απόδοσης μονάδας και λέβητα (Output / Loss Method). Η μέθοδος αυτή επιτυγχάνει την αποδέσμευση της παροχής και της θερμογόνου δύναμης του στερεού καυσίμου από τους υπολογισμούς για την εύρεση του βαθμού απόδοσης. Απαιτείτε παρεμφερής εξοπλισμός με την προηγούμενη μέθοδο, με την προσθήκη συστήματος μέτρησης παροχής καυσαερίων.

Και οι δύο παραπάνω μέθοδοι απαιτούν ακρίβεια στην είσοδο της πληροφορίας από την λειτουργία του κύκλου του στροβίλου για να δώσουν μεγαλύτερη απόλυτη ακρίβεια στις μετρήσεις. Επίσης και οι δύο μέθοδοι δίνουν ένα ποσοστό σφάλματος της τάξης του 0,75 με 1,5 % στον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης, ποσοστό αρκετά ικανοποιητικό.

Ο Lang (2004) παρουσίασε την τρίτη μέθοδο η οποία χρησιμοποιεί διαφορετική προσέγγιση από τις προηγούμενες δύο. Σαν βάση της έχει τις μετρήσεις χαρακτηριστικών μεγεθών του καυσαερίου. Συγκεκριμένα την παροχή του (κατ' όγκο) και την σύστασή του είτε σε O₂ είτε σε CO₂ στην καπνοδόχο. Από τα παραπάνω καθώς και από τη χρήση ενός συντελεστή (EPA F-Factor) προσδιορίζεται η ροή θερμότητας στην είσοδο του λέβητα. Τα μειωμένα δεδομένα εισόδου, καθιστούν τη μέθοδο αυτή ως την οικονομικότερη και ευκολότερη στη χρήση της αλλά και την λιγότερο ακριβής, αν δεν χρησιμοποιηθεί προσεκτικά.

Η τέταρτη μέθοδος πάλι από τον Lang (2000) με την Exergetic Systems (2004) είναι μια μοναδική διαδικασία η οποία επιτρέπει την ολοκληρωτική θερμική κατανόηση μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας μέσω πεπλεγμένων (explicit) προσδιορισμών των ροών καυσίμου και ρευστών αποβλήτων, της χημείας του καυσίμου συμπεριλαμβανομένης της στάχτης, της θερμογόνου δύναμης του καυσίμου και του θερμικού βαθμού απόδοσης. Από αυτά, οι ροές καυσίμου και αποβλήτων δεν υπολογίζονται άμεσα. Και η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για απευθείας παρακολούθηση της μονάδας και επομένως για συνεχή βελτίωση του ρυθμού θερμότητας της μονάδας (unit heat rate) από τον οποίο μπορεί να βρεθεί ο βαθμός απόδοσης της μονάδας.

Η δεύτερη και η τρίτη μέθοδος απαιτούν τη συνεργασία με συστήματα συνεχής παρακολούθησης εκπομπών (Continuous Emissions Monitoring systems, CEM) (Εικόνα 1-4) τα οποία προμηθεύουν δεδομένα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν παράμετροι εισόδου για την εύρεση του ρυθμού θερμότητας της μονάδας (Lehigh University, 1996).



Εικόνα 1-4 Συνδυασμός CEM με άλλες μετρήσεις. (STACK: Καπνοδόχος, FLUE GAS: Καυσαέρια, AIR: Αέρας, COAL: Κάρβουνο, MILL: Μύλος, BOILER: Λέβητας, STEAM TURBINE CYCLE: Κύκλος Ατμοπαραγωγού).

Τα συστήματα αυτά δύναται να συνδυαστούν με συστήματα δυναμικής παρακολούθησης διεργασιών παρέχοντας δυνατότητες παρατήρησης και πρόβλεψης της συμπεριφοράς της μονάδας σε μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας και κατά τη διάρκεια λειτουργίας. Παραδείγματα τέτοιων συστημάτων είναι το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής φόρτισης (Electric Charge Transfer) από την Foster Wheeler και TR-Tech, το οποίο χρησιμοποιήθηκε από τον Laux *et al.*, (1999) με σκοπό τη βελτίωση των εκπομπών NO_x μέσω της βελτίωσης της λειτουργίας του μύλου, συστήματα δυναμικής αδιαφάνειας (Dynamic Opacity) για την παρακολούθηση της εξόδου των ηλεκτρόφιλτρων θερμικής μονάδας στερεού καυσίμου και πακέτα λογισμικού πρόβλεψης σε συνδυασμό με ηλεκτροδυναμικούς αισθητήρες (Electrodynamic Sensors) για παρακολούθηση κυκλώνιων και φιλτροσακούλων (Bag Filters) της PCME ltd. (2006).

Από τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, οι τρεις πρώτες απαιτούν σχετικά μικρό αριθμό δεδομένων ώστε να μπορέσουν να κάνουν υπολογισμούς του ρυθμού θερμότητας της μονάδας. Ωστόσο οι τιμές δεν είναι πολύ ακριβής αν δεν εισαχθούν και άλλα όργανα πέρα από τα βασικά μίας μονάδας για μέτρηση επιπλέον μεγεθών και ειδικά στην πρώτη και τρίτη μέθοδο. Επιπλέον η Output/Loss Method όπως και η Input/Loss Method έχουν εξελιχθεί αρκετά, οπότε και θα συζητηθούν παρακάτω, αναλυτικότερα.

Η τεχνική που χρησιμοποιείται από την Output/Loss Method βασίζεται στην απευθείας μέτρηση της παροχής των εκπομπών των αερίων και με τα δεδομένα αυτά, του βαθμού απόδοσης του λέβητα. Γνωρίζοντας αυτές τις παροχές επιτρέπεται ο προσδιορισμός των περισσότερων θερμικών απωλειών που συνδέονται με την καύση και ονομάζονται “Stack Losses”. Πάντως, υπάρχουν μειονεκτήματα σε πρακτικές εφαρμογές μονάδων παραγωγής για τους εξής λόγους:

1. Δεν βασίζεται σε μετρήσεις συγκεντρώσεων των καυσαερίων, επομένως δεν μπορεί να δει πιθανές αλλαγές στη σύσταση του καυσίμου ή πιθανές διαρροές σε προθερμαντήρα αέρα
2. Λάθη σε μετρήσεις μη κανονικών αγωγών που δεν είναι για ακριβής μετρήσεις κάτι που συμβαίνει στις περισσότερες μονάδες και μπορεί να οδηγήσει σε σφάλμα μεγέθους έως και 20%, το οποίο συνεπάγεται σφάλμα 4% στον βαθμό απόδοσης του συστήματος
3. Η μεταβλητή θερμογόνος δύναμη του λιγνίτη οδηγεί επίσης σε λάθος υπολογισμό της παροχής του καυσίμου, αν δεν παρακολουθείτε συνεχώς
4. Οι ηχητικές ή και υπερηχητικές μετρήσεις ταχύτητας των αερίων οδηγεί σε υποθέσεις ως προς τη σύσταση των ρευστών αποβλήτων που οδηγεί με τη σειρά του σε σφάλματα
5. Μεταβλητή περιεκτικότητα στάχτης που οδηγεί σε μεταβολή της θερμογόνου επομένως σε λάθος υπολογισμούς

Από την άλλη, η Input/Loss Method, για την εύρεση της παροχής του καυσίμου που είναι και η βασική μεταβλητή να βρεθεί, χρησιμοποιεί ροές ενέργειας κύκλου στροβίλου (turbine cycle energy flows), βαθμό απόδοσης λέβητα ο οποίος όμως είναι ανεξάρτητος από την παροχή του καυσίμου (το οποίο δεν ισχύει στην περίπτωση της Output/Loss Method), επαναληπτικές εκπομπές (routine emissions) και ένα

ενδεδειγμένο λόγο αέρα / καυσίμου. Βελτίωση της μονάδας επιτυγχάνεται με χρήση Δεικτών Κατανάλωσης Καυσίμου (Fuel Consumption Indices, FCI) οι οποίοι διανέμουν μη αναστρέψιμες απώλειες σε όλο το σύστημα που οδηγούν τις εφαρμογές σε αυξητικές αλλαγές του ρυθμού θερμότητας.

Ο υπολογισμός του βαθμού απόδοσης του λέβητα **η-thermal** επιτυγχάνεται με την διάσπαση αυτού σε δύο επιμέρους βαθμούς απόδοσης όπως το παρουσίασε ο Lang (2000):

η_C ... βαθμός απόδοσης καύσης

η_A ... βαθμός απόδοσης απορρόφησης λέβητα (boiler absorption efficiency)

Δηλαδή:
$$\eta\text{-thermal} = \eta_C \eta_A \quad (1.1)$$

Για τον όρο της καύσης χρησιμοποιείται μια μοναδική ισορροπία ενέργειας για το ρεύμα των καυσαερίων και για τον όρο της απορρόφησης του λέβητα χρησιμοποιείται η αισθητή θερμότητα των προϊόντων του λέβητα που δεν προέρχεται από καύση και ορίζεται έτσι ώστε να μπορεί να υπολογιστεί ανεξάρτητα από την παροχή του καυσίμου, μέσω της χρήσης επαναληπτικών τεχνικών.

Από τα παραπάνω παρουσιάζεται ότι η Input/Loss Method δίνει σωστότερη προσέγγιση στο πρόβλημα του βαθμού απόδοσης μιας λιγνιτικής μονάδας παραγωγής ενέργειας. Σε αυτό να συμπληρωθεί ότι η Input/Loss Method μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για οποιοδήποτε καύσιμο Lang (2000).

Στοιχεία των δύο παραπάνω μεθόδων θα χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά ώστε να δώσουν την σχέση του βαθμού απόδοσης η οποία θα χρησιμοποιηθεί στο μαθηματικό μοντέλο μονάδας παραγωγής το οποίο έχει κατασκευαστεί στο πλαίσιο αυτής της διατριβής.

1.2.2. Νευρωνικά δίκτυα

Μία εναλλακτική και σύγχρονη μέθοδος υπολογισμού και παρακολούθησης του βαθμού απόδοσης μίας μονάδας, αποτελούν τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks), ή απλώς νευρωνικά δίκτυα είναι ένα μαθηματικό πρότυπο για την επεξεργασία πληροφορίας που προσεγγίζει την υπολογιστική και δυνατότητα αναπαράστασης μέσω συνάψεων (Gurney, 1997). Στις περισσότερες περιπτώσεις, ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο είναι ένα σύστημα προσαρμογής που αλλάζει τη δομή του βασισμένο σε εξωτερικές ή εσωτερικές

πληροφορίες που ρέουν στο δίκτυο. Το μοντέλο είναι εμπνευσμένο από τα βιοηλεκτρικά δίκτυα που δημιουργούνται στον εγκέφαλο ανάμεσα στους νευρώνες (νευρικά κύτταρα) και στις συνάψεις (σημεία επαφής των νευρικών απολήξεων). Στο μαθηματικό μοντέλο των νευρωνικών δικτύων υπάρχουν κομβικά σημεία (nodes) στα οποία καταλήγουν συνδέσεις από άλλους κόμβους του δικτύου, στις οποίες συνήθως αποδίδεται κάποιο βάρος (Yao, 1999). Πρακτικά, ένα νευρωνικό δίκτυο βελτιστοποιεί μία συνάρτηση, σύμφωνα με κάποιους περιορισμούς. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, ως μαθηματικό μοντέλο, προέκυψαν από τον τομέα της Τεχνητής Νοημοσύνης (Nilsson, 1998). Ένα απλό παράδειγμα νευρωνικού δικτύου φαίνεται στην Εικόνα 1-5.

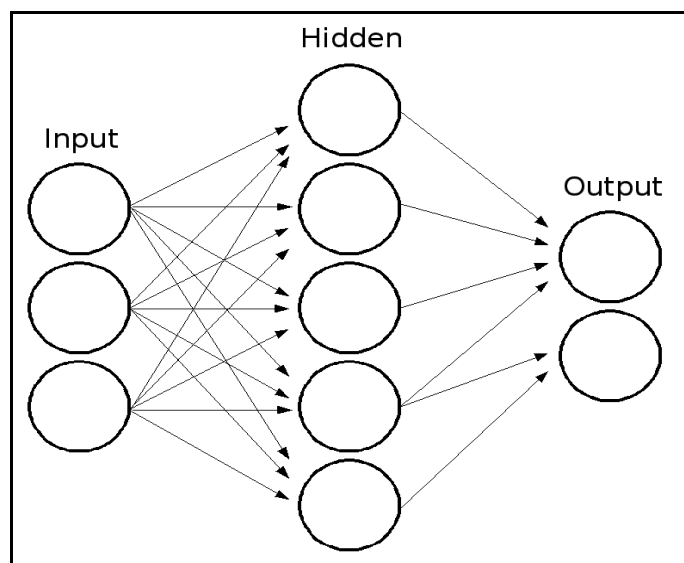
Υπάρχουν δύο είδη νευρώνων, οι νευρώνες εισόδου και οι υπολογιστικοί νευρώνες. Οι νευρώνες εισόδου, μεσολαβούν ανάμεσα στις εισόδους του δικτύου και τους υπολογιστικούς νευρώνες. Οι υπολογιστικοί νευρώνες πολλαπλασιάζουν τις εισόδους τους με τα συναπτικά βάρη και υπολογίζουν το άθροισμα του γινομένου. Χρησιμοποιούν αλγόριθμους για να μεταβάλουν το βάρος των συνδέσεων του δικτύου για να παράγουν την επιθυμητή ροή. Η μέθοδος των νευρωνικών δικτύων είναι μία ευριστική (heuristic) μέθοδος σε αντίθεση με αυτή του μη γραμμικού προγραμματισμού στην οποία χρειάζεται η ακριβής μαθηματική μοντελοποίηση της όλης διαδικασίας. Η εκμάθηση ενός προτύπου νευρωνικού δικτύου, συνάγεται την εκλογή ενός προτύπου από ένα σύνολο προτύπων που ελαχιστοποιούν το κριτήριο κόστους. Συνηθισμένες μέθοδοι εκμάθησης είναι οι εξελικτικές μέθοδοι, εξομοιωτική απόσβεση (simulated annealing) (Del Angel *et al.*, 2003), μη παραμετρικές και προσδοκίας-μεγιστοποίησης μεθόδους.

Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν πολύ καλά αποτελέσματα για τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της ικανότητάς τους να παρακολουθούν δυναμικά την απόδοση συστημάτων όπου αυτή οδηγεί σε μεγάλα κέρδη, όταν μεταβολή αυτής επιτυγχάνεται ακόμα και σε μικρό βαθμό. Για την επίτευξη αυτής της προσομοίωσης, χρειάζεται αρχικά η δημιουργία μέσω νευρωνικών δικτύων ενός μη-γραμμικού μοντέλου μόνιμης κατάστασης και ενός μη-γραμμικού δυναμικού μοντέλου και έπειτα ενός μη γραμμικού πολυμεταβλητού αντισταθμιστή για τον έλεγχο του κλειστού βρόγχου. Ο αντισταθμιστής βασίζεται στη μέθοδο ελέγχου Model Based Predictive Control (MBPC) η οποία είναι μια μεθοδολογία ελέγχου ανάδρασης

(feedback-control) κατάλληλη για αποδοτική ενίσχυση αυστηρών περιορισμών στην μεταβλητές του ελεγχόμενου συστήματος (Mosca, 2001).

Η χρήση τους είναι ιδανική σε περίπτωση όπου η μοντελοποίηση της διαδικασίας ενός συστήματος είναι δύσκολη έως αδύνατη λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος από τη στιγμή που την όλη διαδικασία τη μαθαίνει το δίκτυο μέσω διαδικασίας εκπαίδευσης από τα δεδομένα εισόδου, εξόδου του συστήματος.

Τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης σε συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου διαδικασιών. Εκπαιδεύοντας ένα τέτοιο σύστημα ως προς το ποιες είναι οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, αυτό δύναται να πληροφορεί και να επαναφέρει τις συνθήκες αυτές, σε συνεργασία με άλλα συστήματα μίας μονάδας. Η χρήση τους για παρακολούθηση κατάστασης λειτουργίας μετασχηματιστή ισχύος έδωσε καλά αποτελέσματα (Booth, 1998) όπως και για εκτίμηση γωνίας και ταχύτητας στροφάλου από φασικές μετρήσεις (phasor measurements) (Del Angel *et al.*, 2003) καθώς και για χρονικό προγραμματισμό μίνι υδρογεννήτριας (Estoperez, 2006).



Εικόνα 1-5 Διάγραμμα απλού νευρωνικού δικτύου (INPUT: Είσοδος, OUTPUT: Έξοδος, HIDDEN: Κρυφό).

Το βασικό τους μειονέκτημα είναι η έλλειψη γνώσης των εσωτερικών διεργασιών οι οποίες διεξάγονται για την παραγωγή της εξόδου. Επειδή ακριβώς βασίζονται σε ευριστικές μεθόδους, βασίζεται σε εκτιμήσεις των δεδομένων του, ώστε να παράγει τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Επίσης, χρειάζεται πληθώρα μετρήσεων ώστε να «εκπαιδευτεί» σωστά ο αλγόριθμος.

1.2.3. Γενετικοί Αλγόριθμοι

Η χρήση γενετικών αλγόριθμων (Busetti, 2004), (Weise, 2009) είναι μια σχετικά νέα μέθοδος βελτιστοποίησης η οποία βρίσκει εφαρμογή και σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Οι γενετικοί αλγόριθμοι ανήκουν στο κλάδο της επιστήμης υπολογιστών και αποτελούν μια μέθοδο αναζήτησης βέλτιστων λύσεων σε συστήματα που μπορούν να περιγραφούν ως μαθηματικό πρόβλημα. Είναι χρήσιμοι σε προβλήματα που περιέχουν πολλές παραμέτρους / διαστάσεις και δεν υπάρχει αναλυτική μέθοδος που να μπορεί να βρει το βέλτιστο συνδυασμό τιμών για τις μεταβλητές ώστε το υπό εξέταση σύστημα να αντιδρά με όσο το δυνατόν πιο θεμιτό τρόπο.

Ο τρόπος λειτουργίας των Γενετικών Αλγορίθμων είναι εμπνευσμένος από την βιολογία. Χρησιμοποιεί την ιδέα της εξέλιξης μέσω γενετικής μετάλλαξης, φυσικής επιλογής και διασταύρωσης. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι είναι αρκετά απλοί στην υλοποίησή τους. Οι τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος πρέπει να κωδικοποιούνται με τρόπο ώστε να αναπαρασταθούν από μια μεταβλητή που περιέχει σειρά χαρακτήρων ή δυαδικών ψηφίων (0/1). Αυτή η μεταβλητή μιμείται το γενετικό κώδικα που υπάρχει στους ζωντανούς οργανισμούς. Αρχικά, ο Γενετικός Αλγόριθμος παράγει πολλαπλά αντίγραφα της μεταβλητής / γεννητικού κώδικα, συνήθως με τυχαίες τιμές, δημιουργώντας ένα πληθυσμό λύσεων. Κάθε λύση (τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος) δοκιμάζεται για το πόσο κοντά φέρνει την αντίδραση του συστήματος στην επιθυμητή, μέσω μιας συνάρτησης που δίνει το μέτρο ικανότητας της λύσης και η οποία ονομάζεται συνάρτηση ικανότητας ($\Sigma.I$) (fitness function).

Οι λύσεις που βρίσκονται πιο κοντά στην επιθυμητή, σε σχέση με τις άλλες, σύμφωνα με το μέτρο που μας δίνει η $\Sigma.I$, αναπαράγονται στην επόμενη γενιά λύσεων και λαμβάνουν μια τυχαία μετάλλαξη. Επαναλαμβάνοντας αυτή τη διαδικασία για αρκετές γενιές, οι τυχαίες μεταλλάξεις σε συνδυασμό με την επιβίωση και αναπαραγωγή των γονιδίων / λύσεων που πλησιάζουν καλύτερα το επιθυμητό αποτέλεσμα θα παράγουν ένα γονίδιο / λύση που θα περιέχει τις τιμές για τις παραμέτρους που ικανοποιούν όσο καλύτερα γίνεται την $\Sigma.I$.

Υπάρχουν διάφορες εκδοχές της παραπάνω διαδικασίας για τους Γ.Α από τις οποίες κάποιες περιλαμβάνουν και τη διασταύρωση (ζευγάρωμα) γονιδίων / λύσεων ώστε ο

αλγόριθμος να φτάσει στο αποτέλεσμα πιο γρήγορα. Καθώς υπάρχει το στοχαστικό (τυχαίο) συστατικό της μετάλλαξης και ζευγαρώματος, κάθε εκτέλεση του Γ.Α μπορεί να συγκλίνει σε διαφορετική λύση και σε διαφορετικό χρόνο. Η απόδοση του Γ.Α εξαρτάται επί το πλείστον από την συνάρτηση ικανότητας και συγκεκριμένα από το κατά πόσο το μέτρο της περιγράφει την βέλτιστη λύση. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι ένα πεπερασμένο σύνολο οδηγιών για την εκπλήρωση ενός έργου, το οποίο δεδομένης μιας αρχικής κατάστασης θα οδηγήσει σε μια αναγνωρίσιμη τελική κατάσταση, και το οποίο προσπαθεί να μιμηθεί την διαδικασία της βιολογικής εξέλιξης. Οι γενετικοί αλγόριθμοι προσπαθούν να βρουν τη λύση ενός προβλήματος με το να προσομοιώνουν την εξέλιξη ενός πληθυσμού «λύσεων» του προβλήματος.

Είναι μια τεχνική προγραμματισμού που εισήγαγε στα τέλη της δεκαετίας του 1960 ο Τζον Χόλαντ, ερευνητής του Ινστιτούτου της Σάντα Φε (ΗΠΑ).

Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι μια από τις βάσεις των Προγραμμάτων Τεχνητής Ζωής. Συγκεκριμένα, επιχειρεί να αναπαράξει στους υπολογιστές τους μηχανισμούς της βιολογικής εξέλιξης με τον ίδιο τρόπο που η τεχνητή νοημοσύνη επιχειρεί να αναπαραστήσει και να μιμηθεί τις διαδικασίες της γνώσης.

Τα προγράμματα εξελίσσονται μέχρι να φτάσουν, μέσω μεταλλάξεων, διασταυρώσεων και φυσικής επιλογής, σε μια αποτελεσματική φόρμουλα η οποία θα εκτελεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο μια συγκεκριμένη εργασία.

Το πεδίο εφαρμογής τους ποικίλει από εφαρμογές στην δημιουργία χρονοδιαγραμμάτων, στη χημεία, στη χημική μηχανική, στη φαρμακευτική, στην ανάλυση δεδομένων, στη φυσική και στη γεωμετρία, στα δίκτυα και τις επικοινωνίες, στο σχεδιασμός κυκλωμάτων, στη συνδυαστική βελτιστοποίηση και στη μηχανολογία. Συγκεκριμένα στην μηχανολογία χρησιμοποιείται και στον χώρο των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Περιπτώσεις όπως η διάγνωση σφαλμάτων πυρηνικού σταθμού (Yangring *et al.*, 2000), προγραμματισμό επέκτασης ελαχίστου κόστους (Park *et al.*, 2000), θερμοοικονομική βελτιστοποίηση συνδυασμένου κύκλου (Valdes *et al.*, 2003), βελτίωση παρακολούθησης συστήματος νερού τροφοδοσίας (Pereira *et al.*, 2003) υπόκεινται σε αυτή την κατηγορία.

Τα πλεονεκτήματα των γενετικών αλγόριθμων έχουν να κάνουν με την ταχύτητα και την ευστάθεια τους. Μπορούν γρήγορα να βρουν καλές λύσεις από τη στιγμή που μπορούν να εντοπίσουν γρήγορα μεγάλα σύνολα δυνατών λύσεων δεδομένης της

παραγωγής όχι μίας, αλλά πλήθους λύσεων από γενιά σε γενιά. Η ευστάθεια του έγκειται στο γεγονός ότι κακές αρχικές προτάσεις για λύση δεν επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα δεδομένου ότι θα απορριφθούν στην συνέχεια λόγω της απόκλισης τους από την αναμενόμενη εξέλιξη. Επίσης, το γεγονός ότι είναι μια επαγωγική μέθοδος σημαίνει ότι δεν χρειάζεται επίγνωση κανενός κανόνα που διέπει το πρόβλημα.

Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα του είναι η πιθανότητα εύρεσης τοπικού μέγιστου. Το μειονέκτημα αυτό οφείλεται επίσης στην επαγωγική φύση των αλγορίθμων αυτών. Δεν εξελίσσονται προς βέλτιστες λύσεις αλλά απομακρύνονται από κακές καταστάσεις. Επομένως, όταν βρεθεί κάποια καλή λύση, οι υπόλοιπες λύσεις αρχίζουν να εξελίσσονται γύρω από αυτήν. Με τον τρόπο αυτό οι λύσεις οδηγούνται προς μια ομογενοποίηση η οποία θα αναγκάσει κάποιες λύσεις οι οποίες ίσως να οδηγούσαν σε ακόμα καλύτερες λύσεις να απορριφθούν από πιθανές λύσεις γιατί θα διαφέρουν από το σύνολο. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η μη επίγνωση του κατά πόσο μια λύση είναι τοπικά βέλτιστη ή ολικά. Αυτό οφείλεται στην ανεξαρτητοποίηση – εν μέρη – των κανόνων του προβλήματος από την λύση του. Με τον τρόπο αυτό η λύση εξελίσσεται «βιολογικά» και όχι με βάση το υπαρκτό πρόβλημα. Τέλος χρειάζεται μεγάλη προσοχή στον ορισμό της Σ.Ι. καθώς και των παραμέτρων της μετάλλαξης, της διασταύρωσης και γενικά των παραμέτρων εξέλιξης της λύσης.

Εξελίξεις με παραλλαγές τους έχουν οδηγήσει στην βελτίωση των αλγορίθμων αυτών ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για εύρεση ολικού βέλτιστου με μεγαλύτερη ακρίβεια και σιγουριά. Ένας ακόμα τρόπος με τον οποίο έχει επιτευχθεί η βελτίωσή τους ως προς τη επίτευξή του ολικού βέλτιστου είναι με τον συνδυασμό τους με αλγόριθμους μαθηματικού προγραμματισμού (Martin, 2009). Παρόλα αυτά, η γνώση της διαδικασίας παραμένει ανέφικτη μιας και ο μαθηματικός προγραμματισμός χρησιμοποιείται μόνο προς την κατεύθυνση επίτευξης ολικού μέγιστου.

1.2.4. Μαθηματικός Προγραμματισμός

Έχοντας μακροχρόνια εφαρμογή σε προβλήματα ηλεκτρικής ενέργειας και μηχανολογίας γενικότερα, ο μαθηματικός προγραμματισμός είναι ένα ακόμα εργαλείο για θέματα βελτιστοποίησης (Chungen *et al.*, 2000), (Herskovits *et al.*, 2005), (Vera *et al.*, 2009), (Krüger *et al.*, 2004), (Conradie *et al.*, 1998), (Manninen *et*

al., 1998). Συγκεκριμένα η μέθοδος του μη γραμμικού προγραμματισμού είναι κατάλληλη για τέτοιας φύσεως προβλήματα όπως η βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης. Η καταλληλότητα έγκειται στο γεγονός ότι απαιτείται η γνώση της λειτουργίας των εσωτερικών διεργασιών δεδομένου ότι οι περιορισμοί οι οποίοι ορίζονται (ισοτικοί και ανισοτικοί) έχουν να κάνουν με τις εσωτερικές λειτουργίες της μονάδας όπου αλλαγές και σε αυτούς μπορούν να οδηγήσουν στην βελτιστοποίηση. Πέρα όμως από τα προβλήματα σταθερής κατάστασης όπως η λειτουργία μέγιστου φορτίου, εμφανίζονται και δυναμικά προβλήματα βελτιστοποίησης (*Dynamic optimization problems*) όπως ελέγχου μιας διαδικασίας, ελαχιστοποίησης του συνολικού χρόνου των διαδικασιών αλλά και βελτιστοποίησης μεταβατικών φαινομένων μιας διαδικασίας (προβλήματα εκκίνησης, διακοπής λειτουργίας, μεταβολής φορτίου). Στόχος του μαθηματικού προγραμματισμού άρα και του μη γραμμικού προγραμματισμού είναι η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος και ο έλεγχος της συμπεριφοράς μέσω ανάλυσης ευαισθησίας σε διαφορετικά σενάρια με μεταβολές διαφορετικών παραμέτρων υπό τους εκάστοτε ισοτικούς και ανισοτικούς περιορισμούς.

Στην πορεία ανάπτυξης του Μαθηματικού Προγραμματισμού αναπτύχθηκαν διάφοροι αλγόριθμοι και μέθοδοι για χρήση τους στον μη γραμμικό προγραμματισμό και στον δυναμικό για βελτίωση συστημάτων. Τα χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να διαθέτουν οι αλγόριθμοι και να τους διακρίνουν ως προς την αποτελεσματικότητά τους είναι:

1. Γενικότητα, αξιοπιστία, ακρίβεια
2. Ευαισθησία σε παραμέτρους και δεδομένα
3. Πολυπλοκότητα (θεωρητική, υπολογιστική)
4. Βαθμός σύγκλισης

Παρακάτω θα γίνει μια αναλυτική αναφορά στον μη – γραμμικό προγραμματισμό και μια πιο σύντομη στην δυναμική βελτιστοποίηση από την στιγμή που η δεύτερη δεν θα απασχολήσει στην συγκεκριμένη εργασία. Παρόλα αυτά, δυναμική βελτιστοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί από το πρόγραμμα βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε. Μια πιο εμπειριστατωμένη αναφορά και περιγραφή στις μεθόδους δυναμικής βελτιστοποίησης του προγράμματος θα γίνει στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

1.2.4.1. Μη – γραμμικός προγραμματισμός

Στο μη – γραμμικό προγραμματισμό ανήκουν όλοι οι αλγόριθμοι οι οποίοι μπορούν να εφαρμοστούν σε μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης. Πρώτα απ’ όλα όμως θα γίνει μια αναφορά στις συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker (KKT) οι οποίες είναι απαραίτητες για να μπορέσει μια λύση να είναι βέλτιστη στα προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού. Οι συνθήκες KKT αποτελούν γενίκευση της μεθόδου Lagrange έτσι ώστε στους περιορισμούς να συμπεριλαμβάνονται και οι ανισοτικοί.

Με τη μέθοδο Lagrange υπολογίζονται τα ακρότατα σημεία μιας συνάρτησης $f(\mathbf{x})$ με $\mathbf{x} \in \mathcal{R}^n$, όταν οι άγνωστες μεταβλητές \mathbf{x} ικανοποιούν τους ισοτικούς περιορισμούς

$$h_i(\mathbf{x}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, k$$

Οι συναρτήσεις $f(\mathbf{x})$ και $h_i(\mathbf{x})$ πρέπει να ικανοποιούν ορισμένες συνθήκες συνέχειας και παραγωγισιμότητας. Για τον υπολογισμό των ακρότατων σημείων χρησιμοποιείται η συνάρτηση

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = f(\mathbf{x}) + u_1 h_1(\mathbf{x}) + u_2 h_2(\mathbf{x}) + \dots + u_k h_k(\mathbf{x}) \quad (1-2)$$

η οποία καλείται *Λαγκρανζιανή (Lagrangian)*. Τα ακρότατα σημεία προκύπτουν από την επίλυση του συστήματος

$$\partial L / \partial x_j = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1-3\alpha)$$

$$\partial L / \partial u_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (1-3\beta)$$

όπου γενικά $\partial y(x) / \partial x_j$ είναι η μερική παράγωγος της y ως προς x_j . Οι παράμετροι u_1, u_2, \dots, u_k ονομάζονται *πολλαπλασιαστές Lagrange (Lagrange multipliers)*. Οι συνθήκες (1-3α και β) είναι αναγκαίες συνθήκες, δεν είναι πάντοτε ικανές. Αυτό σημαίνει ότι μια λύση του παραπάνω συστήματος μπορεί να είναι μέγιστο, ελάχιστο ή κανένα από τα δύο.

Σε ένα γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης με ισοτικούς και ανισοτικούς περιορισμούς της μορφής

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\mathbf{x}) \\ \mu.π \quad & g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & h_j(\mathbf{x}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, k \end{aligned} \quad (1-4)$$

Οι αναγκαίες συνθήκες ΚΚΤ μπορούν να περιγραφούν ως εξής:

Αν ένα εφικτό σημείο x είναι λύση του προβλήματος (1-4) τότε υπάρχουν αριθμοί w_1, w_2, \dots, w_m και u_1, u_2, \dots, u_k τέτοιοι ώστε:

$$\nabla f(x) + \sum_{i=1}^m \nabla g_i(x)w_i + \sum_{j=1}^k \nabla h_j(x)u_j = 0 \quad (1-5\alpha)$$

$$w_i g_i(x) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1-5\beta)$$

$$w_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1-5\gamma)$$

όπου

$$[\nabla f(x)]^T = \left[\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right] \quad (1-5\delta)$$

Κάτω από κατάλληλες συνθήκες στις συναρτήσεις f, g και h οι συνθήκες ΚΚΤ μετατρέπονται σε ικανές συνθήκες βελτιστοποίησης. Όπως για παράδειγμα στην περίπτωση του γραμμικού προβλήματος.

Η αναλυτική επίλυση του συστήματος (1-5) δεν είναι εύκολη, ιδιαίτερα όταν το πλήθος των ανισοτικών περιορισμών είναι μεγάλο. Είναι εμφανές ότι για να λυθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης (1-3) πρέπει να λυθούν 2^m συστήματα της μορφής (1-5), αφού για κάθε $i = 1, 2, \dots, m$ πρέπει να εξεταστούν και οι δύο περιπτώσεις $u_i = 0$ και $u_i > 0$. Όταν το m είναι μικρό, $m = 1, 2$, η αναλυτική επίλυση του συστήματος (1-5) είναι εφικτή.

Οι προηγούμενες συνθήκες ΚΚΤ αφορούν προβλήματα βελτιστοποίησης που περιέχουν ισοτικούς και ανισοτικούς περιορισμούς. Οι συνθήκες ΚΚΤ για προβλήματα που περιέχουν μόνο ανισοτικούς ή μόνο ισοτικούς περιορισμούς προκύπτουν από τις γενικές συνθήκες διαγράφοντας τους όρους οι οποίοι δεν χρησιμοποιούνται.

Ανάλογα τώρα το είδος του προβλήματος, διαφορετικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπισή τους. Τρεις είναι οι μεγάλες κατηγορίες στις οποίες μπορούν να χωριστούν τα προβλήματα στον μη γραμμικό προγραμματισμό (Rao, 1996).

Η πρώτη και πιο απλή κατηγορία είναι αυτή των προβλημάτων ελαχιστοποίησης μίας διάστασης. Στην κατηγορία αυτή, η αντικειμενική συνάρτηση είναι συνάρτηση μίας

μόνο μεταβλητής. Δύο μεγάλες ομάδες μεθόδων επίλυσης συναντώνται σε αυτή την κατηγορία. Οι μέθοδοι απαλοιοφής και οι μέθοδοι παρεμβολής.

Οι πρώτες περιλαμβάνουν την απεριόριστη αναζήτηση (*Unrestricted Search*) με σταθερό ή επιταχυνόμενο μέγεθος βήματος, την λεπτομερή αναζήτηση (*Exhaustive Search*), την μέθοδο της διχοτόμησης, την *Μέθοδο Fibonacci* και την μέθοδο της χρυσής τομής. Από αυτές την γρηγορότερη σύγκλιση την έχει η μέθοδος *Fibonacci*.

Οι μέθοδοι παρεμβολής αρχικά αναπτύχθηκαν ως μέθοδοι μονοδιάστατης αναζήτησης εντός τεχνικών βελτιστοποίησης πολλών μεταβλητών. Σε γενικές γραμμές είναι γρηγορότερες και από την μέθοδο *Fibonacci*. Αυτές είναι η μέθοδος τετραγωνικής παρεμβολής (Powell, 1964), η μέθοδος κυβικής παρεμβολής (Fox, 1971), (Davidon, 1959) και οι μέθοδοι απευθείας ρίζας (*Direct Root methods*) στις οποίες ανήκει η μέθοδος *Newton-Raphson*, *ψευδό - Newton* και η μέθοδο της τέμνουσας (*Secant Method*). Από αυτές η τετραγωνικής παρεμβολής και οι ψευδό-Newton δεν απαιτούν την γνώση της αναλυτικής έκφρασης των παραγώγων.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τα προβλήματα ελαχιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. Αν και σε πρακτικές εφαρμογές δεν συναντώνται συχνά, η μελέτη τους είναι σημαντική δεδομένου ότι αρκετές μέθοδοι προβλημάτων με περιορισμούς βασίζονται σε μεθόδους επίλυσης προβλημάτων χωρίς περιορισμούς καθώς και συγκεκριμένα σύνθετα προβλήματα ανάλυσης μηχανικής μπορούν να λυθούν με αυτές τις μεθόδους. Οι μέθοδοι επίλυσης των προβλημάτων αυτών ομαδοποιούνται ανάλογα με την απαίτηση ή όχι των μερικών παραγώγων της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτές αντίστοιχα είναι οι μέθοδοι έμμεσης αναζήτησης (*Descent Methods*) και οι μέθοδοι άμεσης αναζήτησης (*Direct Search Methods*) (Rao, 1996).

Στις δεύτερες ανήκουν οι μέθοδοι τυχαίας αναζήτησης, αναζήτησης πλέγματος, μιας μεταβλητής (*Univariate*), σχεδίου αναζήτησης (*pattern search*) στις οποίες υπάγονται και η μέθοδος του *Hooke and Jeeve* (1961) και του *Powell* (1964). Μία περαιτέρω εξέλιξη της μεθόδου των *Hooke and Jeeve* είναι η μέθοδος των περιστρεφόμενων συντεταγμένων του *Rosenbrock* (1960), (Rao, 1984) και τέλος η μέθοδος *Simplex* η οποία δεν πρέπει να μπερδεύεται με την *Simplex* του γραμμικού προγραμματισμού καθώς σε αυτή την περίπτωση, ως *simplex* ορίζεται το γεωμετρικό σχήμα το οποίο ορίζεται από $n + 1$ σημεία σε ένα χώρο n διαστάσεων.

Στις έμμεσες μεθόδους γίνεται χρήση της κλίσης της αντικειμενικής συνάρτησης f και ορίζεται για χώρο n διαστάσεων ως:

$$\nabla f_{n \times 1} = \begin{Bmatrix} \partial f / \partial x_1 \\ \partial f / \partial x_2 \\ \vdots \\ \partial f / \partial x_n \end{Bmatrix} \quad (1-6)$$

Οι μέθοδοι αυτές είναι η μέθοδος του *Cauchy* (Steepest Descent), των *Fletcher & Reeves* (1964)(Conjugate Gradient), του *Newton* επεκταμένη για πολλών μεταβλητών σχέσεις, του *Marquardt* (1963) η οποία εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα της *Newton* και της *Cauchy*, η *quasi-Newton* με *Rank 1 Updates* (Broyden, 1967) και *Rank 2 Updates*, η *Davidon-Fletcher-Powell (DFP)*(Davidon, 1959),(Fletcher & Powell, 1963) και η *Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS)*(Broyden, 1970), (Fletcher, 1970), (Goldfarb, 1970), (Shanno, 1970). Οι δύο τελευταίες ανήκουν σε μία οικογένεια από *Rank 2 Updates* γνωστή και ως *Huang's family of updates* (1970). Από αυτές η BFGS παρουσιάζεται ως η καλύτερη μέθοδος του είδους.

Η τρίτη κατηγορία είναι και η γενικότερη όπου είναι τα προβλήματα βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Δύο μεγάλες ομάδες μεθόδων συναντούνται και εδώ. Οι άμεσες μέθοδοι στις οποίες οι περιορισμοί αντιμετωπίζονται ανεξάρτητα (in an explicit manner) και οι έμμεσες στις περισσότερες από τις οποίες το πρόβλημα με περιορισμούς λύνεται σαν αλληλουχία προβλημάτων ελαχιστοποίησης χωρίς περιορισμούς.

Στην πρώτη ομάδα ανήκουν μέθοδοι τυχαίας αναζήτησης παρόμοιες με αυτές των προβλημάτων χωρίς περιορισμούς καθώς και παρόμοια με την *Simplex* που ονομάζεται *Complex* (Box, 1965) η οποία όμως δεν μπορεί να λύσει ισοτικούς μη γραμμικούς περιορισμούς και είναι στοχαστική μέθοδος. Επίσης η μέθοδος του *συνεχούς γραμμικού προγραμματισμού (Sequential Linear Programming-SLP)* (Cheney *et al.*, 1959), (Kelly, 1960) όπου το αρχικό πρόβλημα λύνεται ως μια σειρά προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού. Η μέθοδος του *Zoutendijk των εφικτών κατευθύνσεων* και η μέθοδος *προβολής της κλίσης του Rosen* επίσης ανήκουν στην πρώτη κατηγορία καθώς και στην κατηγορία των μεθόδων εφικτής κατεύθυνσης. Η μέθοδος της *γενικευμένης μειωμένης κλίσης (Generalized Reduced Gradient – GRG)*

αποτελεί επέκταση της αντίστοιχης μεθόδου για προβλήματα με γραμμικούς περιορισμούς (Gabriele *et al.*, 1977). Τέλος, στην κατηγορία των άμεσων μεθόδων, η μέθοδος του *διαδοχικού τετραγωνικού προγραμματισμού (Sequential Quadratic Programming – SQP)* η οποία είναι από τις πιο πρόσφατες και θεωρείται μία από τις καλύτερες μεθόδους βελτιστοποίησης και η οποία θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο.

Στις έμμεσες μεθόδους ανήκουν οι τεχνικές μετασχηματισμού (*transformation technics*) όπου ο μετασχηματισμός έχει να κάνει με τις ανεξάρτητες μεταβλητές ώστε οι περιορισμοί να ικανοποιούνται αυτόματα (Box, 1966). Οι μέθοδοι *εσωτερικής και εξωτερικής σχέσης ποινής (Interior / Exterior Penalty Function method)* είναι που εκφράζουν την λύση μέσω την λύση διαδοχικών προβλημάτων ελαχιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. Η διαφορά τους έγκειται στο ότι η αντικειμενική του προβλήματος ελαχιστοποίησης χωρίς περιορισμούς η οποία δημιουργείται στην περίπτωση της εσωτερικής σχέσης βρίσκεται μέσα στην εφικτή περιοχή, ενώ για την περίπτωση της εξωτερικής σχέσης, στην μη-εφικτή περιοχή. Με κάποιες παραλλαγές, η εσωτερικής ποινής μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για ισοτικούς περιορισμούς καθώς και για παραμετρικούς περιορισμούς, δηλαδή περιορισμούς οι οποίοι ισχύουν για ένα εύρος τιμών κάποιας παραμέτρου, όχι κάποιας μεταβλητής. Τέλος η μέθοδο του *επαυξημένου πολλαπλασιαστή Lagrange (Augmented Lagrange Multiplier – ALM)* συνδυάζει τον *πολλαπλασιαστή Lagrange* και τις μεθόδους ποινής οπότε είναι κατάλληλη και για ισοτικούς και για ανισοτικούς περιορισμούς.

1.2.4.2. Δυναμική βελτιστοποίηση

Η περίπτωση προβλημάτων δυναμικής βελτιστοποίησης μπορεί να θεωρηθεί σαν την γενικότερη περίπτωση προβλημάτων βελτιστοποίησης στα οποία εμπεριέχεται και ο χρόνος συνήθως, σαν ανεξάρτητη μεταβλητή από την οποία εξαρτώνται κάποιες από τις μεταβλητές βελτιστοποίησης του προβλήματος. Μια γενική διαμόρφωση των δυναμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι η ακόλουθη:

$$\min_{\mathbf{u}, \mathbf{p}, t_f} \Phi(\mathbf{x}(t_f), t_f) \quad (1-7\alpha)$$

$$s.t. \quad \mathbf{M}(\mathbf{x}, t) \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}, t), \quad t \in [t_0, t_f] \quad (1-7\beta)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{x}(t_0) - \mathbf{x}_0, \quad (1-7\gamma)$$

$$\mathbf{x}^L \leq \mathbf{x}(t) \leq \mathbf{x}^U, \quad t \in [t_0, t_f] \quad (1-7\delta)$$

$$\mathbf{u}^L \leq \mathbf{u}(t) \leq \mathbf{u}^U, \quad t \in [t_0, t_f] \quad (1-7\epsilon)$$

$$\mathbf{p}^L \leq \mathbf{p} \leq \mathbf{p}^U, \quad (1-7\sigma\tau)$$

$$0 \geq \mathbf{e}(\mathbf{x}(t_f)) \quad (1-7\zeta)$$

όπου Φ είναι η αντικειμενική συνάρτηση σε μορφή κριτηρίου τελικού κόστους (*terminal cost criterion*). Οι διαφορικές – αλγεβρικές εξισώσεις (*Differential Algebraic Equations – DAE*) δίνονται από τους περιορισμούς (1-7β). Τα $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{u}(t)$ και \mathbf{p} είναι τα διανύσματα των μεταβλητών κατάστασης, των χρονικά εξαρτημένων μεταβλητών και των χρονικά ανεξάρτητων παραμέτρων αντίστοιχα τα οποία μπορούν να είναι φραγμένα μεταξύ του κατώτερου ορίου $(\cdot)^L$ και του ανώτερου ορίου $(\cdot)^U$. Ο τελικός χρόνος t_f μπορεί να είναι γνωστός είτε άγνωστος σαν μεταβλητή βελτιστοποίησης.

Οι τεχνικές επίλυσης δυναμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης της παραπάνω μορφής χωρίζονται σε άμεσες και έμμεσες μεθόδους. Οι έμμεσες μέθοδοι κάνουν χρήση της πρώτης τάξης απαραίτητες συνθήκες από την αρχή μεγιστοποίησης του Pontryagin (Weber, 2008) με σκοπό τον ανασχηματισμό του προβλήματος σε πρόβλημα πολλαπλών σημείων φραγμένων τιμών (*multi-point boundary value problem*) (Srinivasan, 2003) Στις άμεσες μεθόδους γίνεται απευθείας επίλυση του προβλήματος (1-7α) μέσω εμφάνισης των μεταβλητών ελέγχου, των μεταβλητών κατάστασης και των χρονικών παραγώγων των τελευταίων ως συνεχής μεταβλητές στο πρόβλημα. Αυτές οι μέθοδοι κάνουν χρήση μη γραμμικών μεθόδων επίλυσης λόγω της μετατροπής του αρχικού προβλήματος σε μη γραμμικό πρόβλημα μέσω διακριτοποίησης. Με αυτές τις μεθόδους που αναφέρθηκαν παραπάνω γίνεται εμφανής η θεώρηση της κατηγορίας αυτών των προβλημάτων ως την πιο γενική δεδομένου ότι απαιτείται η χρήση μη γραμμικών μεθόδων για την επίλυση του υποπροβλήματος όπου εμφανίζεται μετά τις μετατροπές.

1.3. Αντικείμενο – Σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης

Στόχος της παρούσας διατριβής είναι ο υπολογισμός του θερμικού βαθμού απόδοσης και η βελτιστοποίηση αυτού για μια μονάδα ενός λιγνιτικού ατμοηλεκτρικού σταθμού. Στην παρούσα περίπτωση ο σταθμός ο οποίος θα προσομοιωθεί θα είναι η

Μονάδα IV του ΑΗΣ Καρδιάς και ο υπολογισμός θα γίνει για σταθερή κατάσταση λειτουργίας στο μέγιστο φορτίο των 300 MW. Ο σταθμός της Καρδιάς τροφοδοτείται με λιγνίτη από τα ορυχεία της Πτολεμαΐδας. Ο λιγνίτης της Πτολεμαΐδας έχει υγρασία 55% και θερμογόνο δύναμη 1.350 kcal/kg (επί φυσικού ή ως έχει). Τα χαρακτηριστικά αυτά μαζί με την υψηλή τέφρα τον καθιστούν από τους φτωχότερους ίσως λιγνίτες διεθνώς, εξ όσων χρησιμεύουν για ηλεκτροπαραγωγή. Η χημική σύσταση του λιγνίτη Πτολεμαΐδας δίνεται στον Πίνακα 1-2.

Πίνακας 1-2 Τυπική χημική σύσταση λιγνίτη Πτολεμαΐδας.

C % κ.β	H % κ.β	O % κ.β	N % κ.β	S % κ.β	A.Θ.Δ. Kcal/kg *	Πτητικά % κ.β *
65,73	4,74	26,58	1,01	1,94	6.042	58,74

*επί καυσίμου ύλης

Βλέποντας και την σύσταση του είναι εμφανής η χαμηλή ποιότητα οπότε, με βάση όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, βελτίωση του βαθμού απόδοσης ως προς την μείωση της καύσιμης ύλης συνεπάγεται σημαντική μείωση στην κατανάλωση άρα παράταση του χρόνου ζωής των διαθέσιμων αποθεμάτων.

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου απαιτείται πληθώρα μεταβλητών προς μέτρηση τόσο σε ποσότητα (80 με 100) όσο και σε ποιότητα, ώστε να είναι δυνατή η σωστή ανάλυση των δεδομένων και ο επιμερισμός των απωλειών για τον υπολογισμό και μελέτη του βαθμού απόδοσης. Δεδομένου του μεγέθους της μονάδας και του πλήθους των μεταβλητών προς μέτρηση, ο αριθμός αυτός είναι ικανοποιητικός καθώς παραπάνω θα απαιτούσαν πολύ χρόνο. Στο κομμάτι της μέτρησής του, απαιτείται συνεχής υπολογισμός ποικιλίας χαρακτηριστικών μεγεθών.

Τα μεγέθη αυτά αφορούν όλες της περιοχές της διεργασίας και μερικά από τα βασικότερα είναι:

- Το καύσιμο (θερμογόνος δύναμη, σύσταση, παροχή καυσίμου, αέρα, συνολικής ενέργειας και περίσσειες αέρα και οξυγόνου)
- Ο λέβητας (βαθμός απόδοσης, απώλειες, θερμότητα καύσης και αποδιδόμενη στο εργαζόμενο μέσο)

- Τα αέρια (συστάσεις και σημεία δρόσου αέρα καύσης και καυσαερίων, παροχή τέφρας) και
- Ο κύκλος του στροβίλου (ειδική κατανάλωση θερμότητας, απόδοση συμπτυκνωτή προθερμαντών και βαθμίδων στροβίλου, απαιτούμενη ισχύς αντλιών).

Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να αξιοποιηθούν και για τον περαιτέρω έλεγχο και αξιολόγηση της μονάδας και του περιφερειακού εξοπλισμού.

Η βελτιστοποίηση θα πραγματοποιηθεί με χρήση μεθόδου μαθηματικού προγραμματισμού και συγκεκριμένα μη γραμμικού με περιορισμούς. Η εκλογή του μαθηματικού προγραμματισμού έναντι των άλλων έγινε γιατί είναι η μόνη μέθοδος με την οποία μπορεί να γίνει σωστή και ακριβής αξιολόγηση των αποτελεσμάτων λόγω της ακριβούς μαθηματικής έκφρασης, μέσω σχέσεων, όλων των φαινομένων και των χαρακτηριστικών που εκφράζουν τα επιμέρους κατασκευαστικά μέρη του συνολικού μοντέλου της μονάδας. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι γενετικοί αλγόριθμοι αλλά και τα νευρωνικά δίκτυα, δεν μπορούν να εκτιμήσουν κατά πόσο μία λύση είναι βέλτιστη ή πόσο μακριά είναι από την βέλτιστη τιμή, αν δεν συνδυαστούν με μεθόδους μαθηματικού προγραμματισμού. Αυτό οφείλεται στο ότι δεν έχουν ακριβή επίγνωση των κανόνων και των φαινομένων που διέπουν το πρόβλημα. Χαρακτηριστικό των γενετικών αλγόριθμων είναι ότι μπορούν να δώσουν γρήγορα μια καλή λύση, αλλά όχι απαραίτητα βέλτιστη (Löhl *et al.*, 1998). Ο μαθηματικός προγραμματισμός μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας μπορεί να δώσει και την απόκλιση από το βέλτιστο καθώς και αποτελέσματα από εναλλακτικά σενάρια χωρίς την ανάγκη επανάληψης των υπολογισμών. Επιπλέον, η αναλυτική έκφραση των φαινομένων μπορεί να δώσει και επιπλέον συμπεράσματα για την συμπεριφορά των εξαρτημένων μεταβλητών η οποία δεν μπορεί να γνωστοποιηθεί μέσω της επίλυσης με γενετικούς αλγόριθμους.

Η διαδικασία η οποία πρέπει να ακολουθηθεί περιλαμβάνει την μορφοποίηση και μοντελοποίηση του προβλήματος του βαθμού απόδοσης μιας μονάδας. Η διαδικασία μοντελοποίησης αποτελείται από τα εξής βήματα:

1. Καθορισμός αντικειμένου μοντελοποίησης (εδώ σταθμός παραγωγής ενέργειας)
2. Περιγραφή των εμπλεκόμενων φυσικών φαινομένων σε ένα λογικό μοντέλο
3. Εκλογή των φυσικών φαινομένων που θα περιληφθούν στο μαθηματικό μοντέλο

4. Ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου
5. εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου σε ένα αριθμητικό λύτη (numerical solver) για τη δημιουργία αριθμητικού μοντέλου
6. Δοκιμή του αριθμητικού μοντέλου.
7. Επαλήθευση των αποτελεσμάτων με τα αναμενόμενα από το λογικό μοντέλο
8. Επικύρωση αποτελεσμάτων με τα πειραματικά
9. Εκτέλεση επιπλέον σχετικών προσομοιώσεων
10. Συμπεράσματα

Στο κομμάτι αυτό, αρχικά θα γίνει χρήση του μαθηματικού μοντέλου που είναι διαθέσιμο στο προσομοιωτικό πρόγραμμα D.N.A. (Dynamic Network Analysis) (Elmegaard, 1999) το οποίο και θα τροποποιηθεί και θα επεκταθεί με βάση τις προδιαγραφές και τις ανάγκες της Μονάδας 4 του ΑΗΣ Καρδιάς (Διεύθυνση Εκπαίδευσης Σ.Τ.Ε. Καρδιάς, 1982) και προσπάθεια μετατροπής και εφαρμογής αυτού στο λογισμικό μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης gPROMS (general PROcess Modeling System) της PSE (2008).

Συγκεκριμένα, οι εργασίες οι οποίες έγιναν ήταν:

- 1) Μοντελοποίηση και προσομοίωση του κυκλώματος νερού – ατμού της συγκεκριμένης μονάδας με χρήση του D.N.A. και του gPROMS.
- 2) Μοντελοποίηση και προσομοίωση του κυκλώματος λέβητα – υπερθερμαντών της ίδιας μονάδας με χρήση των παραπάνω προγραμμάτων.
- 3) Εφαρμογή ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης στο μοντέλο του κυκλώματος νερού - ατμού και έπειτα στο ενιαίο κύκλωμα της μονάδας από την σύζευξη των δύο για να βρεθεί το βέλτιστο σημείο λειτουργίας σε πλήρες φορτίο θεωρώντας ως μεταβλητές τις παροχές μάζας ατμού στις απομαστεύσεις από τους στροβίλους για το κύκλωμα νερού – ατμού και τις παροχές αέρα και καυσίμου από το κύκλωμα λέβητα – υπερθερμαντών στον συνδυασμός τους στο τελικό μοντέλο της μονάδας. Η χρήση των παροχών ατμού των απομαστεύσεων των βαθμίδων των στροβίλων ως μεταβλητές βελτιστοποίησης για την βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης μονάδας ηλεκτροπαραγωγής αποτελεί πρωτότυπο αντικείμενο μελέτης.

Απώτερος στόχος και καινοτομία είναι ότι η δουλειά αυτή σε βάθος χρόνου μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ενός γενικού λογισμικού λεπτομερής προσομοίωσης μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, κάτι το οποίο δεν έχει μελετηθεί επαρκώς με το gPROMS (Alie *et al.*, 2009), (Lawal *et al.*, 2009). Σε αυτό βοηθάει και το περιβάλλον επικοινωνίας του gPROMS με τον χρήστη (*interface*) το οποίο διευκολύνει στην άμεση επίδραση στο μαθηματικό μοντέλο καθώς και στις μεταβλητές βελτιστοποίησης ή προς βελτιστοποίηση. Επίσης στη δημιουργία ενός γενικού λογισμικού αποφάσεων για το δωμάτιο ελέγχου όπου το μοντέλο θα έχει σαν είσοδο δεδομένα πραγματικού χρόνου (*real-time*) από την μονάδα και ο μηχανικός βάρδιας θα μπορεί να προχωρήσει σε βελτιστοποίηση της λειτουργίας με βάση συγκεκριμένες μεταβλητές εισόδου.

Η ανάπτυξη η οποία ακολουθεί περιλαμβάνει στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 2, την περιγραφή των μαθηματικών μοντέλων των επιμέρους στοιχείων του σταθμού παραγωγής ενέργειας καθώς και των σχέσεων που διέπουν τα φυσικά φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την λειτουργία μαζί με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς των φυσικών και θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών των ροών (νερό και καυσαέρια). Το κεφάλαιο 3 θα περιέχει μία παρουσίαση των αλγόριθμων οι οποίοι θα εφαρμοστούν για την επίλυση από τα προγράμματα που θα χρησιμοποιήσουμε τόσο για την προσομοίωση των μοντέλων όσο και για την βελτιστοποίηση αυτών. Έπειτα, στο ίδιο κεφάλαιο, θα γίνει και η παρουσίαση των προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση και βελτιστοποίηση καθώς και αναφορά στις μεθόδους που χρησιμοποίησε το καθένα με παραλλαγές που έγιναν σε αυτές. Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και βελτιστοποίησης του κυκλώματος νερού-ατμού, του κυκλώματος του λέβητα με τους υπερθερμαντές και της συνολικής μονάδας μαζί με το σχολιασμό τους στα κεφάλαια 4 και 5 αντίστοιχα. Κλείνοντας, στο κεφάλαιο 6 θα γίνει μια συνολική εκτίμηση της δουλειάς που έγινε μαζί με συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική δουλειά η οποία μπορεί να γίνει.

2 Περιγραφή μοντέλου μονάδας

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το μοντέλο της μονάδας IV του Α.Η.Σ. Καρδιάς η οποία είναι και η μονάδα η οποία θα προσομοιωθεί και αργότερα βελτιστοποιηθεί. Αρχικά γίνεται η ανάλυση της λειτουργίας του φυσικού μοντέλου αυτής, με ανάλυση της λειτουργίας των επιμέρους κυκλωμάτων που συνθέτουν το τελικό μοντέλο και των κατευθύνσεων των ροών ενέργειας και των ρευστών που συμμετέχουν. Ακολουθεί περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου το οποίο και θα προσομοιωθεί στα προγράμματα. Στο κομμάτι αυτό περιγράφεται το μαθηματικό υπόβαθρο του προγράμματος προσομοίωσης D.N.A. και των στοιχείων της μονάδας τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του μοντέλου. Ο λόγος που γίνεται η περιγραφή του συγκεκριμένου μαθηματικού υποβάθρου είναι γιατί το D.N.A. είναι ανοιχτού πηγαίου κώδικα και ειδικευμένο για μονάδες παραγωγής. Για τον λόγο αυτό αποτέλεσε και την βάση για την κατασκευή του μαθηματικού μοντέλου του gPROMS.

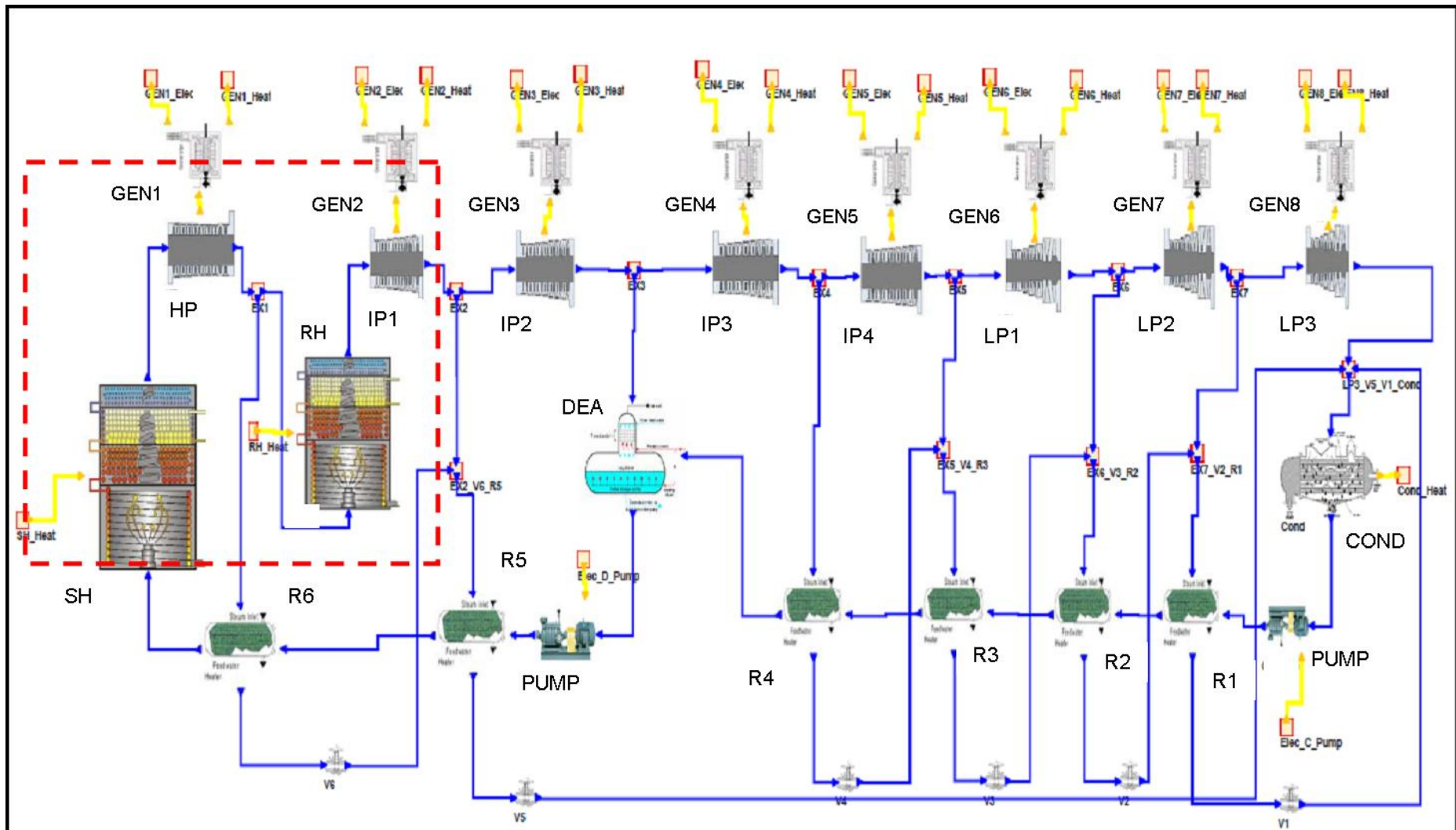
2.1. Φυσικό μοντέλο

Ακολουθεί μια παρουσίαση των επιμέρους κυκλωμάτων νερού – ατμού και λέβητα τα οποία μαζί συνθέτουν την συνολική μονάδα.

2.1.1. Κύκλωμα νερού ατμού

Το μοντέλο του κυκλώματος νερού - ατμού αποτελείται από τα εξής επιμέρους στοιχεία τα οποία φαίνονται στη Εικόνα 2-1 η οποία και δημιουργήθηκε στο gPROMS το οποίο και υποστηρίζει απεικόνιση του δικτύου. Πρώτα από όλα από τις διάφορες βαθμίδες στροβίλων υψηλής πίεσης (HP), μέσης πίεσης (IP) και χαμηλής πίεσης (LP). Μέσα σε αυτές τις βαθμίδες των στροβίλων εκτονώνεται ο ατμός και προσδίδει μηχανικό έργο στις γεννήτριες (GEN) μέσω αξόνων οι οποίες με τη σειρά τους μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική η οποία αποτελεί και το τελικό παράγωγο της όλης λειτουργίας της μονάδας. Ο ατμός πριν οδηγηθεί στην πρώτη βαθμίδα του στροβίλου μέσης πίεσης (IP1) αναθερμαίνεται στον αναθερμαντή (RH) με θερμότητα από τα καυσαέρια, προερχόμενη από τη μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου. Ο ατμός που μπαίνει στον στροβίλο υψηλής πίεσης (HP) είναι υπέρθερμος γιατί προηγουμένως περνάει και υπερθερμαίνεται από τον υπερθερμαντή (SH) από την θερμότητα την προερχόμενη από τα καυσαέρια ακριβώς

μετά την έξοδό τους από τον θάλαμο καύσης όπως στον αναθερμαντή (RH). Ο ατμός αφού περάσει από όλες τις βαθμίδες του στροβίλου (Υψηλής Πίεσης – HP, Μέσης Πίεσης – IP, Χαμηλής Πίεσης – LP) συμπυκνώνεται στον συμπυκνωτή (COND) και από εκεί οδηγείται μέσω αντλίας (PUMP) στους προθερμαντήρες (R) όπου το κορεσμένο υγρό ανεβάζει τη θερμοκρασία του με τη βοήθεια ατμού που προέρχεται από τις απομαστεύσεις από τις διάφορες βαθμίδες των στροβίλων και τελικά οδηγείται στον υπερθερμαντή (SH) για να ατμοποιηθεί. Πριν τους δύο τελευταίους προθερμαντές, παρεμβάλλεται η τροφοδοτική δεξαμενή (DEA) στην οποία προθερμαίνεται παραπέρα το υγρό από τον ατμό της απομάστευσης και παράλληλα γίνεται ο διαχωρισμός του υγρού από τον ατμό, ώστε στην έξοδο να υπάρχει κορεσμένο υγρό το οποίο θα πάει στην αντλία τροφοδοσίας (PUMP). Να σημειωθεί ότι η τροφοδοτική δεξαμενή βρίσκεται στα 55 μέτρα ύψος ώστε να υπάρχει καλή αρχική φυσική κυκλοφορία προς την αντλία κυκλοφορίας (ή τροφοδοσίας). Στους προθερμαντήρες υπάρχουν βαλβίδες στραγγαλισμού που οδηγούν τον υγρό-ατμό της απομάστευσης μετά τον προθερμαντή, σε προηγούμενους προθερμαντές και τον αναμειγνύουν με τον ατμό της εκάστοτε απομάστευσης. Στην Εικόνα 2-1 οι μπλε γραμμές δείχνουν την ροή του νερού – ατμού μέσα στο κύκλωμα και οι κίτρινες την ροή της ενέργειας, είτε προσδιδόμενης είτε αποδιδόμενη.



Εικόνα 2-1 Διάγραμμα ροής προσομοίωσης κύκλου νερού-ατμού του σταθμού όπως σχεδιάστηκε στο gPROMS.

2.1.2. Κύκλωμα λέβητα – υπερθερμαντών

Ο ατμοπαραγωγός EVT-Sulzer (Εικόνα 2-2) (Παπανικολάου, 2008) έχει κατασκευαστεί για μία αναθέρμανση με ροή ατμού κατά μία διαδρομή.

Τα καυσαέρια, αφού περάσουν από τις επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας, οδηγούνται καθοδικά από ένα ουδέτερο πέρασμα και από εκεί διέρχονται από τους προθερμαντήρες αέρα και στη συνέχεια καταλήγουν στα ηλεκτροστατικά φίλτρα της καμινάδας.

Τα πλευρικά τοιχώματα του λέβητα αποτελούνται από τους αυλούς ανόδου (ατμοποίησης) οι οποίοι είναι ηλεκτροσυγκολλημένοι μεταξύ τους. Κάθε σειρά αυτών τροφοδοτείται με νερό από ξεχωριστό συλλέκτη. Οι γραμμές τροφοδοσίας των συλλεκτών αυτών είναι εξοπλισμένες με διαφράγματα σχεδιασμένα έτσι ώστε να εξισώνουν την διαφορά αντίστασης εντός των διάφορων σειρών των αυλών.

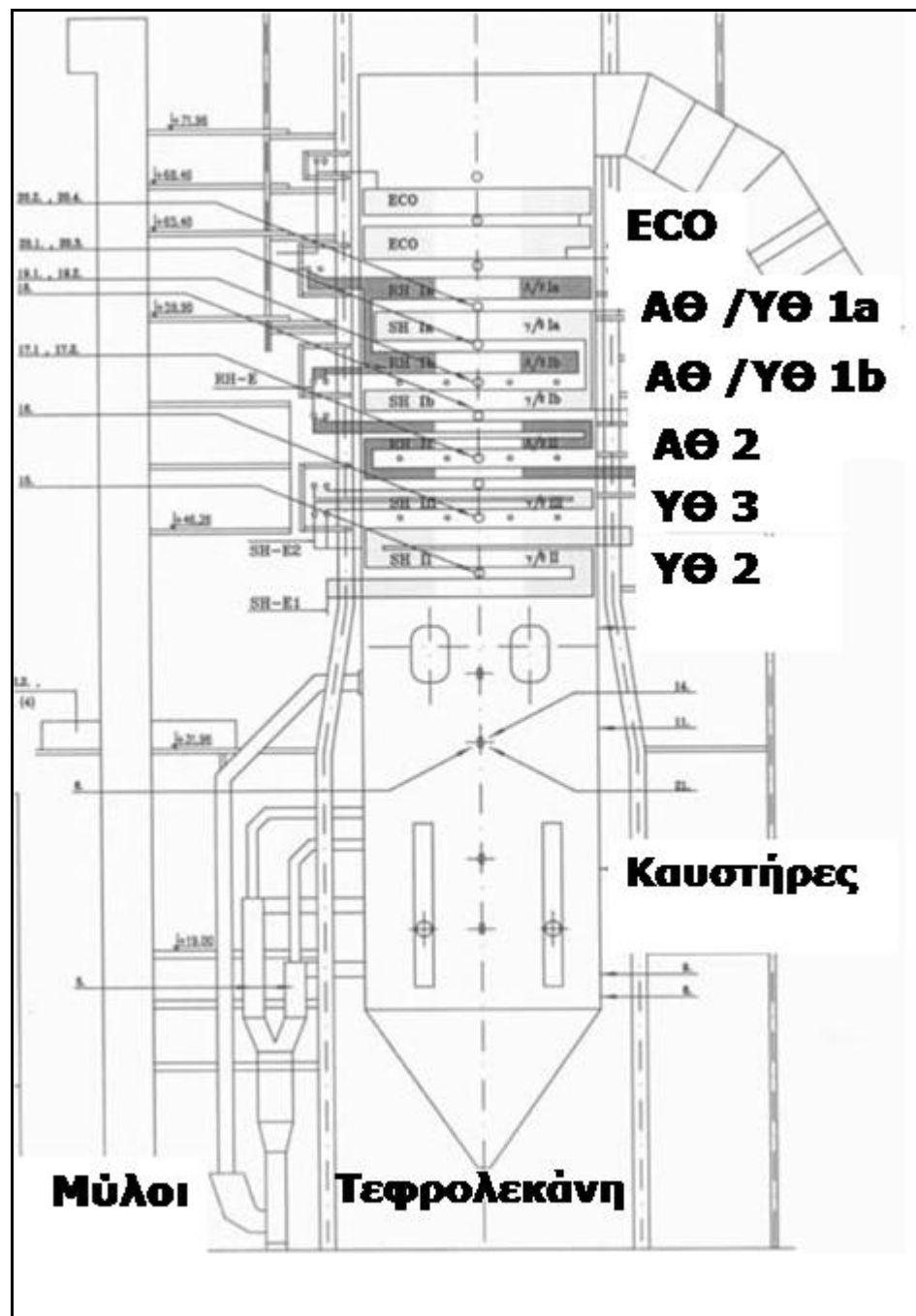
Ο λέβητας λειτουργεί με βάση την αρχή της εξαναγκασμένης κυκλοφορίας, με αυξημένη κυκλοφορία σε όλο το εύρος τιμών των φορτίων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εξασφάλιση σταθερής ροής του ενεργειακού περιεχομένου διαμέσου των αυλών ατμοποίησης, ακόμα και στην περίπτωση λειτουργίας με μερικό φορτίο δίνοντας ουσιαστικά τη δυνατότητα για κάθετη κατασκευή των αυλών.

Οι επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας του Υπέρθερμου και του Ανάθερμου υποστηρίζονται από αυλούς οι οποίοι επεκτείνονται από το μπροστινό και πίσω μέρος του λέβητα. Οι αυλοί αυτοί στηρίζονται από ατσάλινες ράβδους οι οποίες αναρτώνται από την οροφή η οποία επίσης στηρίζει και τον οικονομητήρα (ECO) που εντοπίζεται στην κορυφή του λέβητα. Ο λέβητας είναι αναρτημένος σε μεταλλικό πλαίσιο επιτρέποντας την ελεύθερη κατακόρυφη διαστολή.

Το νερό τροφοδοσίας, κινείται εντός του οικονομητήρα και ακολούθως ρέει στον αναμίκτη, όπου και γίνεται ανάμειξη αυτού με το νερό το οποίο απορρέει από τον διαχωριστή. Στη συνέχεια το νερό αυτό παραλαμβάνεται από την αντλία κυκλοφορίας του λέβητα (ΑΚΛ) απ' όπου και τροφοδοτούνται οι αυλοί ανόδου.

Το διφασικό μείγμα (νερό ατμός) το οποίο τροφοδοτείται από τον εξατμιστή διαχωρίζεται εντός του διαχωριστή. Το διαχωριζόμενο νερό ρέει εντός του αναμίκτη

και ο ατμός οδεύει προς τους υπέρθερμους Υψηλής Πίεσης. Οι τρεις υπέρθερμοι Υψηλής Πίεσης χωρίζονται σε τέσσερις παράλληλες ομάδες αυλών.



Εικόνα 2-2 Ατμοπαραγωγός EVT-Sulzer (Παπανικολάου, 2008)

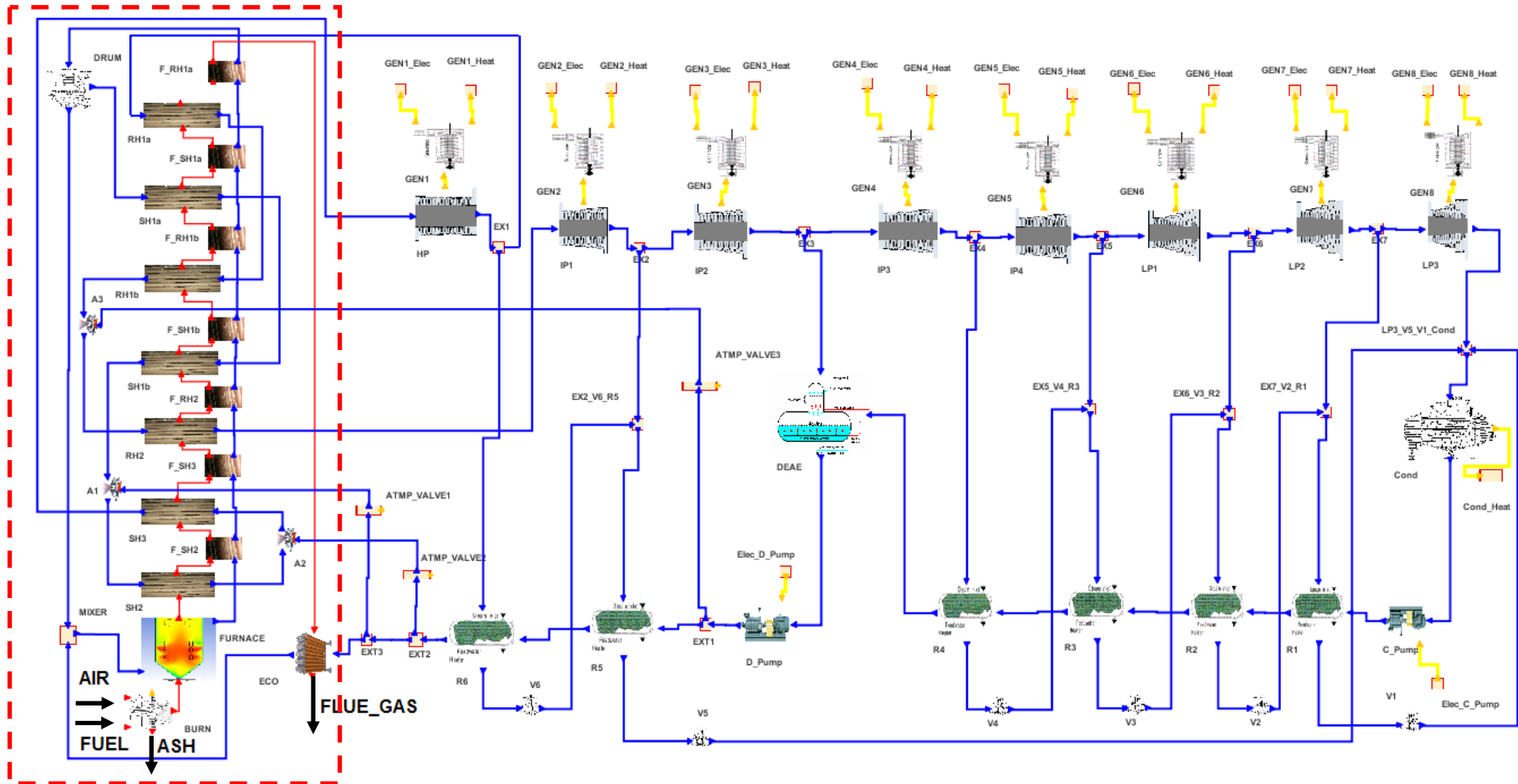
Σε κάθε υπέρθερμο οι ομάδες αυλών εντοπίζονται σε διαφορετικά σημεία εντός της ροής των καυσαερίων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα καυσαέρια με διαφορετική θερμοκρασία και ταχύτητα να έρχονται σε επαφή με τις ομάδες αυλών. Ανάμεσα στους υπέρθερμους 1+2, 3+4, είναι εγκατεστημένα συστήματα ψεκασμού ψύξης τα οποία ρυθμίζουν την θερμοκρασία του ατμού στις εξόδους των υπέρθερμων.

Στην έξοδο του τελευταίου υπέρθερμου οι τέσσερις ομάδες αυλών επανασυνδέονται. Ο ατμός στη συνέχεια, διαμέσου δύο ροών υψηλής πίεσης, κομίζεται προς το στάδιο Υψηλής Πίεσης του στροβίλου. Κατά τη διαδικασία εκκίνησης ή βλάβης ο ατμός αυτός διαμέσου των παρακαμπτών Υψηλής Πίεσης (by-pass) οδηγείται στην ψυχρή περιοχή του ανάθερμου (στραγγαλισμός).

Ο ατμός από τον στρόβιλο Υψηλής Πίεσης ή από τον στραγγαλισμό οδηγείται στους ανάθερμους 1 και 2 οι οποίοι είναι όμοια διαχωρισμένοι σε τέσσερις ομάδες αυλών. Ανάμεσα στους δύο ανάθερμους, εντοπίζονται συστήματα ψεκασμού σε κάθε ομάδα. Ο ανάθερμος ατμός στην συνέχεια τροφοδοτείται στο στάδιο μέσης πίεσης του στροβίλου. Στην περίπτωση εκκίνησης ή βλάβης ο ανάθερμος ατμός οδηγείται στο by-pass χαμηλής πίεσης και στη συνέχεια στον συμπυκνωτή.

2.1.3. Συνολικό μοντέλο σταθμού παραγωγής ενέργειας

Στην Εικόνα 2-3 φαίνεται το συνολικό διάγραμμα ροής του λιγνιτικού ατμοηλεκτρικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τον υπέρθερμο (SH) και τον ανάθερμο (RH) να έχουν αντικατασταθεί από το κύκλωμα του λέβητα με τους υπερθερμαντές και αναθερμαντές του κυκλώματος νερού – ατμού που παρουσιάστηκε παραπάνω. Αυτό το κύκλωμα αποτελεί και το τελικό κύκλωμα όπως αυτό προσομοιώθηκε από το gPROMS έχοντας συνδυάσει τα επιμέρους μοντέλα του κυκλώματος του λέβητα – υπερθερμαντών, αναθερμαντών με το κύκλωμα του νερού ατμού.



Εικόνα 2-3 Διάγραμμα προσομοίωσης λειτουργίας λιγνιτικού ατμοηλεκτρικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

2.2. Μαθηματικό μοντέλο

Ακολουθεί παρουσίαση του μαθηματικού υπόβαθρου των μοντέλων καθώς και των ιδιοτήτων των ρευστών οι οποίες και ενδιαφέρουν για το συγκεκριμένο μοντέλο.

2.2.1. Θερμοδυναμικές σχέσεις και σχέσεις μετάδοσης θερμότητας των ρευστών

Οι θερμοδυναμικές σχέσεις των ρευστών αποτελούν και τις βασικές για τον υπολογισμό της αποδιδόμενης και προσδιδόμενης ενέργειας είτε σαν έργο είτε σαν θερμότητα. Από μόνες τους, για την περίπτωση του κυκλώματος του νερού είναι αρκετές λόγω των απλοποιήσεων του μοντέλου. Στο κύκλωμα του λέβητα ωστόσο, στο οποίο εμφανίζεται και το δεύτερο κύκλωμα ρευστού, αυτό των καυσαερίων, η επίδραση και επιπλέον φυσικών φαινομένων είναι ιδιαίτερα αισθητή όπως της ακτινοβολίας και φαινομένων μεταφοράς (διάχυση, θερμική αγωγιμότητα, κινηματικό ιξώδες) για την μεταφορά της θερμότητας από το ένα μέσω στο άλλο στους υπερθερμαντές και αναθερμαντές καθώς και στα υδροτοιχώματα.

Το D.N.A. διαθέτει μια βιβλιοθήκη 39 στοιχείων μεταξύ των οποίων και το νερό σε υγρή και αέρια φάση. Από τα στοιχεία αυτά ενδιαφέρον έχουν μόνο το νερό σε όλες του τις φάσεις, οξυγόνο, άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου και το αργόν τα οποία είναι και τα στοιχεία τα οποία συνθέτουν τα καυσαέρια μαζί με το νερό σε αέρια φάση. Παρακάτω δίνεται η γενική μεθοδολογία υπολογισμού των ιδανικών αερίων και του νερού – ατμού.

2.2.1.1. Θερμοδυναμικές ιδιότητες των ρευστών

Λόγω της μεγάλης έκτασης των σχέσεων για τους υπολογισμούς των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων εξαιτίας και των πολλών εναλλακτικών ζευγαριών, δίνεται μόνο η απαραίτητη βιβλιογραφία η οποία περιέχει την εκάστοτε μεθοδολογία. Ο υπολογισμός των ιδιοτήτων του νερού γίνεται με βάση τον IAPWS-IF97 (*International Association for the Properties of Water and Steam – Industrial Formulation 1997*) κανονισμό. Οι υπολογισμοί αυτοί είναι για όλες τις φάσεις του νερού.

Τα υπόλοιπα στοιχεία, όλα θεωρούνται σαν ιδανικά αέρια με εξαίρεση τον στερεό άνθρακα και το στερεό θείο τα οποία δεν απασχολούν όμως στην συγκεκριμένη

περίπτωση. Οι υπολογισμοί τους γίνονται βασισμένοι στους Chase (1985) και Daubert (1984)

Όλοι οι παραπάνω υπολογισμοί, επειδή περιέχουν υπολογισμούς πολύπλοκων παραγώγων και ολοκληρωμάτων οι οποίοι δεν μπορούν να υπολογιστούν εύκολα αναλυτικά, έχουν ως βάση την πολυωνυμική προσέγγιση.

2.2.1.2. Σχέσεις μετάδοσης θερμότητας

- **Μεταφορά θερμότητας**

Σε γενικές γραμμές, για να είναι εφικτοί οι υπολογισμοί μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή, απαιτείται εκτίμηση συντελεστών τριβής, υπολογισμοί πτώσης πίεσης και του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας α , για να γίνουν οι εκτιμήσεις της θερμοροής.

Για αυτές τις εκτιμήσεις είναι αναγκαίοι οι αδιάστατοι αριθμοί Reynolds Re , Prandtl Pr και Nusselt Nu οι οποίοι δίνονται ως:

$$Re = \frac{wl\rho}{\mu} \quad (2-1)$$

$$Pr = \frac{c_p\mu}{\lambda} \quad (2-2)$$

$$Nu = \frac{al}{\lambda} \quad (2-3)$$

όπου πέρα από την ταχύτητα w και το μήκος l τα οποία μπορούν να μετρηθούν απαιτείται και ο υπολογισμός της πυκνότητας ρ , του ιξώδους (είτε κινηματικό ν είτε δυναμικό μ), της ειδικής θερμοχωρητικότητας c_p της θερμικής αγωγιμότητας λ καθώς και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας α . Πέρα από την πυκνότητα η οποία μπορεί να υπολογιστεί από τις σχέσεις των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων, παρακάτω παρατίθεται η μεθοδολογία και για την εκτίμηση και των υπολοίπων μεγεθών.

Νερό/Ατμός: Οι ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας υπολογίζονται με βάση τον Schmidt (1982) εκτός της ειδικής θερμοχωρητικότητας η οποία, υπολογίζεται από την σχέση:

$$\frac{c_p T_c}{P_c \nu_c} = -\theta \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial \theta^2} \right)_\beta = -\theta \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} \right)_x + \theta \frac{\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta \partial \chi} \right)^2}{\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} \right)_\theta} \quad (2-4)$$

όπου $\beta = P/P_c$, $\theta = T/T_c$ και $\chi = v/v_c$ με τον δείκτη c να δηλώνει τις κρίσιμες τιμές, ζ η αδιάστατη ελεύθερη ενέργεια Gibbs και Ψ η αδιάστατη ελεύθερη ενέργεια Helmholtz των οποίων οι παράγωγοι συνδέονται με την αδιάστατη εντροπία σ και αδιάστατη πίεση β μέσω των σχέσεων:

$$\sigma = -\left(\frac{\partial \zeta}{\partial \theta}\right)_{\beta} = -\left(\frac{\partial \Psi}{\partial \theta}\right)_{\chi} \quad (2-5)$$

$$\beta = -\left(\frac{\partial \Psi}{\partial \chi}\right)_{\theta}$$

Ανάλογα τώρα αν το ρευστό βρίσκεται στην κρίσιμη περιοχή, η ειδική θερμοχωρητικότητα είναι:

$$c_p = \theta \frac{P_c v_c}{T_c} \left[\left(\frac{\partial \sigma}{\partial \theta}\right)_{\chi} - \frac{\left(\frac{\partial \sigma}{\partial \chi}\right)^2}{\left(\frac{\partial \beta}{\partial \chi}\right)_{\theta}} \right] \quad (2-6)$$

αλλιώς

$$c_p = \theta \frac{P_c v_c}{T_c} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \theta}\right)_{\beta} \quad (2-7)$$

Ιδανικά αέρια:

Για τα αέρια, η εκτίμηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας γίνεται μέσω πρωτοβάθμιας πολυωνυμικής σχέσης, συναρτήσεως της θερμοκρασίας της μορφής:

$$c_p = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + c_3 T^3 + c_4 T^4 + c_5 T^5 + c_6 T^6 \quad (2-8)$$

όπου οι σταθερές c_i δίνονται για το εκάστοτε αέριο από την προαναφερθείσα βιβλιογραφία για τα αέρια.

Ο υπολογισμός του ιξώδους γίνεται με την μέθοδο του Lucas η οποία είναι η πιο απλή με καλή ακρίβεια μεταξύ 1.5% και 4% για μη αλκοολούχες ουσίες το οποίο ανεβαίνει στο 5% για μίγματα. Η εκτίμηση του ιξώδους αερίου δίνεται από την σχέση:

$$\frac{\mu_{\xi}}{F_P^{\circ} F_Q^{\circ}} = 0.807 T_r^{0.618} - 0.357 \exp(-0.449 T_r) + 0.340 \exp(-4.058 T_r) + 0.018 \quad (2-9)$$

όπου

$$\xi = 0.176 \left(\frac{T_c}{M^3 P_c^4} \right)^{1/6} \quad (2-10)$$

F_p^o και F_o^o διορθωτικοί παράγοντες σχετικοί με την επίδραση της πολικότητας και των κβαντικών φαινομένων αντίστοιχα, M το γραμμομοριακό βάρος και T_r αδιάστατη θερμοκρασία ως προς την κρίσιμη θερμοκρασία. Για τα μίγματα η σχέση δεν αλλάζει αλλά κάθε ουσία επηρεάζει ανάλογα με το γραμμομοριακό κλάσμα της στο μίγμα.

Με γνωστό πλέον το ξ μπορεί να γίνει και ο υπολογισμός της θερμικής αγωγιμότητας. Για την εκτίμησή της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Chung στην οποία η θερμική αγωγιμότητα δίνεται:

$$\frac{\lambda M}{\mu} = 3.75 \Psi R \quad (2-11)$$

όπου

$$\Psi = 1 + \alpha \frac{0.215 + 0.28288\alpha - 1.061\beta + 0.26665Z}{0.6366 + \beta Z - 1.061\alpha\beta} \quad (2-12)$$

με $\alpha = c_p / R - 5/2$, $\beta = 0.7862 - 0.7109\omega + 1.3168\omega^2$ και $Z = 2.0 + 10.5T_r^2$

Το σφάλμα της μεθόδου είναι της τάξης του 10% για μίγματα η οποία δεν είναι η πιο ακριβής αλλά είναι αποδεκτό, δεδομένης της δυσκολίας της και της γενικότητάς της. Το T_r , το M και ο συντελεστής εκκεντρότητας ω εκτιμούνται βάση των μέσων τιμών των εμπλεκόμενων στοιχείων στο μίγμα.

Ακτινοβολία

Για να συνυπολογιστεί και η επίδραση της ακτινοβολίας των καυσαερίων από την καύση στα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας, απαιτείται η εκτίμηση της εκπεμπιμότητας ϵ_g , της απορροφητικότητας α_g , της ανακλαστικότητας ρ_g και της διαπερατότητας τ_g του αερίου. Στην περίπτωση των καυσαερίων, μόνο το CO_2 και το H_2O συμμετέχουν στην μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας. Για αυτό το λόγο και έχει σημασία ο λόγος των γραμμομοριακών κλασμάτων τους.

Η πιο απλή υπόθεση είναι αυτή του γκρίζου σώματος μέσα στον θάλαμο καύσης η οποία και ισχύει στη συγκεκριμένη περίπτωση λόγω στερεού καυσίμου οπότε υπάρχει

και παραγωγή αιθάλης κατά της διάρκεια της καύσης. Επομένως για την υπόθεση του γκρίζου σώματος ισχύει:

$$\varepsilon_g = a_g \quad (2-13)$$

$$\rho_g = 1 - \varepsilon_g \quad (2-14)$$

$$\tau_g = 0 \quad (2-15)$$

Επειδή όμως τα καυσαέρια συνεχίζουν να εκπέμπουν ακτινοβολία και μετά την απομάκρυνση από την εστία καύσης, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο σταθμικού αθροίσματος γκρίζων αερίων (*weighted Sum of Grey Gasses*) στο οποίο έχουν χρησιμοποιηθεί κάποιες συσχετίσεις οι οποίες φαίνονται στις σχέσεις. Συγκεκριμένα υπολογίστηκαν τρία αέρια, νερό, διοξείδιο του άνθρακα και ένα καθαρό για να μπορέσει να συμπεριληφθεί και η διαπερατότητα. Η εκπεμπιμότητα υπολογίζεται ως:

$$\varepsilon_g = \sum_{i=0}^3 a_{\varepsilon,i}(T) \left[1 - e^{-k_i L (P_{CO_2} + P_{H_2O})} \right] \quad (2-16)$$

όπου

$$a_{\varepsilon,i} = \sum_{j=1}^4 b_{\varepsilon,i,j} T^{j-1}, \text{ για } i = 1,3 \quad (2-17)$$

$$a_{\varepsilon,0} = 1 - \sum_{i=1}^3 a_{\varepsilon,i} \quad (2-18)$$

Αντίστοιχα η απορροφητικότητα:

$$a_g = \sum_{i=0}^3 a_{a,i}(T, T_s) \left[1 - e^{-k_i L (P_{CO_2} + P_{H_2O})} \right] \quad (2-19)$$

όπου

$$a_{a,i} = \sum_{j=1}^4 \left[\sum_{k=1}^4 c_{a,i,j,k} T_s^{k-1} \right] T^{j-1}, \text{ για } i = 1,3 \quad (2-20)$$

$$a_{a,0} = 1 - \sum_{i=1}^3 a_{a,i} \quad (2-21)$$

k_i είναι συντελεστές της μεθόδου, T_s θερμοκρασία τοιχώματος και c_i επίσης σταθερές της μεθόδου.

Το μέσω μήκος κύματος της ακτινοβολίας μεταξύ δύο επιφανειών L είναι συνάρτηση όγκου και επιφάνειας και ανεξάρτητο από την κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα δίνεται από την σχέση:

$$L = 3.5 \frac{V}{A} \quad (2-22)$$

όπου V ο όγκος του όγκου ελέγχου και A η επιφάνεια αυτού.

Επιπλέον της εκπεμψιμότητας των δύο αερίων που ενδιαφέρουν, υπολογίζεται και η εκπεμψιμότητα των σωματιδίων που υπάρχουν στα καυσαέρια (τέφρα) ε_{par} , των οποίων υπολογίζεται συναρτήσει του ποσοστού συμμετοχής τους στο ρεύμα των καυσαερίων καθώς και από την διάμετρο και την πυκνότητά τους. Συνολικά, η εκπεμψιμότητα υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\varepsilon = \varepsilon_g + \varepsilon_{par} + \varepsilon_g \varepsilon_{par} \quad (2-23)$$

Σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι σε περίπτωση επικαθίσεων στις σωληνώσεις, στον παρανομαστή των συντελεστών συνολικής μετάδοσης θερμότητας υπεισέρχεται και ο συντελεστής ρύπανσης R_{foul} .

2.2.2. Επιμέρους μοντέλα μονάδας

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα επιμέρους μοντέλα των στοιχείων που αποτελούν την μονάδα Η παρουσίαση γίνεται με βάση το κύκλωμα στο οποίο ανήκουν. Το συνολικό μοντέλο δεν έχει κάποιο επιπλέον στοιχείο από την στιγμή που αποτελεί την συνένωση των δύο προηγούμενων.

2.2.2.1. Κύκλωμα νερού – ατμού

Τα μαθηματικά μοντέλα των επιμέρους στοιχείων που αναφέρθηκαν και παρουσιάστηκαν στο παραπάνω σχήμα και εισήχθησαν στο λογισμικό βελτιστοποίησης περιγράφονται από συγκεκριμένες μαθηματικές σχέσεις (Elmegaard, 1999). Αναλυτικά τα μαθηματικά μοντέλα είναι:

- **Στροβίλος (HP, IP1, IP2, IP3, IP4, LP1, LP2, LP3)**

Δύο μοντέλα στροβίλου χρησιμοποιήθηκαν. Το πρώτο που χρησιμοποιήθηκε υπάκουει στις εξής σχέσεις:

$$m_1 + m_2 = 0 \quad (2-24)$$

$$n_{is} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2is}} \quad (2-25)$$

$$C_T = \frac{m_1 \sqrt{T_1}}{\sqrt{P_1^2 - P_2^2}} \quad (2-26)$$

Η σχέση (2-24) είναι το ισοζύγιο μάζας του ατμού που ισχύει μέσα στον στρόβιλο, η (2-25) είναι η σχέση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης n_{is} από την οποία υπολογίζεται η ενθαλπία εξόδου του ατμού μετά την εκτόνωση. Η σχέση (2-26) χρησιμοποιεί την χαρακτηριστική του στρόβιλου C_T από την οποία μπορεί να υπολογιστεί η πίεση εξόδου μετά την εκτόνωση στη βαθμίδα του στρόβιλου και έχει μονάδες [kgK^{0,5}/sbar]. Το μοντέλο αυτό του στρόβιλου χρησιμοποιήθηκε γιατί η χρήση της σχέσης της χαρακτηριστική του στρόβιλου C_T είναι αρκετά συχνή και σε σύγχρονα μοντέλα στρόβιλων (Chaibakhsh *et al.*, 2008) Από την στιγμή που είναι γνωστά δύο θερμοδυναμικά μεγέθη στην έξοδο μπορούν να υπολογιστούν και όλα τα υπόλοιπα.

Το άλλο μοντέλο στρόβιλου χρησιμοποιεί επίσης τις σχέσεις (2-24) και (2-25) αλλά αντί της σχέσης (2-26) χρησιμοποιείται η σχέση του πολυτροπικού βαθμού απόδοσης n_{pol} :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\eta_{pol} \frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (2-27)$$

Το δεύτερο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε λόγω της πιο γενικής του δομής το οποίο το καθιστά πιο εύχρηστο σε περιπτώσεις όπου η χαρακτηριστική του στρόβιλου δεν είναι γνωστή και γενικά υπάρχει έλλειψη δεδομένων για τον στρόβιλο. Στις παραπάνω ισότητες καθώς και στις επόμενες οι δείκτες 1 και 2 συμβολίζουν την είσοδο και την έξοδο αντίστοιχα του κάθε στοιχείου. Επίσης το m συμβολίζει την παροχή μάζας (kg/s), το h την ενθαλπία (kJ/kg), το T τη θερμοκρασία (°C) και το P την πίεση (bar). Το η_{pol} είναι πολυτροπικός βαθμός απόδοσης του στρόβιλου και το γ είναι ο λόγος των ειδικών θερμοχωρητικοτήτων του ατμού.

- **Υπερθερμαντής (SH) Αναθερμαντής (RH)**

Για τον υπερθερμαντή και τον αναθερμαντή ισχύει η διατήρηση μάζας (2-24) καθώς και οι παρακάτω σχέσεις:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 + \dot{Q}_3 = 0 \quad (2-28)$$

$$P_1 - P_2 = \Delta P \quad (2-29)$$

Το \dot{Q}_3 είναι η θερμότητα που προσδίδεται μέσω των καυσαερίων των παραγόμενων από την καύση στο νερό για να ατμοποιηθεί οπότε πρέπει επίσης $\dot{Q}_3 > 0$ ώστε να εξασφαλίζεται η πρόσδοση θερμότητας στα στοιχεία αυτά. Επίσης πρέπει να ελέγχεται στο μοντέλο ότι η θερμοκρασία στην έξοδο του αναθερμαντή και του προθερμαντή είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία κορεσμού του ατμού ώστε να έχουμε σίγουρα στην έξοδο αυτών των στοιχείων κορεσμένο ατμό. ΔP είναι η πτώση πίεσης μέσα στα συγκεκριμένα στοιχεία και δίνεται από τον κατασκευαστή. Σε αυτό το μοντέλο η λειτουργία του υπερθερμαντή και αναθερμαντή απλοποιήθηκε σε μια απλή μεταφορά θερμότητας και μια πτώση πίεσης επειδή σε αυτό το σημείο δεν μελετάται η επίδραση της καύσης και του λέβητα. Όπως θα δούμε παρακάτω έχουν χρησιμοποιηθεί αναλυτικότερα μοντέλα των αναθερμαντών και υπερθερμαντών όπου μπορεί να μελετηθεί και η επίδραση των επικαθίσεων. Τα μοντέλα αυτά θα προσομοιωθούν αναλυτικά στο κύκλωμα του λέβητα το οποίο θα περιλαμβάνει τα στοιχεία τα οποία περικλείονται από το κόκκινο διακεκομμένο πλαίσιο στο σχεδιάγραμμα της Εικόνας 2-3.

- **Συμπυκνωτής (COND)**

Για τον συμπυκνωτή ισχύουν οι ίδιες σχέσεις που ισχύουν και για τον υπερθερμαντή και αναθερμαντή, μόνο που το \dot{Q}_3 είναι η θερμότητα που αποβάλλεται στο περιβάλλον έτσι ώστε στην έξοδό του να έχουμε κορεσμένο υγρό. Επομένως σε αντίθεση με υπερθερμαντή και αναθερμαντή εδώ πρέπει να εξασφαλίζεται ότι $\dot{Q}_3 < 0$. Επίσης, πρέπει να εξασφαλίζεται κορεσμένο υγρό στην έξοδο ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα στην αντλία που ακολουθεί. Απλοποιημένο μοντέλο χρησιμοποιείται και σε αυτή την περίπτωση λόγω πολυπλοκότητας του κυκλώματος νερού ατμού.

- **Προθερμαντής (R1, R2, R3, R4, R5, R6)**

Οι προθερμαντήρες είναι στην ουσία εναλλάκτες θερμότητας όπου στο ένα κύκλωμα ρέει ο ατμός από τις απομαστεύσεις και στο άλλο το κορεσμένο νερό μετά τον συμπυκνωτή και την τροφοδοτική δεξαμενή. Ισχύουν οι αρχές διατήρησης μάζας και ενέργειας ως εξής:

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = 0 \quad (2-30)$$

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_4 = 0 \quad (2-31)$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_4 h_4 = 0 \quad (2-32)$$

και για την πίεση:

$$P_1 - P_2 = \Delta P_1 \quad (2-33)$$

$$P_3 - P_4 = \Delta P_2 \quad (2-34)$$

Στις σχέσεις (2-30), (2-31), (2-32) οι δείκτες 1 και 2 υποδηλώνουν την είσοδο και την έξοδο του νερού στον προθερμαντήρα ενώ οι δείκτες 3 και 4 υποδηλώνουν την είσοδο και έξοδο του ατμού αντίστοιχα. Επίσης ελέγχεται ότι η θερμοκρασία στην κατάσταση 1 είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία στην κατάσταση 4 όπως επίσης και ότι η θερμοκρασία στην κατάσταση 2 είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία στην κατάσταση 3. Για την πίεση χρησιμοποιείται η σχέση Επίσης στην κατάσταση 2 πρέπει να έχουμε κορεσμένο υγρό. Επίσης απλοποιημένα μοντέλα προς χάριν των υπολογισμών και λόγω της πολυπλοκότητας του κυκλώματος.

- **Αντλία (PUMP)**

Για τις αντλίες ισχύει επίσης η αρχή διατήρησης της μάζας (2-30) καθώς και οι επιπλέον σχέσεις:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 + E_3 = 0 \quad (2-35)$$

$$\eta_p E_3 = \dot{m}_1 v_1 (P_2 - P_1) 10^2 \quad (2-36)$$

Στις παραπάνω σχέσεις E_3 είναι η ηλεκτρική ισχύς της αντλίας σε kW και η_P είναι ο βαθμός απόδοσης της αντλίας. Η θερμοκρασία στην είσοδο της αντλίας πρέπει να είναι κάτω από τη θερμοκρασία κορεσμού έτσι ώστε να κυκλοφορεί μόνο κορεσμένο υγρό το οποίο επίσης ελέγχεται. Επίσης η ισχύς πρέπει να είναι θετική από την στιγμή που προσδίδεται στην αντλία. Το παραπάνω μοντέλο προτιμήθηκε λόγω της γενικότητας του από την στιγμή που απαιτείται η γνώση μόνο του βαθμού απόδοσης. Με αυτό τον τρόπο καθίσταται δυνατή η χρήση του σε πληθώρα εφαρμογών.

- **Γεννήτριες (GEN1, GEN2, GEN3, GEN4, GEN5, GEN6, GEN7, GEN8)**

Για τις γεννήτριες ισχύει η εξής σχέση:

$$\eta_G = \frac{E_1}{E_1 + Q_2} \quad (2-37)$$

Όπου η_G είναι ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας, E_1 η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται και Q_2 η θερμική ισχύς που χάνεται από τη μετατροπή της μηχανικής σε ηλεκτρική ενέργεια. Απλοποιημένο μοντέλο και σε αυτή την περίπτωση από τη στιγμή που στη συγκεκριμένη μελέτη απασχολεί η θερμοδυναμική συμπεριφορά της μονάδας, οπότε γνώση του βαθμού απόδοσης είναι αρκετή για την δημιουργία και ενός πιο γενικού μοντέλου.

- **Τροφοδοτική Δεξαμενή (DEA)**

Τέλος στην τροφοδοτική δεξαμενή ισχύουν οι σχέσεις:

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 = 0 \quad (2-38)$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 = 0 \quad (2-39)$$

Όπου οι δείκτες 1, 2 και 3 υποδηλώνουν την είσοδο του νερού από τον προθερμαντήρα, την είσοδο του ατμού από την απομάστευση του στροβίλου και την έξοδο του κορεσμένου νερού από την τροφοδοτική δεξαμενή προς την αντλία κυκλοφορίας αντίστοιχα.

Για ολόκληρο το κύκλωμα νερού-ατμού αλλά και αργότερα για το κύκλωμα του λέβητα με τους υπερθερμαντές και αναθερμαντές να σημειωθεί ότι γίνεται η υπόθεση ότι όλες οι εισερχόμενες ροές, είτε είναι παροχές ενέργειας είτε παροχής μάζας, θεωρούνται θετικές, ενώ όλες οι εξερχόμενες, αντίστοιχες ροές θεωρούνται αρνητικές. Με αυτή την υπόθεση δικαιολογείται και το θετικό πρόσημο σε όλες τις σχέσεις των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας που παρουσιάστηκαν παραπάνω και αυτών που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια. Η πολυπλοκότητα του κυκλώματος νερού ατμού κατέστησε σε αυτό το σημείο την ανάγκη για χρήση απλοποιημένων μοντέλων των περισσότερων στοιχείων, ώστε να είναι δυνατή η μελέτη βελτιστοποίησης για εναλλακτικά σενάρια ώστε να μπορεί να βγει μια πιο εμπειριστατωμένη μελέτη της ανάλυσης ευαισθησίας του κυκλώματος νερού ατμού.

- **Βαθμός απόδοσης**

Τέλος, ο θερμικός βαθμός απόδοσης της μονάδας, η σχέση του οποίου είναι και η αντικειμενική συνάρτηση του μη-γραμμικού προβλήματος βελτιστοποίησης ορίζεται ως εξής:

$$\eta = \frac{\sum E_1 - \sum E_3}{\sum Q_3} \quad (2-40)$$

ο οποίος είναι το κλάσμα της διαφοράς του αθροίσματος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τις βαθμίδες των γεννητριών (E_1) και του αθροίσματος της καταναλισκομένης ηλεκτρικής ενέργειας από τις αντλίες (E_3) προς το άθροισμα της καταναλισκομένης θερμικής ενέργειας από τον υπερθερμαντή και τον αναθερμαντή (Q_3) θεωρώντας τις όλες θετικές σε αυτή την περίπτωση. Η εξάρτηση του βαθμού απόδοσης από τις παραπάνω μεταβλητές, συνεπάγεται την εξάρτησή του από την ενθαλπία και την παροχή ατμού ή νερού. Η ενθαλπία εξαρτάται από την θερμοκρασία και την πίεση του ατμού. Είναι εμφανής επομένως η εξάρτηση του βαθμού απόδοσης, τόσο από τις θερμοφυσικές ιδιότητες του νερού όσο και από την παροχή αυτού. Παρατηρείται ότι ο ορισμός αυτός του βαθμού απόδοσης είναι του κυκλώματος του νερού ατμού οπότε δεν συμπεριλαμβάνεται ο βαθμός απόδοσης του λέβητα ο οποίος θα συμπεριληφθεί στο συνολικό κύκλωμα όπου θα προστεθεί και το κύκλωμα του λέβητα.

2.2.2.2. Κύκλωμα λέβητα – υπερθερμαντών, αναθερμαντών

Σε αυτό το σημείο δίνονται οι λεπτομερείς σχέσεις οι οποίες διέπουν τους υπερθερμαντές και αναθερμαντές οι οποίοι προηγουμένως είχαν απλοποιηθεί στο κύκλωμα του νερού – ατμού σε απλές πηγές ενέργειας. Επίσης δίνονται και οι αναλυτικές σχέσεις του λέβητα ο οποίος επίσης συμμετέχει στην πρόσδοση θερμότητας στο νερό για εξάτμιση. Οι σχέσεις ακτινοβολίας και συναγωγής θα αναδιατυπωθούν για τις παραπάνω περιπτώσεις των συγκεκριμένων στοιχείων. Επίσης παρουσιάζονται και οι σχέσεις των λοιπών στοιχείων που συμπληρώνουν το κύκλωμα.

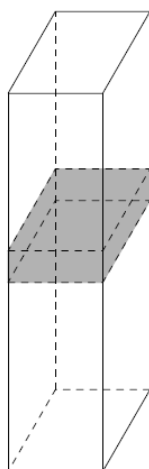
- **Λέβητας (FURNACE)**

Η μεταφορά θερμότητας από τη φλόγα προς το εργαζόμενο μέσο (νερό-ατμός), γίνεται κυρίως με ακτινοβολία. Η ακτινοβολία μπορεί να διαχωριστεί σε ακτινοβολία μέλανος σώματος από τη φλόγα και ακτινοβολία αερίων από τα προϊόντα της καύσης. Οι δύο μορφές ακτινοβολίας διακρίνονται ανάλογα με τη μορφή της φλόγας η οποία προέρχεται από τη καύση ενός δεδομένου καυσίμου. Η φλόγα συμπεριφέρεται σαν ένα σώμα, δηλαδή απορροφά, εκπέμπει και ανακλά ακτινοβολία αλλά δεν τη μεταδίδει. Κατά την καύση παρουσία φλόγας, αυτή εμπεριέχει σύνθετα μόρια, διότι τα καύσιμα αυτά σχηματίζουν αιθάλη και ενδεχομένως να αποτελούνται και από στερεά σωματίδια. Η ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος σε μία επιφάνεια μπορεί να αναλυθεί ως εξής. Η συνολική θερμοροή από ακτινοβολία η οποία μεταφέρεται σε ένα τοίχο i , εντός ενός όγκου με N επιφάνειες περιγράφεται από την εξής εξίσωση:

$$\dot{Q}_i = A_i \sigma \left(\sum_{j=1}^N F_{ij} \epsilon_j T_j^4 + F_{if} \epsilon_f T_f^4 \right) \quad (2-41)$$

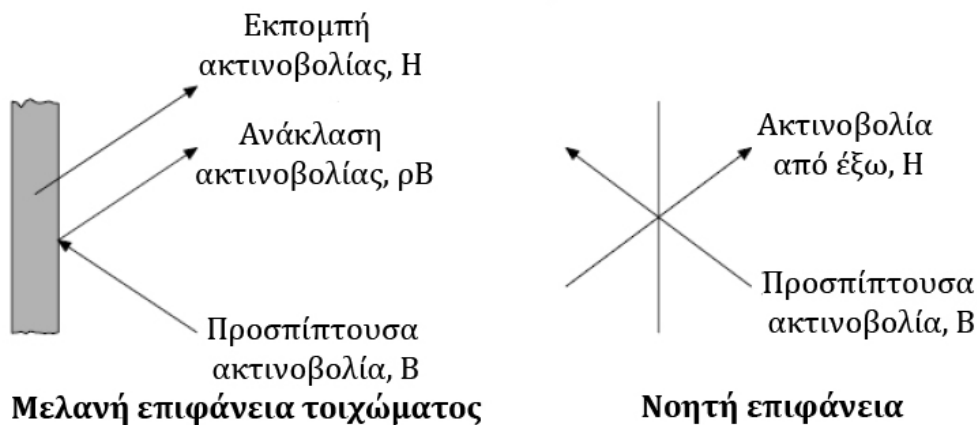
Όπου σ είναι η σταθερά Boltzmann, F είναι παράγοντες όψης και ϵ είναι ο βαθμός μεταφοράς θερμότητας. Οι αυλοί ανόδου οι οποίοι περικλείουν το θάλαμο καύσης, για την ανάλυση της ακτινοβολίας, θα συμπεριφέρονται ως μελανές επιφάνειες. Προκειμένου να δομηθεί ένα γενικό μοντέλο, η λογική είναι να διαχωριστεί ο θάλαμος καύσης σε μικρότερους τομείς. Τα σύνορα των τομέων αυτών θα οριοθετούνται από τα τοιχώματα του θαλάμου καύσης καθώς και από νοητά επίπεδα. Λόγω της συμμετρίας, η διάτμηση του θαλάμου καύσης μπορεί να γίνει ευκολότερη

με κατάλληλη επιλογή του πλήθους των τομέων. Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-4 (Elmegaard, 1999)



Εικόνα 2-4 Διαχωρισμός του θαλάμου καύσης σε τομείς (Elmegaard, 1999).

Η ανάλυση ακτινοβολίας για τους δύο τύπους τοιχωμάτων σε κάθε τομέα παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-5 (Παπανικολάου, 2008)



Εικόνα 2-5 Ανάλυση ακτινοβολίας στα τοιχώματα για το μοντέλο του θαλάμου καύσης (Παπανικολάου, 2008).

Η θερμότητα η οποία απορροφάται από τον θάλαμο καύσης, μεταφέρεται διαμέσου των αυλών ανόδου. Η μεταφορά θερμότητας γίνεται με αγωγή και περιγράφεται από τη σχέση Fourier, όπου για τη περίπτωση κυλινδρικού αυλού δίνεται ως εξής:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda 2\pi l (T_o - T_i)}{\ln \frac{r_o}{r_i}} \quad (2-42)$$

με r_o και r_i η εξωτερική και η εσωτερική ακτίνα αντίστοιχα. Στο εσωτερικό των αυλών ανόδου ρέει νερό υπό πίεση, το οποίο ψύχει το υλικό των αυλών με συναγωγή. Η μεταφορά θερμότητας στη περίπτωση αυτή περιγράφεται από τη σχέση Newton:

$$\dot{Q} = aA(T_s - T_w) \quad (2-43)$$

όπου το a υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Nu = \frac{al}{\lambda} = \frac{\frac{f}{8}(\text{Re}-1000)\text{Pr}}{1 + 12.7\sqrt{\frac{f}{8}}\left(\text{Pr}^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (2-44)$$

Όπου f είναι ο συντελεστής τριβής ο οποίος για λείους αυλούς δίνεται από τη σχέση:

$$f = (0.79 \ln \text{Re} - 1.64)^{-2} \quad (2-45)$$

Ο αδιάστατος αριθμός Nusselt, Nu , στη περίπτωση της εξαναγκασμένης συναγωγής υπολογίζεται από τον εμπειρικό τύπο:

$$Nu = f(\text{Re}, \text{Pr}) \quad (2-46)$$

Οι αριθμοί Reynolds, Re , και Prandtl, P , ορίζονται από τις σχέσεις (2-1) και (2-2)

Το μοντέλο του θαλάμου καύσης θα πρέπει να περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας από τα προϊόντα της καύσης προς τους αυλούς ανόδου και προς το νερό το οποίο ρέει στο εσωτερικό τους. Ο Hadvig (1986) περιγράφεται μία μεθοδολογία μοντελοποίησης στιγμιαίας μεταφοράς θερμότητας με διάφορους μηχανισμούς, εκφράζοντας μία συνολική μεταφορά θερμότητας, U_{tot} , κάνοντας χρήση της σχέσης:

$$\dot{Q} = U_{tot} A \Delta T_{lm} \quad (2-47)$$

Ο συντελεστής συνολικής μεταφοράς θερμότητας υπολογίζεται από τη σχέση (Elmegaard, 1999):

$$U_{tot} = \frac{1}{r_A} \cdot \frac{1}{\frac{1}{a_g r_0} + \frac{1}{\lambda_w} \ln \frac{r_0}{r_i} + \frac{1}{a_{st} r_i}} \quad (2-48)$$

όπου r_A είναι η ακτίνα στην οποία υπολογίζεται η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας.

Οι τρεις όροι στο παρονομαστή είναι η θερμική αντίσταση των καυσαερίων, των αυλών και του ατμού αντίστοιχα. Οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας των ρευστών πρέπει επίσης να οριστούν με σχέσεις.

Οι αυλοί θερμαίνονται μόνο από τη πλευρά η οποία είναι στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης. Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το προσδιορισμό της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας. Λόγω της αγωγής στο εσωτερικό του υλικού των αυλών, η επιφάνεια μεταφοράς δε θα είναι η ίδια για κάθε όρο της συνολικής μεταφοράς θερμότητας. Στην εξωτερική επιφάνεια των αυλών, η επιφάνεια μεταφοράς θα ισοδυναμεί περίπου με το μισό της εξωτερικής επιφάνειας των αυλών. Στο εσωτερικό των αυλών, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας με συναγωγή εξαρτάται από την μη-ομοιομορφία του προφίλ μεταφοράς (Elmegaard, 1999). Η μη-ομοιομορφία της επιφάνειας μπορεί να συσχετιστεί με μία ημιτονοειδή καμπύλη από την οποία ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας προσεγγιστικά υπολογίζεται ότι βρίσκεται μεταξύ 80% και 100% της επιφάνειας για τη περίπτωση που είχαμε περιφερειακά συμμετρική θέρμανση των αυλών. Ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, λαμβάνοντας υπόψη τη συνολικό εσωτερικό επιφανειακό εμβαδόν δίνεται από τη σχέση:

$$U_{tot,i} = \frac{1}{r_i} \cdot \frac{1}{\frac{1}{0.5a_g r_0} + \frac{1}{0.75\lambda_w} \ln \frac{r_0}{r_i} + \frac{1}{0.9a_{st} r_i}} \quad (2-49)$$

Σε αυτό το προφίλ για αγωγή θεωρείται ότι είναι ακόμα περισσότερο μη-συμμετρικό από τη περίπτωση της συναγωγής.

Στην περίπτωση όπου εμφανίζονται και επικαθίσεις, η (2-49) γίνεται:

$$U_{tot,i} = \frac{1}{r_i} \cdot \frac{1}{\frac{1}{0.5a_g r_0} + \frac{1}{0.75\lambda_w} \ln \frac{r_0}{r_i} + \frac{R_{foul}}{0.9a_{st} r_i}} \quad (2-50)$$

όπου R_{foul} είναι ο συντελεστής ρύπανσης και είναι ανάλογος του πάχους των επικαθίσεων. ΔT_{lm} είναι η μέση λογαριθμική θερμοκρασία και δίνεται από την εξίσωση:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_1 - T_4) - (T_2 - T_3)}{\ln \frac{T_1 - T_4}{T_2 - T_3}} \quad (2-51)$$

Οι δείκτες 1 και 2 αντιπροσωπεύουν την είσοδο και την έξοδο του κυκλώματος των καυσαερίων ενώ οι 3 και 4 την είσοδο και την έξοδο του κυκλώματος του ατμού, αντίστοιχα.

Σχετικά με τη μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία, η μεταφορά θερμότητας σε ένα τμήμα του θαλάμου καύσης θα είναι (Hadvig, 1986):

$$\dot{Q}_i = A_i (H_i - B_i) \quad (2-52)$$

Q_i είναι η συνολική εισερχόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια i εμβαδού A_i . H_i και B_i είναι η εκπομπή ακτινοβολίας προς και από την επιφάνεια αντίστοιχα. Η εκπεμπιμότητα μίας επιφάνειας δίνεται από τη σχέση:

$$B_i = \varepsilon \sigma T_{w,i}^4 + \rho_i H_i \quad (2-53)$$

Το άθροισμα της εκπεμπιμότητας και της ανακλασιμότητας για σώματα μηδενικής εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ισούται με τη μονάδα.

Η συνολική ακτινοβολία υπολογίζεται ως το άθροισμα της ακτινοβολίας από τα αέρια και της ακτινοβολίας από κάθε επιφάνεια στο εσωτερικό του υπό μελέτη τομέα:

$$H_i = \sum_{j=1}^N F_{ij} \tau_{ij} B_j + \varepsilon_{gi} \sigma T_g^4 \quad (2-54)$$

,όπου F_{ij} είναι ο συντελεστής όψης από την επιφάνεια i στη j . Εκφράζει το ποσοστό του ημισφαιρίου πάνω από την επιφάνεια i το οποίο καλύπτεται από την επιφάνεια j . Όπου τ_{ji} είναι η διαπερατότητα ακτινοβολίας του αερίου από την επιφάνεια i στην j και ισούται με $1 - \alpha_{ji}$.

Θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη και η πτώση πίεσης του ρευστού λόγω τριβών, βαρύτητας και επιτάχυνσης. Η σχέση η οποία περιγράφει την πτώση πίεσης του ρευστού στο εσωτερικό των αυλών ανόδου είναι η εξής:

$$\Delta p_{w,i} = \frac{lg}{\bar{v}} + \frac{flw^2}{2\bar{v}d_i} + \frac{w^2\Delta v}{\bar{v}} \quad (2-55)$$

Ενώ η μεταβολή πίεσης στα καυσαέρια είναι:

$$\Delta p_{g,i} = \frac{lg}{\bar{v}} \quad (2-56)$$

όπου \bar{v} είναι ο μέσος ειδικός όγκος του ρευστού. Στο μοντέλο του θαλάμου καύσης, τυχών επιπλέον πτώσεις πίεσης στους αυλούς εισάγονται με την προσθήκη ισοδύναμων μηκών αυλών.

Επίσης ισχύουν και οι γνωστές σχέσεις ισοζυγίων μάζας (2-30), (2-31) και ενέργειας η οποία είναι η (2-47) με συνδυασμό της (2-50) και (2-51) όπου:

$$\dot{Q} = \sum_{i=1}^4 \dot{m}_i h_i \quad (2-57)$$

όπου το 4 εκφράζει το σύνολο των ροών παροχών ανά κλάδο (2 είσοδοι και 2 έξοδοι, μία και μία για νερό – ατμό και καυσαέρια). Οι σχέσεις αυτές ισχύουν για κάθε κλάδο.

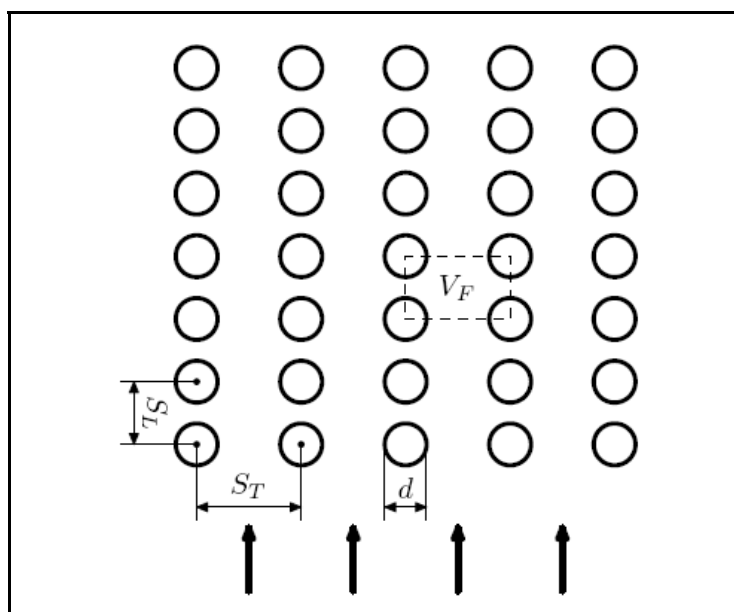
Ο Πίνακας 2-1 δείχνει τις παραμέτρους οι οποίες χρειάζεται να ορισθούν ώστε να μπορέσουν να γίνουν οι υπολογισμοί του μοντέλου του λέβητα σύμφωνα με το εγχειρίδιο της Διεύθυνση Εκπαίδευσης Σ.Τ.Ε. Καρδιάς (1982). Το πλήθος των παραμέτρων αυτών αποκαλύπτει το πόσο ευέλικτο είναι το μοντέλο αυτό, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για την προσομοίωση και άλλων περιπτώσεων λεβήτων με διαφορετικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, στόχος ο οποίος είναι και επιθυμητός μέσω της μελέτης αυτής.

Πίνακας 2-1 Χαρακτηριστικές παράμετροι μοντέλου λέβητα.

Ύψος θαλάμου καύσης	Εσωτερική διάμετρος αυλών
Πλάτος θαλάμου καύσης	Πλήθος αυλών
Βάθος θαλάμου καύσης	Εκπεμπιμότητα αυλών
Ύψος τεφρολεκάνης	Θερμική αγωγιμότητα αυλών
Ύψος κυρίως καυστήρα	Συντελεστής ρύπανσης
Επιπρόσθετο ύψος για υπολογισμό πίεσης	Κλάσμα μάζας σωματιδίων
Πρόσθετη αντίσταση τριβής	Μέση διάμετρος σωματιδίων
Εξωτερική διάμετρος αυλών	Πυκνότητα σωματιδίων

- **Υπερθερμαντές, Αναθερμαντές (SH1a, SH1b, SH2, SH3, RH1a, RH1b, RH2)**

Τα μαθηματικά μοντέλα των εναλλακτών θερμότητας έγιναν σύμφωνα με τα μοντέλα του D.N.A. και είναι εναλλάκτες θερμότητας σταυρωτής ροής. Τέτοιοι είναι και οι υπερθερμαντές και οι αναθερμαντές στο μοντέλο μελέτης. Τα θερμά καυσαέρια ρέουν διαμέσου των αυλών του εναλλάκτη θερμότητας, στο εσωτερικό των οποίων υπερθερμαίνεται ο ατμός. Ανάλογα με τα επίπεδα θερμοκρασίας και τις αποστάσεις μεταξύ των αυλών σε έναν υπέρθερμο, η μεταφορά θερμότητας προς τον ατμό γίνεται με συναγωγή και με ακτινοβολία. Η μοντελοποίηση έχει γίνει ώστε η απόσταση μεταξύ των αυλών να γίνεται αντιληπτή από το πρόγραμμα ως ένα ορθογώνιο του οποίου το προφίλ παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-6 (Elmegaard, 1999). Στο προφίλ αυτό παρουσιάζονται επίσης και οι παράμετροι διαστασιολόγησης S_L και S_T οι οποίες αποτελούν το βήμα στην κάθετη και οριζόντια διεύθυνση αντίστοιχα καθώς και η διάμετρος d των αυλών.



Εικόνα 2-6 Προφίλ υπέρθερμου (Elmegaard, 1999).

Η διεύθυνση των καυσαερίων είναι κάθετη στο οριζόντιο βήμα και παράλληλη στο κάθετο βήμα. Το πλήθος των αυλών σε έναν υπέρθερμο είναι πολύ μεγαλύτερο και στις δύο κατευθύνσεις. Στο εσωτερικό του ορθογώνιου V_F προσδιορίζονται οι παράγοντες όψης. Λόγω των παραδοχών με βάση τις οποίες έχει δομηθεί το μοντέλο η πιο κατάλληλη έκφραση υπολογισμού της μεταφερόμενης θερμότητας είναι η εξής:

$$\dot{Q} = F_c \cdot U \cdot A \cdot \Delta T_l \quad (2-58)$$

Ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας δίνεται από τη σχέση:

$$UA = \frac{2\pi LN}{\frac{1}{\alpha_i r_{in}} + \frac{1}{\lambda_{wat}} \cdot \ln \frac{r_{out}}{r_{in}} + \frac{R_{foul}}{r_{out}} + \frac{1}{(a_{rad} + a_o) r_{out}}} \quad (2-59)$$

Ο συντελεστής F_c εξαρτάται από τις θερμοκρασίες στις δύο πλευρές της δέσμης σωλήνων. Υπολογίζεται ως ένας συντελεστής ο οποίος συνδυάζει τη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία και με συναγωγή στη πλευρά των καυσαερίων. Ο παράγοντας διαμόρφωσης F_c (configuration factor) για σταυρωτή ροή έχει εκφραστεί στη βιβλιογραφία για εναλλάκτες θερμότητας μίας διέλευσης (Kern, 1965). Επειδή στην προκειμένη περίπτωση των υπέρθερμων οι αυλοί είναι κατασκευασμένοι ώστε ο ατμός να διέρχεται περισσότερες από μία φορές, η μοντελοποίηση έγινε με την παραδοχή ότι έχουμε πολλαπλούς εναλλάκτες θερμότητας μίας διέλευσης.

Η μορφή του συντελεστή F_c για κάθε τιμή θερμοκρασίας μπορεί να εκφραστεί ως:

$$F_c = \begin{cases} 1, & \text{όταν } \begin{cases} T_1 = T_3 \vee S = 0 \vee \\ (T_1 \leq T_2 \wedge T_4 \geq T_3) \end{cases} \\ 0, & \text{όταν } \begin{cases} (T_1 \leq T_2 \wedge T_3 \geq T_4) \vee \\ (R = 1 \wedge S > 1 - e^{-1}) \vee \\ RS > 1 - e^{-R} \end{cases} \\ \frac{S}{(S-1)\ln(1+\ln(1-S))}, & \text{όταν } R = 1 \wedge S \leq 1 - e^{-1} \\ \frac{\ln\left(\frac{1-S}{1-RS}\right)}{(1-R)\ln\left(1+\frac{\ln(1-RS)}{R}\right)}, & \text{για κάθε άλλη περίπτωση.} \end{cases} \quad (2-60)$$

όπου

$$R = \frac{T_1 - T_2}{T_4 - T_3} \quad (2-61)$$

και

$$S = \frac{T_4 - T_3}{T_1 - T_3} \quad (2-62)$$

Η θερμότητα λοιπόν μεταφέρεται από την πλευρά των καυσαερίων με συνδυασμό ακτινοβολίας και συναγωγής. Η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία είναι εντονότερη για υψηλές θερμοκρασίες και για μεγάλα μήκη ακτίνας (beam length). Το μέσο μήκος κύματος ακτινοβολίας δίνεται από τη σχέση:

$$L = 3.5 \frac{V}{A} \quad (2-63)$$

Σχετικά με τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, ο υπολογισμός του αριθμού Nusselt γίνεται από τη σχέση (Kakac *et al.*, 1987):

$$Nu = C_1 C_2 \text{Re}_d^m \text{Pr}^{0.36} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_s}\right)^{0.25} \quad (2-64)$$

$$\text{Όπου } Re_d = \frac{\rho w_{\max} d}{\nu}, 10^3 \leq Re_d \leq 2 \cdot 10^6 \wedge 0.7 \leq Pr \leq 500 \quad (2-65)$$

Ο υπολογισμός της μέγιστης ταχύτητας γίνεται στο κέντρο του αυλού. Οι παράγοντες C και m εξαρτώνται από τον αριθμό Reynolds, ενώ ο παράγοντας C_2 είναι μικρότερος της μονάδας για συστοιχίες αυλών με λιγότερες από 20 σειρές.

Προκειμένου να προσδιοριστεί η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία στους αυλούς, γίνεται παρόμοια προσέγγιση με αυτή του θαλάμου καύσης. Ο συνολικός όγκος των αυλών διαιρείται σε ορθογώνιους όγκους ελέγχου όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-6. Το κάθε τμήμα που δημιουργείται, οριοθετείται από τα τέσσερα τεταρτημόρια των αυλών και από τα νοητά όρια απ' όπου εκπέμπεται ακτινοβολία. Γίνεται η υπόθεση πως όλοι οι αυλοί έχουν την ίδια θερμοκρασία, όπως επίσης τα καυσαέρια έχουν την ίδια θερμοκρασία σε εσωτερικό κάθε τμήμα που ορίζεται από το ορθογώνιο V_F . Έτσι οι αυλοί αντιμετωπίζονται ως μία επιφάνεια, ενώ τα νοητά όρια ως μία άλλη. Η συνολική λοιπόν ακτινοβολία στην επιφάνεια των αυλών υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H_1 = (1 - a_g)(F_{11}B_1 + F_{21}B_2) + \varepsilon_g \sigma T_g^4 \quad (2-66)$$

Η εκπομπή ακτινοβολίας από τους αυλούς δίνεται από τη σχέση:

$$B_1 = \varepsilon_w \sigma T_w^4 + \rho_w H_1 \quad (2-67)$$

Οι επιφάνειες οι οποίες ορίζονται από τα νοητά όρια θα εκπέμπουν την ίδια θερμότητα και στις δύο πλευρές, λόγω της υπόθεσης που έγινε ότι το καυσαέριο έχει την ίδια θερμοκρασία:

$$B_2 = (1 - a_g)(F_{12}B_1 + F_{22}B_2) + \varepsilon_g \sigma T_g^4 \quad (2-68)$$

Η συνολική μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία υπολογίζεται τελικά από τη σχέση:

$$\dot{Q}_1 = A_1(H_1 - B_1) \quad (2-69)$$

Τέλος η πτώση πίεσης κατά μήκος μίας συστοιχίας αυλών υπολογίζεται για τα καυσαέρια από τις σχέσεις:

$$\Delta p = \Delta p_f + \Delta p_g \quad (2-70)$$

Η πτώση πίεσης λόγω τριβών δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta p_f = f N_R \frac{\rho w_{\max}}{2} \quad (2-71)$$

Ο συντελεστής τριβής δίνεται από τη σχέση:

$$f = \xi_{lam} + \xi_{tur} = \frac{f_{lam}}{Re} + \frac{f_{tur}}{Re^{0.1b/a}}$$

$$\text{όπου } f_{lam} = f_{lam}(a, b), f_{tur} = f_{tur}(a, b), a = \frac{S_L}{d}, b = \frac{S_T}{d} \quad (2-72)$$

Κάθε συντελεστής τριβής είναι διορθωμένος για διάφορες φυσικές ιδιότητες κατά μήκος της διεύθυνσης της ροής από ένα παράγοντα της μορφής $\left(\frac{\mu_w}{\mu}\right)^r$, όπου r είναι μια σταθερά για τυρβώδη ροή και είναι συνάρτηση της γεωμετρίας, του αριθμού Reynolds και του πλήθους των σειρών του υπέρθερμου για στρωτή ροή.

Οι παραπάνω σχέσεις δίνουν την συνολική σχέση πτώσης πίεσης των καυσαερίων:

$$\Delta p = N_g \frac{g S_L + \xi w^2 S_T^2 \bar{v}}{2(S_T - d_o)} \quad (2-73)$$

Εντός των σωληνώσεων, η πτώση πίεσης του ατμού δίνεται από την σχέση (2-57) χωρίς να ληφθεί υπόψη ο όρος της βαρύτητας δεδομένου ότι οι αυλοί είναι οριζόντιοι και πλέον έχουμε μόνο ατμό ο οποίος είναι αέριο, όποτε γίνεται:

$$\Delta p = \frac{f l w^2}{2 \bar{v} d_i} + \frac{w^2 \Delta v}{\bar{v}} \quad (2-74)$$

Επίσης ισχύουν και εδώ οι γνωστές σχέσεις ισοζυγίων μάζας (2-30), (2-31) και ενέργειας η οποία είναι η (2-61) με συνδυασμό της (2-62) όπου:

$$\dot{Q} = \sum_{i=1}^4 \dot{m}_i h_i \quad (2-75)$$

όπου το 4 εκφράζει το σύνολο των ροών παροχών ανά κλάδο (2 είσοδοι και 2 έξοδοι, μία και μία για ατμό και καυσαέρια). Οι σχέσεις αυτές ισχύουν για κάθε συστοιχία αυλών σε κάθε εναλλάκτη.

Ο Πίνακας 2-2 δείχνει τις παραμέτρους οι οποίες χρειάζεται να ορισθούν ώστε να μπορέσουν να γίνουν οι υπολογισμοί των μοντέλων των υπερθερμαντών και αναθερμαντών. Το πλήθος των παραμέτρων αυτών δείχνει και σε αυτή την περίπτωση την ευελιξία του μοντέλου αυτού, γεγονός που το καθιστά και αυτό ιδανικό για την προσομοίωση και άλλων περιπτώσεων υπερθερμαντών και αναθερμαντών με διαφορετικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά.

Πίνακας 2-2 Χαρακτηριστικές παράμετροι μοντέλου υπερθερμαντών, αναθερμαντών.

Εξωτερική διάμετρος αυλών	Εκπεμπιμότητα αυλών
Εσωτερική διάμετρος αυλών	Θερμική αγωγιμότητα αυλών
Βήμα στην οριζόντια διεύθυνση	Συντελεστής ρύπανσης
Βήμα στη κάθετη διεύθυνση	Κλάσμα μάζας σωματιδίων στα καυσαέρια
Πλήθος σειρών	Μέση διάμετρος σωματιδίων στα καυσαέρια
Πλήθος αυλών σε κάθε σειρά	Πυκνότητα σωματιδίων στα καυσαέρια
Πλάτος καναλιού	Διάταξη ροής
Βάθος καναλιού	Επιπρόσθετη πτώση πίεσης λόγω τριβών

Άλλη μια υπόθεση χρειαζόταν να γίνει για τον SH 1b. Το μοντέλο υπερθερμαντή του D.N.A. θεωρεί ότι οι δέσμες σωλήνων είναι σε σειρά (in-line), ενώ στην εξεταζόμενη μονάδα, ο συγκεκριμένος υπερθερμαντής είναι εναλλασσόμενη διάταξη (staggered). Για αυτόν το λόγο χρησιμοποιήθηκε το συγκεκριμένο μοντέλο στο D.N.A. με ισοδύναμες διαστάσεις βάθους και πλάτους καναλιού ώστε να αποδώσει όπως και ο υπερθερμαντής SH1b.

- **Διαχωριστής (DRUM)**

Οι σχέσεις οι οποίες διέπουν το μοντέλο του διαχωριστή είναι:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 = 0 \quad (2-76)$$

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 = 0 \quad (2-77)$$

οι οποίες είναι τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας τα οποία στην κατάσταση 1 είναι η είσοδος του υγρού – ατμού από την έξοδο των αυλών ανόδου των υδροτοιχωμάτων, 2 η έξοδος του κορεσμένου νερού το οποίο θα αναμιχθεί με το νερό από τον τελευταίο προθερμαντήρα και 3 η έξοδος του κορεσμένου ατμού για τον υπερθερμαντή SH 1a.

$$p_2 = p_1 - \Delta p \quad (2-78)$$

$$p_3 = p_1 - \Delta p \quad (2-79)$$

είναι οι σχέσεις υπολογισμού της πτώσης πίεσης Δp στις εξόδους καθώς και

$$h_2 = h_2'(p_2, T_{2,sat}) \quad (2-80)$$

$$h_3 = h_3''(p_3, T_{3,sat}) \quad (2-81)$$

οι σχέσεις για την εξασφάλιση κορεσμένου νερού και ατμού αντίστοιχα στις εξόδους.

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι μερικώς απλοποιημένο γιατί δεν χρησιμοποιεί τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του διαχωριστή. Ο λόγος είναι ότι και εδώ το ενδιαφέρον στο διαχωριστή έγκειται στη θερμοδυναμική του συμπεριφορά.

- **Υδροτοιχώματα – Αυλοί ανόδου (F SH1a, F SH1b, F SH2, F SH3, F RH1a, F RH1b, F RH2)**

Οι αυλοί ανόδου είναι η συνέχεια των υδροτοιχωμάτων του θαλάμου καύσης. Τα καυσαέρια συνεχίζουν να μεταδίδουν θερμότητα και μετά τον θάλαμο καύσης σε αυτά. Για το μοντέλο των υδροτοιχωμάτων ισχύουν οι ίδιες σχέσεις που ίσχυαν και για τον λέβητα με την διαφορά ότι παραλείφθηκαν το ύψος του καυστήρα και το ύψος της τεφρολεκάνης από τις σχέσεις των υπολογισμών μιας και είναι στοιχεία τα οποία δεν εμφανίζονται στα υδροτοιχώματα. Επίσης, για την ακτινοβολία γίνεται η χρήση μόνο των συντελεστών ακτινοβολίας για παράλληλα τοιχώματα μια και είναι κάθετα και παράλληλα μεταξύ τους.

- **Ψεκασμοί (A1, A2, A3)**

Στο μοντέλο των ψεκασμών επίσης εμφανίζονται τρεις παροχές όπως και στο μοντέλο του διαχωριστή και οι σχέσεις (2-76) και (2-77) ισχύουν ως έχουν με την διαφορά ότι εδώ εμφανίζονται δύο εισοδοί και μία έξοδος. 1 είναι η είσοδος του ατμού από τον υπερθερμαντή ή αναθερμαντή με του οποίου την έξοδο συνδέεται, 2 είναι η είσοδος του τροφοδοτικού νερού με γνωστή θερμοκρασία T_2 και 3 είναι η έξοδος προς τον επόμενο εναλλάκτη.

Επίσης, για την πίεση, ισχύει:

$$P_1 = P_2 = P_3 \quad (2-82)$$

Στην πραγματικότητα, ένας ελεγκτής μετράει την θερμοκρασία στην έξοδο του ψεκασμού και αν αυτή είναι μεγαλύτερη μίας τιμής αναφοράς T_{REFF} τότε ανοίγει το κύκλωμα του ψεκασμού το οποίο τροφοδοτεί με παροχή νερού χαμηλότερης θερμοκρασίας, τόση ώστε να πέσει η θερμοκρασία εξόδου στην θερμοκρασία αναφοράς.

Στο μαθηματικό μοντέλο αυτό θα εκφραστεί μέσω της σχέσης:

$$\dot{m}_2 = \begin{cases} \frac{\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_3 h_3}{h_2} & \text{για } T_1 > T_{REFF} \\ 0 & \text{για } T_1 \leq T_{REFF} \end{cases} \quad (2-83)$$

Δεδομένης της T_2 και της σχέσης (2-82) είναι γνωστή και η h_2 . Όταν $T_1 > T_{REFF}$, τότε η T_3 θα είναι και αυτή γνωστή και ίση με την T_{REFF} . Οπότε πάλι με συνδυασμό και την (2-82) και η h_3 θα είναι γνωστή. Τότε η (2-83) σε συνδυασμό με την (2-77) και με επαναληπτική διαδικασία θα δώσει την m_2 . Για τη δεύτερη περίπτωση, το κύκλωμα των ψεκασμών δεν ενεργοποιείται οπότε η ροή του ατμού δεν μεταβάλλεται γι' αυτό και η είσοδος θα είναι ίδια με την έξοδο, από την στιγμή που δεν υπάρχει κάποια παρέμβαση.

- **Αναμίκτης (MIXER)**

Είναι ένας απλός αναμίκτης δύο ροών ομοιογενών υγρών. Επίσης ισχύουν οι σχέσεις (2-76) και (2-77) όπου 1, 2, τα ρεύματα εισόδου και 3 το ρεύμα εξόδου.

Για την πίεση εξόδου ισχύει η σχέση των μερικών πιέσεων, οπότε:

$$P_3 = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_3} P_1 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3} P_2 \quad (2-84)$$

- **Οικονομητήρας (ECO)**

Ο οικονομητήρας είναι ένας εναλλάκτης υγρού – αερίου στον οποίο προθερμαίνεται επιπλέον το τροφοδοτικό νερό μετά τις αναθερμάνσεις των απομαστεύσεων. Η διαφορά έγκειται στο μέσο πρόσδοσης θερμότητας το οποίο είναι αέριο και είναι τα καυσαέρια μετά την αναθέρμανση RH1a. Λόγω πολυπλοκότητας του μοντέλου και του ήδη αυξημένου μεγέθους του μοντέλου του κυκλώματος λέβητα υπερθερμαντών απλοποιήθηκε σε απλό εναλλάκτη θερμότητας. Επομένως, οι σχέσεις οι οποίες και ισχύουν είναι αυτές των προθερμαντών (σχέσεις (2-30) έως (2-34)) όπου 1, 2 είναι η είσοδος και η έξοδος του καυσαερίου, 3, 4 η είσοδος και η έξοδος του νερού στον οικονομητήρα. Επιπλέον των παραπάνω σχέσεων δίνεται και η σχέση:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = 0 \quad (2-85)$$

και

$$\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_4 h_4 = 0 \quad (2-86)$$

όπου η αποδιδόμενη θερμότητα των καυσαερίων θεωρείται γνωστή και υπολογισμένη από τα δεδομένα της μονάδας για την θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του καυσαερίου και με δεδομένη τη σύστασή του όπως υπολογίστηκε από την έξοδο του καυστήρα, επομένως όπως χρησιμοποιήθηκε και στα υπόλοιπα μοντέλα. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να υπολογιστεί η θερμότητα των καυσαερίων που αποδίδεται από την σχέση (2-86) και μαζί με την πίεση εξόδου η οποία θα υπολογιστεί από την σχέση (2-33) και η θερμοκρασία εξόδου του μοντέλου προσομοίωσης. Έπειτα από τις σχέσεις (2-85) και (2-87) γίνεται ο υπολογισμός της ενθαλπίας εξόδου του νερού και μαζί με την πίεση εξόδου από την σχέση (2-34) μπορεί να υπολογιστεί η θερμοκρασία εξόδου.

- **Καυστήρας στερεού καυσίμου (BURNER)**

Είναι το μοντέλο του καυστήρα για την καύση του στερεού καυσίμου ο οποίος συνδέεται με τον λέβητα (FURNACE) και δίνει την σύσταση, την παροχή και τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των καυσαερίων. Στηρίζεται στο μαθηματικό μοντέλο του καυστήρα SOLIDBURNER που χρησιμοποιεί το D.N.A. Οι σχέσεις οι οποίες διέπουν το μοντέλο του καυστήρα είναι οι σχέσεις διατήρησης μάζας και ενέργειας:

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_4 = 0 \quad (2-87)$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_4 h_4 + \dot{Q} = 0 \quad (2-88)$$

Όπου 1 είναι ο αέρας καύσης, 2 το καύσιμο, 3 τα καυσαέρια και 4 η στερεή τέφρα και \dot{Q} οι απώλειες του καυστήρα. Οι σχέσεις πίεσης είναι:

$$P_2 = P_1 \quad (2-89)$$

$$\frac{P_3}{P_1} = PR \quad (2-90)$$

Όπου PR είναι ο λόγος πίεσης των καυσαερίων με του αέρα και δίνεται σαν παράμετρο του καυστήρα. Επίσης, η σχέση του συντελεστή λ της περίσσειας του αέρα:

$$\lambda = \frac{\dot{m}_1}{AF_{\min} \dot{m}_2} \quad (2-91)$$

όπου το λ είναι και αυτό παράμετρο του καυστήρα και δίνεται σαν δεδομένη παράμετρο εισόδου και αυτή. Το AF_{\min} είναι ο στοιχειομετρικός λόγος αέρα – καυσίμου ο οποίος υπολογίζεται από το μοντέλο των σχέσεων της τέλει καύσης το οποίο και χρησιμοποιείται από το D.N.A. και δίνει την σύσταση του καυσαερίου για το οποίο υπολογίζεται μόνο το O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O , SO_2 , NO , NO_2 και Ar .

Για την τέφρα, ισχύει ότι η θερμοκρασία εξόδου της είναι ίση με την θερμοκρασία των καυσαερίων, δηλαδή:

$$T_4 = T_3 \quad (2-92)$$

Με γνωστή την θερμοκρασία τέφρας και καυσίμου τα οποία είναι στερεά οπότε απαιτείται και η ειδική θερμοχωρητικότητα (γνωστή για την τέφρα) (Richardson, 1993) και η κατώτερη θερμογόνοος του καυσίμου μπορεί να υπολογιστεί η ενθαλπία από τη σχέση:

$$h = c_p (\Delta T) \quad (2-93)$$

όπου η ειδική θερμοχωρητικότητα c_p για το καύσιμο είναι η μέση και υπολογίζεται ανάλογα τη σύσταση του καυσίμου.

Με δεδομένη την παροχή, την σύσταση και την θερμοκρασία του καυσίμου καθώς και την θερμοκρασία και την πίεση του αέρα καύσης με επιπλέον δεδομένο τις απώλειες του καυστήρα μπορούν να υπολογιστούν η πίεση εξόδου των καυσαερίων από την σχέση (2-91) και οι υπόλοιπες παροχές και τα θερμοδυναμικά στοιχεία από τις υπόλοιπες σχέσεις μαζί με το μοντέλο της καύσης έπειτα από επαναληπτική διαδικασία.

- **Βαθμός απόδοσης κυκλώματος λέβητα (η-thermal)**

Το κύκλωμα του λέβητα, όπως και το κύκλωμα του νερού - ατμού έχει τον δικό του βαθμό απόδοσης ο οποίος ορίζεται από την σχέση:

$$\eta - thermal = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \dot{m}_i (h_{out} - h_{in}) + \sum_{j=1}^{N_2} \dot{m}_j (h_{out} - h_{in}) + \sum_{k=1}^{N_3} \dot{m}_k (h_{out} - h_{in}) + \dot{m}_{ECO} (h_{out} - h_{in}) + \dot{m}_{FUR} (h_{out} - h_{in})}{\dot{m}_B \cdot H_u} \quad (2-94)$$

όπου για τον αριθμητή N_1 είναι ο αριθμός των υπερθερμαντών, N_2 ο αριθμός των αναθερμαντών, N_3 ο αριθμών των τμημάτων των υδροτοιχωμάτων, \dot{m} η παροχή εισόδου νερού ή ατμού ή υγρού ατμού και πιο συγκεκριμένα \dot{m}_{ECO} η παροχή του προθερμασμένου νερού που εισέρχεται στον οικονομητήρα και \dot{m}_{FUR} η παροχή νερού στην είσοδο του λέβητα. h είναι η ειδική ενθαλπία και οι δείκτες in και out εκφράζουν την είσοδο και την έξοδο αντίστοιχα. Για τον παρανομαστή \dot{m}_B είναι η παροχή

καυσίμου και H_u είναι η θερμική ενέργεια η οποία απελευθερώνεται κατά την καύση της μονάδας μάζας καυσίμου.

2.2.2.3. Ολοκληρωμένο κύκλωμα μονάδας

Σε αυτό το σημείο δίνονται οι επιπλέον σχέσεις οι οποίες διέπουν το ολοκληρωμένο κύκλωμα της μονάδας. Επειδή η μονάδα αποτελείται από την σύζευξη των δύο κυκλωμάτων των οποίων τα μοντέλα περιγράφηκαν προηγουμένως δεν εμφανίζεται κάποιο καινούργιο στοιχείο του οποίου το μαθηματικό μοντέλο να χρειάζεται περιγραφή. Παρόλα αυτά, μόνο στο συνολικό μοντέλο εμφανίζεται η τελική σχέση η οποία αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του τελικού προβλήματος του οποίου η βελτιστοποίηση είναι και ο τελικός στόχος της διατριβής αυτής. Η σχέση αυτή είναι η σχέση του συνολικού βαθμού απόδοσης της μονάδας.

- **Βαθμός απόδοσης μονάδας (η -total)**

Η σχέση η οποία δίνει και τον συνολικό βαθμό απόδοσης της μονάδας είναι:

$$\eta\text{-total} = \eta\text{-thermal} \times \eta \quad (2-95)$$

όπου $\eta\text{-thermal}$ είναι ο βαθμός απόδοσης του κυκλώματος του λέβητα και η είναι ο βαθμός απόδοσης του κυκλώματος νερού – ατμού. Είναι εμφανής η επίδραση των επιμέρους βαθμών απόδοσης. Συνεπώς, ένας τρόπος αύξησης του βαθμού απόδοσης είναι με την μείωση από την μία της απαιτούμενης παροχής καυσίμου (δεδομένης σταθερής θερμογόνου) με ταυτόχρονη διατήρηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο επιθυμείται να επιτευχθεί και το τελικό ζητούμενο της διατριβής.

3 Μεθοδολογία και προγράμματα επίλυσης προσομοίωσης και βελτιστοποίησης

3.1. Περιγραφή των αλγόριθμων επίλυσης

3.1.1. Αλγόριθμοι επίλυσης προσομοίωσης

Το μοντέλο το οποίο μελετάται στην συγκεκριμένη ερευνητική εργασία είναι στατικό, μη γραμμικό μοντέλο. Αυτό συνεπάγεται ότι δεν απαιτούνται αλγόριθμοι επίλυσης διαφορικών εξισώσεων. Ωστόσο αναφορά θα γίνει και σε αυτούς δεδομένου ότι και τα δύο προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν την δυνατότητα να λύσουν και δυναμικά προβλήματα. Για την συγκεκριμένη περίπτωση, αναγκαία είναι η χρήση αλγόριθμων επίλυσης γραμμικών και μη γραμμικών μοντέλων. Αναλυτική παρουσίαση αυτών οι οποίοι και χρησιμοποιούνται γίνεται παρακάτω ξεκινώντας από τους γραμμικούς, συνεχίζοντας με τους μη γραμμικούς και καταλήγοντας με μια πιο σύντομη αναφορά στους αλγόριθμους για δυναμικά μοντέλα.

3.1.1.1. Παραγοντοποίηση LU

Ένας τρόπος επίλυσης γραμμικών συστημάτων είναι ο συνδυασμός ενός αλγόριθμου παραγοντοποίησης LU σε συνδυασμό με τους αλγόριθμους των προς τα εμπρός και προς τα πίσω αντικαταστάσεων (Rozikidis,2005). Η παραγοντοποίηση γίνεται σε έναν πίνακα A $N \times N$ διαστάσεων ο οποίος μετατρέπεται σε γινόμενο ενός κάτω τριγωνικού πίνακα L και ενός άνω τριγωνικού πίνακα U έτσι ώστε $A = LU$. Αυτή είναι η γενική έκφραση του τι εστί παραγοντοποίηση LU . Η έκφραση αυτή όμως δίνει N βαθμούς ελευθερίας από τη στιγμή που το γινόμενο των πινάκων L και U δίνει $K = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot N(N+1) = N^2 + N$ άγνωστα βαθμωτά στοιχεία εκ των οποίων τα N^2 είναι γνωστά και είναι τα αντίστοιχα στοιχεία του πίνακα A που δίνονται από τις αλγεβρικές εξισώσεις:

$$A_{i,j} = \sum_{m=1}^{\text{Min}(i,j)} L_{i,m} U_{m,j} \quad (3-1)$$

Για να αποφευχθούν αυτοί οι βαθμοί ελευθερίας, τροποποιήσεις στην παραγοντοποίηση LU μπορούν να βοηθήσουν σε αυτή την κατεύθυνση.

Συγκεκριμένα στην παραγοντοποίηση *Doolittle*, θέτεται ως όρος ο πίνακας L να είναι μοναδιαίος κάτω τριγωνικός ενώ αντίθετα στην παραγοντοποίηση *Crout* ο όρος είναι ο πίνακας U να είναι μοναδιαίος άνω τριγωνικός. Ένας εναλλακτικός τρόπος είναι με την εμφάνιση και ενός $3^{ου}$ διαγώνιου πίνακα D ο οποίος θα περιέχει στις διαγώνιες θέσεις του τα αντίστοιχα στοιχεία του πίνακα U οπότε θα ισχύει ότι $U = DU'$ όπου U' θα είναι ένας άνω τριγωνικός πίνακας με όλα τα διαγώνια στοιχεία του ίσα με την μονάδα και κάθε στοιχείο της j γραμμής του U' θα ισούται με την j γραμμή του U διαιρεμένο κατά U_{jj} . Αυτή η μορφή παραγοντοποίησης είναι γνωστή και ως παραγοντοποίηση LDU .

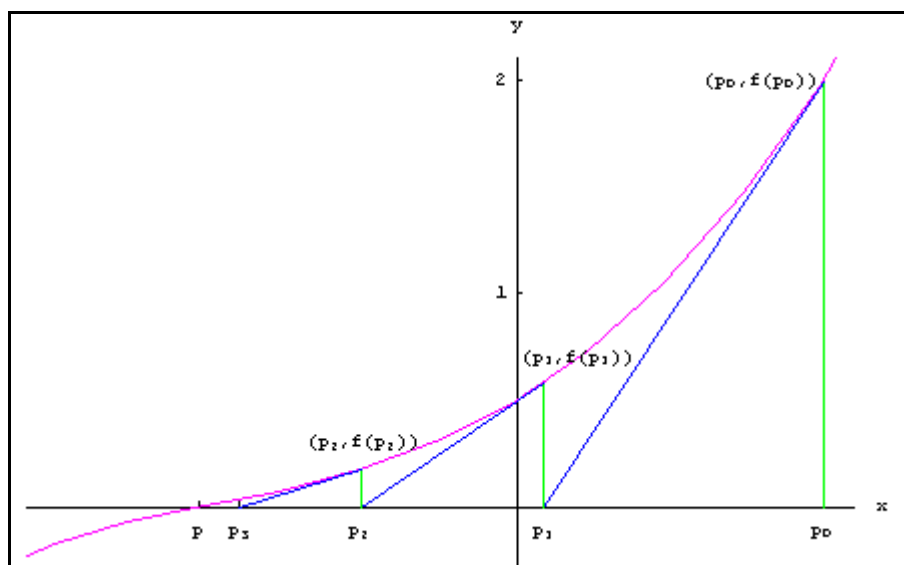
Ενδεχόμενο μη πραγμάτωσης της παραγοντοποίησης είναι δυνατό όταν κάποιο στοιχείο της διαγώνιου είναι μηδενικό είτε πολύ κοντά στο μηδέν οπότε είτε δεν μπορεί να ολοκληρωθεί η παραγοντοποίηση είτε θα παρουσιάζει πολύ μεγάλη αστάθεια στην ακρίβεια της αντίστοιχα. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να ξεπεραστούν με την *οδήγηση (pivoting)* με την οποία γίνεται αναδιάταξη των γραμμών και των στηλών του πίνακα A με έναν δυναμικό τρόπο κατά την διάρκεια των υπολογισμών. Δεν είναι απαραίτητη για *διαγώνια υπερέχοντες (diagonally dominant)* πίνακες όπου μέσα σε αυτούς εμπεριέχονται και οι συμμετρικοί θετικά ορισμένοι πίνακες. Ένα μειονέκτημα της οδήγησης είναι ότι εμποδίζει την πραγματοποίηση παράλληλων υπολογισμών. Για την περίπτωση που ο πίνακας A είναι συμμετρικός μπορεί να χρησιμοποιηθούν και οι αλγόριθμοι του *Cholesky* στους οποίους αυτό που γίνεται είναι η ανάθεση του U ίσου με τον ανάστροφο του L οπότε να ισχύει ότι $A = LL^T$.

Η *προς τα εμπρός αντικατάσταση (forward substitution)* και η *προς τα πίσω αντικατάσταση (backward substitution)* είναι απλές μέθοδοι επίλυσης των εξισώσεων της σχέσης $Ax = b$ όταν ο πίνακας A είναι κάτω τριγωνικός και άνω τριγωνικός αντίστοιχα. Η φιλοσοφία έχει να κάνει με το ότι πίνακας τέτοιας μορφής αυξάνει κατά έναν τους αγνώστους σε κάθε γραμμή, με αύξουσα και με φθίνουσα σειρά αντίστοιχα. Επομένως ακολουθείται διαδοχική επίλυση των εξισώσεων με ταυτόχρονη αντικατάσταση των γνωστών προηγούμενων τιμών στην σχέση όπου έχει μία μεταβλητή παραπάνω η οποία είναι και η μοναδική άγνωστη κάθε φορά. Αυτό που αλλάζει μεταξύ των μεθόδων είναι η σειρά που ακολουθείται στις γραμμές. Η προς τα εμπρός μέθοδος ξεκινάει από την πρώτη γραμμή και συνεχίζει προς την τελευταία, ενώ η προς τα πίσω μέθοδος αντίστροφα.

Συνδυασμός των παραπάνω δίνει την απαλοιφή *Gauss* η οποία είναι η πιο απλή και δημοφιλής *άμεση (direct)* μέθοδος επίλυσης συστημάτων εξισώσεων. Η απαλοιφή *Gauss* μετασχηματίζει το σύστημα $Ax = b$ σε ένα άνω τριγωνικό σύστημα $Ux = y$ και ταυτόχρονα παράγει έναν άνω μοναδιαίο τριγωνικό πίνακα L ώστε $LU = A$ το οποίο επιτυγχάνεται με την παραγοντοποίηση *Doolittle* η οποία γίνεται σε έναν πίνακα A εναλλαγμένων γραμμών στην περίπτωση που χρησιμοποιείται οδήγηση. Η επίλυση του συστήματος γίνεται αφού έχουν γίνει τα προηγούμενα βήματα με χρήση προς τα πίσω αντικατάστασης μιας και ο τελικός πίνακας U είναι άνω τριγωνικός.

3.1.1.2. Μέθοδος Newton

Η μέθοδος Newton είναι από τις πλέον εδραιωμένες μεθόδους για την εύρεση διαδοχικών βελτιωμένων προσεγγίσεων στην λύση μιας πραγματικής συνάρτησης ή ενός συστήματος συναρτήσεων (Rozgikidis,2005). Για την απλή περίπτωση της μίας



Εικόνα 3-1 Απλή διατύπωση της μεθόδου Newton για μια συνάρτηση (Wikipedia.com).

συνάρτησης, η καμπύλη $y = f(p)$ προσεγγίζεται με ευθεία γραμμή η οποία εφάπτεται στην καμπύλη στο σημείο p_0 (Εικόνα 3-1). Η συγκεκριμένη εφαπτόμενη ευθεία περιγράφεται από την εξίσωση:

$$y = f(p_0) + f'(p_0) \cdot (p_1 - p_0) \quad (3-2)$$

Σαν σημείο p_1 δίνεται η τομή του άξονα των x με την εφαπτομένη της ευθείας οπότε ισχύει:

$$p_1 = p_0 - \frac{f(p_0)}{f'(p_0)} \quad (3-3)$$

Η παραπάνω εξίσωση δημιουργεί μια ακολουθία προσεγγίσεων που βασίζονται στην επαναληπτική συνάρτηση:

$$g(x) = x - \frac{f(x)}{f'(x)} \quad (3-4)$$

Η οποία ακολουθία δίνει την επιθυμητή λύση όταν $f(x) = 0$ για $x = g(x)$.

Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου Newton είναι ότι λόγω της μορφής αυτής, μπορεί να δώσει την ακριβής λύση μιας γραμμικής εξίσωσης με μια μόνο επανάληψη μιας και η εφαπτομένη θα είναι η ίδια η ευθεία της γραμμικής σχέσης, οπότε είναι κατάλληλη και για επίλυση γραμμικών εξισώσεων.

Για την γενική περίπτωση συστήματος εξισώσεων το οποίο αντιπροσωπεύεται από την διανυσματική συνάρτηση $\mathbf{f}(\mathbf{x})$, δίνεται αρχικά ο ορισμός του *Ιακωβιανού πίνακα* (*Jacobian matrix*) του οποίου τα στοιχεία ορίζονται ως:

$$J_{i,j} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \quad (3-5)$$

όπου f_i είναι η i συνάρτηση της διανυσματικής συνάρτησης \mathbf{f} και x_j η j μεταβλητή του διανύσματος των μεταβλητών \mathbf{x} που εμφανίζονται στην \mathbf{f} . Σε διανυσματική μορφή η σχέση είναι:

$$\mathbf{J} = (\nabla \mathbf{f})^T \quad (3-6)$$

όπου ∇ είναι ο τελεστής κλίσης ή ανάδελα (gradient operator) και $\nabla \mathbf{f}$ είναι ο πίνακας των μερικών παραγώγων.

Στην περίπτωση συστήματος, η επαναληπτική συνάρτηση προκύπτει με αντικατάσταση της \mathbf{f} με το γραμμικοποιημένο ανάπτυγμα της σειράς Taylor γύρω από την τρέχουσα εκτίμηση $\mathbf{x}^{(k)}$. Έτσι επιτυγχάνετε ο μετασχηματισμός της μη γραμμικής εξίσωσης $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ στην γραμμική εξίσωση:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(k)}) + \mathbf{F}(\mathbf{x}^{(k)}) \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(k)}) = \mathbf{0} \quad (3-7)$$

όπου \mathbf{F} ο ιακωβιανός της διανυσματικής συνάρτησης \mathbf{f} . Επίλυση της παραπάνω ως προς \mathbf{x} όπου σαν λύση έχει το $\mathbf{x}^{(k+1)}$ συνεπάγεται:

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{g}(\mathbf{x}^{(k)}) \quad (3-8)$$

όπου

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{x} - \mathbf{F}^{-1}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (3-9)$$

είναι η επαναληπτική συνάρτηση με \mathbf{F}^{-1} τον αντίστροφο του πίνακα \mathbf{F} . Από την στιγμή που ο πίνακας \mathbf{F}^{-1} δεν μπορεί να είναι μηδενικός, συνεπάγεται ότι λύση της $\mathbf{x} = \mathbf{g}(\mathbf{x})$ θα είναι και λύση της $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$. Επίσης αυτό συνεπάγεται ότι πρέπει να ισχύει $\mathbf{J}(\mathbf{x}^{k+1}) = \mathbf{0}$

$$(3-10)$$

όπου \mathbf{J} είναι ο ιακωβιανός πίνακας της επαναληπτικής διανυσματικής συνάρτησης \mathbf{g} και \mathbf{x}^{k+1} το σταθερό σημείο της λύσης της \mathbf{f} .

Ο αλγόριθμος ο οποίος ακολουθείται για την επίλυση της \mathbf{f} περιλαμβάνει την επιλογή αρχικής πρόβλεψης $\mathbf{x}^{(0)}$ και επίλυση του γραμμικού συστήματος (3-7) στην μορφή:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}^{(0)}) \cdot \Delta \mathbf{x} = -\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(0)}) \quad (3-11)$$

Η οποία είναι ίδια με την $\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}$ η οποία παρουσιάστηκε στα γραμμικά συστήματα και λύνεται με χρήση της παραγοντοποίησης \mathbf{LU} και συνδυασμού οδήγησης με προς τα εμπρός ή προς τα πίσω αντικατάσταση ως προς $\Delta \mathbf{x}$. Δεδομένου ότι $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}^k$, βρίσκεται και το επόμενο βήμα της ακολουθίας των διανυσμάτων $\mathbf{x}^{(k)}$ και επαναλαμβάνεται η επίλυση της (3-11) έως ότου $\Delta \mathbf{x} \approx \mathbf{0}$.

Από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου Newton είναι η τετραγωνική της σύγκλιση όταν η αρχική εκτίμηση είναι αρκετά κοντά σε μονή ρίζα των εξισώσεων. Εξαιρεση αποτελεί η περίπτωση πολλαπλών ριζών ή για σύστημα εξισώσεων, ιδιάζων πίνακας \mathbf{F} όπου τότε η σύγκλιση είναι γραμμική. Παράλληλα, η προϋπόθεση της αρχικής εκτίμησης να είναι κοντά για την επίτευξη τετραγωνικής σύγκλισης, είναι και από τα βασικότερα μειονεκτήματά της μιας και κακή αρχική εκτίμηση μπορεί να οδηγήσει σε εναλλακτική λύση είτε ακόμα και σε μη σύγκλιση του συστήματος.

Επειδή οι σχέσεις οι οποίες διέπουν τα πραγματικά προβλήματα στην φύση είναι αρκετά πολύπλοκες, συχνά είναι δύσκολος και δαπανηρός ο υπολογισμός του πίνακα \mathbf{F} που χρειάζεται για την διεξαγωγή της επαναληπτικής διαδικασίας στην μέθοδο Newton. Τροποποιήσεις προς διευκόλυνση στο κομμάτι αυτό δημιούργησαν τις τροποποιημένες μεθόδους Newton (*modified Newton methods*) ή ψευδο-Newton μεθόδους (*quasi-Newton methods*) ή μη ακριβείς μεθόδους Newton (*inexact Newton*

methods). Αναφορικά, κάποιες από αυτές τις μεθόδους είναι η διατήρηση του Ιακωβιανού πίνακα σταθερού κατά την διάρκεια των επαναλήψεων η οποία είναι και η πιο απλή, η μέθοδος της τέμνουσας, η μέθοδος της βίαιης διαγωνιοποίησης, η μέθοδος του Broyden καθώς και άλλες. Επειδή εφαρμογή τροποποιημένης μεθόδου γίνεται και στα προγράμματα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν, η ανάπτυξη της εκάστοτε τροποποιημένης μεθόδου θα αναλυθεί στη συνέχεια στην περιγραφή των προγραμμάτων και της φιλοσοφίας λειτουργίας αυτών.

Στην συνέχεια θα γίνει σύντομη παρουσίαση των αλγορίθμων επίλυσης διαφορικών και διαφορικών-αλγεβρικών εξισώσεων (*Differential Algebraic Equations – DAE*) οι οποίοι χρησιμοποιούνται από τα προγράμματα.

3.1.1.3. Αλγόριθμοι προς τα πίσω διαφοροποίησης (Backward Differentiation Formulae – BDF)

Είναι η πιο γνωστή ομάδα γραμμικών πολυβηματικών μεθόδων για άκαμπτα προβλήματα κανονικών διαφορικών ή αλγεβρικών - διαφορικών εξισώσεων πρώτου βαθμού (Ascher *et al.*, 1998). Αυτή η ομάδα όπως και άλλες της κατηγορίας των γραμμικών πολυβηματικών, κάνουν χρήση της πληροφορίας από προηγούμενα βήματα παρεμβολής για την κατασκευή ανώτερης τάξης προσεγγίσεων σε μια πιο απλοποιημένη μορφή και γενικά βασίζονται σε πολυωνυμική παρεμβολή. Η γενική μορφή μιας τέτοιας μεθόδου k βημάτων δίνεται από την έκφραση:

$$\sum_{j=0}^k a_j \mathbf{y}_{n-j} = h \sum_{j=0}^k b_j \mathbf{f}_{n-j} \quad (3-12)$$

όπου $\mathbf{y}(t)$ είναι το διάνυσμα των εξαρτημένων συναρτήσεων του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων από το t (συνήθως είναι ο χρόνος), \mathbf{f} είναι σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων συναρτήσεως του χρόνου t και του \mathbf{y} , h είναι το σταθερό βήμα μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών περιόδων, n συμβολίζει το n βηματικό μέγεθος, το j τα εκάστοτε προηγούμενα βήματα και τα α_j και β_j είναι οι σταθερές της μεθόδου.

Για την περίπτωση των BDF μεθόδων η παραπάνω σχέση γίνεται της μορφής:

$$\sum_{i=1}^k \frac{1}{i} \nabla^i \mathbf{y}_n = h \mathbf{f}(t_n, \mathbf{y}_n) \quad (3-13)$$

όπου

$$\begin{aligned}\nabla^0 \mathbf{f}_j &= \mathbf{f}_j \\ \nabla^i \mathbf{f}_j &= \nabla^{i-1} \mathbf{f}_j - \nabla^{i-1} \mathbf{f}_{j-1}\end{aligned}\tag{3-14}$$

είναι οι προς τα πίσω διαφορές (*backward differences*) των γνωστών χρονικών τιμών των προηγούμενων j βημάτων της \mathbf{f} (αυτό δικαιολογεί και το όνομα της ομάδας αυτής) και k είναι τα βήματα της μεθόδου τα οποία αντιστοιχούν και στην τάξη της μεθόδου.

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους έχει να κάνει με την αποτίμηση της \mathbf{f} η οποία γίνεται μόνο γύρω από την τρέχουσα χρονική στιγμή t_n όπως φαίνεται και από την περιγραφή του δεξιού μέρους της εξίσωσης (3-13). Σκοπός αυτής της προσέγγισης είναι η φόρμουλα να αποκτήσει την ιδιότητα της άκαμπτης κατάπτωσης (*stiff decay*) ώστε έτσι να μπορέσει να επιτευχθεί διατήρηση μιας επιτρεπτής περιγραφής της λύσης ακόμα και σε περιπτώσεις παράκαμψης σχολαστικών σχέσεων περιγραφής των λεπτομερειακών χαρακτηριστικών αυτής. Αυτό το προτέρημα ισχύει μόνο για άκαμπτα προβλήματα, όπου είναι και τα προβλήματα για τα οποία είναι κατάλληλες αυτές οι μέθοδοι και όχι ιδιαίτερα ταλαντευόμενα.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι ότι οι μέθοδοι αυτοί κάνουν χρήση παραγοντοποίησης του πολυωνύμου που κάνει παρεμβολή σε προηγούμενες τιμές της \mathbf{y} και ορίζουν την παράγωγο του t_n βήματος από την \mathbf{f} για το ίδιο βήμα.

Γενικά οι BDF μέθοδοι είναι έμμεσες μέθοδοι από την στιγμή που κάνουν χρήση του ίδιου βήματος το οποίο θέλουν να υπολογίσουν (το \mathbf{y}_n βρίσκεται και στα δύο μέλη της (3-13)). Συνήθως συνδυάζονται μαζί με κάποια τροποποιημένη μέθοδος Newton για την επίλυση των μη γραμμικών εξισώσεων σε κάθε χρονικό βήμα. Και τα δύο προγράμματα τα οποία χρησιμοποιούνται κάνουν χρήση κάποιας παραλλαγής της παραπάνω μεθόδου δεδομένου ότι η συνήθης περίπτωση είναι για την θεώρηση σταθερού χρονικού βήματος. Οι παραλλαγές συνήθως έχουν να κάνουν με την θεώρηση μεταβλητού βήματος. Νόημα έχουν οι μέχρι έκτου βαθμού BDF μέθοδοι γιατί από εκεί και πέρα χάνεται η ευστάθεια στα άκαμπτα προβλήματα τα οποία και ενδιαφέρουν για αυτές τις μεθόδους. Η πρώτου βαθμού BDF μέθοδος ονομάζεται και *προς τα πίσω μέθοδος Euler (backward Euler method)*.

3.1.2. Αλγόριθμοι επίλυσης βελτιστοποίησης

Σε αυτή την κατηγορία θα γίνει αναλυτική περιγραφή της μεθόδου η οποία χρησιμοποιήθηκε από το πρόγραμμα βελτιστοποίησης και μια πιο σύντομη για τις υπόλοιπες μεθόδους οι οποίες είναι διαθέσιμες και οι οποίες χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές περιπτώσεις, συνήθως συνδυαστικά μεταξύ τους για την επίλυση των εκάστοτε προβλημάτων.

3.1.2.1. Αλγόριθμος ακολουθιακού δευτεροβάθμιου προγραμματισμού (Sequential Quadratic Programming - SQP)

Ο ακολουθιακός δευτεροβάθμιος προγραμματισμός είναι από τις πιο πρόσφατα αναπτυγμένες μεθόδους βελτιστοποίησης και ίσως μία από τις καλύτερες. Η θεωρητική βάση της μεθόδου σχετίζεται:

1. Με την επίλυση ενός συνόλου μη γραμμικών εξισώσεων χρησιμοποιώντας την μέθοδο Newton
2. Στην παραγωγή ταυτόχρονων μη γραμμικών σχέσεων χρησιμοποιώντας τις συνθήκες KKT στην Λαγκρανζιανή σχέση του προβλήματος βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς.

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η απευθείας επίλυση ενός μη γραμμικού προβλήματος υπό περιορισμούς έναντι της ανάγκης να γίνει μετατροπή αυτού σε αλληλουχία προβλημάτων ελαχιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. Η SQP μέθοδος χρησιμοποιεί μία δευτεροβάθμια αντικειμενική συνάρτηση με γραμμικούς περιορισμούς. Ένα τέτοιο πρόβλημα αποκαλείται δευτεροβάθμιο πρόβλημα (*quadratic problem – QP*) (Rao, 1996), (Bazaraa *et al.*, 1993).

Για την παραγωγή σε δευτεροβάθμιο πρόβλημα ακολουθείται ο εξής συλλογισμός:

Έστω $f(\mathbf{X})$ η μη γραμμική αντικειμενική συνάρτηση προβλήματος ελαχιστοποίησης όπου $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ η βέλτιστη λύση για την οποία να ισχύει επίσης ότι

$$h_k(\mathbf{X}) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (3-15)$$

Βρίσκεται η Λαγκρανζιανή σχέση $L(\mathbf{x}, \lambda)$ του προβλήματος:

$$L = f(\mathbf{x}) + \sum_{k=1}^p \lambda_k h_k(\mathbf{x}) \quad (3-16)$$

όπου λ_k είναι ο Λαγκρανζιανός πολλαπλασιαστής του k περιορισμού ισότητας.

Οι απαραίτητες ΚΚΤ συνθήκες βελτιστοποίησης απαιτούν, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο:

$$\nabla L(\mathbf{X}) = \mathbf{0} \quad \text{ή} \quad \nabla f(\mathbf{X}) + \sum_{k=1}^p \lambda_k \nabla h_k(\mathbf{X}) = \mathbf{0} \quad (3-17)$$

$$h_k(\mathbf{X}) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, p$$

Αυτές οι μη γραμμικές εξισώσεις μπορούν να λυθούν δεδομένου ότι έχουμε $n + p$ εξισώσεις (n Λαγκρασιανές εξισώσεις και p περιορισμούς) με $n + p$ μεταβλητές ($x_i, i = 1, \dots, n$ και $\lambda_k, k = 1, \dots, p$) χρησιμοποιώντας επαναληπτική μέθοδο Newton. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι επαναληπτικές λύσεις θα δίνονται από τις σχέσεις:

$$\mathbf{x}_{j+1} = \mathbf{x}_j + \Delta \mathbf{x}_j \quad (3-18\alpha)$$

$$\lambda_{j+1} = \lambda_j + \Delta \lambda_j \quad (3-18\beta)$$

με j να δηλώνει την επανάληψη και $\Delta \mathbf{x}$, $\Delta \lambda$ τις διαφορές των τιμών των δυο διανυσμάτων των μεταβλητών μεταξύ των δύο επαναλήψεων. Οι διαφορές αυτές υπολογίζονται από τις σχέσεις των προσεγγίσεων πρώτης τάξης ως προς \mathbf{x}_k και λ_k στις συνθήκες ΚΚΤ οι οποίες είναι:

$$\nabla^2 L(\mathbf{x}_j) \cdot \Delta \mathbf{x}_j + \nabla \mathbf{h}(\mathbf{x}_j)^T \cdot \Delta \lambda_j = - \nabla L(\mathbf{x}_j) \quad (3-19)$$

$$\nabla \mathbf{h}(\mathbf{x}_j) \cdot \Delta \mathbf{x}_j = - \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) \quad (3-20)$$

όπου

$$\nabla^2 L(\mathbf{x}_j) = \nabla^2 f(\mathbf{x}_j) + \sum_{k=1}^p \lambda_{kj} \nabla^2 h_k(\mathbf{x}_j) \quad (3-21)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη σχέση από τις (3-17) και τις (3-18), η (3-19) γίνεται:

$$\nabla^2 L(\mathbf{x}_j) \cdot \Delta \mathbf{x}_j + \nabla \mathbf{h}(\mathbf{x}_j)^T \cdot \lambda_{j+1} = - \nabla f(\mathbf{x}_j) \quad (3-22)$$

Επομένως επαναλαμβάνοντας τις επαναλήψεις στο σύστημα των (3-20) και (3-22) έως ότου $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{0}$, θα έχει βρεθεί λύση στις συνθήκες βελτιστοποίησης ΚΚΤ του αρχικού προβλήματος.

Αυτό που προτείνεται από την SQP μέθοδο είναι αντί να γίνει αναζήτηση για οποιαδήποτε λύση των ΚΚΤ συνθηκών του αρχικού προβλήματος, να γίνεται προσπάθεια ελαχιστοποίησης ενός δευτεροβάθμιου προβλήματος ως προς $\Delta \mathbf{x}$ του οποίου οι συνθήκες βελτιστοποίησης να είναι οι τελικές σχέσεις των συνθηκών

βελτιστοποίησης του αρχικού προβλήματος, δηλαδή οι σχέσεις (3-20) και (3-22). Έτσι, όλη η διαδικασία τείνει να οδηγηθεί προς χρήσιμες ΚΚΤ λύσεις.

Ένα τέτοιο δευτεροβάθμιο πρόβλημα είναι το:

$$\min: \quad \frac{1}{2} \Delta \mathbf{x}^T \nabla^2 L(\mathbf{x}_j) \Delta \mathbf{x} + \nabla f(\mathbf{x}_j)^T \Delta \mathbf{x} + f(\mathbf{x}_j) \quad (3-23\alpha)$$

$$\text{u.π.:} \quad h_k(\mathbf{x}_j) + \nabla h_k(\mathbf{x}_j)^T \Delta \mathbf{x} = 0 \quad , k = 1, \dots, p \quad (3-23\beta)$$

Σε αυτό το πρόβλημα αν υπάρχει λύση, τότε αυτή θα ικανοποιεί και την λύση των συνθηκών βελτιστοποίησης ΚΚΤ του αυτού προβλήματος το οποίο σημαίνει και λύση των εξισώσεων (3-20) και (3-22) όπου πλέον λ_{j+1} είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange των περιορισμών του δευτεροβάθμιου προβλήματος. Με την συγκεκριμένη παραγωγή, η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος δεν αντιπροσωπεύει μόνο μια δευτεροβάθμια εκτίμηση της $f(\mathbf{x})$ αλλά περιέχει επιπλέον και τον όρο $\frac{1}{2} \sum_{k=1}^p \lambda_{jk} \Delta \mathbf{x}^T \nabla^2 \mathbf{h}(\mathbf{x}_j) \Delta \mathbf{x}$ ο οποίος αντιπροσωπεύει την καμπυλότητα των περιορισμών. Η αντικειμενική, σε συνδυασμό με την σχέση της Λαγκρανζιανής συνάρτησης της $f(\mathbf{x})$ μπορεί να γίνει:

$$L(\mathbf{x}_j) + \nabla_x L(\mathbf{x}_j)^T \Delta \mathbf{x} + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{x}^T \nabla^2 L(\mathbf{x}_j) \Delta \mathbf{x} \quad (3-24)$$

η οποία αντιστοιχεί σε προσέγγιση σειράς Taylor δεύτερης τάξης της Λαγκρανζιανής συνάρτησης. Με παρουσία μη γραμμικών περιορισμών, παρουσιάζει συμπεριφορά τετραγωνικής σύγκλισης. Άλλο πλεονέκτημα είναι η πρώτη τάξης γραμμικοποίηση των περιορισμών στο σημείο \mathbf{x}_j .

Στη γενική περίπτωση όπου εμφανίζονται και περιορισμοί ανισότητας αυτοί είναι της μορφής:

$$g_l(\mathbf{x}) \leq 0 \quad , l = 1, \dots, m \quad (3-25)$$

όπου στο δευτεροβάθμιο πρόβλημα γίνονται

$$g_l(\mathbf{x}_j) + \nabla g_l(\mathbf{x}_j)^T \Delta \mathbf{x} \leq 0 \quad , l = 1, \dots, m \quad (3-26)$$

Η αντικειμενική δεν αλλάζει αλλά αλλάζει η Λαγκρανζιανή συνάρτηση η οποία γίνεται:

$$L = f(\mathbf{x}) + \sum_{l=1}^m \nu_l g_l(\mathbf{x}) + \sum_{k=1}^p \lambda_k h_k(\mathbf{x}) \quad (3-27)$$

με $\mathbf{v} \geq \mathbf{0}$ να είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange των ανισοτικών περιορισμών.

Επίσης και η τελική μορφή των συνθηκών KKT οι οποίες πρέπει να ισχύουν για το αρχικό και για το δευτεροβάθμιο πρόβλημα αλλά και για τον υπολογισμό των πολλαπλασιαστών Lagrange γίνονται:

$$\begin{aligned} \nabla f(\mathbf{x}_j) + \nabla^2 L(\mathbf{x}_j) \Delta \mathbf{x} + \sum_{l=1}^m \nu_l \nabla g_l(\mathbf{x}_j) + \sum_{k=1}^p \lambda_k \nabla h_k(\mathbf{x}_j) &= \mathbf{0} \\ \nu_l [g_l(\mathbf{x}_j) + \nabla g_l(\mathbf{x}_j)^T \Delta \mathbf{x}] &= 0 \quad l = 1, \dots, m \\ \mathbf{v} &\geq \mathbf{0} \end{aligned} \quad (3-28)$$

λ χωρίς περιορισμούς

Στα μειονεκτήματά της συγκαταλέγονται το γεγονός ότι η τελική μορφή των σχέσεων του δευτεροβάθμιου προβλήματος μπορεί να οδηγήσουν σε μη φραγμένο ή ανέφικτο πρόβλημα καθώς και το γεγονός εμφάνισης δευτέρου βαθμού παραγωγίσης και η ανάγκη καλής αρχικής εκτίμησης για να επιτευχθεί σύγκλιση. Ο πρώτος περιορισμός λύνεται με την οριοθέτηση του $\Delta \mathbf{x}$. Η περίπτωση ανέφικτου προβλήματος μπορεί να αντιμετωπισθεί με τροποποίηση της παραπάνω διαδικασίας η οποία θα παρουσιαστεί μετά την παρουσίαση του τρόπου ολικής σύγκλισης από την στιγμή που οι δύο περιπτώσεις συνδέονται. Για την περίπτωση δύσκολης παραγωγίσης επιστρατεύονται οι ψευδο-Newton μέθοδοι κάποιες από τις οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω, λόγω της εφαρμογής τους και στους SQP αλγόριθμους.

Η επίτευξη ολικής σύγκλισης χρειάζεται λόγω της εμφάνισης καλής σύγκλισης μόνο όταν η αρχική εκτίμηση είναι αρκετά κοντά στην επιθυμητή λύση. Το πρόβλημα είναι ότι ακόμα και στην περίπτωση όπου κάποιος είναι κοντά, δεν γίνεται εύκολα αυτό αντιληπτό. Για τον λόγο αυτό γίνεται χρήση μίας συνάρτησης αξιολόγησης (*merit function*). Πρόκειται για μια συνάρτηση η οποία ελαχιστοποιείται και αυτή παράλληλα με την αντικειμενική στην λύση του προβλήματος. Επιπρόσθετα όμως, λειτουργεί και ως μια συνάρτηση καθόδου η οποία οδηγεί τις επαναλήψεις και

παρέχει ένα μέσο σύγκρισης προόδου της σύγκλισης. Προτιμάται να είναι μια εύκολα εκτιμώμενη συνάρτηση η οποία δεν θα επηρεάζει το ρυθμό σύγκλισης του αλγόριθμου δεδομένου ότι συνυπάρχει με την αντικειμενική συνάρτηση οπότε υπάρχει ενδεχόμενο να επηρεάζει την όλη διαδικασία επίλυσης. Μια συνηθισμένη περίπτωση συνάρτησης αξιολόγησης είναι η συνάρτηση ποινής απόλυτης τιμής (*absolute value, penalty function – l_l*) η οποία για ένα μη γραμμικό πρόβλημα της γενικής μορφής είναι:

$$F_E(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + \mu \left[\sum_{l=1}^m \max\{0, g_l(\mathbf{x})\} + \sum_{k=1}^p |h_k(\mathbf{x})| \right] \quad (3-29)$$

όπου

$$\mu \geq \max\{v_1, \dots, v_m, |k_1|, \dots, |k_p|\}.$$

Η συγκεκριμένη συνάρτηση αξιολόγησης παρουσιάστηκε γιατί μια παραλλαγή αυτής προτάθηκε από τον Fletcher (1981) η οποία εξασφαλίζει ένα εφικτό, φραγμένο μη γραμμικό πρόβλημα με ύπαρξη βέλτιστου, γεγονός το οποίο καλύπτει και το τελευταίο μειονέκτημα των SQP μεθόδων. Η συγκεκριμένη προσέγγιση ονομάζεται L_l SQP, όπου το l_l αντιστοιχεί στην αντίστοιχη συνάρτηση ποινής στην οποία βασίστηκε. Το δευτεροβάθμιο πρόβλημα το οποίο δημιουργείται λόγω αυτής της συνάρτησης ποινής είναι:

$$\begin{aligned} & f(\mathbf{x}) + \nabla f(\mathbf{x}_j)^T \Delta \mathbf{x} + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{x}^T \nabla^2 L(\mathbf{x}_j) \Delta \mathbf{x} \\ \text{Min: } & + \mu \left[\sum_{l=1}^m \max\left\{0, g_l(\mathbf{x}_j) + \nabla g_l(\mathbf{x}_j)^T \Delta \mathbf{x}\right\} + \sum_{k=1}^p \left| h_k(\mathbf{x}_j) + \nabla h_k(\mathbf{x}_j)^T \Delta \mathbf{x} \right| \right] \end{aligned} \quad (3-30)$$

$$\text{Υ.Π.: } -\mathbf{D}_j \leq \Delta \mathbf{x} \leq \mathbf{D}_j \quad (3-31)$$

Όπου \mathbf{D}_k είναι το όριο του πεδίου εμπιστοσύνης του βήματος (*trust region step bound*).

Πέρα από την παραπάνω συνάρτηση αξιολόγησης υπάρχουν και άλλες δευτεροβάθμιες και επαυξημένες Λαγκρασιανές (*Augmented Lagrangian – ALAG*) συναρτήσεις ποινής οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον ίδιο σκοπό.

3.1.2.2. Παραμετροποίηση διανύσματος μεταβλητών ελέγχου (Control Vector Parameterization – CVP)

Από τις μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούνται για δυναμική βελτιστοποίηση και αναφέρθηκαν γενικά σε προηγούμενο κεφάλαιο, αυτή η οποία χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα βελτιστοποίησης είναι μία από τις άμεσες μεθόδους και συγκεκριμένα η μέθοδος παραμετροποίησης του διανύσματος μεταβλητών ελέγχου (*Control Vector Parameterization – CVP*) (Kraft, 1985) η οποία έχει χρησιμοποιηθεί από τον Binder *et al.* (2000) και τον Schlegel *et al.* (2005). Η ονοματολογία που εμφανίζεται στην συνέχεια είναι ίδια με αυτήν η οποία αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1.2.4.2. Στην CVP μέθοδο μόνο οι μεταβλητές ελέγχου $\mathbf{u}(t)$ διακριτοποιούνται με άμεσο τρόπο (*explicit*). Οι παράμετροι διακριτοποίησης είναι και οι μεταβλητές βελτιστοποίησης – απόφασης στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η μορφή των μεταβλητών κατάστασης δημιουργείται από την προς τα εμπρός ολοκλήρωση των διαφορικών – αλγεβρικών εξισώσεων για δεδομένη είσοδο, γεγονός που δικαιολογεί την εναλλακτική ονομασία αυτών των μεθόδων και ως μεθόδους απλής σκόπευσης (*Single Shooting*). Για τη διακριτοποίηση των μεταβλητών ελέγχου συνήθως χρησιμοποιούνται πολυωνυμικές προσεγγίσεις συναρτήσεων εξαρτημένης μορφής από τις ανεξάρτητες μεταβλητές τους (*piecewise polynomial approximations*) όπως π.χ. οι B-splines (Pozrikidis, 2005).

Συνεχίζοντας, δίνεται η περιγραφή των προγραμμάτων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Στην περιγραφή θα παρουσιαστεί η φιλοσοφία κατασκευής ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης η οποία χρησιμοποιείται από τα προγράμματα. Επιπλέον, θα παρουσιαστεί και ο συγκεκριμένος τρόπος προσέγγισης του εκάστοτε αλγόριθμου για την επίλυση ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης (από το δεύτερο) από τους αλγόριθμους οι οποίοι παρουσιάστηκαν προηγουμένως και χρησιμοποιούνται από τα προγράμματα.

3.2. Περιγραφή προγραμμάτων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης

Η προσομοίωση ενός συστήματος, αποτελείται από ένα σύνολο εργασιών οι οποίες, οδηγούμενες η μία από την άλλη, δίνουν το τελικό αποτέλεσμα. Οι εργασίες

αυτές είναι το στήσιμο του φυσικού μοντέλου του συστήματος του οποίου η προσομοίωση απαιτείται, η δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου από το φυσικό μοντέλο, η εφαρμογή κατάλληλου αλγόριθμου στο μαθηματικό μοντέλο ώστε να λυθεί το αριθμητικό μοντέλο και η εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου σε ένα πρόγραμμα. Περαιτέρω εργασία στο παραπάνω σύνολο αποτελεί η μετατροπή του μαθηματικού μοντέλου σε κατάλληλο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, οι παραπάνω εργασίες περιγράφονται πιο αναλυτικά για την περίπτωση του D.N.A. και του gPROMS. Συγκεκριμένα και τα δύο προγράμματα είναι κατάλληλα για την προσομοίωση κάποιας διεργασίας και συγκεκριμένα διεργασίες μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής, αλλά μόνο το gPROMS είναι κατάλληλο και για την μελέτη προβλήματος βελτιστοποίησης.

3.2.1. D.N.A.

Το D.N.A. (*Dynamic Network Analysis*) (Elmegaard, 1999) είναι το αποτέλεσμα της εξέλιξης της δουλειάς η οποία πραγματοποιήθηκε στο τμήμα Ενεργειακής Μηχανικής στο Τεχνικό πανεπιστήμιο της Δανίας, αρχής γενομένης από τον Perstrup (1990) ο οποίος και έθεσε τις βάσεις για τον κώδικα του D.N.A. ο οποίος στην αρχή ήταν γραμμένος σε FORTRAN 77 μόνο, με αρχικό σκοπό την προσομοίωση εφαρμογών σταθερής κατάστασης κυρίως μονάδων ηλεκτροπαραγωγής αλλά με απώτερο στόχο τη διατήρηση της γενικής χρήσης, της ελαστικότητας της εφαρμογής του σε διαφορετικά συστήματα καθώς και της επεκτασιμότητας αυτού. Ο Lorentzen (1995) στην συνέχεια πρόσθεσε και την δυνατότητα υπολογισμών μεταβατικών διεργασιών καθώς και επιπλέον δυνατότητες οι οποίες βελτίωσαν την λειτουργία του προγράμματος. Το D.N.A. καθίσταται ένα πολύ καλό εργαλείο γενικής χρήσης για μελέτη ενεργειακών συστημάτων, λόγω της προσπάθειας επίτευξης και διατήρησης των παρακάτω χαρακτηριστικών:

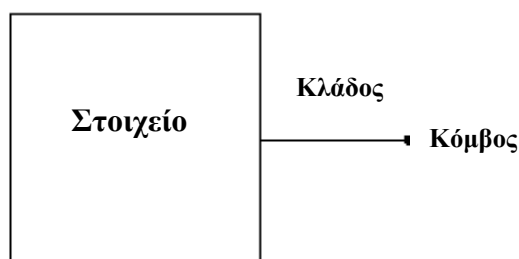
- a. Ελαστικότητα ως προς την εφαρμογή του σε ενεργειακά συστήματα
- b. Ευστάθεια ως προς την διεξαγωγή και παραγωγή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης
- c. Αποτελεσματικότητα ως προς την εφαρμογή του αριθμητικού επιλυτή.
- d. Φορητότητα ως προς τα λειτουργικά υπολογιστικά συστήματα στα οποία μπορεί να δουλέψει

- e. Ευχρηστία ως προς την εισαγωγή των δεδομένων, την πρόσβαση στα αποτελέσματα και την προσθήκη νέων μοντέλων συσκευών και τέλος
- f. Ευαναγνωσιμότητα του πηγαίου κώδικα του προγράμματος

Το τελευταίο χαρακτηριστικό αποκαλύπτει και τον επιπλέον λόγο για τον οποίο επιλέχθηκε το D.N.A. ο οποίος είναι η δυνατότητα αλληλεπίδρασης με τον πηγαίο κώδικα από την στιγμή που είναι ελεύθερα διαθέσιμος μαζί με το πρόγραμμα.

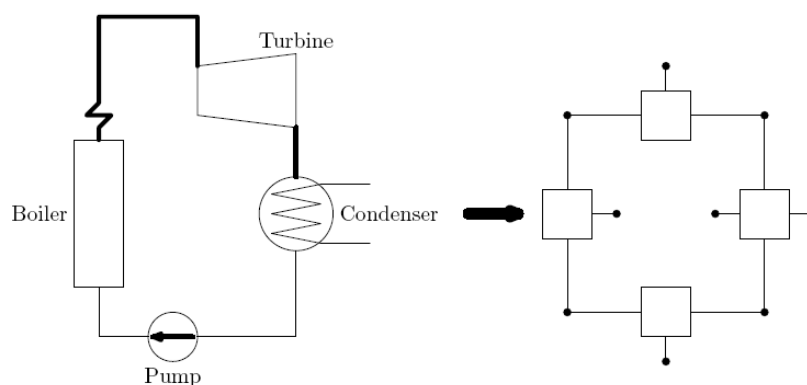
3.2.1.1. Φυσικό μοντέλο

Αρχικά πρέπει να βρεθεί ένας συστηματικός τρόπος προσέγγισης στη μοντελοποίηση του συστήματος. Η προσέγγιση των δικτύων (network approach) θεωρείται πολύ καλή για το σχηματισμό μοντέλων συστημάτων σε προγράμματα. Για τη μετατροπή από την φυσική απεικόνιση, σε απεικόνιση δικτύου, κάθε συσκευή που εμφανίζεται στο φυσικό σύστημα μεταφράζεται σε στοιχείο (component) το οποίο περιλαμβάνει κλάδους (branches), οι οποίοι καταλήγουν σε κόμβους (nodes) όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-2 (Elmegaard, 1999).



Εικόνα 3-2 Τα βασικά στοιχεία ενός δικτύου (Elmegaard, 1999).

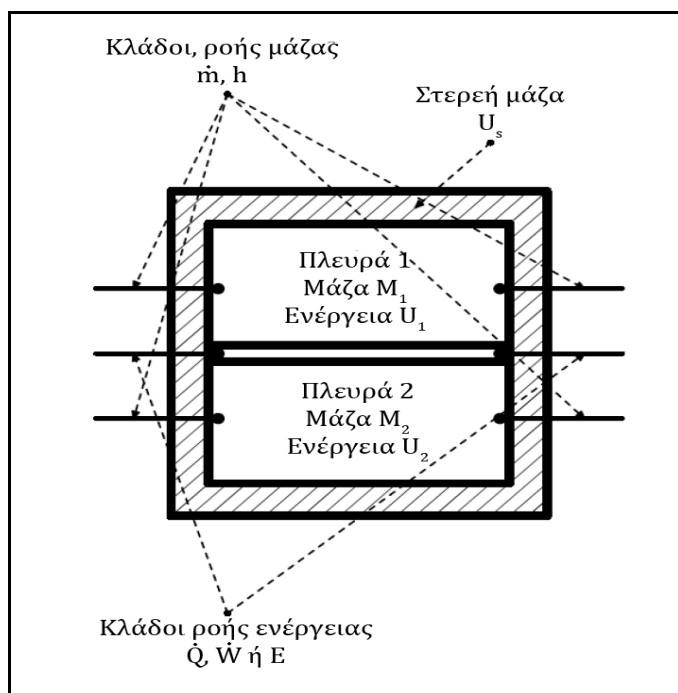
Με αυτό τον τρόπο, ο σχηματισμός του δικτύου είναι ανεξάρτητος από τη φύση του κάθε στοιχείου. Αυτό μπορεί να φανεί και στην Εικόνα 3-3 (Elmegaard, 1999) όπου δίνεται η μεταφορά ενός απλού κύκλου ενεργειακού συστήματος σε μορφή δικτύου. Επιπλέον, κάθε στοιχείο έχει περισσότερους κλάδους από αυτούς που χρειάζονται για να δημιουργηθεί το μοντέλο, ώστε να επιτρέπεται η αλληλεπίδρασή του με τον περιβάλλοντα χώρο.



Εικόνα 3-3 Μεταφορά ενός απλού ενεργειακού συστήματος στη μορφή δικτύου (Elmegaard, 1999).

Επομένως, μπορεί να παρομοιαστεί ένα τέτοιο δίκτυο με ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, όπου οι παροχές μάζας και ενέργειας αντιστοιχούν στα ηλεκτρικά ρεύματα που διέρχονται από τα στοιχεία και προσδιορίζουν την κατάσταση των κλάδων. Αντίστοιχα, η διαφορά πίεσης από κόμβο σε κόμβο, που είναι και η κινητήρια δύναμη για την μάζα (ώστε να έχουμε παροχή μάζας, άρα και ενέργειας) αντιστοιχεί με την διαφορά τάσης από κόμβο σε κόμβο σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, η οποία είναι και η κινητήρια δύναμη των ηλεκτρικών ρευμάτων. Σε αντιστοιχία με τον πρώτο νόμο του Kirchhoff, όπου το άθροισμα των ρευμάτων σε ένα κόμβο είναι μηδέν σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, η αρχή διατήρησης μάζας και το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα εκφράζουν κάτι ανάλογο για τη παροχή μάζας και ενέργειας αντίστοιχα. Πέρα από την παροχή μάζας που χρησιμοποιείται ως μέσο για την ανταλλαγή ενέργειας (μέσω της ενθαλπίας) το D.N.A. χρησιμοποιεί και τις ροές θερμότητας και ισχύος. Οι τελευταίες, που αποτελούν και μεταβλητές των κλάδων, δεν χρειάζονται κάποια μεταβλητή στους κόμβους, μιας και δεν απαιτείται κάποια κινητήρια δύναμη για να τις προσδιορίσει.

Το συστατικό μοντέλο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-4 (Elmegaard, 1999) είναι μια αντιπροσώπευση ενός βασικού προτύπου που εφαρμόζεται στο DNA σε προσομοιωτικές διαδικασίες σταθερής κατάστασης ή δυναμικές.



Εικόνα 3-4 Γενικευμένο μοντέλο DNA (Elmegaard, 1999).

Η μάζα και η ενέργεια που περιλαμβάνονται μπορούν να υπολογιστούν ως δυναμικές μεταβλητές. Οι εξισώσεις ισορροπίας για το γενικό συστατικό διατυπώνονται ως εξής:

$$\sum_{\text{κλάδων}} \dot{m} = \frac{dM}{d\tau} \quad (3-32)$$

Για τα μοντέλα σταθερής κατάστασης και για τους κόμβους η εξίσωση συνέχειας απλοποιείται:

$$\sum_{\text{κλάδων}} \dot{m} = 0 \quad (3-33)$$

Η ισορροπία ενέργειας για ένα συστατικό στοιχείο στη γενικευμένη του μορφή εκφράζεται ως εξής:

$$\sum_{\substack{\text{κλάδων} \\ \text{ροής} \\ \text{μάζας}}} \dot{m}h + \sum_{\substack{\text{κλάδων} \\ \text{ροής} \\ \text{θερμότητας}}} \dot{Q} + \sum_{\substack{\text{κλάδων} \\ \text{ενέργειας}}} P = \sum_{\text{ρευστών}} \frac{U}{d\tau} + \frac{U_s}{d\tau} \quad (3-34)$$

Για συστήματα όπου δεν λαμβάνεται υπόψη η δυναμική τους συμπεριφορά, η σχέση απλοποιείται:

$$\sum_{\substack{\text{κλάδων} \\ \text{ροής} \\ \text{μάζας}}} \dot{m}h + \sum_{\substack{\text{κλάδων} \\ \text{ροής} \\ \text{θερμότητας}}} \dot{Q} + \sum_{\substack{\text{κλάδων} \\ \text{ενέργειας}}} P = 0 \quad (3-35)$$

Σε έναν κόμβο, παρουσιάζεται μόνο ένας τύπος και έτσι η ενεργειακή ισορροπία θα εκφράζεται με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

$$\sum_{\substack{\text{κλάδων} \\ \text{ροής} \\ \text{μάζας}}} \dot{m}h = 0$$

$$\sum_{\substack{\text{κλάδων} \\ \text{ροής} \\ \text{θερμότητας}}} \dot{Q} = 0 \quad (3-36)$$

$$\sum_{\substack{\text{κλάδων} \\ \text{ενέργειας}}} P = 0$$

Σύμφωνα με τη παραπάνω διατύπωση, καμία κατεύθυνση ροής δεν εφαρμόζεται. Για να γίνεται λοιπόν αντιληπτή η φορά, θα πρέπει οι ροές εισόδου και εξόδου να έχουν αντίθετα πρόσημα με τις ροές εξόδου να ορίζονται ως αρνητικές.

Πέρα όμως από τις παραπάνω μεταβλητές, για τη δημιουργία εκτενέστερων και γενικότερων μοντέλων, χρειάζονται επιπλέον μεταβλητές. Τέτοιες μεταβλητές είναι ποσοτικά κλάσματα των συστατικών ενός αερίου μίγματος, σήματα ελέγχου, περιστροφικές ταχύτητες από τους κινητήριους άξονες, καθώς και μεταβλητές προσδιορισμένες από το χρήστη οι οποίες ίσως χρειαστούν.

3.2.1.2. Μαθηματικό μοντέλο

Με βάση τα παραπάνω για το στήσιμο του δικτύου, το παραγόμενο σύστημα εξισώσεων θα αποτελείται από:

1. Εξισώσεις διατήρησης μάζας για κάθε πλευρά ροής σε κάθε εξάρτημα
2. Εξισώσεις διατήρησης μάζας για κάθε κόμβο με ροή μάζας
3. Εξισώσεις διατήρησης ενέργειας για κάθε εξάρτημα
4. Εξισώσεις διατήρησης ενέργειας για κάθε κόμβο
5. Καταστατικές σχέσεις που αντιπροσωπεύουν διατήρηση ορμής για κάθε πλευρά ροών σε κάθε εξάρτημα

Για την δημιουργία ενός πλήρως προσδιορισμένου συστήματος εξισώσεων χρειάζονται επιπλέον πληροφορίες. Στο D.N.A. αυτές παρέχονται με την εφαρμογή καταστατικών συσχετίσεων στο μοντέλο του στοιχείου και προσδιορίζοντας συνθήκες για τη λειτουργία του προσομοιωμένου συστήματος.

Οι συνθήκες αυτές μπορεί να έχουν να κάνουν με ροές, πιέσεις ή ενθαλπία όπου σε συνδυασμό με θερμοδυναμικές σχέσεις μπορούν να δώσουν πληροφορίες και για άλλα μεγέθη (ειδική εντροπία, ειδικό όγκο, θερμοκρασία, πυκνότητα). Επίσης αρχικές τιμές διαφοροποιήσιμων μεταβλητών απαιτούνται για να μπορέσει να ξεκινήσει ο υπολογισμός των μεταβλητών αυτών. Η εφαρμογή των καταστατικών σχέσεων στο μοντέλο ενός στοιχείου χρειάζεται λόγω της πιθανότητας να μην είναι αρκετά γενικές οι τιμές των συνθηκών που έχουν χρησιμοποιηθεί οπότε αποκτάται επιπλέον πληροφορία όσον αφορά απώλειες πίεσης, διαφορές θερμοκρασιών και άλλων μεγεθών που δεν μπορούν να βρεθούν από τις προηγούμενες συνθήκες. Για να συμπεριληφθούν αυτές οι σχέσεις, απαιτείται η εισαγωγή παραμέτρων οι οποίες θα ομαλοποιήσουν (lumping) τα χαρακτηριστικά των στοιχείων. Δύναται ωστόσο, να είναι άλλες οι ποσότητες από αυτές που αναφέρθηκαν, για να δώσουν την απαιτούμενη πληροφορία, ανάλογα με τις ιδιομορφίες του συστήματος ή ακόμα και να προσδιοριστούν οι απαιτούμενες τιμές, αν είναι γνωστή η κατάσταση που βρίσκεται το σύστημα σε μία προκαθορισμένη στιγμή. Ένας περιορισμός του D.N.A. είναι ότι μόνο δύο ξεχωριστές ροές στοιχείων μπορούν να συμπεριληφθούν σε ένα εξάρτημα.

3.2.1.3. Αριθμητικές μέθοδοι στις προσομοιώσεις

Για την εκλογή της κατάλληλης αριθμητικής μεθόδου λαμβάνεται υπόψη η συμπερίληψη κυκλικών διεργασιών σε ένα ενεργειακό σύστημα γεγονός που οδηγεί κατευθείαν σε εκλογή κάποιας επαναληπτικής μεθόδου. Η επιθυμία για διατήρηση της γενικότητας του προσομοιωτή συνεπάγεται την εκλογή πεπλεγμένων σχέσεων σχηματισμού του μοντέλου των στοιχείων ως πιο κατάλληλο ώστε το εκάστοτε εξάρτημα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες περιπτώσεις. Η εκλογή της μεθόδου Newton έγινε λόγω των καλών ιδιοτήτων της (τετραγωνικής τάξης σύγκλιση, από τους γρηγορότερους ρυθμούς σύγκλισης όταν συγκλίνει, σύγκλιση μόνο κοντά στην λύση) και του γεγονότος ότι είναι μέθοδος ταυτόχρονης επίλυσης οπότε και κατάλληλη για να δώσει αποδοτικό κώδικα.

Για την βελτίωση της χρήσης της μεθόδου Newton, τα πρώτα βήματα μειώνονται, ώστε μόνο ένα μέρος του βήματος να χρησιμοποιηθεί και αυτό γιατί η μέθοδος δεν είναι εύρωστη όταν δεν δίνονται ικανοποιητικά καλές αρχικές υποθέσεις τιμών οπότε έτσι μειώνεται και η μεταβολή από την αρχική τιμή, αν αυτή δεν είναι καλή, οπότε μπορεί να έδινε μη επιτρεπτή τιμή. Για την βελτίωση της ταχύτητάς της μεθόδου, μπορεί να εφαρμοστεί μια ακόμα μετατροπή στη μέθοδο, αυτή της διατήρησης του ίδιου Ιακωβιανού πίνακα για κάποιο αριθμό επαναλήψεων. Το D.N.A. έχει σαν προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων χωρίς την μετατροπή του Ιακωβιανού πίνακα τις 100. Αλλά χρησιμοποιεί και μία διαφορετική προσέγγιση, η οποία παρακολουθεί τον λόγο του λάθους και της μεταβολής μεταξύ δύο επαναλήψεων και επιτρέπει τη χρήση του ίδιου πίνακα για όσο η σύγκλιση είναι καλή, με κάποια κριτήρια που έχουν προσδιοριστεί.

Για την ρύθμιση της μεθόδου, όλες οι αρχικές τιμές των μεταβλητών πρέπει να ρυθμιστούν από τον χρήστη και συγκεκριμένα για τις ροές μπορεί να ρυθμιστεί μόνο η ενθαλπία και οι υπόλοιπες θερμοδυναμικές ιδιότητες μέσω αυτής. Για την παραγωγή τώρα καλών αρχικών εκτιμήσεων χρησιμοποιείται μεθοδολογία που βασίζεται σε μια πρωτοβάθμια ανάλυση του συστήματος και δεν περιέχει αριθμητικούς υπολογισμούς. Αρχικά, οι εφαρμοσμένες συνθήκες χρησιμοποιούνται και ως αρχικές εκτιμήσεις και τα δεδομένα που δίνουν για ροή μάζας και ενθαλπίας ή ροής ενέργειας σε ένα κλάδο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αρχική εκτίμηση στους κλάδους που συνδέονται άμεσα με τον αρχικό κλάδο. Για την αποφυγή αριθμητικών υπολογισμών πρέπει να προσδιοριστούν οι συστάσεις όλων των μέσων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο.

Για την γενίκευση των μοντέλων των στοιχείων, συνίσταται η διάσπαση των προβληματικών σχέσεων που εμφανίζονται στο μοντέλο, οι οποίες είναι οι μη συνεχής και μη διαφοροποιήσιμες, σε συνεχής και διαφοροποιήσιμες ώστε να μπορούν να συγκλίνουν με χρήση κάποιας μεθόδου ολικής σύγκλισης (π.χ. μεθόδους συνέχισης – continuation methods)

Για την επίλυση των διαφορικών – αλγεβρικών εξισώσεων (Differential-Algebraic Equations – DAE), μια μέθοδος μορφής προς τα πίσω διαφοροποίησης (Backward Differentiation Formulae – BDF) επιλέχτηκε ως μέθοδος ολοκλήρωσης σαν πιο

αποτελεσματική για τις πρωτοβάθμιες semi-explicit DAE. Στην μονοδιάστατη περίπτωση η BDF k τάξης για το βήμα n δίνεται ως:

$$\sum_{i=0}^k \alpha_i y_{n-i} = \hat{h} \beta_k f(t_n, y_n) \quad (3-37)$$

όπου \hat{h} είναι το χρονικό βήμα. Η μέθοδος περιορίστηκε στην τέταρτη τάξη, για να έχει μια αρκετά μεγάλη περιοχή σταθερότητας. Η μέθοδος χρησιμοποιείται ως μια μέθοδος πρόβλεψης – διόρθωσης με εκτίμηση του σφάλματος αποκοπής και έλεγχο του χρονικού βήματος. Η μορφή του Nordsieck της BDF μεθόδου εκλέχτηκε, λόγω της χρονοβόρας παρεμβολής που απαιτείται για την εύρεση των αλλαγών των χρονικών βημάτων στις BDF μεθόδους εξαιτίας των οπισθοδρομικών διαφορών. Αυτή βασίζεται σε μια επέκταση της σειράς Taylor πίσω στο χρόνο της επίλυσης στο σύστημα των εξισώσεων. Για κάθε διαφοροποιήσιμη μεταβλητή στο σύστημα ένα διάνυσμα Nordsieck ορίζεται ως:

$$\mathbf{Y}(j) = \frac{\hat{h}^j}{j!} \cdot y_i^{(j)} \text{ για } j = 0, k-1 \quad (3-38)$$

Αυτό απλοποιεί τον έλεγχο του χρονικού βήματος γιατί κάθε είσοδο του διανύσματος του Nordsieck χρειάζεται μόνο να πολλαπλασιαστεί με το λόγο a μεταξύ ενός νέου χρονικού βήματος και ενός απορριφθέντος

$$\mathbf{Y}(j) = \frac{(a \cdot \hat{h})^j}{j!} \cdot y_i^{(j)} \text{ για } j = 0, k-1 \quad (3-39)$$

Οι ασυνέχειες αντιμετωπίζονται, προσδιορίζοντας το χρονικό σημείο στο οποίο εμφανίζονται, ολοκληρώνοντας μέχρι το σημείο αυτό και με επανεκκίνηση της μεθόδου ακριβώς μετά την ασυνέχεια. Αυτές χωρίζονται σε χρονικά εξαρτώμενες (μεταβολή του ανοίγματος μίας βαλβίδας σε συγκεκριμένο χρόνο από ένα χειριστή) οπότε ορίζονται αποκλειστικά (*explicitly*) στο σύστημα, οπότε η τιμή τους μπορεί να βρεθεί πριν την έναρξη της προσομοίωσης, οπότε και η ολοκλήρωση μπορεί να διακοπεί ακριβώς στο σημείο της ασυνέχειας και να ξαναρχίσει ακριβώς μετά από αυτήν. Οι ασυνέχειες, οι εξαρτώμενες από τις μεταβλητές, είναι η άλλη κατηγορία και οι πιο δύσκολες στο χειρισμό τους και για των οποίων την αντιμετώπιση εισάγονται

μεταβλητές αλλαγής (switch variables) οι οποίες ορίζονται έτσι ώστε να αλλάζουν πρόσημο στην ασυνέχεια.

3.2.1.4. Αξιολόγηση του D.N.A.

Σε σύγκριση και με άλλα πακέτα προσομοίωσης - εμπορικά και μη – το D.N.A. παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Όσον αφορά την προσέγγιση της μοντελοποίησης, το D.N.A. μπορεί να μοντελοποιήσει και να υπολογίσει και δυναμικά και στατικά μοντέλα, δηλαδή σχεδόν όλα τα ενεργειακά συστήματα. Επίσης, σε ότι αφορά την προσέγγιση της περιγραφής του συστήματος, η περιγραφή του μοντέλου είναι εύκολη για τον χρήστη καθώς και η τροποποίηση αυτού μέσω της χρήσης στοιχείων για τις διάφορες επιμέρους συσκευές. Τα δύο παραπάνω χαρακτηριστικά του D.N.A. το καθιστούν ευέλικτο για την προσομοίωση σχεδόν όλων των ενεργειακών συστημάτων.

Είναι επίσης αρκετά γρήγορος στις προσομοιώσεις λόγω της εφαρμογής λύτη ταυτόχρονων εξισώσεων που χρησιμοποιεί μεθόδους αραιού πίνακα (sparse matrix) και έχει μοναδικά χαρακτηριστικά λόγω της πινακοποιημένης μορφής του μοντέλου, γεγονός που παρέχει δυνατότητα εκτενής ανάλυσης της συνέπειας του μοντέλου.

Τα αποτελέσματα από τη χρήση του D.N.A. στη μονάδα III του ΑΗ.Σ. Καρδιά έχουν δώσει καλά αποτελέσματα όσον αφορά την σύγκλιση των μετρημένων αποτελεσμάτων με των παραγόμενων του προγράμματος στα κομμάτια του στροβίλου, αλλά όχι τόσο καλά στο κομμάτι του ατμοπαραγωγού σε περίπτωση απλού μοντέλου (Πετράκης & Μαθιουδάκης, 2006).

3.2.2. **gPROMS**

Τελικός στόχος της παρούσας δουλειάς είναι η βελτιστοποίηση της μονάδας IV του ΑΗΣ Καρδιά με αρχική βελτιστοποίηση των επιμέρους κυκλωμάτων και έπειτα της σύζευξής τους στην συνολική μονάδα. Γι' αυτό το λόγο επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το λογισμικό “gPROMS” της εταιρείας “Process System Enterprise”. Οι σχέσεις οι οποίες περιγράφουν το μοντέλο, κατά την επίλυση δημιουργούνται στο gPROMS σαν σχέσεις διαφορών και ως συμβολικά παραγόμενες μερικές παράγωγοι (Ιακωβιανή) και χρησιμοποιούνται σαν είσοδοι στον κώδικα βελτιστοποίησης. Οι λόγοι για τους οποίους έγινε εκλογή του συγκεκριμένου λογισμικού ήταν:

a. Ελαστικότητα και φιλικότητα στην χρήση. Το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει δυνατότητες προσομοίωσης, βελτιστοποίησης και παραμετρικής ανάλυσης μοντέλων σταθερής κατάστασης αλλά και δυναμικών. Όλες οι παραπάνω διεργασίες συνδέονται με το ένα και αυτό μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος γεγονός που το καθιστά ένα ιδιαίτερα ελαστικό και φιλικό προς την χρήση πρόγραμμα από την στιγμή που περιορίζεται η επαναληπτική εργασία πιθανής ανακατασκευής ενός μοντέλου ώστε να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί για διαφορετική μελέτη. Επίσης δίνεται η δυνατότητα χρήσης αποτελεσμάτων μιας διεργασίας για κάποια άλλη.

b. Καθαρή κατανοητή γλώσσα γραφής των μοντέλων. Η διατύπωση των σχέσεων των μοντέλων είναι παραπλήσια με την διατύπωση αυτών στο χαρτί γεγονός στο οποίο βοηθάει και η ονοματολογία των εντολών σύμφωνα με την πρακτική τους χρήση μέσα στο μοντέλο.

c. Πρόγραμμα γενικής μοντελοποίησης. Ο προσδιορισμός των μοντέλων γίνεται μόνο μέσω των σχέσεων τους. Επομένως, κάθε διεργασία η οποία μπορεί να περιγραφεί μέσω μαθηματικών σχέσεων μπορεί να μελετηθεί. Αυτή είναι όμως και μια από τις προκλήσεις της συγκεκριμένης εργασίας. Αρχικά, το συγκεκριμένο λογισμικό ήταν προσανατολισμένο για την εφαρμογή σε χημικές διεργασίες κυρίως και όχι μηχανολογικές. Εξαιτίας αυτού, μια κλίση προς την κατεύθυνση της καλύτερης αντιμετώπισης τέτοιων μοντέλων παρατηρείται. Αυτό φαίνεται και από την περιορισμένη βιβλιογραφία γύρω από την περιοχή των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής η οποία και πάλι γίνεται όχι στο συνολικό μοντέλο μιας ολόκληρης μονάδας αλλά σε συγκεκριμένες διεργασίες (Alie *et al.*, 2009), (Lawal *et al.*, 2009). Για τον λόγο αυτό μία από τις καινοτομίες της συγκεκριμένης εργασίας έγκειται και στην πρόκληση της δημιουργίας ενός μαθηματικού μοντέλου ολόκληρης μονάδας ηλεκτροπαραγωγής.

d. Δυνατότητα έκφρασης μαθηματικών σχέσεων κατανεμημένων λειτουργιών (*distributed variables*). Με αυτό τον τρόπο αποφεύγονται χοντροειδής προσεγγίσεις λεπτομερών διεργασιών στο χώρο.

e. Ιεραρχική δόμηση των μοντέλων. Χρησιμοποιεί αντικειμενοστραφή (*“object-oriented”*) αντιμετώπιση στην μοντελοποίηση της εκάστοτε διεργασίας. Αυτό

είναι και ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματά του γιατί συμβαδίζει και με την νοοτροπία των δικτύων του D.N.A. όπου τα επιμέρους στοιχεία του D.N.A. εδώ μπορούν να εκφραστούν μέσω των MODELS του gPROMS.

f. Δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει μεταξύ διαφόρων γραμμικών ή μη γραμμικών επιλυτών αλγεβρικών εξισώσεων, διαφορικών αλγεβρικών εξισώσεων, βελτιστοποίησης και παραμετρικής ανάλυσης σταθερής κατάστασης και δυναμικών προβλημάτων (gPROMS Advanced User Guide, 2004). Πέρα από αυτούς οι οποίοι ήδη χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα, υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης κάποιου εξωτερικού επιλύτη στο πρόγραμμα (gPROMS Programmers Guide, 2004)

g. Δυνατότητα παραμετροποίησης όλων των λυτών που χρησιμοποιούνται τόσο ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων τους αλλά και ως προς την ταχύτητά τους και την ευελιξία τους μέσω απλοποιήσεων στον τρόπο υπολογισμού κάποιων μεγεθών (π.χ. του Ιακωβιανού πίνακα) (gPROMS Introductory User Guide, 2004).

h. Δυνατότητά του για συνεργασία με ήδη γνωστά προγράμματα όπως το Excel, το Matlab και CFX αλλά και πληθώρα άλλων τα οποία δύναται να συγχρονιστούν με το gPROMS μέσω κατάλληλου προγραμματισμού δυναμικών βιβλιοθηκών (.dll). Έτσι δύναται η εισαγωγή είτε μοντέλων είτε δεδομένων από εξωτερικά προγράμματα αλλά και η εξαγωγή σε άλλα, με επιθυμητές δυνατότητες επεξεργασίας των αποτελεσμάτων του gPROMS.

Έχοντας παρουσιάσει τα πλεονεκτήματα του gPROMS ακολουθεί η παρουσίαση της μεθοδολογίας του gPROMS για την επίλυση των μοντέλων τόσο για την περίπτωση προσομοίωσης όσο και βελτιστοποίησης καθώς και οι αντίστοιχες παραλλαγές των προαναφερθέντων αλγόριθμων.

3.2.2.1. Μεθοδολογία προσομοίωσης

Η προσομοίωση αποτελεί τη βασικότερη από τις διεργασίες που εκτελεί το gPROMS. Αυτό σχετίζεται με την συνδεσιμότητα του μαθηματικού μοντέλου με όλες τις διεργασίες. Αν η προσομοίωση δεν είναι επιτυχής, η οποία είναι η διεργασία που ουσιαστικά εκφράζει αν είναι λειτουργικό το μοντέλο, αυτό συνεπάγεται ότι το

μαθηματικό μοντέλο δεν είναι σωστά δομημένο οπότε δεν μπορεί να δουλέψει και καμία από τις υπόλοιπες διεργασίες.

Όπως αναφέρθηκε, το gPROMS διαθέτει πληθώρα αριθμητικών λυτών γραμμικών, μη γραμμικών και διαφορικών εξισώσεων. Από αυτούς, ενδιαφέρον έχουν οι γραμμικοί και οι μη γραμμικοί από τη στιγμή που το μοντέλο θα προσομοιάσει σταθερή κατάσταση. Αυτοί οι οποίοι και χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται λεπτομερώς στην συνέχεια.

- **“MA28”**

Επιλέχθηκε έναντι του “MA48”, που ήταν η μοναδική εναλλακτική, ως πιο σταθερός σε περιπτώσεις εμφάνισης ασυνέχειας. Ο λύτης αυτός κάνει χρήση αλγόριθμου άμεσης κατώτερης-ανώτερης παραγοντοποίησης (LU Factorisation) το οποίο τον καθιστά κατάλληλο για μεγάλα, αραιά (sparse) μη συμμετρικά συστήματα γραμμικών εξισώσεων. Αποτελεί τον κατώτερο επιλύτη στην ιεραρχία δεδομένου ότι σε γραμμικές εξισώσεις καταλήγουν όλοι οι ανώτεροι αλγόριθμοι. Η πινακοποιημένη απόδοση ενός συστήματος εξισώσεων είναι η ευκολότερη οπότε και η επιλογή αλγόριθμου βασισμένο σε αυτόν τον τρόπο έκφρασης είναι λογική.

- **“SPARSE”**

Επιλέχθηκε λόγω της εφαρμογής μεθόδου τύπου Newton, όπου αντίστοιχη χρησιμοποιεί και το D.N.A. Τροποποιημένη μέθοδος χρησιμοποιείται και εδώ. Από την στιγμή που το gPROMS δύναται να κάνει εκτιμήσεις των μερικών παραγώγων των σχέσεων οι οποίες απαιτούνται από την μέθοδο Newton η οποία στην απλή μορφή της δεν μπορεί να υπολογίσει εύκολα πολύπλοκες μερικές παραγώγους. Για τον σκοπό αυτό γίνεται συνδυαστική χρήση προσέγγισης πεπερασμένων διαφορών και αναβαθμίσεων ελάχιστων μεταβολών τέμνουσας. Κατά κανόνα πάντως, το gPROMS στοχεύει στην αναλυτική απόδοση των μερικών παραγώγων όπου χρειάζεται να υπολογιστούν. Στην παρούσα έκδοση ο “SPARSE” είναι και ο μοναδικός αυτούσιος λύτης μη γραμμικών συστημάτων. Ένα μειονέκτημά του είναι η ανάγκη ύπαρξης αρχικής λύσης για την έναρξη της επίλυσης, αναμενόμενο λόγω της εφαρμογής μεθόδου Newton. Για την δημιουργία αυτής της αρχικής λύσης θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στο κεφάλαιο της προσομοίωσης.

- **“BDNLSOL”**

Τα συστήματα τα οποία λύνει ο “SPARSE” δημιουργούνται από τον “BDNLSOL” (**B**lock **D**ecomposition **N**on-**L**inear **S**OLver) ο οποίος είναι επίσης μη γραμμικός επιλύτης ο οποίος επαναπροσδιορίζει τις μη γραμμικές σχέσεις σε σύνολα πινάκων (blocks) τριγωνικής μορφής τα οποία έπειτα επιλύει ο “SPARSE”. Ο ίδιος ο “BDNLSOL” εμπεριέχει αλγόριθμο με τον οποίο μπορεί να διαχειριστεί τις συμμετρικές αντιστρεπτές ασυνέχειες. Η δυνατότητα περαιτέρω επεξεργασίας της αρχικής λύσης είναι μια αρκετά χρήσιμη ιδιότητα για την περίπτωση χρήσης του “SPARSE” σε περιπτώσεις δύσκολων αρχικών λύσεων.

- **“DASOLV”**

Ο λύτης “DASOLV” (**D**ifferential **A**lgebraic **S**OLver) είναι ο γενικός λύτης του προγράμματος για την επίλυση των διαφορικών – αλγεβρικών εξισώσεων που εμφανίζονται. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί ο “DASOLV” είναι ένας αλγόριθμος μεταβλητού χρονικού βήματος / μεταβλητής τάξης προς τα πίσω διαφοροποίησης (**B**ackward **D**ifferentiation **F**ormulae – BDF). Κάθε χρονικό βήμα προσαρμόζεται αυτόματα ώστε να ικανοποιείται το κριτήριο:

$$\sqrt{\frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} \left(\frac{\varepsilon_i}{\alpha + r|x_i|} \right)^2} \leq 1 \quad (3-40)$$

όπου n_d ο αριθμός των διαφορίσιμων μεταβλητών του προβλήματος, ε_i η εκτίμηση του λύτη για το τοπικό σφάλμα της αντίστοιχης διαφορίσιμης μεταβλητής, x_i η τρέχουσα τιμή της αντίστοιχης διαφορίσιμης μεταβλητής, α το απόλυτο σφάλμα ανοχής και r το σχετικό σφάλμα ανοχής.

Από τα παραπάνω είναι εμφανής η ιεραρχία των λυτών από τον πιο γενικό (“DASOLV”) στον πιο βασικό (“MA28”) για να είναι εφικτή η επίλυση οποιασδήποτε κατηγορίας προβλήματος. Έτσι, μέσα στους ανώτερους τάξης αλγόριθμους εμπεριέχονται οι γραμμικοί και μη λύτες οι οποίοι απαιτούνται για την λειτουργία τους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν γίνεται χρήση του BDF αλγόριθμου του “DASOLV” επειδή το πρόβλημα είναι σταθερής κατάστασης συνεπώς δεν υπάρχουν διαφορικές εξισώσεις.

3.2.2.2. Μεθοδολογία βελτιστοποίησης

Όπως και στην περίπτωση της προσομοίωσης, αντίστοιχα και στην βελτιστοποίηση υπάρχει ιεράρχιση μεταξύ των λύτων. Ξεκινώντας από τον πιο ειδικό, στη συγκεκριμένη περίπτωση ο λύτης μη γραμμικών προβλημάτων και καταλήγοντας στον πιο γενικό για την επίλυση των δυναμικών προβλημάτων, όπου ο κατώτερος λύτης υπάγεται στον ανώτερο. Συνεχίζοντας, παρουσιάζονται οι λύτες που εμφανίζονται για την βελτιστοποίηση της συγκεκριμένης περίπτωσης.

- **“SRQP”**

Είναι ο λύτης του μη γραμμικού προβλήματος βελτιστοποίησης και αυτός ο οποίος εφαρμόζεται αποκλειστικά στη συγκεκριμένη περίπτωση, δεδομένου ότι το μοντέλο είναι σταθερής κατάστασης. Εμπεριέχει αλγόριθμο μειωμένου ακολουθιακού δευτεροβάθμιου προγραμματισμού (Sequential Quadratic Programming – SQP) για την επίλυση. Ο λύτης δίνει την δυνατότητα στον χρήστη διαβάθμισης (*scaling*) των τιμών των μεταβλητών βελτιστοποίησης για ενδεχόμενη μεγάλη απόκλιση τάξης μεγέθους των τιμών μεταξύ τους. Η γενική μαθηματική μορφή αυτής της διαβάθμισης είναι:

$$\tilde{q}_j = \frac{q_j - c_j}{d_j} \quad (3-41)$$

όπου q_j είναι η j αρχική μεταβλητή βελτιστοποίησης, \tilde{q}_j είναι η αντίστοιχη διαβαθμισμένη τιμή και οι σταθερές c_j και d_j οι οποίες προσδιορίζονται συναρτήσει των ορίων της μεταβλητής q_j ανάλογα με την τιμή της διαβάθμισης που θα οριστεί από τον χρήστη.

Η βελτιστοποίηση θεωρείται επιτυχής όταν ο γραμμικός συνδυασμός των ανάδελτα της Λαγκρανζιανής είναι μικρότερος από μια επιτρεπτή τιμή ανοχής η οποία ορίζεται από τον χρήστη. Η συνάρτηση του γραμμικού αυτού συνδυασμού είναι:

$$\frac{1}{|\Phi^*| + 1.0} \left(\left| \sum_j \frac{\partial \Phi^*}{\partial q_j} \delta q_j \right| + \sum_{j \in \varepsilon} \lambda_j |x_j^* - \tilde{x}_j| + \sum_{j \in I} |\mu_j| \max(0, x_j^L - x_j^*, x_j^* - x_j^U) \right) + \sum_{j \in \varepsilon} |x_j^* - \tilde{x}_j| + \sum_{j \in I} \max(0, x_j^L - x_j^*, x_j^* - x_j^U) \leq e \quad (3-42)$$

όπου:

- q_j ... Η j μεταβλητή βελτιστοποίησης
- Φ^* ... Τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης
- δq_j ... Βήμα της μεταβλητής q_j στην τελευταία επανάληψη της βελτιστοποίησης
- x_j^* ... Τελική τιμή των μεταβλητών x_j του προβλήματος οι οποίες υπάρχουν σε περιορισμούς ισοτικών ή ανισοτικών στην βελτιστοποίηση, είτε είναι μεταβλητές βελτιστοποίησης είτε περιορισμοί.
- ε ... Το υποσύνολο των x_j που είναι ισοτικοί περιορισμοί
- I ... Το υποσύνολο των x_j που είναι ανισοτικοί περιορισμοί
- λ_j ... Πολλαπλασιαστές Lagrange για τους ισοτικούς περιορισμούς
- μ_j ... Πολλαπλασιαστές Lagrange για τους ανισοτικούς περιορισμούς

- **“CVP_SS”**

Για το γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, το gPROMS χρησιμοποιεί την προσέγγιση παραμετροποίησης του διανύσματος ελέγχου (Control Vector Parameterisation – CVP) συνδυάζοντας αλγόριθμο ενός σημείου σκόπευσης (Single-shooting – SS) ή πολλαπλών σημείων σκόπευσης (“Multi-shooting: - MS) (Ascher, 1998), (Spangelo, 1994) οι οποίοι αλγόριθμοι εμπεριέχονται στους γενικούς λύτες βελτιστοποίησης “CVP_SS” και “CVP_MS” αντίστοιχα. Οι χρονικά εξαρτημένες μεταβλητές θεωρούνται γραμμικά η σταθερά εξαρτημένες από την τιμή του χρόνου στο εκάστοτε προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Η ακριβής τιμή σε κάθε διάστημα, καθώς και η διάρκεια κάθε διαστήματος καθορίζονται από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Σε αυτή την περίπτωση, έγινε εκλογή του “CVP_SS” γιατί ο συγκεκριμένος δύναται και για την επίλυση στατικών προβλημάτων καθώς και ακέραιων μεταβλητών. Στον SS λύτη, ο χρονικός ορίζοντας είναι ενιαίος έναντι του “CVP_MS” ο οποίος τον διακρίτοποιεί σε επιμέρους τμήματα ελέγχου.

Και οι δύο λύτες βελτιστοποίησης, χρησιμοποιούν τον “DASOLV” για την επίλυση του υπάρχοντος DAE προβλήματος και τον υπολογισμό των αντίστοιχων εξισώσεων ευαισθησίας σε κάθε επανάληψη της βελτιστοποίησης και τον “SRQPD” για την επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος βελτιστοποίησης. Επειδή το συγκεκριμένο

πρόβλημα είναι μόνο μη γραμμικό, ο υπο-λύτης “SRDPD” είναι τελικά αυτός ο οποίος λύνει το πρόβλημα βελτιστοποίησης, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο μέσω του γενικού λύτη βελτιστοποίησης. Σε αυτό το σημείο, παρατηρείται ξανά η σύνδεση της προσομοίωσης με την βελτιστοποίηση. Η ίδια σύνδεση υπάρχει και με την εκτίμηση των παραμέτρων.

4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Στα επόμενα δύο κεφάλαια θα γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και της βελτιστοποίησης. Δεδομένου ότι μόνο το gPROMS είναι ικανό και για την εκτέλεση βελτιστοποίησης, στο κεφάλαιο της προσομοίωσης θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα και από τα δύο προγράμματα, ενώ για την βελτιστοποίηση μόνο από το gPROMS. Η παρουσίαση θα γίνει για κάθε κύκλωμα ξεχωριστά.

4.1. Κύκλωμα νερού – ατμού

Πρώτα από όλα έγινε η προσομοίωση του κυκλώματος νερού - ατμού στο D.N.A.. Από την προσομοίωση θα μπορέσει να γίνει και η τεκμηρίωση του D.N.A. μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων με τις τιμές που διατέθηκαν από την Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.) για το ισοζύγιο ενέργειας του κυκλώματος σε συνθήκες ισορροπίας στο μέγιστο φορτίο λειτουργίας των 300 MW για την συγκεκριμένη μονάδα. Από την στιγμή που το D.N.A. είναι αξιόπιστο, συνεπάγεται ότι το μαθηματικό του υπόβαθρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από κάποιο εναλλακτικό, γενικό λογισμικό μαθηματικής μοντελοποίησης για περαιτέρω μελέτη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το gPROMS είναι το εναλλακτικό λογισμικό στο οποίο θα γίνει ξανά προσομοίωση και βελτιστοποίηση της μονάδας.

Το μοντέλο το οποίο κατασκευάστηκε είναι αυτό το οποίο δίνεται στο σχέδιο της Εικόνας 2-1 και βασίστηκε στην φιλοσοφία την οποία ακολουθεί το D.N.A., δηλαδή στην αντικειμενοστραφή (object-oriented) κατασκευή ενός συστήματος, φιλοσοφία την οποία ακολουθεί και το gPROMS. Επειδή το ίδιο μοντέλο χρησιμοποιείται και από τα δύο προγράμματα, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα είναι κοινή, ώστε να είναι ευκολότερη η σύγκρισή τους με τα μετρημένα δεδομένα.

Για να μπορέσει να ξεκινήσει η προσομοίωση, απαιτούνται κάποιες αρχικές και οριακές συνθήκες οι οποίες θα είναι και τα δεδομένα εισόδου τα οποία θα παραμένουν και σταθερά λόγω του ότι γίνεται προσομοίωση σταθερής κατάστασης. Από αυτές, οι οριακές συνθήκες επιλέχθηκαν να είναι τα δεδομένα στην είσοδο του στροβίλου υψηλής πίεσης τα οποία είναι τα εξής:

- Πίεση : 170 bar
- Θερμοκρασία : 535° C

Οι παραπάνω είναι τιμές κοντά στις κρίσιμες επιτρεπτές τιμές που δίνει ο κατασκευαστής του στροβίλου υψηλής πίεσης ώστε να προστατευθούν τα μεταλλικά του μέρη. Επίσης στα δεδομένα εισόδου συμπεριλαμβάνεται και η παροχή του ατμού /νερού που ανακυκλοφορεί μέσα στο συγκεκριμένο κύκλωμα. Επιπλέον δίνεται η ισχύς της αντλίας συμπυκνώματος που βρίσκεται μετά τον συμπυκνωτή και η οποία είναι 420 kW, καθώς και οι τιμές των απομαστεύσεων των στροβίλων οι οποίες δίνονται στον Πίνακα 4-1:

Πίνακας 4-1 Παροχή απομάστευσης μετά τον στρόβιλο

Στρόβιλος απομάστευσης	Παροχή απομάστευσης [kg/s]
HP	-23.29
IP1	-15.41
IP2	-5.02
IP3	-14.91
IP4	-5.78
LP1	-10.55
LP2	-0.47

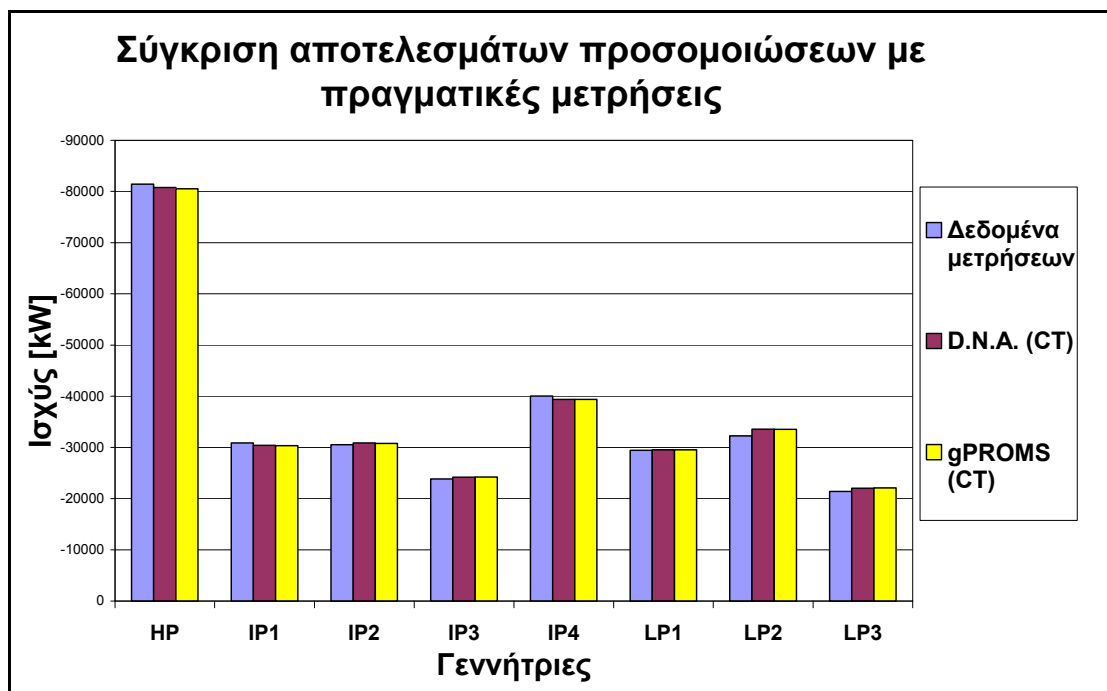
Όλα αυτά τα δεδομένα έχουν δοθεί από τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) και αφορούν τη λιγνιτική μονάδα IV του Α.Η.Σ. Καρδιάς για λειτουργία μέγιστου φορτίου 300 MW. Μέσα σε αυτές συμπεριλαμβάνονται και οι τιμές από πτώση πίεσης στους διάφορους απλούς εναλλάκτες οι οποίοι εμφανίζονται σε αυτό το κύκλωμα όπως προσδιορίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη γίνεται χρήση στροβίλων με εφαρμογή της σταθεράς στροβίλου και στην δεύτερη χρήση στροβίλων με εφαρμογή του πολυτροπικού βαθμού απόδοσης αντί της σταθεράς του στροβίλου.

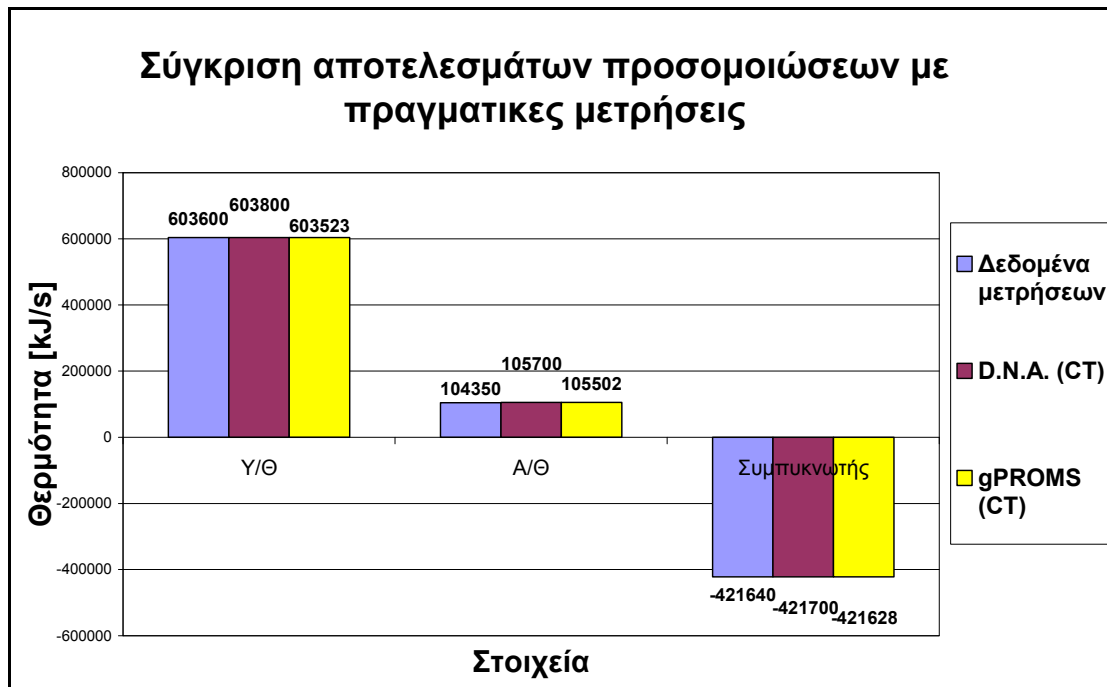
4.1.1. Σταθερά Στροβίλου CT

Όπως φαίνεται και στις Εικόνες 4-1 και 4-2 η προσομοίωση και των δύο προγραμμάτων οδήγησε σε ικανοποιητική συμφωνία με τα αποτελέσματα τα οποία μετρήθηκαν στην αίθουσα ελέγχου της μονάδας για τις σταθερές συνθήκες λειτουργίας του μέγιστου φορτίου όσον αφορά την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις βαθμίδες των γεννητριών για τις αντίστοιχες των στροβίλων, τα

προσδιδόμενα θερμικά φορτία των υπερθερμαντών – αναθερμαντών και τα αποδιδόμενα θερμικά φορτία του συμπυκνωτή αντίστοιχα.

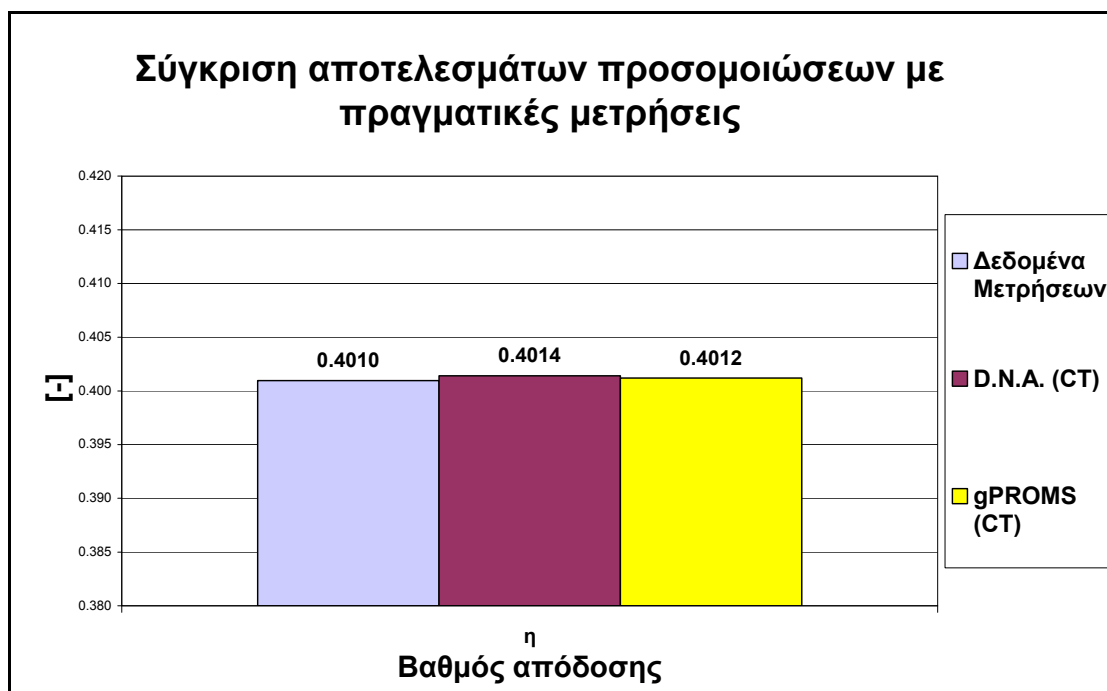


Εικόνα 4-1 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων με τα μετρημένα δεδομένα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις γεννήτριες.



Εικόνα 4-2 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων με τα μετρημένα δεδομένα για τα θερμικά φορτία

Φυσικό επακόλουθο ήταν και ο βαθμός απόδοσης να έχει τιμή παραπλήσια με αυτή των μετρημένων δεδομένων της μονάδας όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-3.



Εικόνα 4-3 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων με τα μετρημένα δεδομένα για τον βαθμό απόδοσης

Στον Πίνακα 4-2 δίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των επιμέρους στοιχείων της μονάδας και των δύο παραπάνω προγραμμάτων καθώς και οι αποκλίσεις που παρουσίασαν τα αποτελέσματα αυτά σε σύγκριση με τα μετρημένα, επί της εκατό, για τα παρακάτω μεγέθη:

- Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από τις γεννήτριες
- Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς από τις αντλίες
- Προσδιδόμενη θερμική ενέργεια στον υπερθερμαντήρα και τον αναθερμαντήρα από το καυσαέριο
- Θερμικές απώλειες από τον συμπυκνωτή
- Θερμικός βαθμός απόδοσης ο οποίος αποτελεί και την αντικειμενική συνάρτηση για την οποία θα γίνει η προσπάθεια βελτιστοποίησης.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνεται η πολύ καλή προσέγγιση των τιμών του gPROMS και αυτών του D.N.A. με τα δεδομένα των μετρήσεων του κέντρου ελέγχου. Σε καμία περίπτωση η απόκλιση δεν είναι μεγαλύτερη από 5%, ποσοστό ικανοποιητικό, ενώ για τον βαθμό απόδοσης, ο οποίος είναι και το μέγεθος το οποίο θα βελτιστοποιηθεί, η απόκλιση από την μετρημένη τιμή είναι 0,11% και 0.06% για το D.N.A. και το PROMS αντίστοιχα, γεγονός που δηλώνει την γενική πολύ καλή συμπεριφορά του μαθηματικού μοντέλου την μονάδας, καθώς και την πολύ καλή μεταφορά αυτού στο gPROMS. Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη απόκλιση

παρουσιάζεται στις τελευταίες 2 βαθμίδες του στροβίλου. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι στις τελευταίες βαθμίδες, λόγω και της αρκετά χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας, είναι πιθανή η εμφάνιση υγρού ατμού η οποία επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του στροβίλου. Αν εξαιρεθούν αυτά τα αποτελέσματα, σε κανένα άλλο σημείο δεν υπάρχει απόκλιση μεγαλύτερη ή ίση με 2% από τα μετρημένα δεδομένα.

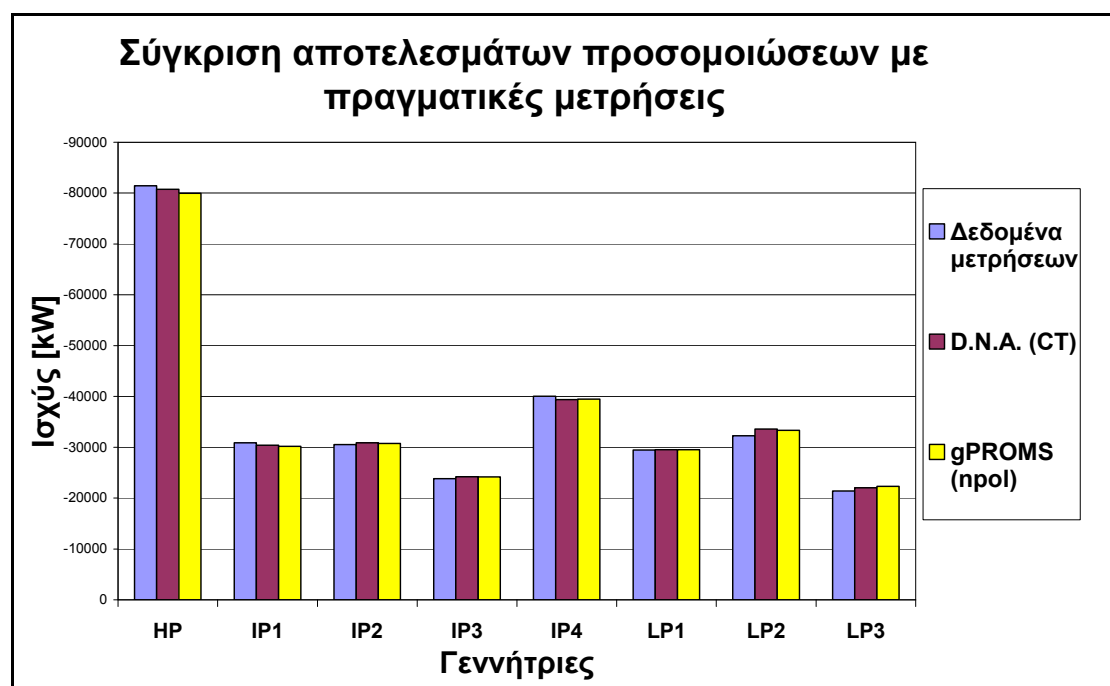
Πίνακας 4-2 Σύγκριση των μετρημένων δεδομένων με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του D.N.A. και του gPROMS για το σενάριο λειτουργίας των 300 MW.

Στοιχείο	Μετρημένα Δεδομένα	D.N.A.	gPROMS	Απόκλιση [%]	
				D.N.A	gPROMS
Γεννήτριες	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια [kW]				
GEN1	-81428	-80760	-80527	-0.82	-1.11
GEN2	-30873	-30400	-30353	-1.53	-1.68
GEN3	-30505	-30880	-30770	1.23	0.87
GEN4	-23849	-24190	-24245	1.43	1.66
GEN5	-40035	-39380	-39352	-1.64	-1.71
GEN6	-29468	-29530	-29515	0.21	0.16
GEN7	-32259	-33560	-33527	4.03	3.93
GEN8	-21390	-22040	-22117	3.04	3.40
Αντλίες	Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια [kW]				
Αντλία Κενού	421	420	420	-0.24	-0.24
Αντλία Κυκλ.	5525	5521	5522	-0.07	-0.05
Θερμαντές	Θερμική κατανάλωση [kW]				
S/H	603600	603800	603523	0.03	-0.01
R/H	104350	105700	105502	1.29	1.10
Συμπυκνωτής	Θερμικές Απώλειες [kJ/s]				
Cond.	-421640	-421700	-421628	0.01	0.00
Μονάδα	Θερμικός βαθμός απόδοσης [-]				
H	0.4010	0.4014	0.4012	0.11	0.06

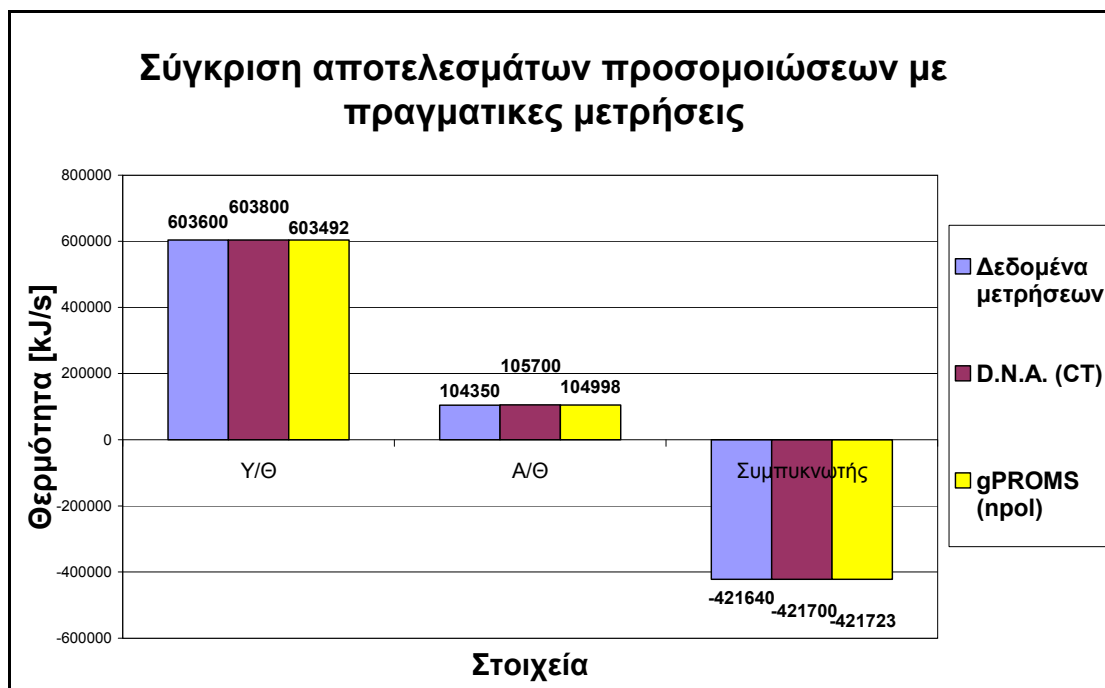
4.1.2. Πολυτροπικός Βαθμός Απόδοσης

Η προσομοίωση και σε αυτή την περίπτωση οδήγησε σε ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων τα οποία μετρήθηκαν στην αίθουσα ελέγχου της μονάδας και αυτών που υπολογίστηκαν από το gPROMS για τις σταθερές συνθήκες λειτουργίας του μέγιστου φορτίου όπως φαίνεται στις Εικόνες 4-4 και 4-5 για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις βαθμίδες των γεννητριών για τις αντίστοιχες των στρόβιλων, τα προσδιδόμενα θερμικά φορτία των υπερθερμαντών – αναθερμαντών και τα αποδιδόμενα θερμικά φορτία του συμπυκνωτή αντίστοιχα.

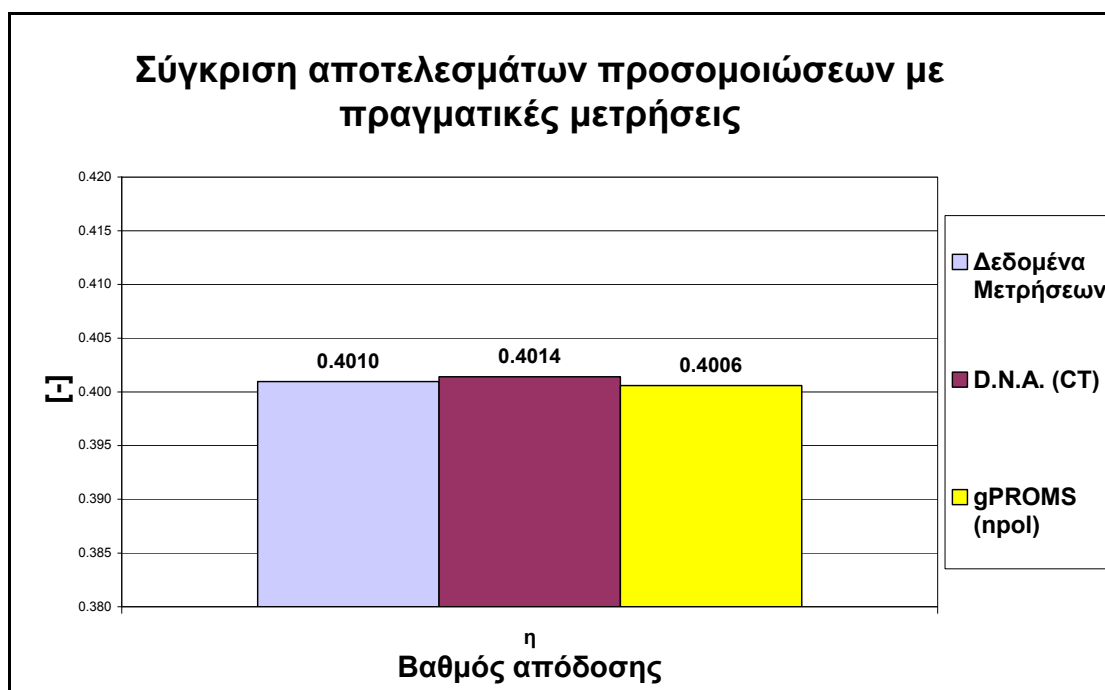
Αντίστοιχα και σε αυτή την περίπτωση, η ακρίβεια του υπολογισμού του βαθμού απόδοσης είναι ικανοποιητικά μεγάλη όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-6. Αντίστοιχης και καλύτερης ακρίβειας είναι τα αποτελέσματα και για τα υπόλοιπα στοιχεία τα οποία συνθέτουν το κύκλωμα του νερού ατμού. Όπως παρατηρείται δεν έχει αλλαχτεί το μοντέλο του D.N.A. με το αντίστοιχο με στρόβιλο πολυτροπικού βαθμού απόδοσης. Ο λόγος είναι ότι το D.N.A. χρησιμοποιεί πιο απλοποιημένο μοντέλο πολυτροπικού βαθμού απόδοσης και επιπλέον αποτέλεσε τη βάση για την δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου της μονάδας στο gPROMS και όχι αυτούσια απεικόνιση αυτού. Στη επόμενο κεφάλαιο θα γίνει εμφανής ο λόγος για τον οποίο αναζητήθηκε κάποιο εναλλακτικό μοντέλο έναντι αυτού της χαρακτηριστικής του στρόβιλου.



Εικόνα 4-4 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων με τα μετρημένα δεδομένα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις γεννήτριες.



Εικόνα 4-5 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων με τα μετρημένα δεδομένα για τα θερμικά φορτία



Εικόνα 4-6 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων με τα μετρημένα δεδομένα για τον βαθμό απόδοσης

Στον Πίνακα 4-3 δίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των επιμέρους στοιχείων της μονάδας και των δύο παραπάνω προγραμμάτων καθώς και οι αποκλίσεις που παρουσίασαν τα αποτελέσματα αυτά σε σύγκριση με τα μετρημένα για τα προαναφερθέντα μεγέθη του Πίνακα 4-2.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συμφωνούν αρκετά καλά με τα μετρημένα δεδομένα από την αίθουσα ελέγχου της μονάδας, δεδομένου ότι η σχετική απόκλιση των υπολογισμένων τιμών είναι μικρότερη του 4.39% για το gPROMS και του 3.04% με το D.N.A. για όλα τα στοιχεία του κυκλώματος. Η διαφορά στο σχετικό σφάλμα μεταξύ του gPROMS και του D.N.A. οφείλεται και για τις δύο περιπτώσεις στην διαφορετική παραμετροποίηση της επίλυσης του μοντέλου που χρησιμοποιούν τα δύο προγράμματα. Συγκεκριμένα το D.N.A. απαιτεί το πέρας 100 επαναλήψεων πριν την αναβάθμιση του Ιακωβιανού πίνακα, δίνει ανοχή σύγκλισης 10^{-10} και χρησιμοποιεί 4^{ης} τάξη BDF μέθοδο. Από την άλλη στο gPROMS, μεταβλήθηκαν μόνο ο αριθμός των επαναλήψεων πριν την αναβάθμιση του Ιακωβιανού πίνακα στις 3 έναντι καμίας που είναι η προκαθορισμένη τιμή στο gPROMS και η ανοχή σύγκλισης που ορίστηκε στο 10^{-7} έναντι της προκαθορισμένης 10^{-5} . Με τον τρόπο αυτό μπορεί να επιτευχθεί βελτίωση των αποτελεσμάτων με την μείωση της τιμής ανοχής αλλά και πιθανή βελτίωση στον χρόνο επίλυσης από την μείωση της απαίτησης σε υπολογισμούς των Ιακωβιανών πινάκων. Το δεύτερο μπορεί να επιτευχθεί σε περιπτώσεις όπου τα βήματα για την επίτευξη της επιπλέον ακρίβειας απαιτούν λιγότερο χρόνο από τον χρόνο ο οποίος εξοικονομήθηκε από την μείωση των υπολογισμών των Ιακωβιανών. Οι χρόνοι προσομοίωσης και για τα δύο προγράμματα κυμαίνονται στην περιοχή των δευτερολέπτων γεγονός που τα καθιστά εξίσου χρήσιμα για δοκιμές και άλλων περιπτώσεων σε μικρό χρονικό διάστημα.

Πίνακας 4-3 Σύγκριση των μετρημένων δεδομένων με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του D.N.A. και του gPROMS για το σενάριο λειτουργίας των 300 MW.

Στοιχείο	Μετρημένα Δεδομένα	D.N.A.	gPROMS	Απόκλιση [%]	
				D.N.A	gPROMS
Γεννήτριες	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια [kW]				
GEN1	-81428	-80760	-79977	-0.82	-1.78
GEN2	-30873	-30400	-30185	-1.53	-2.23
GEN3	-30505	-30880	-30773	1.23	0.88
GEN4	-23849	-24190	-24175	1.43	1.37
GEN5	-40035	-39380	-39459	-1.64	-1.44
GEN6	-29468	-29530	-29541	0.21	0.25
GEN7	-32259	-33560	-33344	4.03	3.36

GEN8	-21390	-22040	-22329	3.04	4.39
Αντλίες	Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια [kW]				
Αντλία Συμπ.	421	420	420	-0.24	-0.24
Αντλία Κυκλ.	5525	5521	5522	-0.07	-0.05
Θερμαντές	Θερμική κατανάλωση [kW]				
S/H	603600	603800	603492	0.03	-0.02
R/H	105350	105700	104998	1.29	0.62
Συμπυκνωτής	Heat Losses [kJ/s]				
Cond.	-421640	-421700	-421723	0.01	0.02
Μονάδα	Θερμικός βαθμός απόδοσης [-]				
n	0.4010	0.4014	0.4006	0.11	-0.09

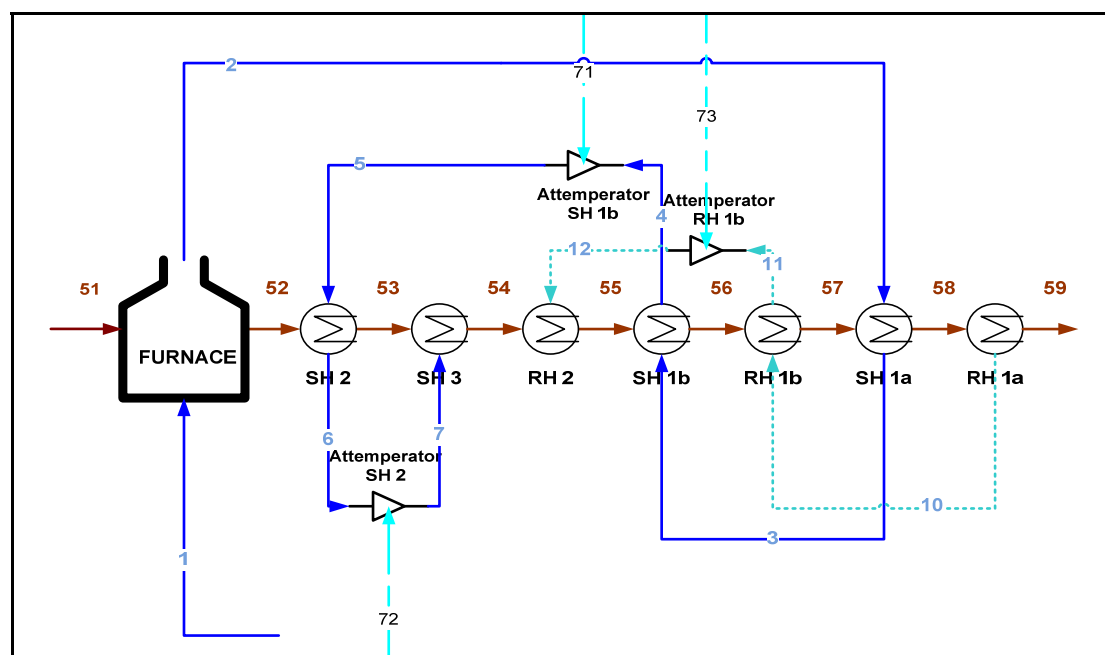
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μας οδήγησαν σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την εκλογή του προγράμματος βελτιστοποίησης. Αρχικά αποδείχθηκε ότι η μοντελοποίηση της μονάδας είναι εφικτή και τα αποτελέσματα από την προσομοίωση αυτού του μοντέλου είχαν ικανοποιητική σύγκλιση με τα αποτελέσματα από το κέντρο ελέγχου της μονάδας. Έπειτα αποδείχθηκε ότι η μεταφορά του αυτού μαθηματικού μοντέλου στο gPROMS το οποίο δεν είναι πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα επομένως οι επεμβάσεις είναι περιορισμένες σε σχέση με το D.N.A., έδωσε παρόμοια αποτελέσματα με αυτό. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω μαζί με το γεγονός ότι το gPROMS περιέχει αλγόριθμους βελτιστοποίησης για τα μοντέλα τα οποία μπορεί και προσομοιώνει, το καθιστά κατάλληλο για την μελέτη βελτιστοποίησης η οποία είναι και το βασικό κομμάτι αυτής της εργασίας.

4.2. Κύκλωμα Λέβητα – Υπερθερμαντών, Αναθερμαντών

Στην Εικόνα 4-7 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής του λέβητα όπως μοντελοποιήθηκε μέσα στο D.N.A. από τον Παπανικολάου (2008).

Τα καυσαέρια διασχίζουν στην διαδρομή τους από τον θάλαμο καύσης του λέβητα (FURNACE) με την εξής σειρά:

Υπερθερμαντής 2 (SH 2), υπερθερμαντής 3 (SH 3), αναθερμαντής 2 (RH 2), υπερθερμαντής 1b (SH 1b), αναθερμαντής 1b (RH 1b), υπερθερμαντής 1a (SH 1a) και αναθερμαντής 1a (RH 1a). Το νερό με την σειρά του, αφού ατμοποιηθεί στους αυλούς ανόδου του θαλάμου καύσης (FURNACE) πηγαίνει κατά σειρά στον υπερθερμαντή 1a (SH 1a), στον υπερθερμαντή 1b (SH 1b), στον υπερθερμαντή 2 (SH 2) και στον υπερθερμαντή 3 (SH 3). Από τον υπερθερμαντή 3 (SH 3) ο ατμός οδηγείται στον στρόβιλο υψηλής πίεσης και στη συνέχεια αφού περάσει τους αναθερμαντές 1a, 1b και 2 (RH 1a, RH 1b, RH 2) πηγαίνει στον στρόβιλο μέσης πίεσης.



Εικόνα 4-7 Διάγραμμα ροής προσομοίωσης λέβητα ατμοηλεκτρικού σταθμού (Παπανικολάου, 2008).

Μέσα στο θάλαμο καύσης, θερμότητα από τα αέρια καύσης μεταφέρεται στο νερό, που ρέει μέσα στους αυλούς ανόδου του θαλάμου καύσης. Η μετάδοση θερμότητας γίνεται μέσω μηχανισμών ακτινοβολίας και συναγωγής.

Στην εικόνα αυτή, παρατηρείται ότι υπάρχουν τρεις ψεκασμοί (ένας μετά τον SH 1b, ένας μετά τον SH 2 και ένας μετά τον RH 1b). Αυτοί είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την ψύξη του υπέρθερμου ατμού έτσι ώστε να μην ξεπεραστεί το όριο των 547°C που έχει τεθεί από τον κατασκευαστή του στρόβιλου. Η θερμοκρασία μπορεί να ξεπεράσει τα όρια σχεδιασμού εάν υπάρχουν επικαθίσεις στους σωλήνες των εναλλακτών.

Στο συγκεκριμένο σημείο να σημειωθεί ότι απλοποιήσεις χρειάστηκε να γίνουν στα μοντέλα και των δύο προγραμμάτων, διαφορετικές μεταξύ τους και περισσότερες στο

D.N.A. εξαιτίας των διαθέσιμων στοιχείων των βιβλιοθηκών. Αυτές παρουσιάζονται παρακάτω.

4.2.1. Απλοποιήσεις και παραδοχές των μοντέλων προσομοίωσης.

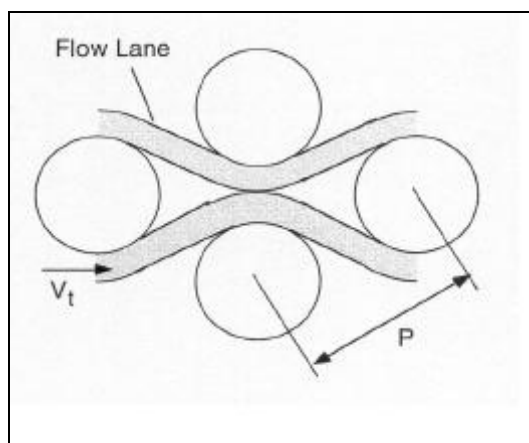
4.2.1.1. D.N.A.

Από το μοντέλο έχει παραληφθεί ο διαχωριστής μαζί με το κύκλωμα του αναμίκτη και της τροφοδοτικής αντλίας, όπου γίνεται η ανακυκλοφορία του εργαζόμενου μέσου, ενώ επιπρόσθετα θεωρείται ότι η έξοδος του θαλάμου καύσης είναι η είσοδος των υπέρθερμων, με ποιότητα του ατμού ίση με 1 ($x=1$). Στην πραγματικότητα, στην έξοδο του διαχωριστή προς τους υπέρθερμους, όπου ο ατμός είναι κορεσμένος, μέχρι και την είσοδο του υπέρθερμου 1a, λαμβάνει χώρα μία πτώση πίεσης 1 – 2 bar, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα τη πτώση της ποιότητας του ατμού από 1 σε 0.98. Επίσης έχει αντικατασταθεί ο υπέρθερμος Y/Θ1a με τη ρουτίνα SIM_BOIL η οποία απλώς προσδίδει προκαθορισμένη ενέργεια στο ρευστό. Οι δύο αυτές παραδοχές έγιναν διότι η ρουτίνα του υπέρθερμου δεν έχει τη δυνατότητα να διαχειρίζεται διαφασικές ροές. Οι σχέσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα για την περιγραφή της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή δεν ισχύουν στην περίπτωση διαφασικών ροών. Αντίστοιχα με τη ρουτίνα HEATNSK0 υποβιβάστηκε το θερμικό περιεχόμενο των καυσαερίων προκειμένου να εισαχθούν με τα σωστά χαρακτηριστικά στην επόμενη ρουτίνα υπέρθερμου. Διευκρινίζεται ότι παρά την παραδοχή που έγινε για μονοφασική ροή στην είσοδο του YΘ1a, δεν ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθεί η ρουτίνα του υπέρθερμου διότι σε εκείνο το σημείο η διαστασιολόγηση του υπέρθερμου προβλέπει αυτό το ποσοστό υγρασίας. Γι' αυτό εξάλλου αν παρατηρήσει κανείς τα δεδομένα θα δει ότι η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου κατά τη διέλευση από αυτόν τον υπέρθερμο αυξάνει μόνο 8 °C (Σημειώνεται πως ο YΘ1β έχει ακριβώς την ίδια δομή η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου κατά τη διέλευση του μέσα από αυτόν ανεβαίνει 73 °C). Προκειμένου λοιπόν να συμπεριληφθεί η ρουτίνα του υπέρθερμου στο σημείο αυτό θα έπρεπε να υπολογιστούν εκ νέου οι διαστάσεις του υπέρθερμου.

Ένα ακόμα πρόβλημα το οποίο παρουσιάστηκε και χρειάστηκε να γίνει παραδοχή σχετίζεται με τη διάταξη των αυλών του υπέρθερμου 1b. Οι αυλοί σε αυτόν τον υπέρθερμο δεν είναι διατεταγμένοι σε σειρά όπως στην Εικόνα 3-6, αλλά σε εναλλασσόμενη διάταξη όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-8 (Παπανικολάου, 2008). Η

ρουτίνα όπως έχει προγραμματιστεί, δεν προβλέπει μία τέτοια διάταξη. Εναλλακτικά ζητήθηκε από το πρόγραμμα να υπολογιστούν ισοδύναμες διαστάσεις για έναν εναλλάκτη, όπου οι αυλοί είναι σε σειρά και ο οποίος θα έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει το ίδιο ποσό ενέργειας στον ατμό με αυτό που μεταφέρεται στην πραγματικότητα. Αυτό ουσιαστικά επετεύχθη με μεταβολή του πλάτους και του βάθους του καναλιού μεταβάλλοντας κατ' αυτόν τον τρόπο το μέσο μήκος κύματος L και αυξάνοντας ουσιαστικά το ποσό θερμότητας το οποίο μεταφέρεται με ακτινοβολία. Επίσης οι απώλειες ορίστηκαν να είναι μηδενικές.

Στα τμήματα των υπέρθερμων και των ανάθερμων δεν λαμβάνεται υπόψη η μεταφορά θερμότητας προς τους αυλούς ανόδου, καθώς κάτι τέτοιο προϋποθέτει την ύπαρξη τριών ροών σε μία ρουτίνα, το οποίο δεν υποστηρίζεται από το πρόγραμμα.



Εικόνα 4-8 Διάταξη αυλών στον υπέρθερμο SH1b (Παπανικολάου, 2008).

Μία ακόμα απλοποίηση η οποία έγινε στα πλαίσια της μοντελοποίησης σχετίζεται με τη θερμική αγωγιμότητα των αυλών. Κάθε υπέρθερμος αποτελείται από δύο έως τρία διαφορετικά υλικά. Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί από το πρόγραμμα. Οι τιμές λοιπόν της θερμικής αγωγιμότητας επιλέχθηκαν προσεγγιστικά, εντός του εύρους τιμών που ισχύουν για κάθε υλικό.

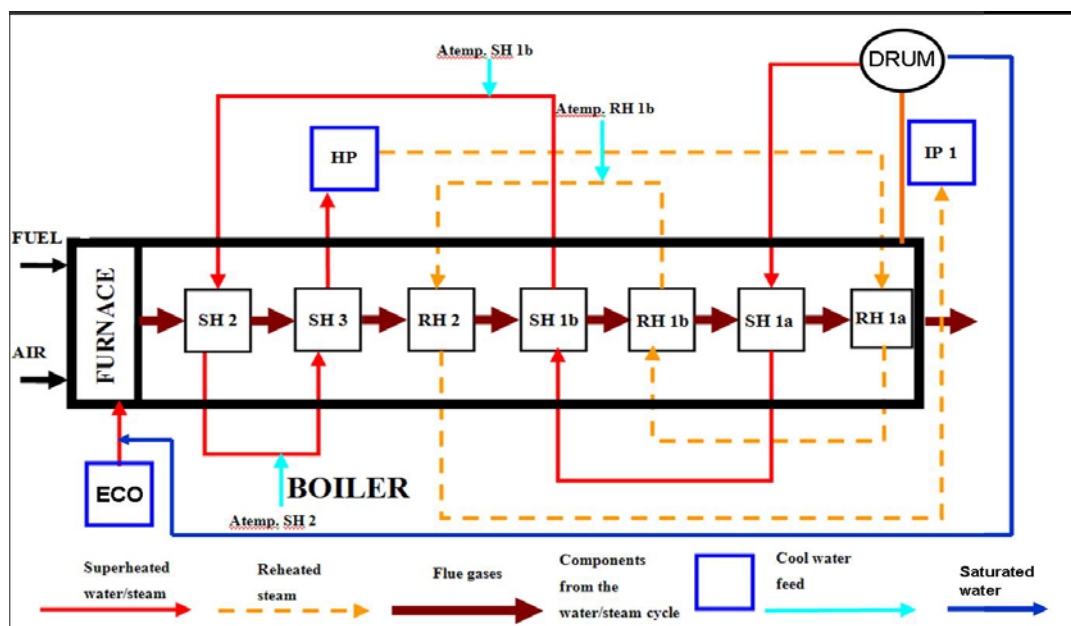
Όσο αφορά στις συνθήκες ρύπανσης του ατμοπαραγωγού, έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές. Καταρχήν τα μοντέλα του υπέρθερμου και του ανάθερμου διαχειρίζονται την αύξηση της ρύπανσης ακτινικά, ομοιόμορφα και σε όλο το μήκος των αυλών. Επίσης δε λαμβάνεται υπόψη η υπερθέρμανση λόγω της ανακυκλοφορίας των καυσαερίων στο εσωτερικό των υπέρθερμων, η οποία λαμβάνει χώρα σε συνθήκες έντονης ρύπανσης.

Σημειώνεται πως η σύσταση και η θερμοκρασία των καυσαερίων υπολογίστηκαν με τη χρήση της ρουτίνας SOLIDBURNER η οποία προσομοιώνει τη λειτουργία των καυστήρων στερεών καυσίμων και οι σχέσεις οι οποίες την διέπουν παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 2. Τα αποτελέσματα τα οποία έδινε η ρουτίνα αυτή σε σχέση με αυτά των μετρήσεων του σταθμού παρουσιάζουν αποδεκτή απόκλιση της τάξης του 2%, οπότε και θεωρήθηκαν έγκυρα για χρήση. Η ρουτίνα SOLIDBURNER, στο σενάριο προσομοίωσής της στην σταθερή κατάσταση λειτουργίας και με βάση τις παραμέτρους σχεδιασμού της μονάδας, δεν παρουσίαζε πρόβλημα. Εντούτοις η ρουτίνα αυτή σε συνεργασία με το υπόλοιπο μοντέλο δημιούργησε προβλήματα στην προσομοίωση του κυκλώματος καθιστώντας την μη εφικτή. Από τη διερεύνηση που έγινε από τον Παπανικολάου (2008), εκτιμάται πως αυτή η συμπεριφορά του προγράμματος οφείλεται στο τελικό σύστημα των εξισώσεων που δημιουργούταν, όπου λόγω της πεπλεγμένης σχέσης μεταξύ των εξισώσεων της ρουτίνας SOLIDBURNER και των υπόλοιπων εξισώσεων, ήταν αδύνατος ο υπολογισμός του αντίστροφου μητρώου στο τελικό σύστημα γραμμικών εξισώσεων που προέκυπτε. Η επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος θα απαιτούσε παρέμβαση στον κώδικα του λύτη του προγράμματος, κάτι το οποίο δεν είναι στο πλαίσιο της εργασίας αυτής. Ωστόσο εν τέλει, η ρουτίνα συμπεριλήφθηκε στη μοντελοποίηση με τον εξής τρόπο. Τα τελικά αποτελέσματα της ρουτίνας SOLIDBURNER χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδο στο υπόλοιπο μοντέλο, χωρίς έτσι να επηρεάζεται το τελικό σύστημα εξισώσεων και η φυσική συμπεριφορά του μοντέλου.

Τέλος για όλα τα σενάρια τα οποία προσομοιώθηκαν, η παροχή του καυσίμου θεωρήθηκε σταθερή.

4.2.1.2. gPROMS

Στην Εικόνα 4-9 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής για το μοντέλο του λέβητα και των υπερθερμαντών, αναθερμαντών το οποίο και θα μοντελοποιηθεί για να προσομοιωθεί τελικά από το gPROMS.



Εικόνα 4-9 Διάγραμμα ροής λέβητα – υπερθερμαντών, αναθερμαντών για μοντελοποίηση και προσομοίωση στο gPROMS.

Οι διαφορές των δύο μοντέλων έγκειται στην προσθήκη διαχωριστή (DRUM) κορεσμένου νερού και ατμού για τον υγρό ατμό ο οποίος έρχεται από τα υδροτοιχώματα του λέβητα καθώς και στην προσθήκη των αυτών υδροτοιχωμάτων μετά τον θάλαμο καύσης οι οποίοι ανεβαίνουν παράλληλα με τους υπερθερμαντές και αναθερμαντές για την περαιτέρω εξάτμιση του υγρού ατμού μετά τα υδροτοιχώματα στον θάλαμο καύσης. Με αυτές τις αλλαγές δεν χρειάζεται πλέον να γίνει υπόθεση για τον υπερθερμαντή 1a (SH 1a) από τη στιγμή που πλέον σε αυτόν θα πηγαίνει κατευθείαν κορεσμένος ατμός από τον διαχωριστή, οπότε θα χρησιμοποιηθεί μοντέλο υπερθερμαντή.

Μια άλλη αλλαγή έχει να κάνει με την υπόθεση απωλειών στους υπερθερμαντές. Οι υποθέσεις αυτές γίνονταν με σκοπό να δικαιολογήσουν την θερμότητα την οποία υπό κανονικές συνθήκες θα πήγαινε στον υγρό ατμό από τα υδροτοιχώματα τα οποία βρίσκονται στο αντίστοιχο ύψος του εκάστοτε υπερθερμαντή και αναθερμαντή.

Επίσης, λόγω της εισαγωγής του διαχωριστή (DRUM), το κορεσμένο νερό το οποίο βγαίνει από τον διαχωριστή αναμιγνύεται μέσω ενός αναμίκτη με το θερμό νερό το προερχόμενο από τον οικονομητήρα, επομένως η συνολική παροχή θερμού νερού η οποία εισέρχεται μέσα στον θάλαμο καύσης (FURNACE) είναι μεγαλύτερη κατά την παροχή η οποία ανακυκλοφορεί λόγω του διαχωριστή.

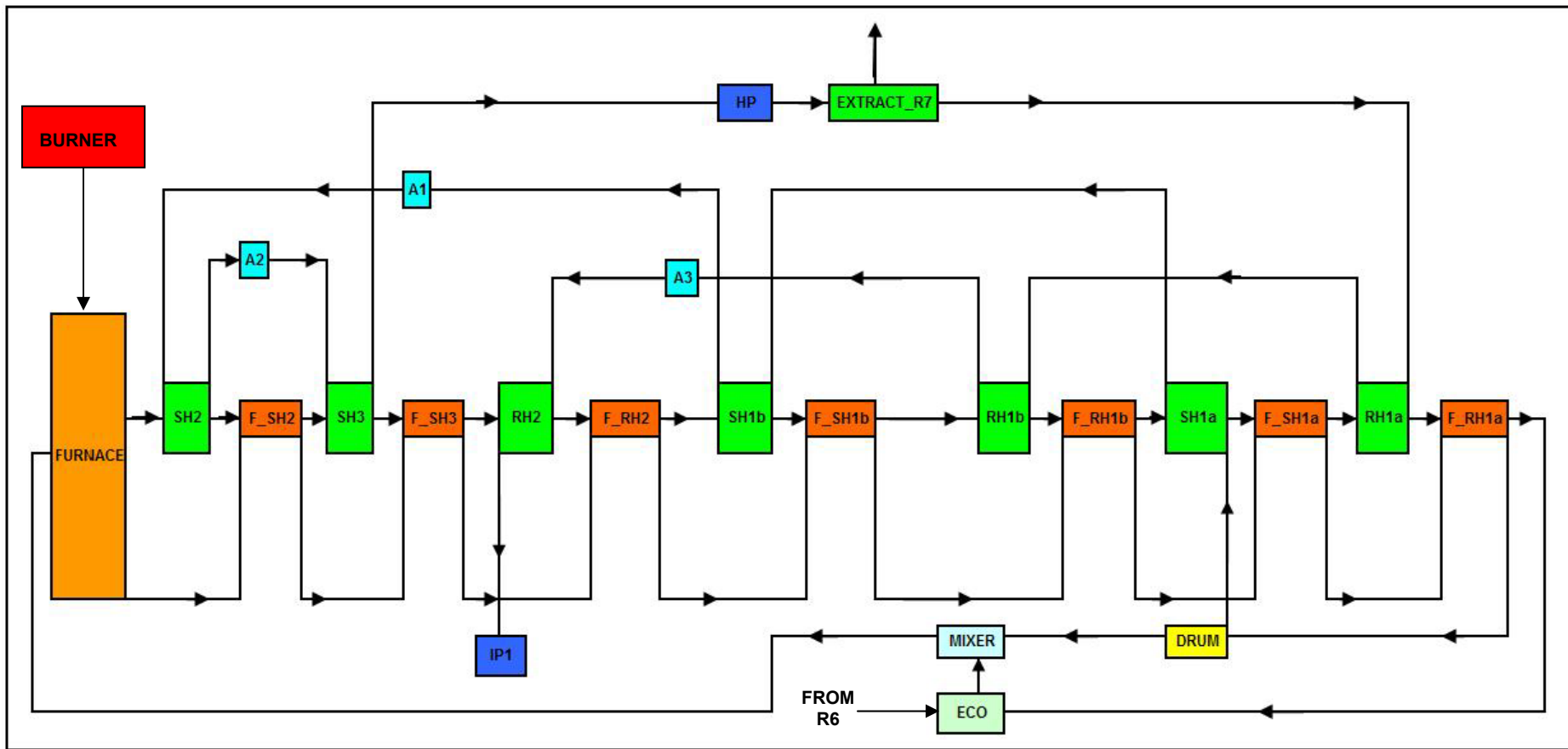
Τέλος, προστέθηκε στο κύκλωμα μοντέλο καυστήρα (BURN) το οποίο ήταν βασισμένο στο μοντέλο του SOLIDBURNER (του D.N.A.). Το συγκεκριμένο

μοντέλο συνεργάστηκε ικανοποιητικά με το υπόλοιπο μοντέλο του κυκλώματος του λέβητα.

Πέρα από τις παραπάνω αλλαγές σε σχέση με το μοντέλο του D.N.A., οι υπόλοιπες παραδοχές για το μοντέλο του gPROMS είναι ίδιες με αυτές για το μοντέλο του D.N.A.

Στην Εικόνα **4-10** δίνεται το πραγματικό διάγραμμα ροής του μοντέλου του λέβητα της Εικόνας **4-9** όπως αυτό προσομοιώθηκε από το gPROMS με όλα τα στοιχεία εμφανή, εκτός τον καυστήρα ο οποίος βρίσκεται μεταξύ εισόδου καυσίμου και αέρα με τον λέβητα.

Οι διαφοροποιήσεις των απλοποιήσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω εμφανίζονται μεταξύ του μοντέλου προσομοίωσης του D.N.A. και του τελικού μοντέλου προς προσομοίωση του gPROMS. Αρχικά ωστόσο, η κατασκευή του απλοποιημένου μοντέλου του D.N.A. έγινε και στο gPROMS. Στόχος αυτής της προσομοίωσης ήταν να γίνει η τεκμηρίωση της σωστής λειτουργίας και στο PROMS των μοντέλων των επιμέρους στοιχείων τα οποία συνθέτουν το κύκλωμα του λέβητα με τους υπερθερμαντές και αναθερμαντές. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μοντέλου που σχεδιάστηκε στο D.N.A. από τον Παπανικολάου (2008). Τα αποτελέσματα είναι αυτά της προσομοίωσης με το D.N.A. και αυτά της προσομοίωσης με το gPROMS, αφού έγινε η κωδικοποίηση στο gPROMS των μαθηματικών μοντέλων του κυκλώματος του λέβητα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο **2**. Στην συνέχεια παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του πλήρους μοντέλου του κυκλώματος του λέβητα της Εικόνας **4-10** στο gPROMS.



Εικόνα 4-10 Διάγραμμα ροής τελικού μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης του κυκλώματος του λέβητα της μονάδας.

4.2.2. Προσομοίωση μοντέλου D.N.A.

Θα παρουσιαστούν αρχικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο D.N.A. σε σύγκριση με τα πραγματικά δεδομένα και θα ακολουθήσει παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στο gPROMS τα οποία και θα συγκριθούν με αυτά του D.N.A. από τη στιγμή που θα είναι ικανοποιητικά και δεδομένου ότι τα επιμέρους μοντέλα βασίζονται σε αυτά του D.N.A. οπότε η τεκμηρίωση θα γίνει με βάση τα αποτελέσματα της πρώτης προσομοίωσης. Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι το απλοποιημένο μοντέλο του D.N.A. κάνει χρήση στροβίλου με την σταθερά του στροβίλου CT και όχι με τον πολυτροπικό βαθμό απόδοσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μόνο το μοντέλο της σταθεράς του στροβίλου είναι διαθέσιμο στις βιβλιοθήκες του D.N.A.. Επομένως χρήση αυτού έγινε και στο gPROMS.

4.2.2.1. D.N.A.

Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό το μαθηματικό μοντέλο λειτουργεί με την υπόθεση σταθερής κατάστασης οπότε όλες οι ροές μάζας είναι σταθερές. Αυτές οι ροές έχουν την τιμή των 574.96 kg/s για τα καυσαέρια και 248.05 kg/s για το νερό - ατμό στην είσοδο του θαλάμου καύσης. Η ροή μάζας του ατμού μετά την απομάστευση από το στρόβιλο υψηλής πίεσης είναι επίσης σταθερή και ίση με - 232.22 kg/s μαζί με τις πιέσεις και θερμοκρασίες που δίνονται για την είσοδο του λέβητα στον Πίνακα 4-4. Τα παραπάνω στοιχεία μαζί με τις θερμικές απώλειες από τους εναλλάκτες και τις ροές μάζας και θερμοκρασίας από τους ψεκασμούς ήταν επίσης απαραίτητα. Τα στοιχεία αυτά δίνονται στον Πίνακα 4-4.

Πίνακας 4-4 Δεδομένα που τέθηκαν για την προσομοίωση του λέβητα.

Θερμικές απώλειες εναλλακτών θερμότητας (kW)						
Y/Θ 1 ^α	Y/Θ 1β	Y/Θ 2	Y/Θ 3	A/Θ 1α	A/Θ 1β	A/Θ 2
-58490	0	-6802	-6515	-2841	-1527.56	-6979.83
Θερμοκρασία νερού ψύξης (°C) και ροή μάζας (kg/s)						
Ψεκασμός Y/Θ 1β		Ψεκασμός Y/Θ 2		Ψεκασμός A/Θ 2		
Ροή μάζας (kg/s)	Θερμ. (°C)	Ροή μάζας (kg/s)	Θερμ. (°C)	Ροή μάζας (kg/s)	Θερμ. (°C)	
9.61	152.63	6.22	275.05	7.78	132.61	

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο D.N.A. του κυκλώματος λέβητα – υπερθερμαντών, όσον αφορά πίεση και θερμοκρασία του νερού-ατμού και θερμοκρασία των καυσαερίων των επιμέρους στοιχείων του κυκλώματος, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-5 μαζί με τις σχετικές αποκλίσεις επί τις εκατό των τιμών της προσομοίωσης με το D.N.A. από τις αντίστοιχες μετρημένες από το κέντρο ελέγχου της μονάδας. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συμφωνούν αρκετά καλά με τα μετρημένα της μονάδας με μέγιστη απόκλιση αυτή του 3.65% που παρουσιάζεται για την θερμοκρασία εισόδου του νερού στο λέβητα. Η απόκλιση αυτή μπορεί να δικαιολογηθεί και από το γεγονός ότι το συγκεκριμένο μοντέλο είναι πιο απλοποιημένο από το τελικό το οποίο και θα προσομοιωθεί στο gPROMS, λόγω των περιορισμών των μοντέλων του D.N.A. οι οποίοι οδήγησαν στις απλοποιήσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Επομένως έγινε μια μικρή αναθεώρηση των τιμών στην είσοδο και κυρίως της θερμοκρασίας ώστε τα υπόλοιπα στοιχεία να δώσουν σωστά αποτελέσματα μετά τον απλοποιημένο SH1a.

Πίνακας 4-5 Αποτελέσματα προσομοίωσης λέβητα με το D.N.A. και σύγκριση με μετρήσεις από την Δ.Ε.Η. για το σενάριο λειτουργίας του λέβητα μέγιστου φορτίου 300 MW.

Στοιχεία	Μετρημένα Δεδομένα			Δεδομένα προσομοίωσης			Σχετική Διαφορά [%]		
	Θερμ. Καυσ. [°C]	Θερμ. ατμού [°C]	Πίεση ατμού [bar]	Θερμ. Καυσ. [°C]	Θερμ. ατμού [°C]	Πίεση ατμού [bar]	Θερμ. Καυσ. [°C]	Θερμ. ατμού [°C]	Πίεση ατμού [bar]
	Τιμές Εισόδου								
Furnace	1197	332.11	196.13	1197	320	196	0.00	-3.65	-0.07
S/H 1a		362	188.8		360.74	189.48		-0.35	0.36
S/H 1b		370	186.7		369.99	186.7		0.00	0.00
Atte. S/H 1b		443	183.2		445.13	183.35		0.48	0.08
S/H 2		422	181.7		422.95	183.35		0.23	0.91
Atte. S/H 2		510	177.9		509.99	177.9		0.00	0.00
S/H 3		494	176.6		494	177.9		0.00	0.74
R/H 1a		346	44.8		349.32	44.75		0.96	-0.11
R/H 1b		376	44.5		376	44.5		0.00	0.00
Atte. R/H 1b		470	44		471.19	44		0.25	0.00
R/H 2		431	43.8		432.79	44		0.42	0.46

Τιμές Εξόδου									
Furnace	973	359.69	190	973.1	360.74	189.48	0.01	0.29	-0.27
S/H 1a	442	370	186.7	442	369.99	186.7	0.00	0.00	0.00
S/H 1b	590	443	183.2	590	445.13	183.35	0.00	0.48	0.08
Atte. S/H 1b		422	181.7		422.95	183.35		0.23	0.91
S/H 2	866	510	177.9	866.5	509.99	177.9	0.05	0.00	0.00
Atte. S/H 2		494	176.6		494	177.9		0.00	0.74
S/H 3	812	540	172.5	811.9	540	172.5	-0.01	0.00	0.00
R/H 1a	417	376	44.5	416.9	376	44.5	-0.03	0.00	0.00
R/H 1b	520	470	44	520	471.19	44	0.00	0.25	0.00
Atte. R/H 1b		431	43.8		432.79	44		0.42	0.46
R/H 2	728	540	43.1	728	539.74	42.6	0.00	-0.05	-1.16

Όπως είχε αναφερθεί, το μοντέλο του λέβητα έχει την δυνατότητα να χωριστεί σε επιμέρους οριζόντια τμήματα όπου για κάθε ένα από αυτά, επικρατούν διαφορετικές θερμοδυναμικές συνθήκες και η έξοδος του ενός κομματιού είναι η είσοδος του επόμενου μέσα από το ίδιο μοντέλο και χωρίς την ανάγκη καθορισμού καινούργιου μοντέλου από την αρχή. Με αυτό τον τρόπο, οι αλλαγές στις διάφορες μεταβλητές οι οποίες εξαρτώνται από τις θερμοδυναμικές συνθήκες θα περιγράφονται λεπτομερέστερα. Σε αυτό το σημείο όμως η χρήση του μοντέλου έγινε με την θεώρηση ενός ενιαίου τμήματος. Ο λόγος που οδήγησε σε αυτή την απλοποίηση είναι η κατανομή του καυσαερίου. Στην είσοδο κάθε επιπέδου, η κατανομή αλλάζει. Όμως ο τρόπος με τον οποίο αλλάζει δεν είναι απλός γιατί επηρεάζεται τόσο από την κινητική αντίδραση της καύσης όσο και από την δυναμική των ρευστών μεταξύ του εναπομένου αέρα και των καυσαερίων που δημιουργούνται. Επομένως, για να είναι δυνατή η χρήση του ίδιου μοντέλου και σε άλλα φορτία θεωρώντας κάποια γνωστή κατανομή, δεν είναι επιτρεπτή η χρήση πολλαπλών διαμερισμάτων στο μοντέλο του λέβητα. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα είναι ακόμα ικανοποιητικά.

4.2.2.2. gPROMS

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το gPROMS δεν διαθέτει έτοιμες βιβλιοθήκες κανενός μαθηματικού μοντέλου είτε των στοιχείων τα οποία συνθέτουν την μονάδα

είτε των μεθόδων υπολογισμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων είτε των ιδιοτήτων μεταφοράς θερμότητας των καυσαερίων και του νερού – ατμού. Στο κύκλωμα του νερού – ατμού χρειάζονταν μόνο οι θερμοφυσικές ιδιότητες του νερού οι οποίες παρέχονταν από την χρήση εξωτερικού προγράμματος (FOREIGN OBJECT) το οποίο απαιτεί μόνο την χρήση εισόδου και δίνει την έξοδο χωρίς να γίνεται επεξεργασία της όλης διαδικασίας υπολογισμού. Για το κύκλωμα του λέβητα με τους υπερθερμαντές και αναθερμαντές ωστόσο απαιτείται επιπλέον και ο υπολογισμός των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του καυσίμου και των καυσαερίων καθώς και των ιδιοτήτων μετάδοσης θερμότητας τόσο του νερού – ατμού εντός των σωληνώσεων όσο και του καυσαερίου εκτός αυτών. Σε αυτή την φάση και οι μεθοδολογίες αυτές προσομοιώθηκαν στο gPROMS, μετατρέποντας τις αντίστοιχες υπο-ρουτίνες του κώδικα FORTRAN σε μαθηματικά μοντέλα του gPROMS.

Σε αυτό το σημείο θα γίνει μια αναφορά ως προς τον τρόπο με τον οποίο έγινε η μεταφορά του κώδικα για την προσομοίωση του κυκλώματος στο gPROMS λόγω της διαφορετικής λογικής επίλυσης των δύο προγραμμάτων.

Επειδή το D.N.A. βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN 77, η σειρά των πράξεων διαδέχεται η μία την άλλη και μία μεταβλητή μπορεί να επαναπροσδιοριστεί μέσα στην ίδια ρουτίνα μέσω πράξεων οι οποίες θα ακολουθήσουν του αρχικού υπολογισμού της, άσχετα από την επαναληπτική διαδικασία την οποία ακολουθεί ο λύτης για την επίτευξη λύσης στην οποία υπολογίζονται ξανά όλες οι μεταβλητές. Αν και το gPROMS χρησιμοποιεί εντολές παρόμοιες με της FORTRAN, αυτές αντιμετωπίζονται διαφορετικά. Επίσης δεν ισχύει ο επαναπροσδιορισμός μιας μεταβλητής μέσα στο ίδιο μοντέλο, πέρα από εντολές οι οποίες εμφανίζονται στο κομμάτι του προγραμματισμού της προσομοίωσης (SCHEDULE) το οποίο όμως παραλείπεται στην βελτιστοποίηση οπότε θα καθιστούσε το μοντέλο μη λειτουργικό.

Δύο είναι τα τινά τα οποία συμβαίνουν από τις παραπάνω διαφοροποιήσεις των προγραμμάτων:

1. Αυξάνει το μέγεθος των μεταβλητών του μοντέλου λόγω της ανάγκης μετατροπής μονοδιάστατων μεταβλητών σε διανυσματικές όπου εμφανίζονται αυτές μέσα σε επαναληπτικές διαδικασίες μέσα στο μαθηματικό μοντέλο ενός στοιχείου (DO loops)

2. Ανάγκη ξεχωριστής προσομοίωσης για την δημιουργία ενός αρχείου αρχικής πρόβλεψης (*initial guess file*) το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για να μπορέσει να τρέξει το κανονικό μοντέλο. Αρχική πρόβλεψη είναι εξ αρχής αναγκαία λόγω της χρήσης της μεθόδου Newton και από τα δύο προγράμματα. Στο D.N.A. όμως η αρχική πρόβλεψη χρησιμοποιείται στην αρχή του κώδικα της υπορουτίνας του εκάστοτε μοντέλου και δίνει αρχικές τιμές για όλες τις υπόλοιπες μεταβλητές μέσω είτε κάποιων εναλλακτικών απλών σχέσεων για μερικές από αυτές είτε μέσω των κανονικών σχέσεων υπολογισμού των υπολοίπων. Οι μεταβλητές οι οποίες υπολογίστηκαν από απλές σχέσεις, στο τέλος του κώδικα επαναπροσδιορίζονται από τις πραγματικές σχέσεις που τις διέπουν σε συνδυασμό με τους αλγόριθμους επίλυσης, χωρίς να γίνεται ξανά πέρασμα από τις αρχικές σχέσεις. Αυτή η αυτοματοποίηση στο gPROMS δεν είναι εφικτή.

Για το δεύτερο σκέλος, αυτό το οποίο και έγινε ήταν η τροποποίηση των μαθηματικών μοντέλων του λέβητα (FURNACE) και των υπερθερμαντών και αναθερμαντών (SH1a, SH1b, SH2, SH3, RH1a, RH1b, RH2) ώστε να δημιουργηθούν αρχικά μοντέλα τα οποία να μπορούν να προσομοιωθούν χωρίς την ανάγκη αρχείου αρχικής πρόβλεψης, αλλά μόνο με την αρχική πρόβλεψη ορισμένων τελικών μεταβλητών που ενδιαφέρουν (συνήθως πίεση και ενθαλπία εξόδου). Η τροποποίηση που πραγματοποιήθηκε στο εκάστοτε μαθηματικό μοντέλο ήταν η χρήση των απλοποιημένων σχέσεων αντί των τελικών σε όσες μεταβλητές χρησιμοποιούσαν τέτοιες για την αρχική τους πρόβλεψη. Τα αποτελέσματα από την επίλυση των τροποποιημένων μοντέλων των στοιχείων μπορούν να αποθηκευτούν σε αρχείο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην συνέχεια ως αρχείο εκκίνησης των υπολογισμών του κυκλώματος το οποίο πλέον θα περιλαμβάνει μόνο τα μοντέλα των στοιχείων με τις τελικές σχέσεις υπολογισμού όλων των μεταβλητών. Αν και η δημιουργία του αρχικού αρχείου ολόκληρου του κυκλώματος είναι χρονοβόρα γιατί απαιτείται η σταδιακή προσθήκη των επιμέρους στοιχείων στο προηγούμενο υπομοντέλο στο οποίο όλα τα στοιχεία είναι τελικά, από εκεί και έπειτα δεν απαιτείται η δημιουργία άλλου αρχικού αρχείου, ακόμα και στους υπολογισμούς βελτιστοποίησης.

Συνεχίζοντας παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα του gPROMS με το D.N.A. στον Πίνακα 4-6.

Πίνακας 4-6 Αποτελέσματα προσομοίωσης λέβητα με το gPROMS και σύγκριση με προσομοίωση με D.N.A. για το σενάριο λειτουργίας του λέβητα μέγιστου φορτίου 300 MW.

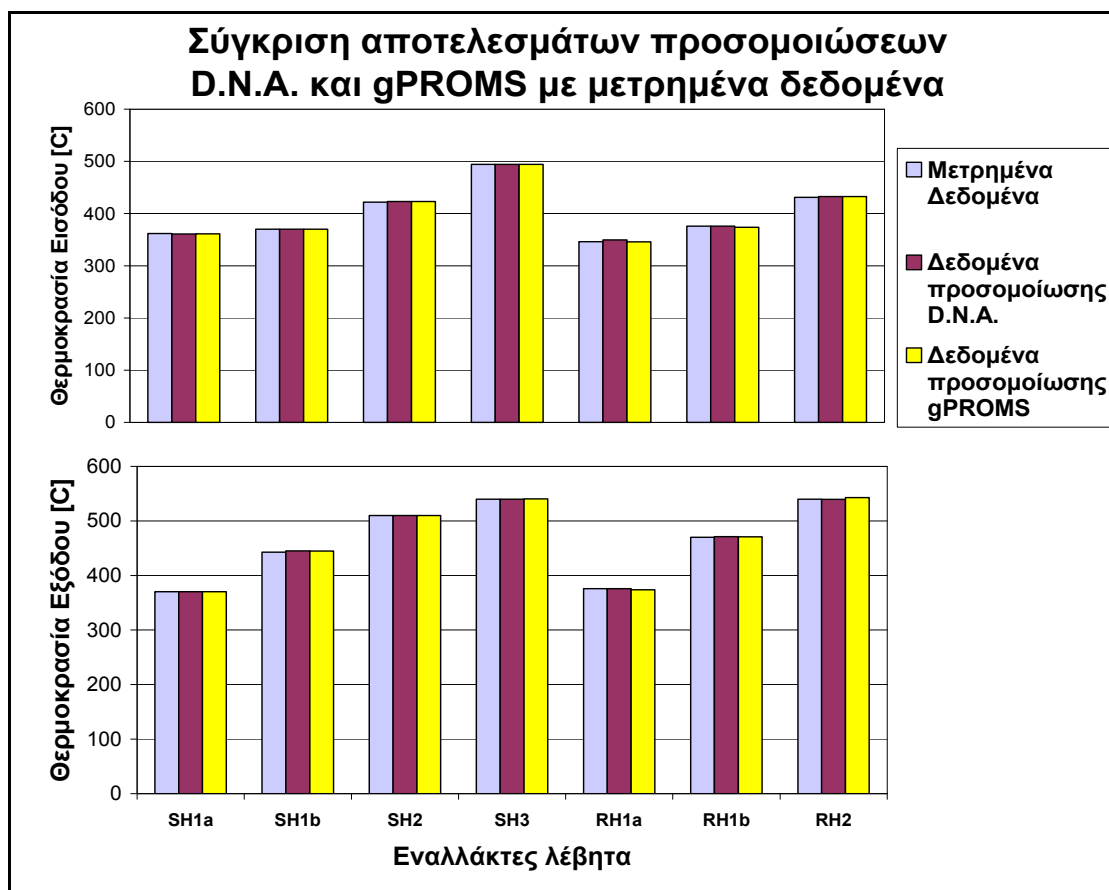
Στοιχεία	Δεδομένα προσομοίωσης D.N.A.			Δεδομένα προσομοίωσης gPROMS			Σχετική Διαφορά [%]		
	Θερμ. Καυσ. [°C]	Θερμ. ατμού [°C]	Πίεση ατμού [bar]	Θερμ. Καυσ. [°C]	Θερμ. ατμού [°C]	Πίεση ατμού [bar]	Θερμ. Καυσ. [°C]	Θερμ. ατμού [°C]	Πίεση ατμού [bar]
Τιμές Εισόδου									
Furnace	1197	320	196	1197	320.00	196.00	0.00	0.00	0.00
S/H 1a		360.74	189.48		361.21	189.50		0.13	0.01
S/H 1b		369.99	186.7		370.00	186.46		0.00	-0.13
Atte. S/H 1b		445.13	183.35		444.79	183.11		-0.08	-0.13
S/H 2		422.95	183.35		422.95	183.11		0.00	-0.13
Atte. S/H 2		509.99	177.9		510.22	177.66		0.05	-0.13
S/H 3		494	177.9		494.00	177.66		0.00	-0.13
R/H 1a		349.32	44.75		345.83	43.57		-1.00	-2.64
R/H 1b		376	44.5		373.56	43.31		-0.65	-2.67
Atte. R/H 1b		471.19	44		470.74	42.80		-0.10	-2.73
R/H 2		432.79	44		432.79	42.80		0.00	-2.73
Τιμές Εξόδου									
Furnace	973.1	360.74	189.48	973.32	361.21	189.50	0.02	0.13	0.01
S/H 1a	442	369.99	186.7	441.54	370.00	186.46	-0.10	0.00	-0.13
S/H 1b	590	445.13	183.35	591.00	444.79	183.11	0.17	-0.08	-0.13
Atte. S/H 1b		422.95	183.35		422.95	183.11		0.00	-0.13
S/H 2	866.5	509.99	177.9	868.01	510.22	177.66	0.17	0.05	-0.13
Atte. S/H 2		494	177.9		494.00	177.66		0.00	-0.13
S/H 3	811.9	540	172.5	813.53	540.63	172.26	0.20	0.12	-0.14
R/H 1a	416.9	376	44.5	415.62	373.56	43.31	-0.31	-0.65	-2.67
R/H 1b	520	471.19	44	519.55	470.74	42.80	-0.09	-0.10	-2.73
Atte. R/H 1b		432.79	44		432.79	42.80		0.00	-2.73
R/H 2	728	539.74	42.6	729.39	542.82	41.35	0.19	0.57	-2.93

Όπως παρατηρείται οι αποκλίσεις είναι σε αρκετά ικανοποιητικά επίπεδα, μικρότερες του 0,5% με εξαιρέσεις τις πιέσεις στις αναθερμάνσεις οι οποίες έχουν μία απόκλιση της τάξης του 2,5% με 3%. Ο λόγος για τον οποίο εμφανίζονται αυτές οι αποκλίσεις είναι η χρήση διαφορετικών μοντέλων υπολογισμού των ιδιοτήτων του νερού μεταξύ D.N.A. και gPROMS. Αν και τα δύο προγράμματα βασίζονται στον κανονισμό IAPWS-IF97, χρησιμοποιήθηκε διαφορετικός κώδικας για το gPROMS επειδή η μεταφορά του ανοιχτού διαθέσιμου κώδικα από το D.N.A. θα επιβάρυνε αρκετά το τελικό μοντέλο, χρησιμοποιήθηκε *ξένο αντικείμενο (Foreign Object)* το οποίο υπολόγιζε τις θερμοφυσικές ιδιότητες του νερού, εξωτερικά και όχι ως μέρος των υπολογισμών, κάτι το οποίο κάνει το D.N.A. Η διαφορά στρογγυλοποίησης των σταθερών στους υπολογισμούς, οδήγησε στην διαφορετική πίεση εξόδου του SH3.

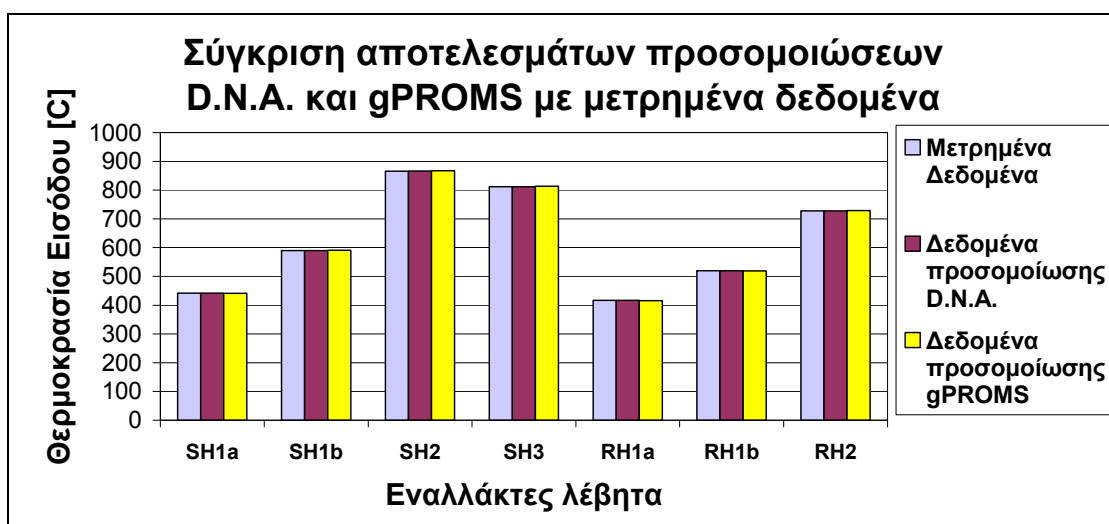
Συνδυασμός της προαναφερθείσας αιτίας με την χρήση του μοντέλου με την σταθερά CT για τον στρόβιλο, το οποίο είναι πολύ ευαίσθητο σε μεταβολές πίεσης, οδήγησε σε αυξημένη απόκλιση στην έξοδο του στροβίλου το οποίο συνεπάγεται διατήρηση του σφάλματος και για τα στοιχεία τα οποία ακολουθούν, δηλαδή τις αναθερμάνσεις. Εξάλλου, παρατηρείται ότι μετά την είσοδο του αναθέρμου RH1a, η απόκλιση κυμαίνεται μεταξύ 2,7 και 2,9%, τιμές κοντά στην αρχική απόκλιση της εισόδου του RH1a, 2,63%. Άρα από εκεί και πέρα το σφάλμα στα υπόλοιπα στοιχεία συνεχίζει να είναι αρκετά μικρό.

Από τα παραπάνω βγαίνει το συμπέρασμα ότι τα επιμέρους μοντέλα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν από το D.N.A. και για το κύκλωμα του λέβητα έχουν πολύ καλή απόκριση και στο gPROMS. Επομένως τα μοντέλα αυτά είναι κατάλληλα για να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία και πιο σύνθετων και ρεαλιστικών μοντέλων, όπως αυτό που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

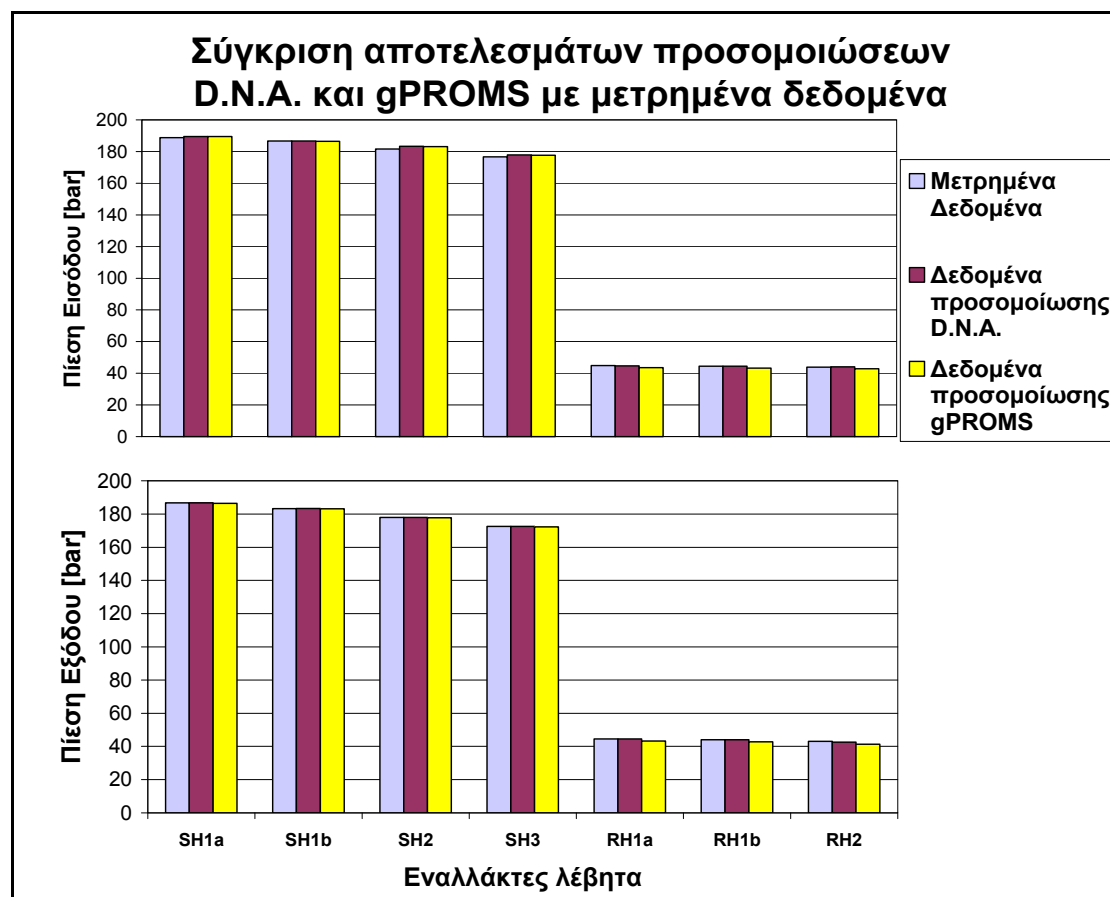
Οι Εικόνες 4-11 και 4-12 παρουσιάζουν τη σύγκριση των τιμών των θερμοκρασιών ατμού και καυσαερίων μόνο στην έξοδο για τους υπερθερμαντές και αναθερμαντές και των δύο προγραμμάτων με τις μετρημένες. Αντίστοιχα για την πίεση δίνονται στην Εικόνα 4-13. Σε αυτές δίνετε μια γραφική απεικόνιση της πολύ καλής συμπεριφοράς των μοντέλων των προγραμμάτων.



Εικόνα 4-11 Σύγκριση των τιμών θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου ατμού στους εναλλάκτες του κυκλώματος του λέβητα για το σενάριο λειτουργίας των 300 MW.



Εικόνα 4-12 Σύγκριση των τιμών θερμοκρασίας εισόδου καυσαερίων στους εναλλάκτες του κυκλώματος του λέβητα για το σενάριο λειτουργίας των 300 MW.



Εικόνα 4-13 Σύγκριση των τιμών πίεσης εισόδου και εξόδου ατμού στους εναλλάκτες του κυκλώματος του λέβητα για το σενάριο λειτουργίας των 300 MW.

4.2.3. Προσομοίωση μοντέλου gPROMS

Δεδομένης της καλής λειτουργίας των επιμέρους μοντέλων, η προσομοίωση στο κύκλωμα του λέβητα εξελίχθηκε, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, με την δημιουργία ενός πιο ολοκληρωμένου μοντέλου όπου πλέον λαμβάνονται υπόψη και στοιχεία τα οποία είχαν παραληφθεί στην προηγούμενη απλοποίηση. Το τελικό κύκλωμα το οποίο και προσομοιώθηκε στο gPROMS είναι αυτό της Εικόνας 4-10. Επειδή πλέον έχει τεκμηριωθεί η σωστή λειτουργία των μοντέλων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το μοντέλο του στροβίλου χρήσης του πολυτροπικού βαθμού απόδοσης, για καλύτερα αποτελέσματα όπως θα παρουσιαστούν παρακάτω.

4.2.3.1. Χρήση στροβίλου HP με σταθερά CT

Στον Πίνακα 4-7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του ατμού των υπερθερμαντών και οι αντίστοιχες θερμοκρασίες των καυσαερίων μετά τους υπερθερμαντές και αναθερμαντές. Επειδή όμως στην πραγματικότητα ο κάθε εναλλάκτης βρίσκεται παράλληλα με τα αντίστοιχα

υδροτοιχώματα και όχι σε σειρά όπως διατάχθηκαν στο gPROMS, σαν θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τους εναλλάκτες δεν θα παρουσιάζεται αυτή της εξόδου του εναλλάκτη αλλά αυτή των αντίστοιχων υδροτοιχωμάτων. Επίσης οι θερμοκρασίες εισόδου του ατμού στους εναλλάκτες SH2, SH3 και RH2 είναι προκαθορισμένη και δίνεται από την επιθυμητή θερμοκρασία του ατμού μετά τους ψεκασμούς. Λόγω της χρήσης του διαχωριστή, εμπεριέχεται στο συγκεκριμένο κύκλωμα και η ανακυκλοφορία της ποσότητας του νερού η οποία διαχωρίζεται. Για το λόγο αυτό και η παροχή είναι διαφορετική σε αυτό το κύκλωμα και ίση με την τιμή της παροχής η οποία δίνεται από την τροφοδοτική αντλία, τιμή η οποία είναι σταθερή και ίση με 1200 t/h ή 333 kg/s. Η ποιότητα του υγρού - ατμού είναι της τάξης του 70%, τιμή η οποία επιβεβαιώνεται από την προσομοίωση όπου η ποιότητα είναι 71%.

Πίνακας 4-7 Παρουσίαση αποτελεσμάτων ολοκληρωμένου μοντέλου κυκλώματος λέβητα υπερθερμαντών και σύγκριση αυτών με μετρημένες μέσες τιμές σε συνθήκες σταθερής λειτουργίας.

Στοιχεία	Μετρημένα Δεδομένα		Δεδομένα προσομοίωσης		Σχετική Διαφορά [%]	
	Θερμ. εισόδου [°C]	Θερμ. εξόδου [°C]	Θερμ. εισόδου [°C]	Θερμ. εξόδου [°C]	Θερμ. εισόδου [°C]	Θερμ. εξόδου [°C]
Τιμές Ατμού						
ECO	257	317	255.84	317	-0.453	0.000
Furnace	332.11	361	334.58	363.38	0.744	0.659
SH1a	361		363.38	372.41	0.659	
SH1b		428	372.41	430.34		0.547
SH2	408	512	422	508.94	3.431	-0.597
SH3	496	542	496.00	534.62	0.000	-1.362
RH1a	339		348.10	375.69	2.685	
RH1b		444	375.69	439.57		-0.998
RH2	414	542	431	534.00	4.106	-1.475
Τιμές Καυσαερίων						
ECO	405	303	400.57	298.18	-1.093	-1.591
Furnace	1197.1	965	1197.1	970.1	0.000	0.528
SH1a	492	428	491.65	426.49	-0.070	-0.352
SH1b	682	548	670.56	544.88	-1.678	-0.570
SH2	965	830	970.1	830.75	0.528	0.091
SH3	830	780	830.75	760.99	0.091	-2.437
RH1a	428	405	426.49	400.57	-0.352	-1.093

RH1b	548	492	544.88	491.65	-0.570	-0.070
RH2	780	682	760.99	670.56	-2.437	-1.678

Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι οι μετρημένες τιμές οι οποίες δίνονται εδώ, είναι μέσες πραγματικές τιμές οι οποίες έχουν μετρηθεί στο ολοκληρωμένο κύκλωμα του λέβητα και όχι στο απλοποιημένο όπως παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη προσομοίωση, οι οποίες ήταν τιμές επίσης δεδομένες από τη Δ.Ε.Η. αλλά ήταν τιμές οι οποίες αντιπροσωπεύουν το ισοζύγιο ενέργειας των βασικών στοιχείων του κυκλώματος σε αντίθεση με τις παραπάνω οι οποίες προήρθαν από το κέντρο ελέγχου της μονάδας. Παρ'όλα αυτά και πάλι, μόνο οι θερμοκρασίες στις κύριες εισόδους και εξόδους των βασικών στοιχείων είναι διαθέσιμες για τον ατμό και για τα καυσαέρια μεταξύ των στοιχείων.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα, η σύγκρισή τους με τις μετρημένες τιμές του κέντρου ελέγχου είναι ικανοποιητική. Σε κανένα σημείο δεν ξεπερνάει το 4,2% και σε γενικές γραμμές βρίσκεται κάτω από το 2,5%. Τρεις είναι οι περιπτώσεις στις οποίες παρατηρείται μεγαλύτερη απόκλιση. Οι δύο από αυτές έχουν να κάνουν με τις τιμές εισόδου του SH2 και RH2. Οι τιμές αυτές ορίστηκαν από την αρχή σαν παράμετροι της προσομοίωσης. Οι τιμές είναι ανεβασμένες από τις πραγματικές δεδομένης της άγνωστης ακριβής παροχής των καυσαερίων, όπου τελικά χρησιμοποιήθηκε η παροχή όπως είχε οριστεί στο απλοποιημένο μοντέλο οπότε και οι τιμές θερμοκρασίας ατμού μετά τους ψεκασμούς είναι παραπλήσιες με αυτές οι οποίες είχαν οριστεί σε αυτό. Η τρίτη αυξημένη τιμή είναι αυτή της εισόδου στον RH1a. Και εδώ, όπως και στο απλοποιημένο μοντέλο, η ευαισθησία του στροβίλου λόγω της χρήσης της σταθεράς του στροβίλου, επηρεάζει αρκετά την έξοδο του στροβίλου η οποία είναι και είσοδο του RH1a, δεδομένου ότι δεν εμφανίζονται απώλειες λόγω της ύπαρξης της απομάστευσης.

Στον Πίνακα 4-8 συγκρίνονται οι τιμές εισόδου των στροβίλων HP και IP καθώς και της εισόδου του οικονομητήρα μεταξύ των μετρημένων δεδομένων από το κύκλωμα νερού – ατμού το οποίο είχε προσομοιωθεί προηγουμένως και των υπολογισμένων στο παρόν κύκλωμα. Αν και δεν είχε χρησιμοποιηθεί στρόβιλος IP στο κύκλωμα του λέβητα λόγω μη επίδρασης αυτού στο κύκλωμα όταν χρησιμοποιείται σταθερή είσοδος σε αυτό, τα δεδομένα εισόδου του είναι τα δεδομένα εξόδου του ατμού από τον αναθερμαντή RH2. Επίσης η είσοδος του οικονομητήρα του κυκλώματος του

λέβητα, αντιστοιχεί με την είσοδο στον υπερθερμαντή στο απλοποιημένο κύκλωμα νερού ατμού που προσομοιώθηκε προηγουμένως.

Σχετικά με τα δεδομένα εισόδου του οικονομητήρα, οι αποκλίσεις είναι μεταξύ του 4 και 6%. Οι τιμές είναι σχετικά μεγάλες αλλά δεν είναι απαγορευτικές. Αυτό είναι αναμενόμενο από τη στιγμή που οι τιμές εισόδου στον οικονομητήρα, πέρα από την πίεση, δεν χρησιμοποιήθηκαν σαν δεδομένα αλλά υπολογίστηκαν ώστε να υπάρχει συμφωνία των υπολοίπων τιμών οι οποίες πλέον, στο αναλυτικό μοντέλο του λέβητα, είναι γνωστές και δεδομένες από το κέντρο ελέγχου, σε αντίθεση με τις υποθέσεις στο αρκετά απλοποιημένο μοντέλο του κυκλώματος νερού - ατμού. Σε γενικές γραμμές, οι αποκλίσεις αυτές είναι αποδεκτές λόγω της χρήσης προσεγγιστικών τιμών στην είσοδο του νερού στο λέβητα ακόμα και στο κύκλωμα του λέβητα.

Τα δεδομένα εισόδου στον στροβίλου HP παρουσιάζουν πολύ καλή σύγκλιση στα δεδομένα του κυκλώματος νερού ατμού το οποίο αποδεικνύει την πολύ καλή συμπεριφορά του μοντέλου του λέβητα. Η εμφάνιση της αισθητής απόκλισης της πίεσης εισόδου στην βαθμίδα IP1 οφείλεται, όπως και στα προηγούμενα αποτελέσματα προσομοίωσης του κυκλώματος του λέβητα, στην χρήση του στροβίλου HP με χρήση της σταθεράς του στροβίλου CT. Η χρήση αυτής, έχει σαν αποτέλεσμα την έντονη εξάρτηση της πίεσης από την παροχή ατμού. Έπειτα από εφαρμογή των διαφορετικών δεδομένων εισόδου του Πίνακα 4-8 (με μέγιστη απόκλιση μεταξύ τους μικρότερη του 1,1%) στο μοντέλο του στροβίλου με την χαρακτηριστική στροβίλου CT, οι πιέσεις εξόδου βρέθηκαν 51,07 bar για το κύκλωμα του λέβητα και 41,91 bar για το κύκλωμα του νερού - ατμού. Παρατηρείται ότι μία αύξηση της παροχής κατά 2,72 kg/s (ή 1,1%) συνεπάγεται πτώση 9,16 bar στην πίεση εξόδου του στροβίλου. Επειδή η πίεση επηρεάζεται κυρίως από χαρακτηριστικά των σωληνώσεων, αν γίνει υπόθεση ότι δεν επηρεάζεται η πτώση πίεσης στους αναθερμαντές από αυτή την μεταβολή της πίεσης στην έξοδο του HP στροβίλου, τότε η πίεση στην είσοδο του IP1 θα είναι περίπου 40 bar οπότε η απόκλιση μεταξύ των τιμών πέφτει στο 2,83%, ποσοστό αποδεκτό.

Πίνακας 4-8 Σύγκριση αποτελεσμάτων εισόδου βαθμίδων στροβίλων που βρίσκονται μετά το κύκλωμα του λέβητα από τις προσομοιώσεις των κυκλωμάτων καθώς και του οικονομητήρα.

	Κύκλωμα Λέβητα	Κύκλωμα Νερού/Ατμού	Απόκλιση [%]
Είσοδος HP			
Παροχή [kg/s]	244.63	247.35	-1.10
Ενθαλπία [kJ/kg]	3383.14	3385.058	-0.06
Πίεση [bar]	170.72	170	0.43
Θερμοκρασία [°C]	534.62	535	-0.07
Είσοδος IP1			
Παροχή [kg/s]	218.96	224.06	-2.28
Ενθαλπία [kJ/kg]	3512.90	3527.075	-0.40
Πίεση [bar]	49.21	38.9	26.50
Θερμοκρασία [°C]	534.00	535	-0.19
Είσοδος ECO			
Παροχή [kg/s]	236.41	247.35	-4.42
Ενθαλπία [kJ/kg]	1114.27	1051.744	5.94
Πίεση [bar]	210.90	210.9	0.00
Θερμοκρασία [°C]	255.84	242.44	5.53

Αυτό το χαρακτηριστικό του μοντέλου του στροβίλου με την χαρακτηριστική του στροβίλου *CT* θα προβληματίσει επιπλέον στην περίπτωση της βελτιστοποίησης το οποίο θα εξεταστεί στο επόμενο κεφάλαιο.

4.2.3.2. Χρήση στροβίλου HP με πολυτροπικό βαθμό απόδοσης

Για τον παραπάνω λόγο, γίνεται και εδώ χρήση του μοντέλου του πολυτροπικού βαθμού απόδοσης. Στον Πίνακα 4-9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εισόδων των δύο στροβίλων μετά από τη χρήση του πολυτροπικού βαθμού απόδοσης αντί της σταθεράς *CT*.

Πίνακας 4-9 Σύγκριση αποτελεσμάτων εισόδου βαθμίδων στροβίλων που βρίσκονται μετά το κύκλωμα του λέβητα από τις προσομοιώσεις των κυκλωμάτων.

	Κύκλωμα Λέβητα	Κύκλωμα Νερού/Ατμού	Απόκλιση [%]
Είσοδος HP			
Παροχή [kg/s]	246.94	247.35	-0.17
Ενθαλπία [kJ/kg]	3386.35	3385.058	0.04
Πίεση [bar]	169.85	170	-0.08
Θερμοκρασία [°C]	535.4	535	0.07

	Είσοδος IP1		
Παροχή [kg/s]	224.44	224.06	0.16
Ενθαλπία [kJ/kg]	3525.2	3527.075	-0.05
Πίεση [bar]	39.9	38.9	2.50
Θερμοκρασία [°C]	535.28	535	0.05

Είναι εμφανής από τον παραπάνω πίνακα η βελτίωση η οποία επιτεύχθηκε στα αποτελέσματα για τις εισόδους των δύο στροβίλων οι οποίοι συνδέονται με το κύκλωμα του λέβητα και των υπερθερμαντών – αναθερμαντών ως προς το σχετικό σφάλμα των αντίστοιχων αποτελεσμάτων του μοντέλου με στρόβιλο σταθεράς *CT*. Να σημειωθεί ότι οι μεταβολές δεν είναι αισθητές στα υπόλοιπα στοιχεία, εκτός των αναθερμάνσεων, δεδομένου ότι δεν μεταβλήθηκαν οι παράμετροί τους και ότι η μεταβολή του στροβίλου δεν επηρεάζει την διανομή των καυσαερίων. Οι αναθερμάνσεις επηρεάζονται όσον αφορά το κύκλωμα του ατμού γιατί η έξοδος του στροβίλου συνδέεται με την RH1a η οποία με τη σειρά τις συνδέεται με την RH1b και η τελευταία με την RH2. Φαίνεται από τα δεδομένα εισόδου του στροβίλου IP1 ότι το σφάλμα ως προς τα δεδομένα του κυκλώματος νερού - ατμού μειώθηκε στο 2.50% στο οποίο τα στοιχεία των στροβίλων είναι ακριβή.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθούν κάποια στατιστικά στοιχεία και οι απαιτούμενοι χρόνοι επίλυσης. Σε αντίθεση με το απλοποιημένο μοντέλο του κυκλώματος νερού ατμού εδώ χρησιμοποιήθηκαν τα αναλυτικά αριθμητικά μοντέλα μετάδοσης θερμότητας για τον ατμό και για τα καυσαέρια τόσο για συναγωγή για τον πρώτο όσο και για ακτινοβολία για τα δεύτερα. Ελλείπει ικανοποιητικών διαθέσιμων βιβλιοθηκών από εξωτερικά προγράμματα τα οποία συνεργάζονται με το gPROMS, ήταν επιτακτική η μεταφορά του κώδικα των αντίστοιχων αναλυτικών μαθηματικών μοντέλων από το D.N.A. στο gPROMS. Διαφορετική προσέγγιση όμως χρησιμοποιείται στην μετάφραση του κώδικα μεταξύ FORTRAN και gPROMS και ειδικότερα στις περιπτώσεις επαναληπτικών διαδικασιών και στις εξισώσεις ασυνέχειας ή υπό συνθήκες εξισώσεις (IF statements).

Για την πρώτη περίπτωση το gPROMS, σε αντίθεση με τη FORTRAN, αντιλαμβάνεται κάθε επανάληψη σαν καινούργια φυσική διεργασία στην οποία δεν μπορεί μια μεταβλητή να θεωρηθεί αποτέλεσμα του εαυτού της μαζί με κάποια

επιπλέον σχέση. Συνεπώς, επαναληπτικές διαδικασίες οι οποίες στη FORTRAN θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν κάποια βαθμωτή μεταβλητή στο gPROMS χρησιμοποιούν διανυσματικές μεταβλητές με μέγεθος διανύσματος ίσο με τον αριθμό των επαναλήψεων. Αυτό έχει σαν συνέπεια τη σημαντική αύξηση του αριθμού των μεταβλητών.

Επιπρόσθετα, οι ασυνέχειες αντιμετωπίζονται ως δίκτυα κατάστασης-μετάβασης (State – Transition Networks, STNs) το οποίο συνεπάγεται ότι χρειάζονται και τα δύο (ή και παραπάνω) σκέλη της ασυνέχειας, ακόμα και σε απλές περιπτώσεις όπου στη FORTRAN εξετάζεται μόνο το ενδεχόμενο αλλαγής αλλά και ότι χρειάζεται να υπολογιστούν όλες οι εξισώσεις σε κάθε κατάσταση. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται το πλήθος των εξισώσεων οι οποίες πρέπει να ελεγχθούν στην ασυνέχεια. Επακόλουθο είναι η αύξηση του χρόνου υπολογισμού των ασυνεχειών από τη στιγμή που ελέγχονται όλες οι περιπτώσεις και οι επιπλέον σχέσεις που πιθανόν να μην υπήρχαν στους αρχικούς υπολογισμούς της FORTRAN και εμφανίζονται πλέον σε κάθε στάδιο της ασυνέχειας.

Εξαιτίας των παραπάνω διαφορών και λόγω του αυξημένου αριθμού επαναληπτικών διαδικασιών και υπό συνθήκη εξισώσεων ο αριθμός των μεταβλητών είναι 372239 εκ των οποίων 41612 είναι οι ανεξάρτητες, επομένως 330627 είναι οι εξαρτημένες καθώς και ο αριθμός των εξισώσεων του μοντέλου. Αυτός ο αριθμός μεταβλητών και εξισώσεων έχει σαν επακόλουθο την αύξηση του χρόνου επίλυσης από 3 με 4 δευτερόλεπτα ανέρχεται πλέον στα 2000 δευτερόλεπτα.

4.3. Προσομοίωση συνολικού μοντέλου μονάδας στο gPROMS

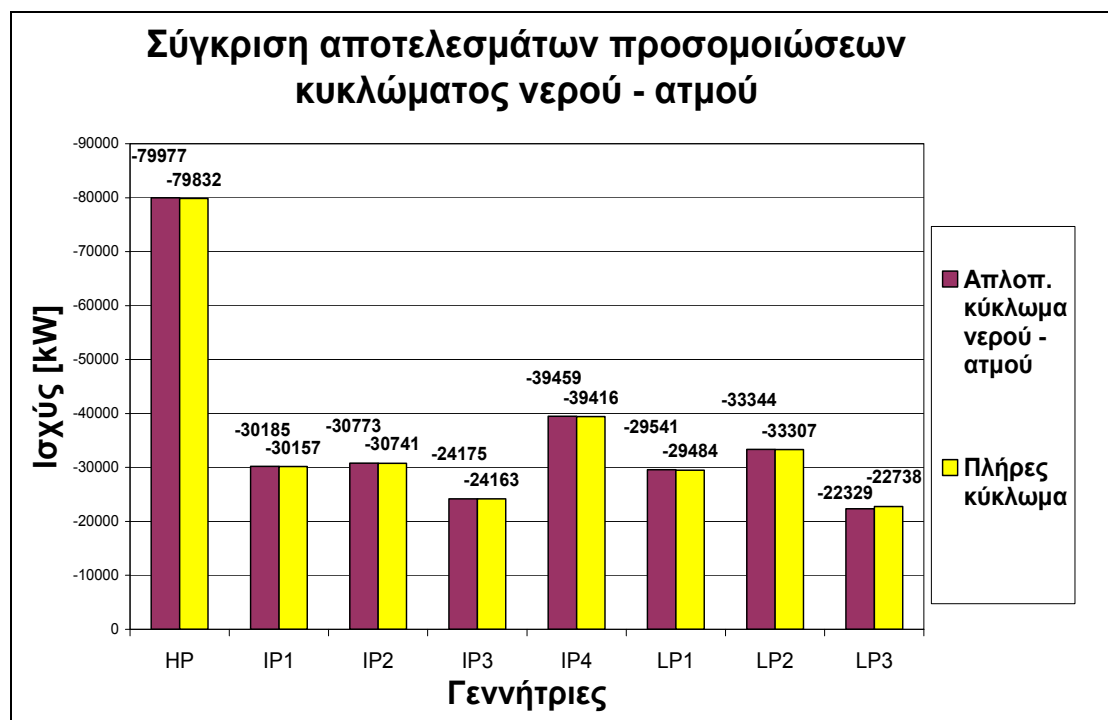
Σε αυτό το σημείο και έπειτα από την τεκμηρίωση της καλής λειτουργίας των επιμέρους μοντέλων, καθώς και της απόδειξης της συμφωνίας των αποτελεσμάτων κυκλώματος νερού - ατμού και λέβητα στα σημεία σύνδεσης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του συνολικού μαθηματικού μοντέλου της μονάδας. Η συνολική μονάδα είναι αυτή η οποία δίνεται στην Εικόνα 2-3 της οποίας το διάγραμμα ροής είναι και αυτό το οποίο προσομοιώθηκε στο gPROMS μιας και σε αυτό κατασκευάστηκε το συγκεκριμένο σχέδιο. Σε αυτό το σχέδιο δίνεται και η τροφοδοσία των ψεκασμών η οποία προέρχεται από το τροφοδοτικό νερό μετά την αντλία τροφοδοσίας για τον ανάθερμο και μετά την τελευταία αναθέρμανση για τους

υπερθερμούς. Για αυτά τα κομμάτια δίνονται στο αρχικό μοντέλο του νερού ατμού οι αντίστοιχοι διαχωριστές οι οποίοι συνοδεύονται από ρυθμιστικές διατάξεις ώστε το νερό να έχει την σωστή πίεση και θερμοκρασία. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, οι παροχές ατμού για τους στροβίλους πλέον δεν έρχονται από έναν υπερθερμαντή και ένα αναθερμαντή αλλά από την τελευταία βαθμίδα αυτών. Επίσης να σημειωθεί ότι έγινε χρήση του μοντέλου στροβίλου με πολυτροπικό βαθμό απόδοσης που είναι αξιόπιστο.

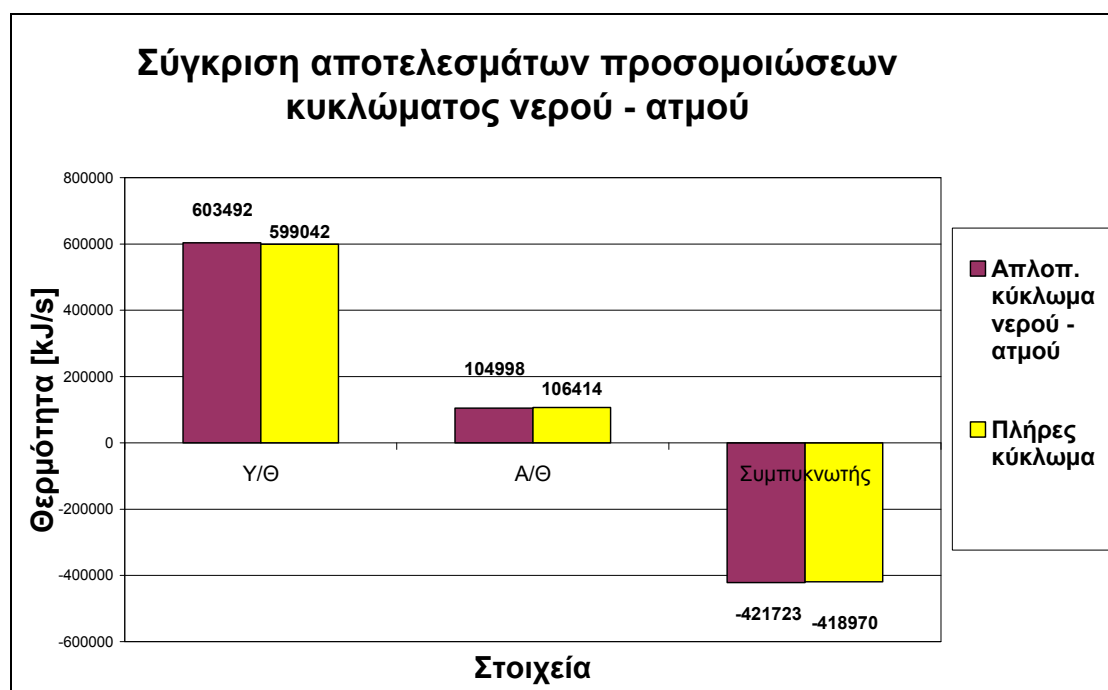
Παρακάτω παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των αντίστοιχων μεγεθών που είχαν συγκριθεί με μετρημένα δεδομένα προηγουμένως στα επιμέρους κυκλώματα. Αρχικά γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων του απλοποιημένου κυκλώματος νερού - ατμού με το αντίστοιχο κομμάτι από το συνολικό κύκλωμα της μονάδας και έπειτα η σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων του κυκλώματος του λέβητα με υπερθερμαντές και αναθερμαντές με τα αποτελέσματα από το αντίστοιχο κομμάτι του συνολικού κυκλώματος που προσομοιώθηκε.

4.3.1. Νερό - ατμός

Οι Εικόνες **4-14** έως **4-16** παρουσιάζουν τα διαγράμματα με τα αντίστοιχα συγκριτικά αποτελέσματα των Εικόνων **4-1** έως **4-3** με τη διαφορά ότι πλέον η σύγκριση γίνεται ανάμεσα στις προσομοιώσεις του απλού κυκλώματος νερού - ατμού και του πλήρους κυκλώματος το οποίο και προσομοιώθηκε. Η σύγκριση έγινε μεταξύ των δύο δεδομένου ότι τα αποτελέσματα του απλοποιημένου κυκλώματος έρχονταν σε πολύ καλή συμφωνία με τα μετρημένα δεδομένα. Παρατηρείται και εδώ επομένως, πολύ καλή σύγκλιση των αποτελεσμάτων των δύο προσομοιώσεων σε όλα τα υπό παρακολούθηση μεγέθη.

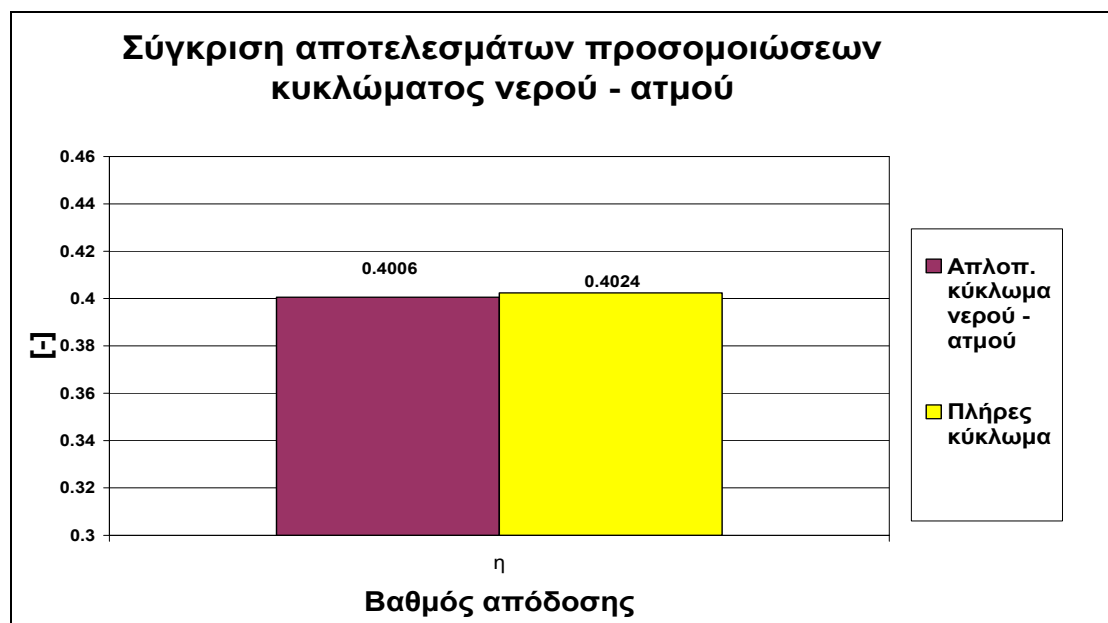


Εικόνα 4-14 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων πλήρους και απλοποιημένου κυκλώματος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις γεννήτριες.



Εικόνα 4-15 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων πλήρους και απλοποιημένου κυκλώματος για τα θερμικά φορτία

Φυσικό επακόλουθο ήταν και ο βαθμός απόδοσης να έχει τιμή που να συγκλίνει με αυτή του απλοποιημένου κυκλώματος της μονάδας όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-16.



Εικόνα 4-16 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων με τα μετρημένα δεδομένα για τον βαθμό απόδοσης

Στον Πίνακα **4-10** παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα αντίστοιχα με αυτά του κυκλώματος νερού – ατμού που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.

Πίνακας 4-10 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης κυκλώματος νερού – ατμού με κυκλώματος ολόκληρης της μονάδας.

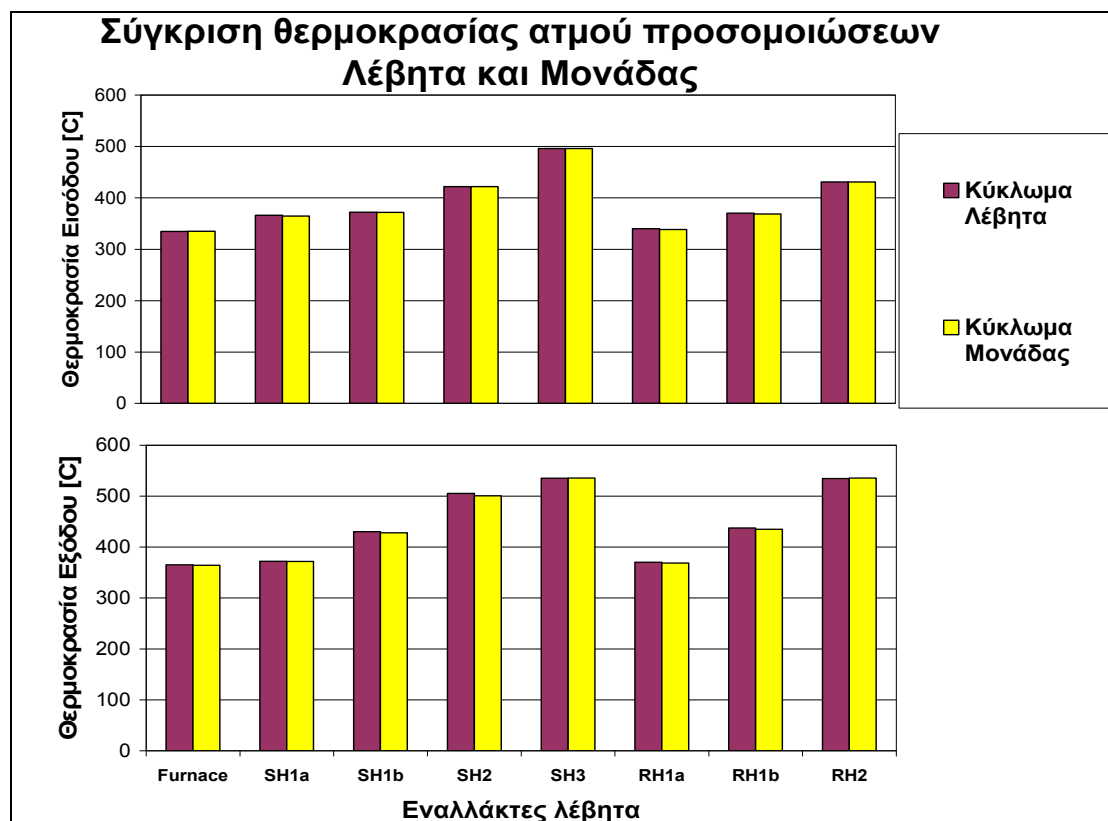
Στοιχείο	Νερό - Ατμός	Πλήρες	Απόκλιση [%]
Γεννήτριες	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια [kW]		
GEN1	-79977	-79832	-0.18
GEN2	-30185	-30157	-0.09
GEN3	-30773	-30741	-0.10
GEN4	-24175	-24163	-0.05
GEN5	-39459	-39416	-0.11
GEN6	-29541	-29484	-0.19
GEN7	-33344	-33307	-0.11
GEN8	-22329	-22738	1.83
Αντλίες	Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια [kW]		
Αντλία Συμπ.	420	446	6.19
Αντλία Κυκλ.	5522	5520	-0.04
Θερμαντές	Θερμική κατανάλωση [kW]		
S/H	603492	599042	-0.74
R/H	104998	106414	1.35
Συμπυκνωτής	Heat Losses [kJ/s]		
Cond.	-421723	-418970	-0.65

Μονάδα	Θερμικός βαθμός απόδοσης [-]		
n	0.4006	0.4024	0.45

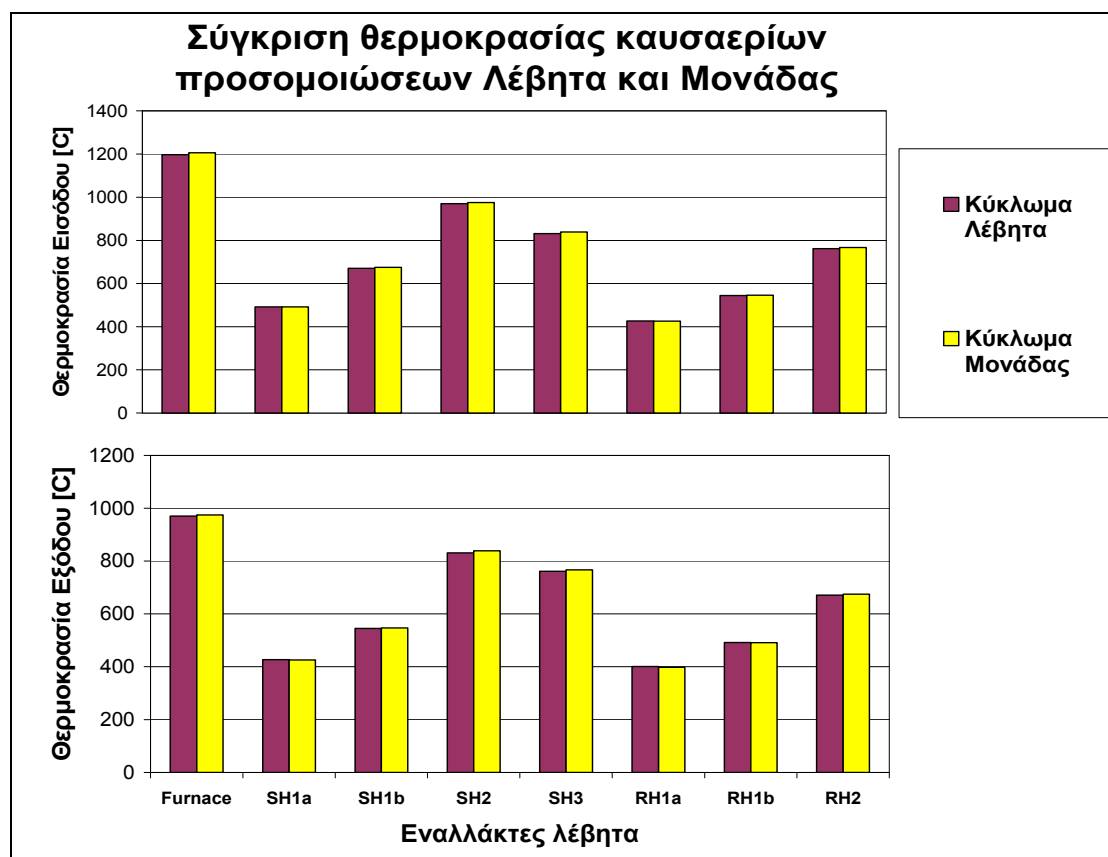
Όπως παρατηρείται, πέρα από την αντλία του συμπυκνωτή, η απόκλιση δεν ξεπερνάει το 2%, ποσοστό ικανοποιητικό. Η μεγάλη αυτή απόκλιση στην αντλία του συμπυκνωτή οφείλεται στο γεγονός ότι πλέον, με το αναλυτικό μοντέλο του κυκλώματος του λέβητα, δίνονται σε αυτό επιπλέον δεδομένα τα οποία δεν καθιστούν απαραίτητη τη χρήση δεδομένων για την ισχύ της αντλίας. Επίσης επειδή οι απώλειες είναι μειωμένες τώρα στον συμπυκνωτή, χωρίς αλλαγές στην πίεση, απαιτείται υψηλότερο θερμικό περιεχόμενο για την αύξηση στην πίεση. Η ισχύς στην αντλία κυκλοφορίας δεν ήταν δεδομένη ούτε στο απλοποιημένο κύκλωμα γι' αυτό και δεν εμφανίζεται μεγάλη απόκλιση μεταξύ των δύο προσομοιώσεων.

4.3.2. Λέβητας

Σε αντιστοιχία και εδώ με τις Εικόνες 4-11 και 4-12 οι Εικόνες 4-17 και 4-18 παρουσιάζουν την σύγκριση των αντίστοιχων μεγεθών των προσομοιώσεων. Αν και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του κυκλώματος του λέβητα δεν είχαν την ίδια καλή ακρίβεια που είχαν τα αποτελέσματα στο κύκλωμα του νερού – ατμού, γίνεται η σύγκριση με αυτά γιατί ίδιες παραδοχές χρησιμοποιήθηκαν και στο τελικό κύκλωμα λόγω απώλειας κάποιων δεδομένων όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο σημείο επομένως πρέπει να συγκλίνουν με αυτά. Τα αποτελέσματα του κυκλώματος του λέβητα τα οποία παρουσιάζονται είναι αυτά της περίπτωσης χρήσης πολυτροπικού βαθμού απόδοσης μιας και αυτό χρησιμοποιήθηκε και στο ολοκληρωμένο κύκλωμα της μονάδας και όπως αποδείχτηκε παραπάνω είχε καλύτερα αποτελέσματα. Και σε αυτή την περίπτωση των μοντέλων του λέβητα τα αποτελέσματα δείχνουν ικανοποιητική σύγκλιση στις τιμές των δύο μοντέλων. Τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά τόσο για τις θερμοκρασίες του ατμού, όσο και για τις θερμοκρασίες των καυσαερίων σε όλους του εναλλάκτες.



Εικόνα 4-17 Σύγκριση θερμοκρασιών εισόδου - εξόδου ατμού στους εναλλάκτες του λέβητα από τις προσομοιώσεις του κυκλώματος λέβητα και του κυκλώματος ολόκληρης της μονάδας.



Εικόνα 4-18 Σύγκριση θερμοκρασιών εισόδου - εξόδου καυσαερίου στους εναλλάκτες του λέβητα από τις προσομοιώσεις του κυκλώματος του λέβητα και ολόκληρης της μονάδας.

Στον Πίνακα 4-11 παρουσιάζονται τα ποσοστά των αποκλίσεων μεταξύ των δύο προσομοιώσεων ώστε να είναι εμφανείς οι αποκλίσεις. Επίσης εδώ παρουσιάζονται και αναλυτικά οι τιμές των θερμοκρασιών από την προσομοίωση με την χρήση του πολυτροπικού βαθμού απόδοσης στον στρόβιλο HP οι οποίες δεν είχαν παρουσιαστεί στο κομμάτι των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του κυκλώματος του λέβητα με τους υπερθερμαντές και αναθερμαντές.

Από τις στήλες των αποκλίσεων φαίνεται η ικανοποιητική σύγκλιση των δύο προσομοιώσεων. Σε κανένα σημείο η απόκλιση δεν ξεπερνάει το 1%, ποσοστό ικανοποιητικό.

Πίνακας 4-11 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης κυκλώματος λέβητα με το κύκλωμα ολόκληρης της μονάδας

Στοιχεία	Κύκλωμα Λέβητα		Κύκλωμα Μονάδας		Απόκλιση [%]	
	Θερμ. εισόδου [°C]	Θερμ. εξόδου [°C]	Θερμ. εισόδου [°C]	Θερμ. εξόδου [°C]	Θερμ. εισόδου [°C]	Θερμ. εξόδου [°C]
	Τιμές Ατμού					
Furnace	334.78	365.37	335.06	364.44	0.084	-0.253
SH1a	366.4	372	364.44	371.75	-0.534	-0.067
SH1b	372	430.34	371.75	427.78	-0.067	-0.594
SH2	422	505.07	422.00	500.80	0.000	-0.846
SH3	496	535.02	496.00	535.40	0.000	0.071
RH1a	340.04	370.25	338.39	368.65	-0.485	-0.433
RH1b	370.25	437.26	368.65	435.13	-0.433	-0.486
RH2	431	534.48	431.00	535.28	0.000	0.150
	Τιμές Καυσαερίων					
Furnace	1197.34	970.35	1205.98	974.69	0.722	0.447
SH1a	491.82	426.52	491.16	426.00	-0.135	-0.122
SH1b	670.73	545	674.46	546.49	0.556	0.274
SH2	970.35	830.94	974.69	838.78	0.447	0.944
SH3	830.94	761.08	838.78	766.98	0.944	0.775
RH1a	426.52	400.71	426.00	398.12	-0.122	-0.646
RH1b	545	491.82	546.49	491.16	0.274	-0.135
RH2	761.08	670.73	766.98	674.46	0.775	0.556

Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζονται στον υπέρθερμο SH2 ο οποίος για μεγαλύτερες θερμοκρασίες εισόδου των καυσαερίων χάνει την απόδοσή του κάτι το οποίο φαίνεται τόσο από την μείωση της θερμοκρασίας του ατμού (με σταθερή είσοδο) όσο και από την μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας των καυσαερίων (θερμοκρασία εισόδου καυσαερίων είναι η εξόδου του λέβητα).

Από τα παραπάνω αποτελέσματα τόσο για το κύκλωμα του νερού – ατμού όσο και για το κύκλωμα του λέβητα με τους υπερθερμαντές και αναθερμαντές, συνεπάγεται ότι η συμπεριφορά και του συνολικού μαθηματικού μοντέλου της μονάδας παραμένει στα ίδια ικανοποιητικά επίπεδα. Επομένως το μαθηματικό μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί κατάλληλο για να εφαρμοστούν αλγόριθμοι βελτιστοποίησης για την μελέτη της μονάδας.

Αντίστοιχα με το μοντέλο του λέβητα και στο μοντέλο του ολοκληρωμένου κυκλώματος ο αριθμός των μεταβλητών και των χρόνων επίλυσης είναι της ίδιας τάξης. Συγκεκριμένα, 375630 μεταβλητές με 41647 ανεξάρτητες μεταβλητές και 333983 εξισώσεις και χρόνο επίλυσης γύρω στα 2100 δευτερόλεπτα.

4.4. Εναλλακτική μοντελοποίηση του συνολικού μοντέλου της μονάδας στο gPROMS

Παρατηρώντας κανείς τόσο το μοντέλο του κυκλώματος του λέβητα με τους υπερθερμαντές και αναθερμαντές καθώς και το συνολικό μοντέλο της μονάδας, παρουσιάζεται μια έντονη αύξηση τόσο στις μεταβλητές των μοντέλων όσο και στους χρόνους επίλυσης σε σχέση με το μοντέλο του κυκλώματος νερού – ατμού. Οι αυξήσεις είναι 2 τάξεων μεγέθους στις μεταβλητές (από μερικές χιλιάδες σε εκατοντάδες χιλιάδες) και 3 τάξεων στους χρόνους επίλυσης (από 3-4 δευτερόλεπτα σε 2000 δευτερόλεπτα). Ένας από τους σημαντικότερους λόγους των αυξήσεων αυτών είναι η αναλυτικότερη περιγραφή των στοιχείων τα οποία αποτελούν τα κυκλώματα. Ο σημαντικότερος από τους λόγους είναι η μαθηματική μοντελοποίηση, εξ'αρχής, των μεθόδων υπολογισμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων καυσίμου και καυσαερίων, καθώς και των μεθόδων υπολογισμού ιδιοτήτων μετάδοσης θερμότητας για το δεύτερο όσο και για το νερό – ατμό.

Η μοντελοποίηση των παραπάνω μεθόδων επιλέχτηκε για την καλύτερη προσομοίωση και κατανόηση των διεργασιών και των ιδιοτήτων των ρευστών από το πρόγραμμα. Αυτό συνεπάγεται ορθότερη αντιμετώπιση του προβλήματος

βελτιστοποίησης της μονάδας, το οποίο είναι και ένα από τα τελικά ζητούμενα. Σωστότερη αντιμετώπιση της βελτιστοποίησης επιτυγχάνεται από τη στιγμή που υπάρχει πλήρης επίγνωση των μηχανισμών που διέπουν τους υπολογισμούς των ιδιοτήτων των ρευστών, συνεπώς οποιοιδήποτε περιορισμοί εμφανίζονται μέσα στους υπολογισμούς αυτούς λαμβάνονται υπόψη στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης του προβλήματος. Ωστόσο, έπειτα από την προσομοίωση και ακολούθως την προσπάθεια βελτιστοποίησης η οποία θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα εξής προβλήματα και δυσκολίες:

- Υψηλές απαιτήσεις σε χρόνο επίλυσης.

Όπως παρουσιάστηκε και αναφέρθηκε προηγουμένως, ο χρόνος επίλυσης της προσομοίωσης έχει αυξηθεί σημαντικά. Συγκεκριμένα από επιλύσεις των 3-4 δευτερολέπτων στο κύκλωμα νερού – ατμού πλέον η επίλυση είναι της τάξης των 2100 δευτερολέπτων (ή 35 λεπτών). Στη συγκεκριμένη περίπτωση και γενικότερα σε προβλήματα σταθερής κατάστασης, η διάρκεια μίας προσομοίωσης δεν αποτελεί πρόβλημα από τη στιγμή που τα αποτελέσματα είναι μόνιμα και δεν μεταβάλλονται χρονικά. Το πρόβλημα αρχίζει να εμφανίζεται σε περιπτώσεις όπου χρειάζεται να μελετηθεί η επίδραση της μεταβολής μίας μεταβλητής ή κάποιας παραμέτρου του συστήματος. Επίσης, πρόβλημα μπορεί να εμφανιστεί και στην βελτιστοποίηση. Συγκεκριμένα, η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται μέσω επαναληπτικών προσομοιώσεων του προβλήματος όπως απαιτείται από την μέθοδο Newton η οποία και είναι κομμάτι του αλγόριθμου βελτιστοποίησης διαδοχικού δευτεροβάθμιου προγραμματισμού. Συνεπώς ανάλογα με τον αριθμό των επαναλήψεων οι οποίες θα χρειαστούν για την βελτιστοποίηση, μία και μόνο βελτιστοποίηση μπορεί να διαρκέσει μέχρι και 10 μέρες.

- Υψηλές απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ.

Λόγω της σημαντικής αύξησης σε μεταβλητές, εξισώσεις και παραμέτρους αυξάνονται και οι απαιτήσεις σε μνήμη για την αποθήκευση των δεδομένων καθώς και των αποτελεσμάτων τα οποία και πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην επίλυση είτε της προσομοίωσης, είτε της βελτιστοποίησης. Στην δεύτερη οι απαιτήσεις είναι ακόμη υψηλότερες λόγω ανάγκης υπολογισμού του Hessian πίνακα και επιπλέον σχέσεων οι οποίες δημιουργούνται από την διαδικασία του αλγόριθμου βελτιστοποίησης. Επίσης ο δεύτερος λόγος αποτελεί και την αιτία για

την αύξηση του χρόνου επίλυσης ο οποίος μπορεί να μειωθεί με αύξηση της υπολογιστικής ισχύος.

Η παρατήρηση των παραπάνω έγινε έπειτα από την προσομοίωση και βελτιστοποίηση στο παρόν πρόβλημα, όπως αυτό είχε συνταχθεί και σύμφωνα με τα στατιστικά αποτελέσματα τα οποία παράγει το gPROMS στην αρχή και στο τέλος της επίλυσης. Συγκεκριμένα στην βελτιστοποίηση παρουσιάστηκε επιπλέον πρόβλημα το οποίο θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο. Για τον λόγο αυτό, αναζητήθηκε εναλλακτικός τρόπος μοντελοποίησης του συνολικού μοντέλου ώστε να ελαττωθούν όσο γίνεται τα παραπάνω μειονεκτήματα που εμφανίζονται στο αρχικά διατυπωμένο πρόβλημα.

4.4.1. Δημιουργία εξωτερικού προγράμματος συνεργασίας με το gPROMS (FOREIGN OBJECT - FO)

Οι προσπάθειες στράφηκαν προς την δημιουργία εξωτερικών προγραμμάτων (FO), όπως αυτού το οποίο δημιουργήθηκε από τον Dragan Nikolic για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του νερού – ατμού, το οποίο βασίζόταν σε ανοιχτό πυγαίο κώδικα γλώσσας προγραμματισμού C++. Κατ' αντιστοιχία, FO μπορούν να δημιουργηθούν και για την γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN στην οποία και είναι γραμμένος ο ανοιχτός πυγαίος κώδικας του D.N.A., στις μεθόδους του οποίου βασίστηκε και η μαθηματική μοντελοποίηση της μονάδας στο gPROMS.

Με μία ποιο προσεκτική μελέτη των μαθηματικών μοντέλων όπως αυτά δημιουργήθηκαν στο gPROMS, παρατηρείται ότι ο μεγαλύτερος όγκος μεταβλητών, εξισώσεων αλλά και παραμέτρων βρίσκεται στους υπολογισμούς των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του καυσίμου και του καυσαερίου και κυρίως στον υπολογισμό των ιδιοτήτων μετάδοσης θερμότητας τόσο των παραπάνω όσο και του νερού – ατμού. Η ανάγκη για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων μετάδοσης θερμότητας εμφανίστηκε από την στιγμή που δεν υπολογίζονται στο αρχικό FO των θερμοφυσικών ιδιοτήτων το οποίο και χρησιμοποιήθηκε στο κύκλωμα νερού – ατμού. Η παρατήρηση αυτή έκανε ακόμη πιο ελκυστική την αναζήτηση εναλλακτικής μοντελοποίησης με κατεύθυνση την δημιουργία FO στο gPROMS. Ο λόγος ήταν ότι όλοι οι υπολογισμοί των μεθοδολογιών για υπολογισμούς ιδιοτήτων τόσο θερμοφυσικών όσο και μετάδοσης θερμότητας είναι ευθύς υπολογισμοί οι οποίοι δεν απαιτούν κάποιον επαναληπτικό αλγόριθμο για την εύρεση του τελικού αποτελέσματος με εξαίρεση κάποιες απλές

επαναληπτικές διαδικασίες οι οποίες εφαρμόζονται σαν κομμάτι της συνολικής διαδικασίας, επομένως εμπεριέχονται στους υπολογισμούς. Το χαρακτηριστικό αυτό, σε συνδυασμό με το έτοιμο κομμάτι κώδικα FORTRAN το οποίο παρέχει το gPROMS και συνδέει μεταξύ τους τα δύο προγράμματα, διευκολύνει την δημιουργία του τελικού κώδικα FORTRAN ο οποίος στηρίζεται στον κώδικα σύνδεσης του gPROMS. Η διευκόλυνση έχει να κάνει με το γεγονός ότι ο υπολογισμός κάθε ιδιότητας (ή περισσοτέρων) εμπεριέχεται σε μία υπο-ρουτίνα της FORTRAN. Συνεπώς, το κάλεσμα της αντίστοιχης υπο-ρουτίνας είναι αρκετό για την διεξαγωγή της επίλυσης, έπειτα της εφαρμογής διαφόρων προσαρμογών του αρχικού κώδικα ώστε να ανταποκρίνεται στην δομή του κώδικα σύνδεσης με το gPROMS. Η σύνδεση γίνεται μέσω δυναμικής βιβλιοθήκης σύνδεσης (Dynamic Link Library – DLL) το όνομα της οποίας αποτελεί και το FO το οποίο θα χρησιμοποιηθεί μέσα στα μοντέλα των στοιχείων της μονάδας.

Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι διαθέσιμα προγράμματα υπάρχουν αλλά είναι γενικά προγράμματα υπολογισμού ιδιοτήτων και δεν περιέχουν υπολογισμό των φαινομένων μετάδοσης θερμότητας και με ακτινοβολία και είναι αρκετά απλοποιημένα. Το Multiflash (Infochem Computer Services Ltd., 2007), το οποίο είναι εμπορικό αναλυτικό πρόγραμμα υπολογισμού ιδιοτήτων τόσο θερμοφυσικών όσο και μετάδοσης και μεταφοράς θερμότητας πληθώρας στοιχείων, διατίθεται μόνο σε ακαδημαϊκή έκδοση με μειωμένες λειτουργίες. Σε αυτή είναι περιορισμένοι οι υπολογισμοί μετάδοσης θερμότητας.

4.4.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης εναλλακτικού μοντέλου

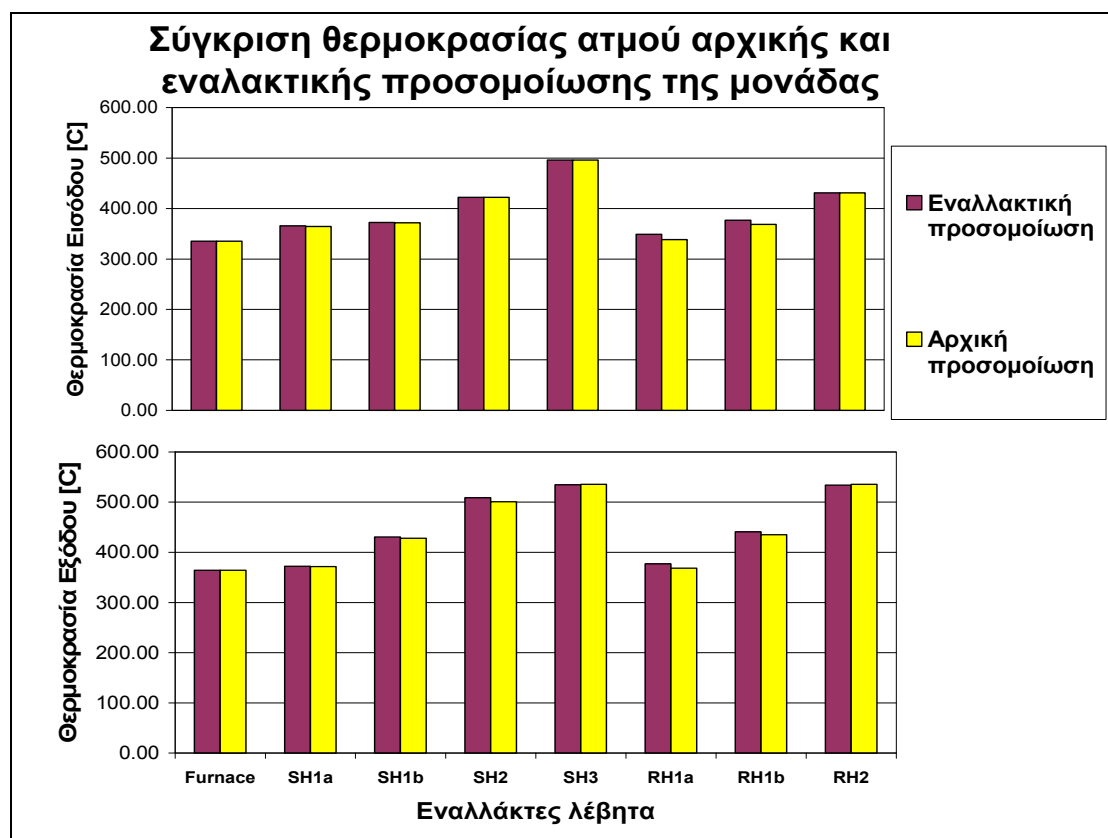
4.4.2.1. Σύγκριση των υπολογισμών μεμονωμένων των ιδιοτήτων

Έπειτα από την προσαρμογή του αρχικού κώδικα σε αυτόν του κώδικα σύνδεσης και την δημιουργία του επιθυμητού DLL, δημιουργήθηκε αρχικά ένα μικρό μοντέλο μόνο για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων, οι οποίες αντικαταστήθηκαν, ώστε να βεβαιωθεί η σωστή δημιουργία του FO. Τα αποτελέσματα τα οποία παράχθηκαν συγκρίθηκαν με αυτά του D.N.A. τα οποία εξάχθηκαν από την προσομοίωση ενός υπερθερμαντή στον οποίο πραγματοποιούνται όλες από τις απαιτούμενες μεθόδους υπολογισμούς ιδιοτήτων. Η σύγκριση παρουσίασε πολύ καλά αποτελέσματα καθότι το απόλυτο σφάλμα ήταν της τάξης του πέμπτου ή και έκτου δεκαδικού ψηφίου, ανάλογα την τάξη μεγέθους της μεταβλητής. Σύγκριση με τα αποτελέσματα του

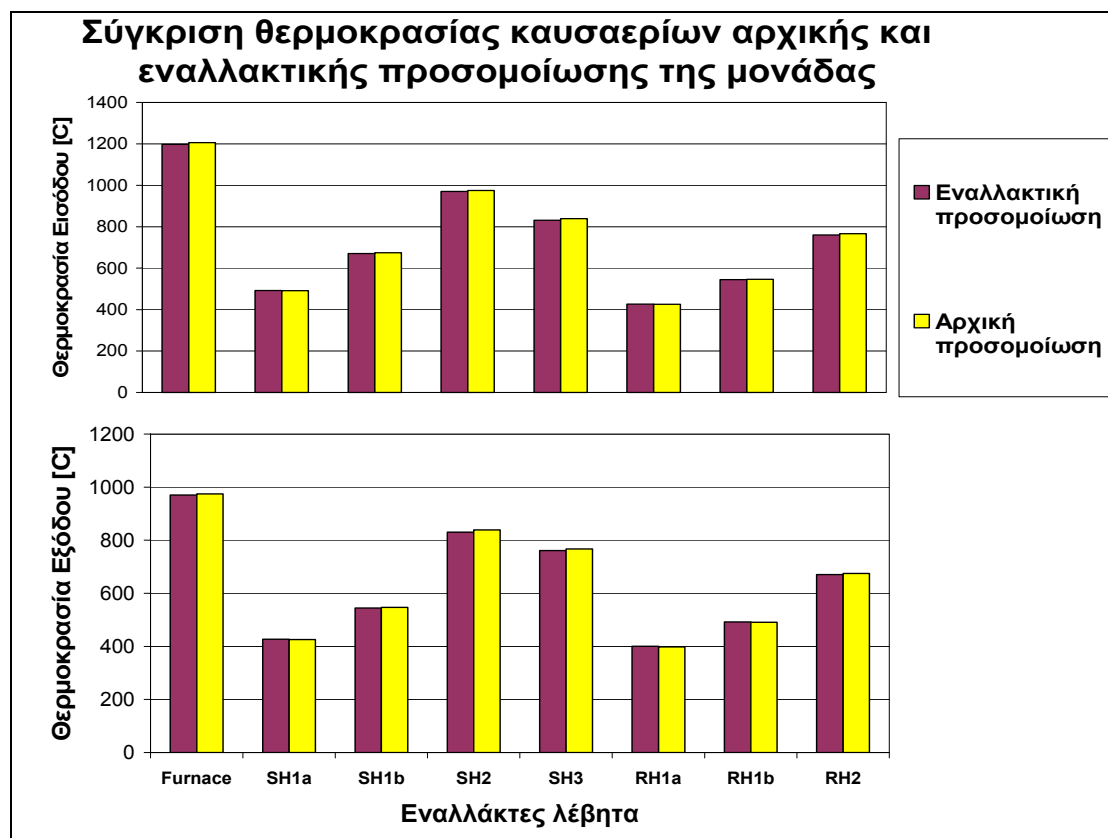
αρχικού μοντέλου στο gPROMS δεν είναι αναγκαία δεδομένου ότι έχει γίνει ήδη σύγκρισή τους με αυτά του D.N.A. μέσω των προσομοιώσεων των επιμέρους κυκλωμάτων που μπορούσαν να συγκριθούν.

4.4.2.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης μονάδας

Έπειτα από την τεκμηρίωση της πολύ καλής λειτουργίας των FO που δημιουργήθηκαν (ένα για υπολογισμό θερμοφυσικών ιδιοτήτων καυσίμου και καυσαερίου και ενός για υπολογισμό ιδιοτήτων μετάδοσης θερμότητας όλων των ρευστών μαζί και το νερό – ατμό), ακολούθησε η σύγκριση των δύο προσομοιώσεων της μονάδας. Η σύγκριση έγινε τόσο στα αποτελέσματα όσο και στους χρόνους επίλυσης και στο μέγεθος του προβλήματος από την στιγμή όπου αυτά ήταν η αιτία για την αναζήτηση της εναλλακτικής μοντελοποίησης.



Εικόνα 4-19 Σύγκριση θερμοκρασιών εισόδου - εξόδου ατμού στους εναλλάκτες του λέβητα από την αρχική και την εναλλακτική προσομοίωση της μονάδας.



Εικόνα 4-20 Σύγκριση θερμοκρασιών εισόδου - εξόδου καυσαερίου στους εναλλάκτες του λέβητα από την αρχική και εναλλακτική προσομοίωση της μονάδας.

Στον Πίνακα 4-12 παρουσιάζονται τα ποσοστά των αποκλίσεων μεταξύ των δύο προσομοιώσεων ώστε να είναι εμφανείς οι αποκλίσεις.

Από τις Εικόνες 4-19 και 4-20 καθώς και από τις στήλες των αποκλίσεων φαίνεται η ικανοποιητική σύγκλιση των δύο προσομοιώσεων. Σε κανένα σημείο, πέραν των θερμοκρασιών του ατμού στους αναθέρμους RH1a και RH1b, η απόκλιση δεν ξεπερνάει το 1%, ποσοστό ικανοποιητικό.

Πίνακας 4-12 Σύγκριση αποτελεσμάτων αρχικής και εναλλακτικής προσομοίωσης της μονάδας

Στοιχεία	Αρχική		Εναλλακτική		Σχετική Διαφορά [%]	
	Θερμ. εισόδου [°C]	Θερμ. εξόδου [°C]	Θερμ. εισόδου [°C]	Θερμ. εξόδου [°C]	Θερμ. εισόδου [°C]	Θερμ. εξόδου [°C]
Τιμές Ατμού						
ECO	222.08	319.38	255.84	317	15.204	-0.744
Furnace	335.06	364.44	335.06	364.44	0.000	0.000
SH1a	364.44	371.75	365.38	372.45	0.257	0.188
SH1b	371.75	427.78	372.45	430.42	0.188	0.616
SH2	422.00	500.80	422	508.91	0.000	1.620
SH3	496.00	535.40	496	534.61	0.000	-0.147
RH1a	338.39	368.65	348.91	376.8	3.109	2.212
RH1b	368.65	435.13	376.8	440.78	2.212	1.298
RH2	431.00	535.28	431	533.93	0.000	-0.253
Τιμές Καυσαερίων						
ECO	398.12	290.00	400.71	298.18	0.650	2.821
Furnace	1205.98	974.69	1197.1	970.1	-0.737	-0.471
SH1a	491.16	426.00	491.99	426.68	0.170	0.160
SH1b	674.46	546.49	670.56	544.89	-0.578	-0.294
SH2	974.69	838.78	970.1	830.75	-0.471	-0.958
SH3	838.78	766.98	830.75	760.99	-0.958	-0.781
RH1a	426.00	398.12	426.68	400.93	0.160	0.705
RH1b	546.49	491.16	544.89	491.99	-0.294	0.170
RH2	766.98	674.46	760.99	670.56	-0.781	-0.578

Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις στους προαναφερθείς αναθέρμους, οφείλονται κυρίως στις μεταβολές του στροβίλου οι οποίες επηρεάζουν την είσοδο του ατμού στην είσοδο του πρώτου αναθέρμου. Από εκεί και πέρα οι υπόλοιπες αποκλίσεις οφείλονται στο γεγονός ότι πλέον ο αλγόριθμος δεν έχει επίγνωση των εξισώσεων οι οποίες διέπουν τους υπολογισμούς των ιδιοτήτων των ρευστών. Από τη στιγμή που η προσομοίωση περιλαμβάνει επαναληπτική διαδικασία λόγω της μεθόδου Newton, με τον περιορισμό της μη επίγνωσης των σχέσεων των υπολογισμών των ιδιοτήτων, ο Ιακωβιανός Πίνακας του προβλήματος δεν είναι ολοκληρωμένος επομένως παρουσιάζονται κάποιες, μικρές κατά τα άλλα, αποκλίσεις οι οποίες ακόμη και για τις μεγαλύτερες τιμές είναι αποδεκτές (μικρότερες του 5%)

Στον Πίνακα 4-13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το κύκλωμα του νερού – ατμού σε αντιστοιχία με τον Πίνακα 4-10 σε σύγκριση με την αρχική προσομοίωση.

Πίνακας 4-13 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των δυο διαφορετικών μεθόδων προσομοίωσης του κυκλώματος της μονάδας.

Στοιχείο	Αρχικό	Εναλλακτικό	Απόκλιση [%]
Γεννήτριες	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια [kW]		
GEN1	-79832	-79900	0.09
GEN2	-30157	-30172	0.05
GEN3	-30741	-30799	0.19
GEN4	-24163	-24213	0.21
GEN5	-39416	-39539	0.31
GEN6	-29484	-29613	0.44
GEN7	-33307	-33424	0.35
GEN8	-22738	-22600	-0.61
Αντλίες	Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια [kW]		
Αντλία Συμπ.	446	440	-1.35
Αντλία Κυκλ.	5520	5349	-3.10
Θερμαντές	Θερμική κατανάλωση [kW]		
S/H	599042	598992	-0.01
R/H	106414	106734	0.30
Συμπυκνωτής	Heat Losses [kJ/s]		
Cond.	-418970	-422138	0.76
Μονάδα	Θερμικός βαθμός απόδοσης [-]		
n	0.4024	0.4	-0.6

Τα αποτελέσματα και σε αυτή την περίπτωση είναι θετικά, καθότι η απόκλιση πέραν της ισχύος στις αντλίες, δεν ξεπερνάει το 1%. Η αιτία για αυτές τις μεγαλύτερες αποκλίσεις στις αντλίες οφείλεται σε δύο παράγοντες. Αρχικά, η ισχύς δεν είναι δεδομένη πλέον στο κύκλωμα για την αντλία μετά τον συμπυκνωτή. Δεδομένης της ευαισθησίας της πίεσης λόγω του αθροιστικού σφάλματός από τις βαθμίδες των στροβίλων και συνεπαγόμενου του δεύτερου λόγου, ότι δηλαδή η ισχύς εξαρτάται από την πίεση, εμφανίζονται αυτές οι αποκλίσεις.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα τόσο για το αρχικό κύκλωμα όσο και για το εναλλακτικό κύκλωμα, συνεπάγεται ότι η χρήση και των δύο μοντέλων παραμένει στα ίδια ικανοποιητικά επίπεδα προσομοίωσης. Επομένως και το δεύτερο μαθηματικό μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί κατάλληλο για να εφαρμοστούν αλγόριθμοι βελτιστοποίησης για την μελέτη της μονάδας.

Η μεγάλη διαφορά και αυτή η οποία απασχολούσε κατά την εφαρμογή του εναλλακτικού μοντέλου είναι ως προς τους χρόνους και της μεταβλητές.

Συγκεκριμένα:

- 10906 μεταβλητές στο εναλλακτικό μοντέλο έναντι 375630 του αρχικού.
- 239 ανεξάρτητες μεταβλητές στο εναλλακτικό έναντι 41647 του αρχικού.
- 10667 εξισώσεις στο εναλλακτικό μοντέλο έναντι 333983 του αρχικού.
- και 8 δευτερόλεπτα χρόνος επίλυσης του εναλλακτικού μοντέλου έναντι 2105.8 του αρχικού.

Επιπλέον, για τις παραμέτρους, ο αριθμός τους μειώθηκε στις 3615 στο εναλλακτικό έναντι των 588215 του αρχικού.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι εμφανή η βελτίωση η οποία επιτυγχάνεται τόσο σε χρόνο επίλυσης όσο και σε απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ από τη στιγμή που μειώνεται αισθητά ο αριθμός των μεταβλητών και των παραμέτρων. Το μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι δεν αλλοιώνεται σημαντικά το αποτέλεσμα της προσομοίωσης, συνεπώς είναι αρκετά σωστή η επιλογή του εναλλακτικού τρόπου προσομοίωσης. Ένα ακόμη πλεονέκτημα το οποίο προκύπτει είναι η αμεσότητα του προγράμματος με χρόνο προσομοίωσης της τάξης των μερικών δευτερολέπτων, είναι δυνατή η χρήση του προγράμματος ως εργαλείου on-line παρακολούθησης μίας μονάδας ή ακόμη και για την δυναμική προσομοίωση μίας μονάδας, μελετώντας συνθήκες έναρξης λειτουργίας ή διακοπής λειτουργίας καθώς και μεταβολής φορτίου. Σημαντικό πλεονέκτημα για την περίπτωση μελέτης της παρούσας διατριβής είναι και ο απαιτούμενος χρόνος βελτιστοποίησης. Πλέον επαναληπτικές προσομοιώσεις κατά την διαδικασία της επίλυσης της βελτιστοποίησης δεν θα απαιτούν σημαντικό χρόνο οπότε και ο συνολικός χρόνος της βελτιστοποίησης μειώνεται αισθητά.

5 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, βελτιστοποίηση θα πραγματοποιηθεί με χρήση του λογισμικού gPROMS. Ένα από τα πλεονεκτήματα του gPROMS είναι η άμεση σύνδεση του μοντέλου προσομοίωσης με αυτό της βελτιστοποίησης. Από το μοντέλο της προσομοίωσης γίνεται η εκλογή μιας εξαρτημένης μεταβλητής της οποίας η βελτιστοποίηση απαιτείται είτε για μεγιστοποίηση είτε για ελαχιστοποίηση αυτής. Έπειτα, γίνεται η εκλογή των ανεξάρτητων μεταβλητών ελέγχου από τις οποίες εξαρτάται η αντικειμενική συνάρτηση και θα καθορίσουν την επίτευξη του εκάστοτε στόχου. Η εκλογή γίνεται μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών των οποίων και οι τιμές είναι ήδη γνωστές. Δυνατότητα επαναπροσδιορισμού των ορίων των ανεξάρτητων μεταβλητών μόνο, είναι εφικτή δεδομένου ότι τα αρχικά όρια τα οποία δίνονται κατά την κατασκευή του μοντέλου είναι τα γενικά που ισχύουν για το εκάστοτε είδος μεταβλητών όπως πίεση, ενθαλπία, θερμοκρασία, παροχές, εντροπία, ειδικός όγκος και ενδιάμεσες μεταβλητές απαραίτητες για τους υπολογισμούς ειδικών και μη μεγεθών. Λόγω της έκφρασης των μοντέλων μόνο μέσω σχέσεων ισοτήτων, περιπτώσεις σχέσεων περιορισμών ανισότητας εκφράζονται μέσω ορισμού νέων ορίων των εξαρτημένων μεταβλητών. Στην συνέχεια θα παρουσιαστεί η μελέτη βελτιστοποίησης των επιμέρους μοντέλων καθώς και του συνολικού της μονάδας.

5.1. Κύκλωμα νερού - ατμού

Η αντικειμενική συνάρτηση του μη – κυρτού (non-convex), μη γραμμικού προβλήματος βελτιστοποίησης που παρουσιάζεται είναι ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κυκλώματος νερού – ατμού που περιγράφηκε και προσομοιώθηκε προηγουμένως. Οι μεταβλητές ελέγχου είναι οι παροχές μάζας των απομαστεύσεων των διαφόρων βαθμίδων των στροβίλων και είναι 7. Το πρόβλημα αποτελείται από 3361 αλγεβρικές μεταβλητές (μεταβλητές απόφασης – decision variables) και 3326 περιορισμούς ισότητας οπότε υπάρχουν 35 βαθμοί ελευθερίας στο πρόβλημα από τους οποίους ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι 7 των παροχών μάζας των απομαστεύσεων. Στο τελικό μοντέλο, στο οποίο θα περιληφθεί και το αναλυτικό μοντέλο του κυκλώματος λέβητα – υπερθερμαντών, θα αυξηθεί και ο αριθμός των μεταβλητών βελτιστοποίησης επομένως και οι βαθμοί ελευθερίας.

Η επιβολή οριακών συνθηκών ήταν και εδώ αναγκαία. Αρχικά, οι παροχές μάζας των απομαστεύσεων, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν σαν αρχικές τιμές, είναι αυτές της προσομοίωσης όπως δίνονται στον Πίνακα 4-1. Επιλογή αυτών έγινε γιατί η βελτιστοποίηση θα πραγματοποιηθεί γύρω από τις συνθήκες λειτουργίας που προσομοιώθηκαν, δηλαδή του μέγιστου φορτίου. Το εύρος μεταβολής τους αφέθηκε ελεύθερο ως προς το κάτω όριο, δεδομένου ότι δίνονται με αρνητικό πρόσημο γιατί είναι έξοδοι, αλλά με περιορισμένο στο άνω όριο το μηδέν ώστε να μην υπάρξει φόβος θετικής παροχής, άρα αναρρόφησης. Επίσης, σταθερή συνολική παροχή μάζας νερού - ατμού η οποία κυκλοφορεί στο κύκλωμα του νερού - ατμού πρέπει να είναι γνωστή (έχει ορισθεί στα 247.35 kg/s από την προσομοίωση). Επιπλέον, πρέπει να είναι γνωστές και οι θερμοκρασίες ατμού στην είσοδο της βαθμίδας του HP στροβίλου και στην είσοδο της IP1 βαθμίδα στροβίλου. Η θερμοκρασία που ορίστηκε είναι οι 535°C, θερμοκρασία η οποία είχε οριστεί και στην προσομοίωση καθώς είναι κοντά στην μέγιστη αποδεκτή θερμοκρασία των 547°C, που δόθηκε από τον κατασκευαστή των στροβίλων ως η ανώτερη επιτρεπτή για την προστασία των μεταλλικών εξαρτημάτων του στροβίλου. Τέλος, η πίεση του ατμού στην είσοδο του HP στροβίλου έχει καθοριστεί στα 170 bar και η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για την λειτουργία της αντλίας συμπυκνώματος στα 420 kW, τιμές οι οποίες και είχαν οριστεί και στην προσομοίωση. Στους περιορισμούς υπάγονται και τα αρχικά όρια των μεταβλητών των θερμοφυσικών ιδιοτήτων και γενικά μεταβλητών γνωστού εύρους τιμών.

Τέλος, ορίστηκαν και οι παράμετροι του λύτη βελτιστοποίησης (“SRQPD”) ώστε το αρχικό βήμα γραμμικής αναζήτησης να είναι 1, το ελάχιστο 10^{-7} , με την ίδια τιμή να έχει δοθεί και στην ανοχή βελτιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης. Από την άλλη, η ανοχή για βελτιστοποίηση των μεταβλητών ήταν ορισμένη στο 10^{-12} .

Η μη-γραμμικότητα του προβλήματος είναι απόρροια του ορισμού της αντικειμενικής συνάρτησης, των μαθηματικών σχέσεων που διέπουν τα επιμέρους μοντέλα των σχέσεων που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του νερού-ατμού, καθώς και των καυσαερίων οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν αργότερα στο κομμάτι του λέβητα.

Παρακάτω παρουσιάζονται ξεχωριστά τα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων για τις διαφορετικές περιπτώσεις μοντέλου στροβίλου που χρησιμοποιήθηκε.

5.1.1. Χαρακτηριστική στροβίλου CT

Τα αποτελέσματα από την επίλυση της βελτιστοποίησης, δίνονται στον Πίνακα 5-1 και συγκρίνονται με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του gPROMS ως το πρόγραμμα το οποίο έδωσε και το μοντέλο προς βελτιστοποίηση. Οι μεταβλητές προς παρακολούθηση είναι οι ίδιες με αυτές της μοντελοποίησης, με επιπλέον αυτή την φορά και τις μεταβλητές αποφάσεων, δηλαδή τις παροχές ατμού από τις απομαστεύσεις των βαθμίδων των στροβίλων.

Μια παρατυπία η οποία παρατηρείται σε αυτή την βελτιστοποίηση είναι η έλλειψη περιορισμού ως προς το παραγόμενο ρεύμα. Το σκεπτικό της βελτιστοποίησης μιας μονάδας έχει να κάνει με την μείωση της κατανάλωσης και όχι με την αύξηση της παραγωγής, ειδικά όταν γίνεται για το μέγιστο φορτίο, δεδομένη της μη ικανότητας για επιπλέον ηλεκτροπαραγωγή. Δοκιμές με επιπλέον τον περιορισμό της ηλεκτροπαραγωγής, δεν έδωσαν καμία βελτίωση της μονάδας συνδεδεμένη με τις μεταβολές των απομαστεύσεων, από τη στιγμή που η παροχή εμφανίζεται να επηρεάζει ιδιαίτερα την πίεση εξόδου, όπως παρατηρήθηκε και από την προσομοίωση. Επομένως, έγιναν δοκιμές χωρίς τον περιορισμό αυτό ώστε να παρουσιαστεί η θεωρητική επίδραση των απομαστεύσεων στο μοντέλο με χρήση της παραμέτρου της χαρακτηριστικής του στροβίλου CT.

Σε αντίθεση με την προσομοίωση, όπου η σχετική απόκλιση των μεταβλητών ήταν αυτή που χρησιμοποιήθηκε για τα συμπεράσματα δεδομένου ότι γινόταν έλεγχος για την τεκμηρίωση του πραγματικού μοντέλου σε σχέση με αυτό του D.N.A., τώρα, σημασία έχει η απόλυτη διαφορά των μεταβλητών πριν και μετά την βελτιστοποίηση, ώστε να φαίνεται το πραγματικό μέγεθος της μεταβολής.

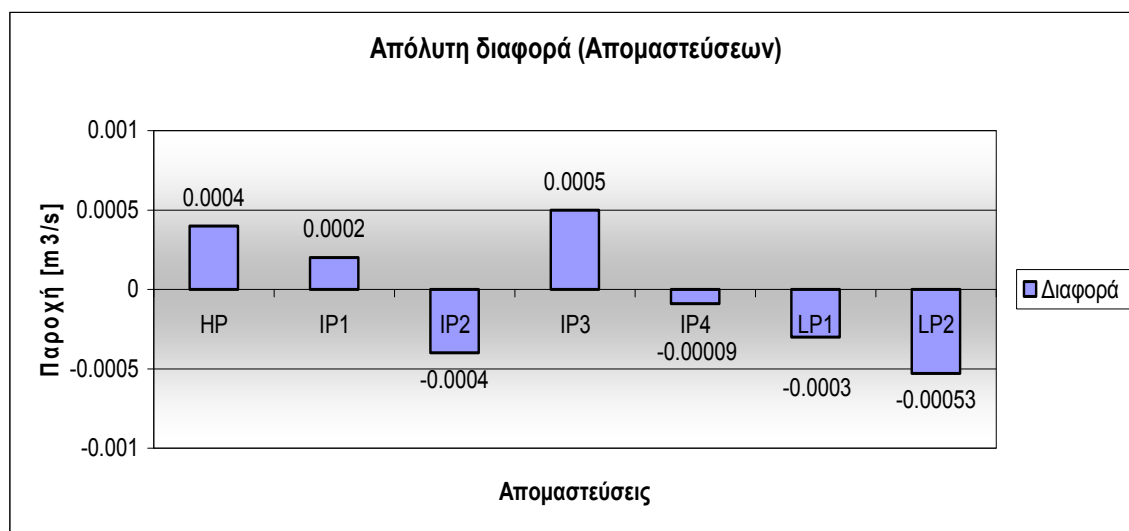
Πίνακας 5-1 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης και σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του gPROMS.

	Προσομοίωση	Βελτιστοποίηση	Διαφορά
Μονάδα	Θερμικός βαθμός απόδοσης [-]		
η	0.4012	0.42954	0.02834
Βαθμίδα	Παροχή απομάστευσης [kg/s]		
HP	-23.29	-23.2896	0.00040
IP1	-15.41	-15.4098	0.00020
IP2	-5.02	-5.0204	-0.00040
IP3	-14.91	-14.9095	0.00050

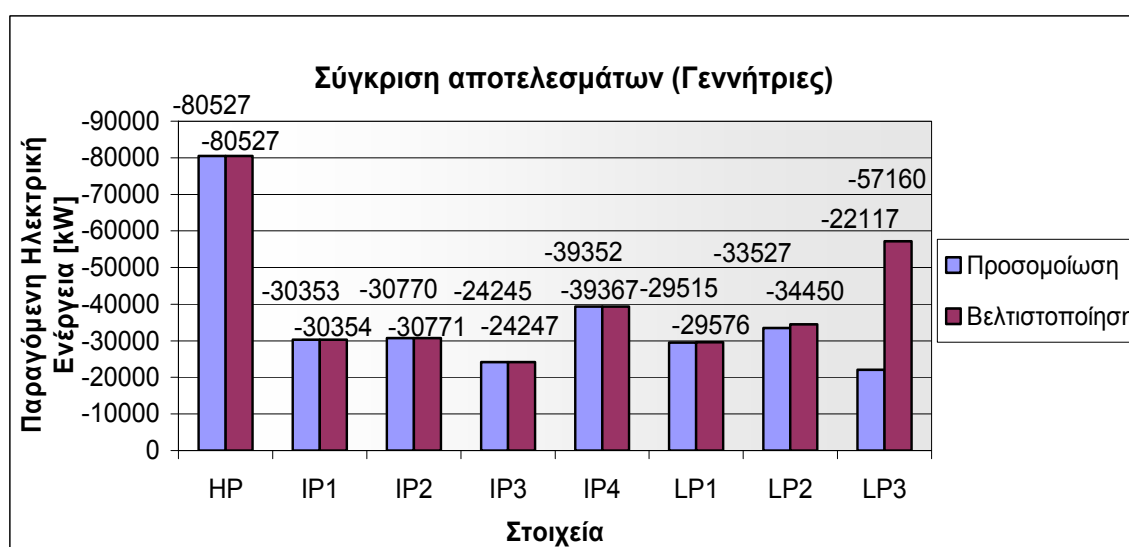
IP4	-5.78	-5.78009	-0.00009
LP1	-10.55	-10.5503	-0.00030
LP2	-0.47	-0.470532	-0.00053
Βαθμίδα	Παραγόμενη Ηλεκτρική Ισχύς [kW]		
HP	-80527	-80527	-0.01
IP1	-30353	-30354	-0.27
IP2	-30770	-30771	-0.92
IP3	-24245	-24247	-1.96
IP4	-39352	-39367	-14.53
LP1	-29515	-29576	-61.15
LP2	-33527	-34450	-922.85
LP3	-22117	-57160	-35042.63
Αντλία	Καταναλωσκόμνη ηλεκτρική ισχύς [kW]		
PUMP	420	420	0.00
PUMP	5522	5522	0.00
Θερμαντής	Προσδιδόμενη θερμική ενέργεια [kJ/s]		
SH	603523	640977	37454.00
RH	105502	105502	0.00
Συμπυκνωτής	Θερμικές απώλειες [kJ/s]		
COND.	-421628	-422539	-911.00

Παρατηρείται ότι έπειτα από πέντε επαναληπτικές διαδικασίες, ο βαθμός απόδοσης έχει παρουσιάσει αύξηση κατά 2,834 %, ποσοστό πολύ υψηλό δεδομένης της μεταβολής των τιμών των παροχών των απομαστεύσεων των στροβίλων που είναι της τάξης μεγέθους 1×10^{-4} .

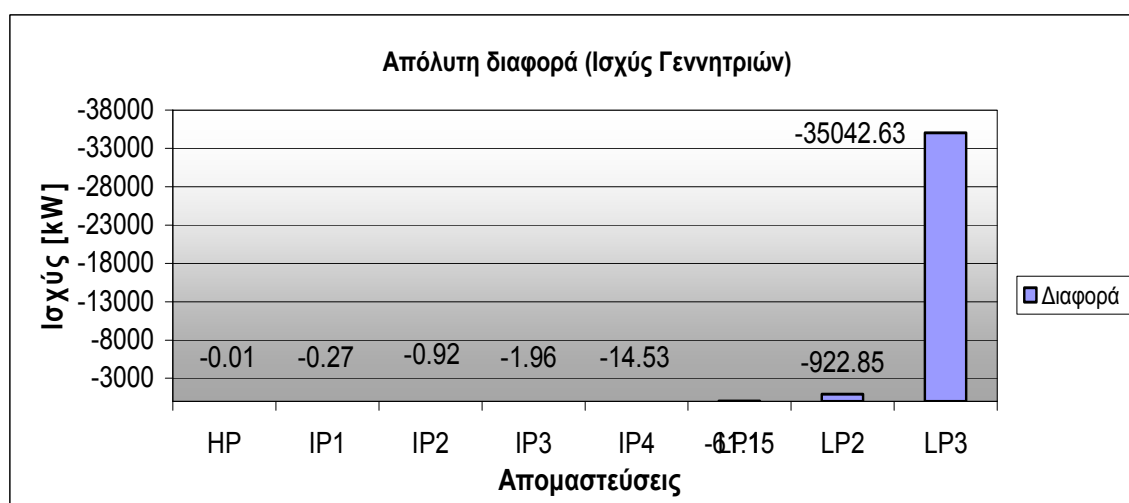
Οι έντονες μεταβολές γίνονται καλύτερα αντιληπτές στις Εικόνες **5-1** έως **5-5**.



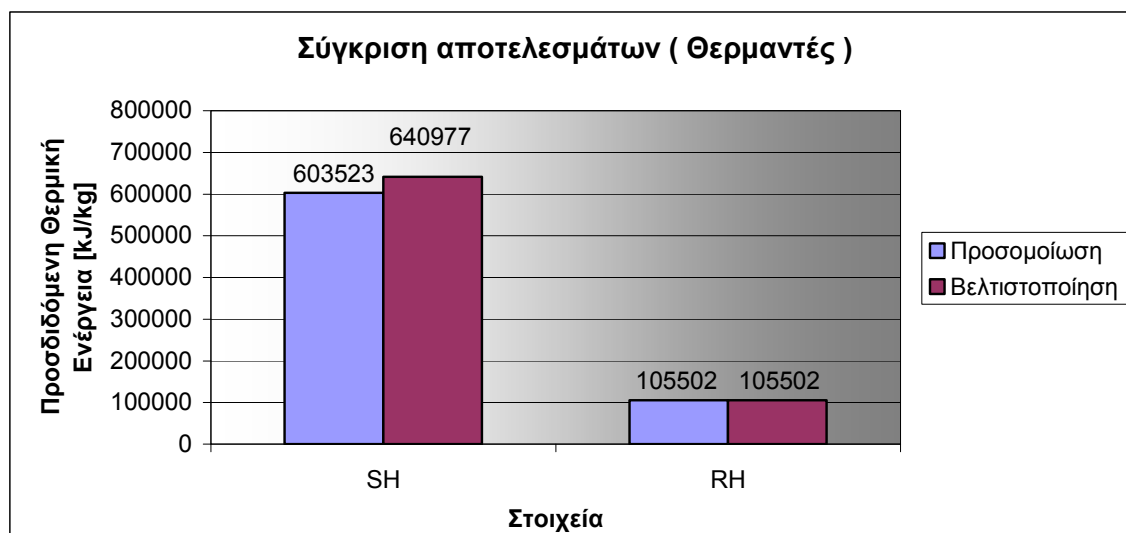
Εικόνα 5-1 Απόλυτη μεταβολή των μεταβλητών βελτιστοποίησης.



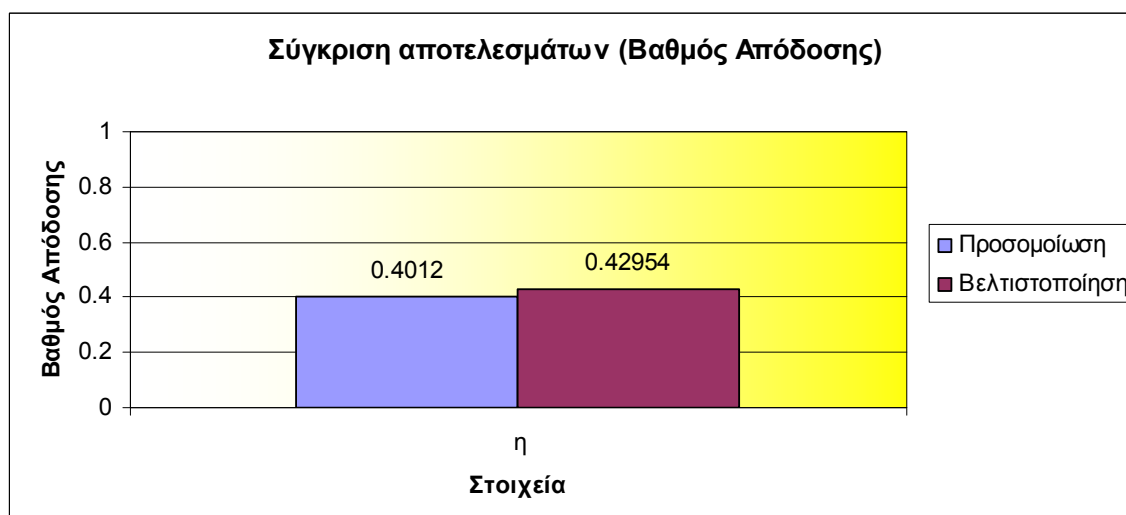
Εικόνα 5-2 Σύγκριση παραγόμενης ισχύος πριν και μετά την βελτιστοποίηση.



Εικόνα 5-3 Απόλυτη μεταβολή της παραγόμενης ισχύος των γεννητριών των βαθμίδων των στροβίλων.



Εικόνα 5-4 Σύγκριση προσδιδόμενης ενέργειας από τον λέβητα πριν και μετά την βελτιστοποίηση.



Εικόνα 5-5 Σύγκριση βαθμού απόδοσης κύκλου νερού – ατμού πριν και μετά την βελτιστοποίηση.

Παρατηρείται ότι η απόλυτη τιμή του βελτιωμένου βαθμού απόδοσης του κυκλώματος νερού – ατμού (42,954%), είναι μία τιμή η οποία πολύ δύσκολα μπορεί να εμφανιστεί σε υφιστάμενες μονάδες, αν ληφθεί υπόψη ότι ακόμα και σύγχρονες υπερκρίσιμες μονάδες, δεν φτάνουν εύκολα αυτές τις τιμές βαθμού απόδοσης.

Από την παρατήρηση των διαφορών στις τιμές των επιμέρους μοντέλων των οποίων τα αποτελέσματα δίνονται, παρατηρείται μια γεωμετρική αύξηση της διαφοράς της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος των γεννητριών στην κατεύθυνση ροής του ατμού στους στροβίλους. Ειδικά στην τελευταία βαθμίδα χαμηλής πίεσης, η διαφορά αυτή ξεπερνάει κατά 150% την αρχική τιμή αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος δίνοντάς τη μια τιμή κοντά στις τιμές της βαθμίδας υψηλής πίεσης. Κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατόν για βαθμίδα χαμηλής πίεσης. Επαναλαμβάνοντας την βελτιστοποίηση, αυτή την φορά

με την υπόθεση ότι δεν μεταβάλλονται τα δεδομένα στην τελευταία βαθμίδα του στροβίλου χαμηλής, παρατηρήθηκε αισθητά μικρότερη βελτίωση κατά 0,019% (40,139% β.α.) μετά από 25 επαναλήψεις και με διαφορετικές τιμές των μεταβλητών αποφάσεων, αλλά πάλι της τάξης του 10^{-4} . Ο λόγος εμφάνισης της απότομης μεταβολής της ισχύος στον αρχικό υπολογισμό οφείλεται σε δύο παράγοντες:

1. Στη σταθερά C_T του στροβίλου. Η σχέση που τη δίνει περιλαμβάνει όρους πίεσης εισόδου και εξόδου στο τετράγωνο. Σε συνδυασμό με την αλληλεξάρτηση των πιέσεων εισόδου και εξόδου των διαδοχικών βαθμίδων, πολύ μικρή μεταβολή σε αρχική βαθμίδα επηρεάζει πολύ έντονα την πίεση σε βαθμίδα χαμηλής πίεσης προς το τέλος, άρα και τα θερμοδυναμικά της μεγέθη όπως την ενθαλπία η οποία από το ισοζύγιο ενέργειας θα δώσει τη μηχανική ισχύς που θα περάσει στη γεννήτρια.
2. Στην πολύ χαμηλή πίεση στην έξοδο της τελευταίας βαθμίδας χαμηλής πίεσης. Η προσπάθεια επίτευξης κενού στην είσοδο από την πλευρά του ατμού στο συμπυκνωτή για βελτίωση της λειτουργίας του, συνεπάγεται πολύ χαμηλή πίεση στην τελευταία βαθμίδα χαμηλής πίεσης του στροβίλου της τάξης των 0,06 bar. Σε συνδυασμό με τον πρώτο παράγοντα είναι εύκολη η μικρή μεταβολή τις πίεσης στην έξοδο σε απόλυτο μέγεθος αλλά μεγάλη σε σχετικό, μέχρι και μια τάξη μεγέθους κάτω. Μεταβολές σε τόσο μικρές πιέσεις μπορούν να εμφανίσουν μεγάλες πτώσεις στην ενθαλπία εξόδου. Η αιτία είναι η αλλαγή φάσης από ατμό σε υγρό. Εξαιτίας αυτής, αποδίδεται σαν έργο και η θερμότητα ατμοποίησης. Επομένως, η παραγόμενη ισχύς υπολογίζεται πολύ μεγάλη χωρίς ωστόσο κάτι τέτοιο να είναι δυνατόν, λόγω των πολύ στενών φυσικών ορίων της πίεσης και της παροχή στις περιοχές αυτές του στροβίλου.

5.1.2. Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου

Τα παραπάνω αποτελέσματα ήταν αυτά το οποία οδήγησαν στην ανάγκη αλλαγής μοντέλου στροβίλου, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα στο μοντέλο του κυκλώματος του λέβητα, το οποίο παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο όπου μικρές μεταβολές στην παροχή οδηγούσαν σε μεγάλες μεταβολές στην πίεση. Έτσι, έγινε η επιλογή εφαρμογής μοντέλου όπου γίνεται χρήση και του πολυτροπικού βαθμού απόδοσης, χαρακτηριστικό μέγεθος το οποίο μπορεί να θεωρηθεί σταθερό για σταθερές συνθήκες λειτουργίας.

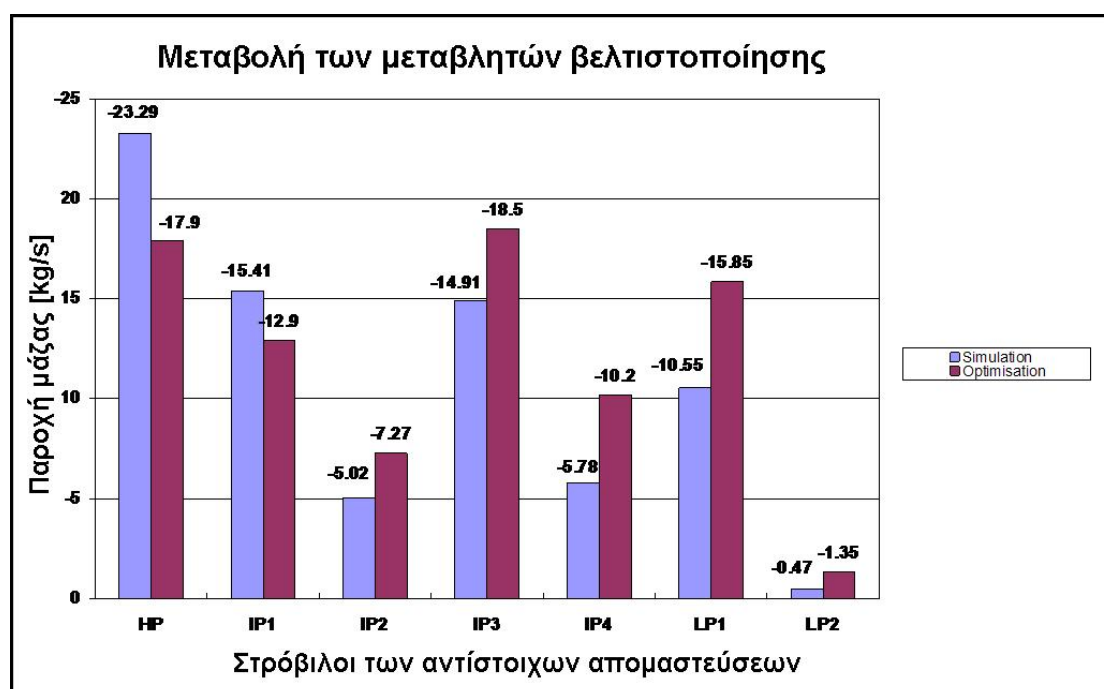
Όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 5-2 σημαντικές αλλαγές στις παροχές μάζας των διαφόρων απομαστεύσεων οδήγησε στην αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης κατά 1.42% σε απόλυτη μεταβολή (ή 3.54% σε σχετική) του κυκλώματος νερού - ατμού της μονάδας. Η αύξηση στο θερμικό βαθμό απόδοσης οφείλεται στην διατήρηση της ηλεκτροπαραγωγής με ταυτόχρονη μείωση της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας που χρειάζεται να προσδοθεί στο νερό από το σύνολο των υπερθερμαντών, οι οποίοι θα αποκτήσουν αυτό το θερμικό φορτίο μέσω του καυσαερίου από την καύση. Η μείωση αυτή είναι αποτέλεσμα της καλύτερης προθέρμανσης του νερού πριν την είσοδό του στο λέβητα λόγω των απομαστεύσεων. Συνεπακόλουθο της μείωσης αυτής του απαιτούμενου θερμικού φορτίου από το καυσαέριο είναι η μείωση της κατανάλωσης.

Πίνακας 5-2 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης του gPROMS και σχετική απόκλιση των αποτελεσμάτων από την προσομοίωση για το σενάριο λειτουργίας των 300 MW.

Στοιχεία	Προσομοίωση	Βελτιστοποίηση	Απόκλιση [%]
Απομαστεύσεις	Παροχή μάζας απομαστεύσεων βαθμίδων στροβίλων [kg/s]		
HP	-23.29	-17.9	-23.14
IP1	-15.41	-12.9	-16.29
IP2	-5.02	-7.27	44.82
IP3	-14.91	-18.5	24.07
IP4	-5.78	-10.2	76.47
LP1	-10.55	-15.85	50.24
LP2	-0.47	-1.35	187.23
Γεννήτριες	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια [kW]		
GEN1	-79977	-79987	0.01
GEN2	-30185	-30917	2.43
GEN3	-30773	-31938	3.79
GEN4	-24175	-24843	2.76
GEN5	-39459	-39883	1.07
GEN6	-29541	-29154	-1.31
GEN7	-33344	-31856	-4.46
GEN8	-22329	-21217	-4.98
Αντλίες	Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια [kW]		
Αντλία κενού	420	420	0.00
Αντλία κυκλ.	5522	5592	1.27
Θερμαντές	Θερμική κατανάλωση [kW]		
S/H	603492	577340	-4.33
R/H	104998	107524	2.41

Συμπυκνωτής	Θερμικές απώλειες [kJ/s]		
Cond.	-421723	-397906	-5.65
Μονάδα	Θερμικός βαθμός απόδοσης [-]		
η	0.4006	0.4148	3.54

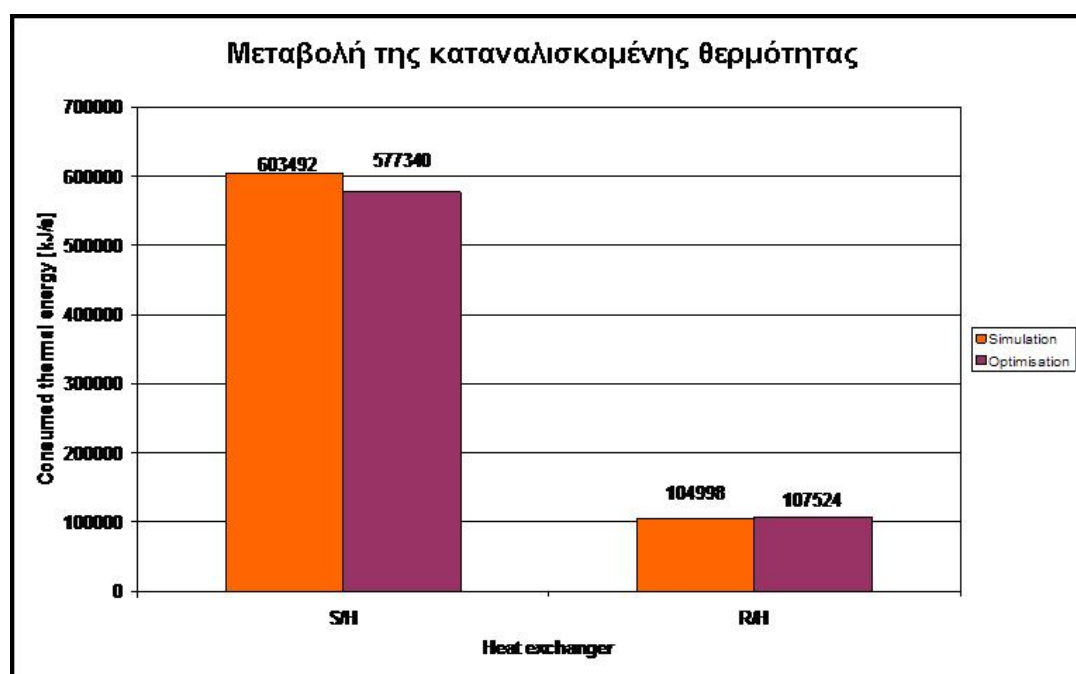
Αναλυτικότερα, στην Εικόνα 5-6 παρουσιάζονται οι τιμές των παροχών των απομαστεύσεων των διαφόρων βαθμίδων των στροβίλων. Φαίνεται ότι από τις βαθμίδες του στροβίλου υψηλής πίεσης και την πρώτη βαθμίδα μέσης πίεσης χρειάζεται μείωση των παροχών απομαστεύσεων κατά 23.14% και 16.29% αντίστοιχα. Αντίθετα, για όλες τις υπόλοιπες απομαστεύσεις, χρειάζεται να γίνει αύξηση των παροχών τους. Κάτι τέτοιο είναι δυνατό να γίνει με την εγκατάσταση ρυθμιστικών βαλβίδων με αγωγούς κατάλληλου διαμετρήματος από το τεχνικό προσωπικό της μονάδας, ώστε να μπορεί να ελεγχθεί η παροχή των απομαστεύσεων.



Εικόνα 5-6 Μεταβολή των μεταβλητών βελτιστοποίησης η οποία οδήγησε σε αύξηση 1.42% του θερμικού βαθμού απόδοσης για το σενάριο λειτουργίας των 300 MW. (HP: -23.14%, IP1: -16.29%, IP2: 44.82%, IP3: 24.08%, IP4: 76.47%, LP1: 50.24%, LP2: 187.23%)

Η εικόνα 5-7 δείχνει την απαιτούμενη θερμική ενέργεια για τον υπερθερμαντή (S/H) και τον αναθερμαντή (R/H), η οποία είναι αναγκαία για τη μετατροπή του νερού σε υπέρθερμο ατμό. Αν και παρατηρείται αύξηση της απαιτούμενης θερμότητας για

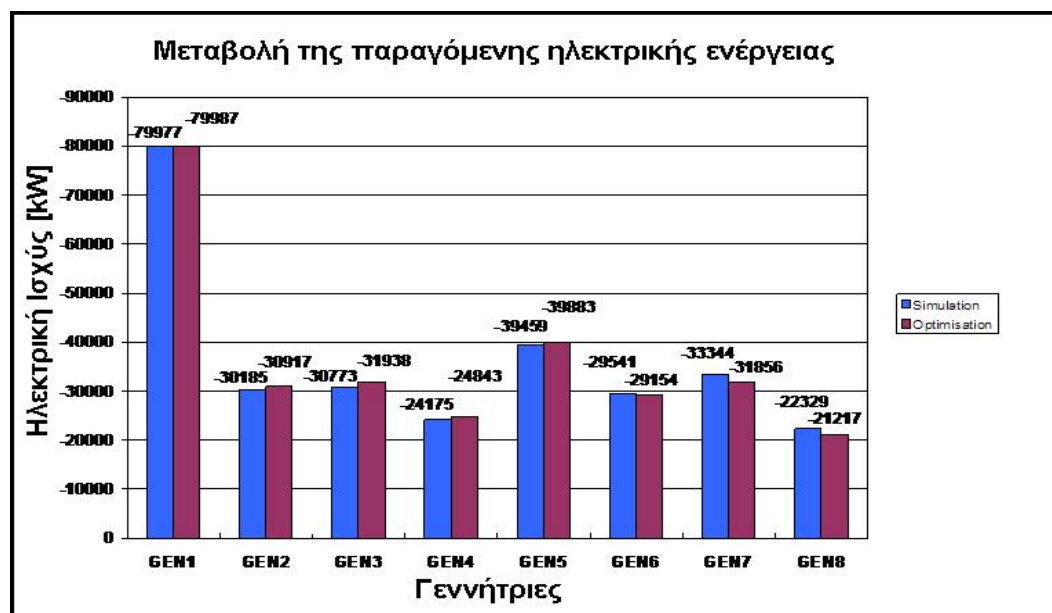
αναθέρμανση, γεγονός που οφείλεται στη μείωση της παροχής της απομάστευσης του στροβίλου υψηλής πίεσης, άρα σε αύξηση της παροχής του ατμού για αναθέρμανση, η συνολική απαιτούμενη θερμότητα μειώνεται λόγω της σημαντικότερης μείωσης στην υπερθέρμανση. Συγκεκριμένα, η συνολική απαίτηση σε θερμική ενέργεια πριν τη βελτιστοποίηση ήταν 708490 kJ/s και μετά την εφαρμογή του αλγόριθμου βελτιστοποίησης μειώθηκε στα 684864 kJ/s. Αυτή η μείωση αντιστοιχεί στο 3.33% της αρχικής κατανάλωσης, ποσοστό ιδιαίτερα σημαντικό δεδομένο των μεγεθών που δουλεύουν αυτές οι εφαρμογές. Λιγότερη απαιτούμενη θερμική ενέργεια συνεπάγεται μικρότερη κατανάλωση καυσίμου για την παραγωγή αυτής, το οποίο με τη σειρά του οδηγεί σε χαμηλότερες εκπομπές καυσαερίων χωρίς όμως μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας της μονάδας.



Εικόνα 5-7 Μεταβολές της μετάδοσης θερμότητας από και προς το κύκλωμα του νερού – ατμού έπειτα από την εφαρμογή της βελτιστοποίησης που οδήγησε στην αύξηση κατά 1.42% του θερμικού βαθμού απόδοσης. (S/H: - 4.33%, R/H: 2.41%)

Αυτό φαίνεται καθαρά στην Εικόνα 5-8 όπου παρουσιάζεται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την αντίστοιχη γεννήτρια κάθε βαθμίδας στροβίλου. Εμφανίζονται μικρές διαφορές μεταξύ των τιμών της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας πριν και μετά τη βελτιστοποίηση σε κάθε βαθμίδα, αλλά το άθροισμα της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας παραμένει σταθερό και στις δύο περιπτώσεις και ίσο με περίπου 290 MW. Η τιμή αυτή είναι σωστή γιατί από τα δεδομένα λειτουργίας της μονάδας, όπως αυτά δόθηκαν από το τεχνικό προσωπικό της για λειτουργία σε μέγιστο φορτίο, η παραγωγή ανέρχεται στα 290 MW, τιμή η οποία επιβεβαιώνεται

και στις προσομοιώσεις του D.N.A. και του gPROMS. Γι' αυτό το λόγο το άθροισμα των τιμών (Εικόνα 5-8) της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τις γεννήτριες κάθε βαθμίδας στροβίλου είναι 290 MW.

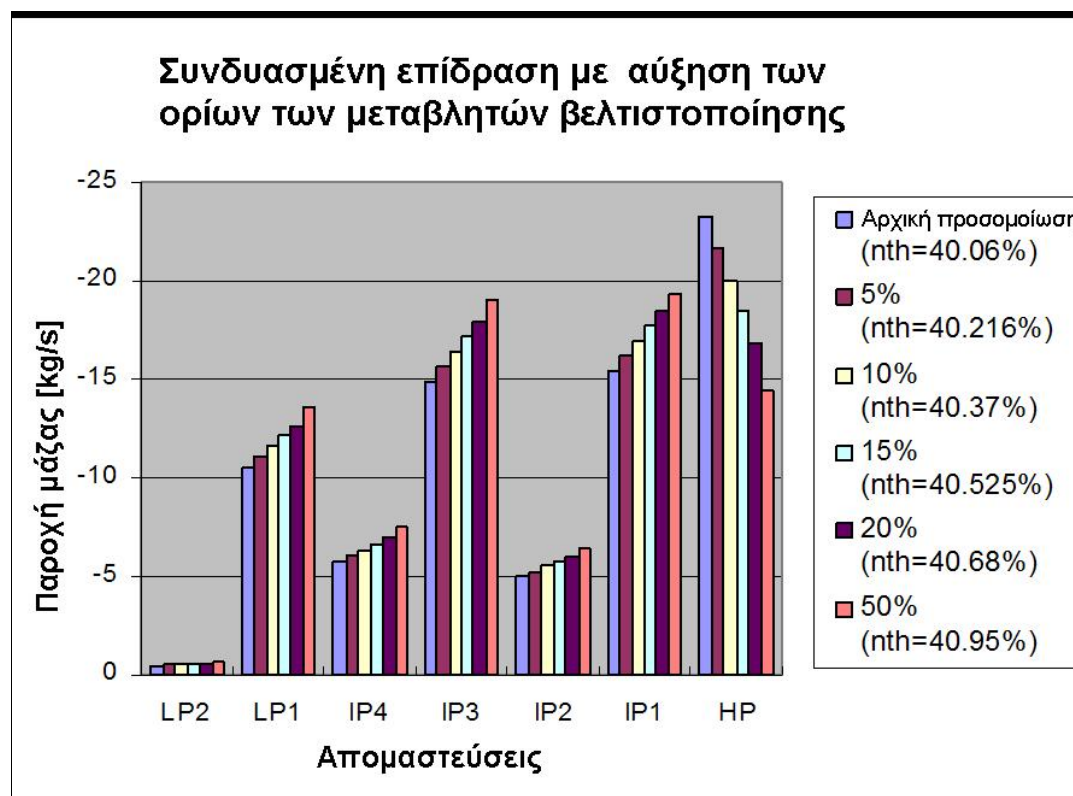


Εικόνα 5-8 Μεταβολές στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μετά την εφαρμογή της βελτιστοποίησης η οποία οδήγησε στην αύξηση κατά 1.42% του θερμικού βαθμού απόδοσης. (GEN1: 0.01%, GEN2: 2.43%, GEN3: 3.79%, GEN4: 2.76%, GEN5: 1.07%, GEN6: -1.31%, GEN7: -4.46%, GEN8: -4.98%)

Αν και για ένα γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης αυτό το ποσοστό βελτιστοποίησης (1.42% σε απόλυτη τιμή και 3.54% σε σχετική) μπορεί να φαίνεται μικρό, για ένα σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ καλό, δεδομένων των μεγεθών για τα οποία μιλάμε. Όπως παρουσιάστηκε στην Εικόνα 5-7 αυτή η σχετική βελτίωση στον βαθμό απόδοσης έδωσε αντίστοιχου ποσοστού μείωση της κατανάλωσης (3.33%) το οποίο μεταφράζεται σε μείωση κατανάλωσης περίπου 24 MW θερμικά για την παραγωγή του ίδιου ποσού ηλεκτρικής ενέργειας. Στην συνέχεια, θα γίνει μία πρώτη ανάλυση ευαισθησίας ώστε να παρουσιαστεί το ποσοστό επίδραση των μεταβλητών βελτιστοποίησης σαν σύνολο και η μεμονωμένη επίδρασή τους στην αντικειμενική, ώστε να αποδειχθεί ότι αυτό το ποσοστό επίδρασης εκπροσωπεί την τάξη επίδρασης αυτών των μεταβλητών στην αντικειμενική.

Στην Εικόνα 5-9 φαίνεται η επίδραση της συνδυασμένης μεταβολής των άνω ορίων (αν και αρνητικές τιμές) των μεταβλητών βελτιστοποίησης κατά 5, 10, 15, 20 και 50% από τις αρχικές τιμές της προσομοίωσης με μετέπειτα επανάληψη του αλγόριθμου βελτιστοποίησης. Η επιλογή των δοκιμών των ορίων μέχρι το 50% έγινε δεδομένου ότι η μέση τιμή μεταβολής των μεταβλητών στην βέλτιστη περίπτωση

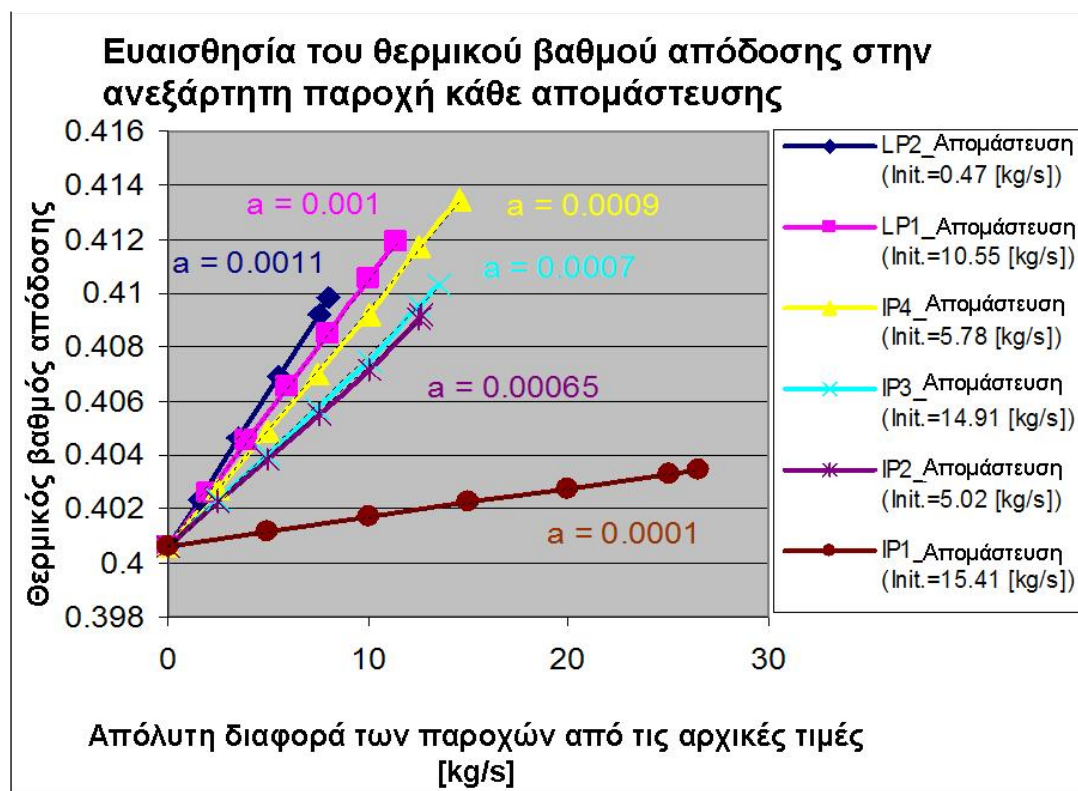
είναι της αυτής τάξης του 50% (48.6%). Το κατώτερο όριο είναι το 0 γιατί για θετικές τιμές θα συνεπαγόταν ότι έχουμε αναρρόφηση από τις απομαστεύσεις προς την αντίστοιχη βαθμίδα του στροβίλου το οποίο δεν είναι φυσικά αποδεκτό. Με αυτό τον τρόπο, αύξηση των άνω ορίων συνεπάγεται αύξηση στις μέγιστες τιμές που μπορούν να πάρουν οι παροχές των απομαστεύσεων σαν απόλυτες τιμές.



Εικόνα 5-9 Περιπτώσεις βελτιστοποίησης για αυξημένα όρια των μεταβλητών βελτιστοποίησης.

Η τάση που παρουσιάζεται είναι αύξηση στις τιμές όλων των παροχών των απομαστεύσεων, εκτός της βαθμίδας του HP στροβίλου η τιμή της οποίας μειώνεται. Αν και στην αρχή φαίνεται να υπάρχει γραμμικότητα μεταξύ μεταβολής μεταβλητών βελτιστοποίησης και αντικειμενικής (0.15% ανά 5%) τελικά αυτή δεν διατηρείται σε υψηλότερες μεταβολές των μεταβλητών (0.3% για 30% μεταβολή). Αυτό αποδεικνύει ότι το πρόβλημα είναι μη-γραμμικό οπότε σωστά έγινε επιλογή μεθόδων μη γραμμικού προγραμματισμού.

Η Εικόνα **5-10** παρουσιάζει την επίδραση της μεμονωμένης μεταβολής της απομάστευσης της εκάστοτε βαθμίδας των στροβίλων, με διατήρηση των υπολοίπων μεταβλητών βελτιστοποίησης σταθερές στις τιμές της προσομοίωσης. Σε όλες τις περιπτώσεις οι υπόλοιποι περιορισμοί και οριακές συνθήκες έχουν διατηρηθεί σταθερές στις τιμές της προσομοίωσης.



Εικόνα 5-10 Περιπτώσεις βελτιστοποίησης με επιμέρους αυξήσεις κάθε μεταβλητής βελτιστοποίησης ξεχωριστά.

Όπως φαίνεται, κινούμενοι από την τελευταία απομάστευση του LP στροβίλου προς την πρώτη απομάστευση της πρώτης βαθμίδας του IP στροβίλου, η επίδραση της εκάστοτε μεταβολής την παροχή της απομάστευσης στον βαθμό απόδοσης, μειώνεται. Αυτό φαίνεται από την τιμή a η οποία είναι η κλίση της προσεγγιστικής ευθείας των σημείων των οποίων υπολογίστηκαν έπειτα από επαναληπτικές εφαρμογές του αλγόριθμου βελτιστοποίησης μεταβάλλοντας κάθε φορά το άνω απόλυτο όριο της παροχής απομάστευσης της εκάστοτε βαθμίδα μέχρι επίτευξης της μέγιστης δυνατής βελτιστοποίησης του βαθμού απόδοσης. Σε κάθε περίπτωση βελτιστοποίησης οι τιμές των υπολοίπων μεταβλητών περιορίστηκαν με ανώτερο όριο την τιμή της παροχής την οποία είχαν κατά την περίπτωση της προσομοίωσης. Με αυτό τον τρόπο δεν επηρέασαν την βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης θετικά δεδομένης της τάσης για αύξηση τους κατά την βελτιστοποίηση από την Εικόνα 5-9 (εκτός της απομάστευσης του HP). Η τάση αυτή επιβεβαιώθηκε και σε αυτή την περίπτωση μελέτης καθώς σε όλες τις περιπτώσεις επιμέρους αλλαγής των ορίων, οι τιμές των υπολοίπων μεταβλητών έπαιρναν την τιμή του άνω απόλυτου ορίου με μόνη εξαίρεση την βαθμίδα του HP στροβίλου.

Παρατηρείται ότι παρόλο που οι μεταβολές των παροχών των απομαστεύσεων είναι σημαντικές σε σχέση με τις αρχικές τους τιμές, ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξήθηκε στην καλύτερη περίπτωση λιγότερο από 1.4%. Η παραπάνω παρατήρηση δείχνει τον βαθμό μέχρι τον οποίο μπορούν οι παροχές των απομαστεύσεων να επηρεάσουν τον θερμικό βαθμό απόδοσης του κυκλώματος νερού/ατμού και ταυτόχρονα επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης. Συνεπώς, αυτή η βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης που επιτεύχθηκε δεν είναι ασήμαντη δεδομένου και ότι ενώ οι επιμέρους μεταβολές μπορούν να οδηγήσουν σε μια αύξηση τουλάχιστον κατά 0.8% (εξαιρέση η πρώτη βαθμίδα του IP στροβίλου) η αθροιστική συνεισφορά τους δεν μπορεί να ξεπεράσει το 1.42%. Από αυτή την παρατήρηση επιβεβαιώνεται ακόμα μία φορά και η μη-γραμμικότητα του προβλήματος.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι τελευταίας τεχνολογίας μονάδες ηλεκτροπαραγωγής έχουν αρχίσει να καταργούν την απομάστευση από την βαθμίδα του HP στροβίλου και να αυξάνουν τις παροχές αυτών στις βαθμίδες του LP στροβίλου (Chaibakhsh *et al.*, 2008). Τα αποτελέσματα των Εικόνων 5-9 και 5-10 συμφωνούν με αυτή την τάση.

Για την βελτιστοποίηση το gPROMS χρειάστηκε τρία δευτερόλεπτα για την εκτέλεση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης με την χρήση τριών επαναλήψεων μη γραμμικού προβλήματος (Non Linear Problem - NLP) και τρία βήματα Αναζήτησης Γραμμής μη γραμμικού προβλήματος (NLP Line Search) και η ακρίβεια σύγκλισης που επιτεύχθηκε ήταν $1.75 \cdot 10^{-10}$. Με αυτόν τον χρόνο και την ακρίβεια επιτεύχθηκε και ο στόχος για γρήγορα και ακριβή αποτελέσματα στην βελτιστοποίηση. Αναμενόμενη αύξηση στον αριθμό των μεταβλητών βελτιστοποίησης καθώς και στον αριθμό των περιορισμών αλλά και στο μέγεθος του μοντέλου θα οδηγήσει σε αύξηση τόσο του χρόνου επίλυσης της προσομοίωσης και της βελτιστοποίησης κυρίως, αλλά και στην αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων του μη γραμμικού προβλήματος και των βημάτων αναζήτησης γραμμής.

Συνεπώς, μεταξύ της σύγκρισης των δύο μοντέλων, δηλαδή του μοντέλου που χρησιμοποιεί τη σταθερά του στροβίλου (C_T) για τον υπολογισμό της πίεσης στην έξοδο της κάθε βαθμίδας και του μοντέλου που κάνει χρήση του πολυτροπικού βαθμού απόδοσης. Αναφέρουμε ότι η χρήση του μοντέλου της σταθεράς του στροβίλου C_T για το μοντέλο του αμοστροβίλου καθιστούσε το θερμικό βαθμό απόδοσης του κυκλώματος νερού-ατμού πολύ ευαίσθητο σε πολύ μικρές, και μη

μετρήσιμες, μεταβολές της ροής μάζας από τις απομαστεύσεις των στροβίλων, κάτι που δεν ανταποκρίνεται σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του λιγνιτικού σταθμού, παρόλο που έδινε εξίσου καλά αποτελέσματα στην προσομοίωση. Στην περίπτωση που έγινε χρήση του πολυτροπικού βαθμού απόδοσης, παρατηρήθηκε ότι οι αλλαγές στις ροές μάζας από τις απομαστεύσεις είναι μετρήσιμες και γενικά τα αποτελέσματα ρεαλιστικά οπότε και αυτό προτιμήθηκε και για το τελικό συνολικό μοντέλο της μονάδας όπως και παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

5.2. Αναλυτικό κύκλωμα μονάδας

Επόμενο στάδιο είναι η βελτιστοποίηση του συνολικού κυκλώματος της μονάδας. Η βελτιστοποίηση στοχεύει στην αύξηση του συνολικού βαθμού απόδοσης της μονάδας, συμπεριλαμβανομένου και του κυκλώματος του λέβητα με υπερθερμαντές και αναθερμαντές. Αυτός είναι και ο απώτερος στόχος της εργασίας καθώς και κάθε παρέμβασης η οποία πραγματοποιείται σε μία μονάδα ηλεκτροπαραγωγής πρέπει να λαμβάνει υπ' όψιν το ολοκληρωμένο κύκλωμα. Στη συγκεκριμένη μελέτη ως μεταβλητές βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκαν οι παροχές των απομαστεύσεων των βαθμίδων των στροβίλων όπως είχαν χρησιμοποιηθεί και στην βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης του κυκλώματος νερού – ατμού. Επιπλέον τώρα, η παροχή του καυσίμου χρησιμοποιείται σαν μεταβλητή βελτιστοποίησης. Αυτό βγήκε σαν συμπέρασμα των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης στο κύκλωμα νερού – ατμού από τη στιγμή που βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης με σταθερή ισχύ εξόδου από την μονάδα οδήγησε σε μείωση της απαιτούμενης θερμότητας στην υπερθέρμανση και αναθέρμανση του ατμού το οποίο συνεπάγεται, για το κύκλωμα του λέβητα, μείωση της απαιτούμενης παροχής καυσίμου.

Πριν γίνει εφαρμογή οποιασδήποτε προσπάθειας βελτιστοποίησης της μονάδας, αρχικά πρέπει να οριστούν οι περιορισμοί οι οποίοι πρέπει να ισχύουν στον πρόβλημα προς βελτιστοποίηση. Συγκεκριμένα, οι περιορισμοί οι οποίοι μπήκαν ήταν οι ακόλουθοι:

- ◆ Θερμοκρασία εισόδου ατμού στην βαθμίδα στροβίλου HP: 535 °C με επιτρεπτή απόκλιση +/- 2 °C. Η θερμοκρασία αυτή είχε οριστεί και στην προσομοίωση καθώς είναι κοντά στην μέγιστη αποδεκτή θερμοκρασία των 547°C, που δόθηκε από τον κατασκευαστή των στροβίλων ως η ανώτερη επιτρεπτή για την προστασία των μεταλλικών εξαρτημάτων του στροβίλου.

- ◆ Πίεση εισόδου ατμού στην βαθμίδα στροβίλου HP: 170 bar με επιτρεπτή απόκλιση +/- 0.2 bar. Είναι η τιμή της πίεσης ατμού για την οποία η συγκεκριμένη μονάδα παράγει την μέγιστη μηχανική ισχύ από τους στροβίλους, συνεπώς και την μέγιστη ηλεκτρική ισχύ. Συνεπώς αποτελεί αρχική συνθήκη για το σενάριο μέγιστου φορτίου.
- ◆ Παροχή εισόδου ατμού στην βαθμίδα στροβίλου HP: 246.9 kg/s με επιτρεπτή απόκλιση +/- 0.2 kg/s. Είναι η αντίστοιχη τιμή παροχής ατμού η οποία δίνει την μέγιστη ισχύ επομένως δίνεται ως αρχική συνθήκη.
- ◆ Θερμοκρασία εισόδου ατμού στην πρώτη βαθμίδα στροβίλου IP: 535 °C με επιτρεπτή απόκλιση +/- 2 °C. Επίσης αρχική συνθήκη για το σενάριο μέγιστου φορτίου το οποίο έχει αντίκρισμα και στο θερμικό φορτίο της αναθέρμανσης.
- ◆ Τελική καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς της μονάδας: 281MW με επιτρεπτή απόκλιση +/- 0.2 MW. Αυτή είναι και η μετρημένη τιμή από το κέντρο ελέγχου του Α.Η.Σ. Καρδιάς. Η τιμή παρουσιάζει απόκλιση από την τιμή των 300MW γιατί αυτή αποτελεί την ονομαστική τιμή της συγκεκριμένης μονάδας.

Οι παραπάνω αποκλίσεις έχουν χρησιμοποιηθεί γιατί μικρομεταβολές είναι πιθανό να εμφανιστούν λόγω της αστάθειας στην ποιότητα του καυσίμου καθώς και της πολυπλοκότητας του συστήματος το οποίο συνεπάγεται την χαλάρωση των περιορισμών του προβλήματος για την ευκολότερη διεξαγωγή του υπολογισμού βελτιστοποίησης. Φυσικά συνεχίζουν να ισχύουν οι φυσικοί περιορισμοί των μεταβλητών των ιδιοτήτων.

Επίσης, να σημειωθεί ότι αν και οι μεταβλητές βελτιστοποίησης οι οποίες και ενδιαφέρουν είναι η παροχή καυσίμου καθώς και οι παροχές των απομαυστεύσεων των βαθμίδων των στροβίλων, στις ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος συμπεριλαμβάνεται και η ενθαλπία του νερού εισόδου στον λέβητα μετά των αναμίκτη. Αυτό γίνεται γιατί η τιμή της μεταβάλλεται με την μεταβολή των ιδιοτήτων του νερού μετά τις προθερμάνσεις οι οποίες λαμβάνουν χώρα εξαιτίας των μεταβολών στις απομαυστεύσεις. Να σημειωθεί ότι η μεταβολή της τιμής του καυσίμου θα υπολογιστεί με την υπόθεση σταθερού λόγου αέρα με αποτέλεσμα την σταθερή σύσταση του καυσαερίου.

Συνεπώς πρόκειται για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με 9 βαθμούς ελευθερίας από σύνολο 239 ανεξάρτητων μεταβλητών, 10667 εξισώσεων ισότητας και επιπλέον 10 ανισοτικών περιορισμών. Η ακρίβεια βελτιστοποίησης ορίστηκε στο 10^{-6} με αρχικό

βήμα αναζήτησης 0,5. Επιπλέον ορίστηκε και το επίπεδο κλιμάκωσης (scaling) των μεταβλητών βελτιστοποίησης στο 1. Η κλιμάκωση είναι μία από τις επιτρεπτές παραμετροποιήσεις του λύτη βελτιστοποίησης οι οποίες επιτρέπονται από το gPROMS. Συγκεκριμένα, η κλιμάκωση χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το μέγεθος των τιμών των μεταβλητών βελτιστοποίησης είναι ανομοιογενές μεταξύ τους. Ο γενικός μαθηματικός τύπος ο οποίος χρησιμοποιείται είναι:

$$\tilde{q}_j = \frac{q_j - c_j}{d_j} \quad (5-1)$$

όπου q_j είναι η αρχική τιμή της j μεταβλητής βελτιστοποίησης και \tilde{q}_j η αντίστοιχη κλιμακωμένη τιμή. Οι σταθερές c_j και d_j υπολογίζονται αυτόματα ανάλογα με το επίπεδο κλιμάκωσης το οποίο θα εκλεγεί. Στην περίπτωση που μελετάται, διαφορετικής τάξης μεγέθους μεταβλητές βελτιστοποίησης, εμφανίζονται. Οι απομαστεύσεις είναι της τάξης των δεκάδων, η παροχή του καυσίμου των εκατοντάδων και η ενθαλπία του νερού εισόδου στο λέβητα της τάξης των χιλιάδων. Στο πρώτο επίπεδο κλιμάκωσης οι κλιμακωμένες τιμές βρίσκονται μεταξύ του -1 και 1 ανάλογα με το εύρος τιμών για βελτιστοποίηση. Για τον λόγο αυτό οι τιμές των c_j και d_j είναι:

$$d_j = \frac{1}{2} (q_j^{\max} - q_j^{\min})$$

$$c_j = \frac{1}{2} (q_j^{\max} + q_j^{\min}) \quad (5-2)$$

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν και θα συγκριθούν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης και της προσομοίωσης για τις μεταβλητές οι οποίες είχαν παρουσιαστεί και στο κομμάτι της βελτιστοποίησης του κυκλώματος νερού – ατμού. Η σύγκριση έγινε ώστε να μπορέσουν να αντιπαρατεθούν οι τιμές της βελτιστοποίησης του απλοποιημένου και του ολοκληρωμένου κυκλώματος από τη στιγμή που όπως θα παρουσιαστεί στα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης στη συνέχεια οι τιμές αυτές των απομαστεύσεων διαφέρουν. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε με τα ίδια όρια τιμών των παροχών των απομαστεύσεων τα οποία είχαν χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο του απλοποιημένου κυκλώματος.

5.2.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης ολοκληρωμένου κυκλώματος μονάδας.

Τα συνοπτικά αποτελέσματα των σημαντικότερων μεγεθών από την βελτιστοποίηση του προβλήματος του βαθμού απόδοσης σε σύγκριση με την προσομοίωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-3. Όπως παρατηρείται, σημαντικές αλλαγές στις παροχές μάζας των διαφόρων απομαστεύσεων με ταυτόχρονη μείωση της απαιτούμενης παροχής σε καύσιμο οδήγησε στην αύξηση του συνολικού βαθμού απόδοσης της μονάδας κατά 0,55% σε απόλυτη μεταβολή (ή 1,67% σε σχετική). Η αύξηση στο βαθμό απόδοσης οφείλεται στην μείωση της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας που χρειάζεται να προσδοθεί στο νερό από το σύνολο των υπερθερμαντών και αναθερμαντών, οι οποίοι με τη σειρά τους θα το αποκτήσουν μέσω του καυσαερίου από την καύση. Η μείωση αυτή είναι αποτέλεσμα της καλύτερης προθέρμανσης του νερού πριν την είσοδό του στο λέβητα λόγω των απομαστεύσεων. Μείωση αυτής της απαίτησης σε θερμικό φορτίο από τα καυσαέρια, πραγματοποιείται μέσω της μείωσης του καυσίμου το οποίο αποτέλεσε, στο ολοκληρωμένο κύκλωμα, μία από τις μεταβλητές βελτιστοποίησης.

Πίνακας 5-3 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης του κυκλώματος της μονάδας και σχετική απόκλιση των αποτελεσμάτων από την προσομοίωση του σεναρίου λειτουργίας των 300 MW.

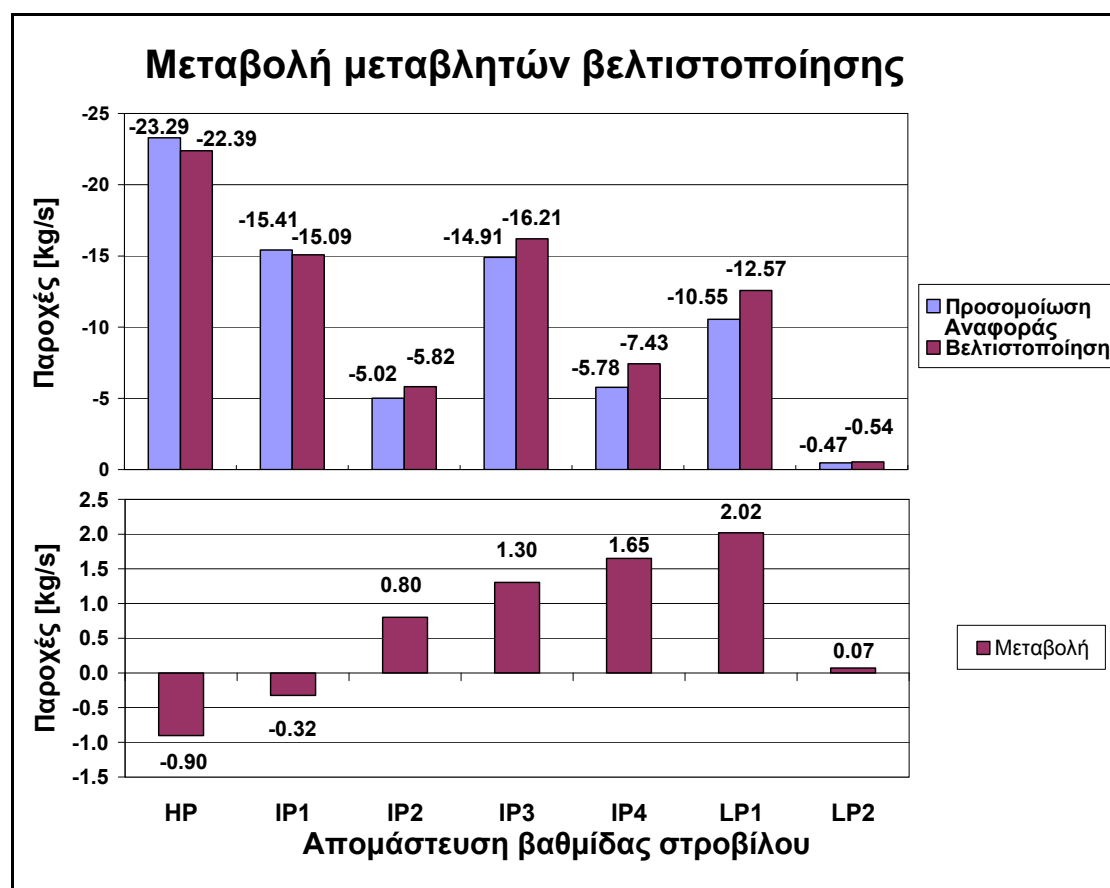
Στοιχεία	Προσομοίωση	Βελτιστοποίηση	Μεταβολή [%]
Απομαστεύσεις	Παροχή μάζας απομαστεύσεων βαθμίδων στροβίλων [kg/s]		
HP	-23.29	-22.39	-3.88
IP1	-15.41	-15.09	-2.10
IP2	-5.02	-5.82	16.00
IP3	-14.91	-16.21	8.74
IP4	-5.78	-7.43	28.55
LP1	-10.55	-12.57	19.15
LP2	-0.47	-0.54	14.89
Καυστήρας	Παροχή μάζας καυσίμου [kg/s]		
BURN	155	151.82	-2.05
Λέβητας	Ενθαλπία εισόδου νερού στο λέβητα [kJ/kg]		
FURNACE	1538.13	1551.41	0.86
Γεννήτριες	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια [kW]		
GEN1	-79900	-79691	-0.26
GEN2	-30172	-30536	1.21
GEN3	-30799	-31726	3.01

GEN4	-24213	-25067	3.53
GEN5	-39539	-39537	-0.01
GEN6	-29613	-29463	-0.51
GEN7	-33424	-32437	-2.95
GEN8	-22400	-21768	-2.82
Αντλίες	Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια [kW]		
Αντλία κενού	446	400	-10.31
Αντλία κυκλ.	5349	5394	0.84
Θερμαντές	Θερμική κατανάλωση [kW]		
S/H	598992	587953	-1.84
R/H	106734	104213	-2.36
Συμπυκνωτής	Θερμικές απώλειες [kJ/s]		
Cond.	-422138	-409147	-3.08
Μονάδα	Βαθμός απόδοσης κυκλώματος νερού - ατμού [-]		
η	0.4	0.406	1.50
Μονάδα	Βαθμός απόδοσης κυκλώματος λέβητα [-]		
η-thermal	0.8227	0.8242	0.18
Μονάδα	Βαθμός απόδοσης μονάδας [-]		
η-total	0.3291	0.3347	1.71

Όπως παρατηρείται αυτή η μείωση του καυσίμου αντιστοιχεί σε 3,18 kg/s κατά απόλυτη μεταβολή ή 2,05% κατά σχετική μεταβολή. Το ποσοστό αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό δεδομένων των μεγεθών που εμφανίζονται σε μία μονάδα. Συγκεκριμένα, αυτή η μεταβολή αντιστοιχεί περίπου σε 11,5 τόνους λιγνίτη ανά ώρα, ποσότητα σημαντική η οποία έχει αντίκτυπο και στις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα. Δεδομένου ότι είχε θεωρηθεί αμετάβλητος ο λόγος αέρα – καυσίμου, η σύσταση των καυσαερίων δεν μεταβάλλεται. Αυτό καθιστά εύκολη μία πρώτη εκτίμηση στη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Συγκεκριμένα, από την σύσταση του καυσαερίου η οποία υπολογίζεται από το μοντέλο του καυστήρα, το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα είναι 11.2447% κατά βάρος οπότε η μείωση των εκπομπών ισοδυναμεί περίπου με την μείωση της παροχής των καυσαερίων επί το ποσοστό του CO₂ σε αυτά:

$(572,4-560,6) \times 3600 \times 0,112447 = 4,776$ τόνοι διοξειδίου του άνθρακα ανά ώρα (ή -2,06% ποσοστιαία μεταβολή)

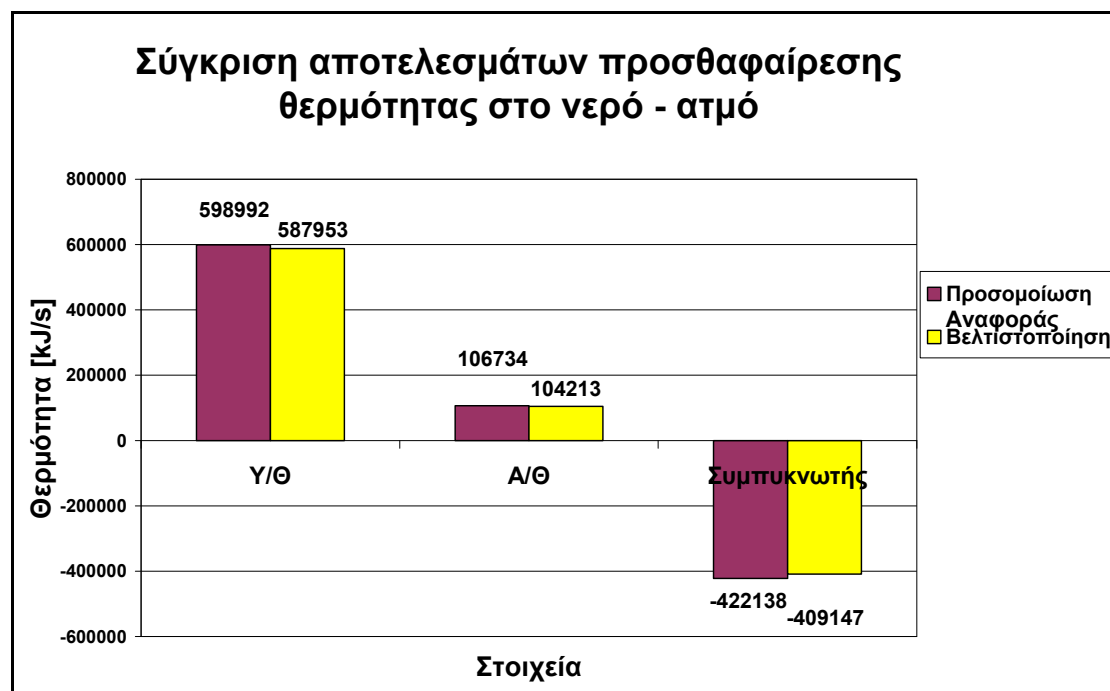
Αυτή είναι μία σημαντική ωριαία ποσότητα η οποία επιβαρύνει το περιβάλλον. Στη συνέχεια αναλύονται πιο διεξοδικά τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης μέσω των συγκριτικών διαγραμμάτων τα οποία παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες. Οι Εικόνες 5-11 έως 5-13 αντιστοιχούν με τις Εικόνες 5-6 έως 5-8 ώστε να είναι δυνατή η αντιπαράθεση με την βελτιστοποίηση του απλοποιημένου κυκλώματος. Τέλος στην Εικόνα 5-14 παρουσιάζεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης των επιμέρους κυκλωμάτων και ολόκληρης της μονάδας ώστε να είναι εμφανής η επίδραση στο εκάστοτε κύκλωμα.



Εικόνα 5-11 Ποσοτική μεταβολή των παροχών των απομαστεύσεων των βαθμίδων των στροβίλων (μεταβλητές βελτιστοποίησης) η οποία οδήγησε σε αύξηση 0,55% του συνολικού βαθμού απόδοσης για το σενάριο λειτουργίας των 300 MW (HP: -3,88%, IP1: -2,1%, IP2: 16%, IP3: 8,74%, IP4: 28,55%, LP1: 19,15%, LP2: 14,89%).

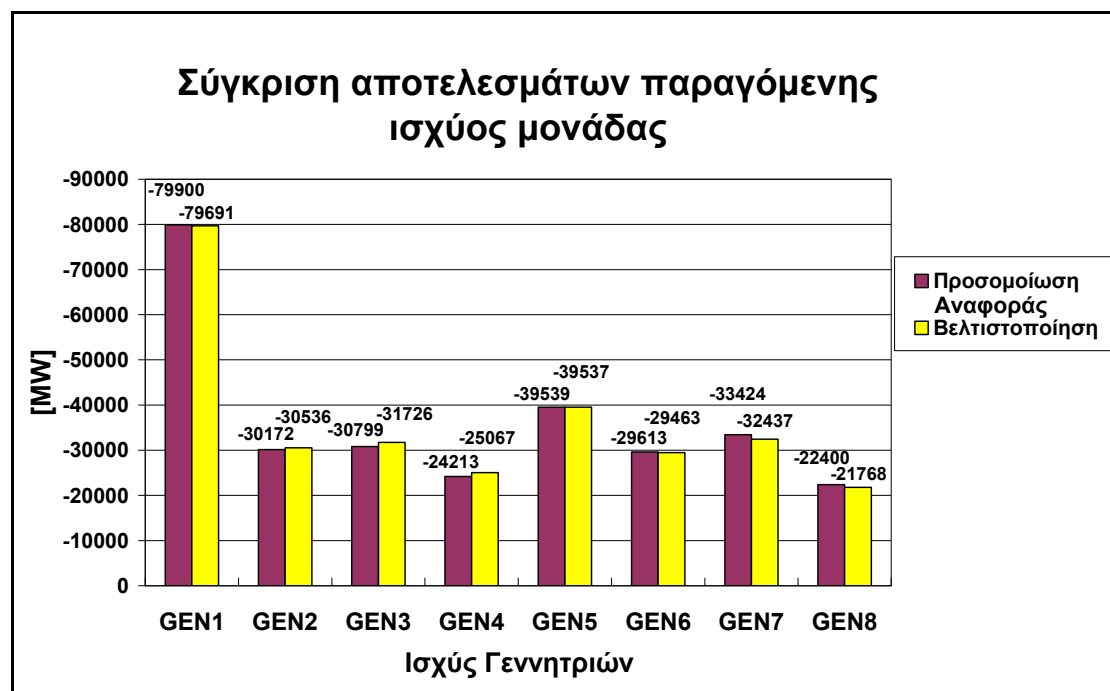
Στην Εικόνα 5-11 παρουσιάζονται οι αρχικές και βελτιστοποιημένες τιμές των παροχών των απομαστεύσεων καθώς και οι απόλυτες μεταβολές αυτών. Παρατηρείται ότι απαιτείται μείωση των παροχών στις απομαστεύσεις των βαθμίδων της υψηλής πίεσης και της πρώτης μέσης πίεσης και αύξηση σε όλες τις υπόλοιπες. Ενδεικτικό είναι ότι παρουσιάζεται μία τάση μείωσης των απομαστεύσεων στις

πρώτες βαθμίδες και αύξηση αυτών στις επόμενες σε σχέση με τις αρχικές τιμές. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η προθέρμανση του νερού στα αρχικά στάδια όπου βλέποντας το συνολικό άθροισμα των απομαστεύσεων, το νερό το οποίο τελικά βγαίνει από τους στροβίλους είναι λιγότερο από το αρχικό. Επομένως αυξημένη παροχή ατμού σε μειωμένη παροχή νερού συνεπάγεται μεγαλύτερη προθέρμανση του νερού οπότε απαίτηση για μικρότερη προθέρμανση στα τελευταία στάδια αυτής. Αν και η απόλυτη μεταβολή είναι μικρή στην τελευταία βαθμίδα χαμηλής πίεσης, σαν σχετική είναι ικανοποιητική (14,89%) λόγω της μικρής αρχικής τιμής αυτής. Αυτή η τάση στην μεταβολή των παροχών έρχεται σε σχετική συμφωνία με την γενικότερη τάση η οποία παρουσιάστηκε στην ανάλυση που έγινε της βελτιστοποίησης του κυκλώματος νερού – ατμού και η οποία δικαιολογείται και από τις τελευταίες τεχνολογίας μονάδες ηλεκτροπαραγωγής που έχουν αρχίσει να καταργούν την απομάστευση από την βαθμίδα του HP στροβίλου και να αυξάνουν τις παροχές αυτών στις βαθμίδες του LP στροβίλου (Chaibakhsh *et al.*, 2008). Η γενική τάση φαίνεται στην Εικόνα 5-11 η οποία παρουσιάζει μείωση στην απομάστευση της βαθμίδας υψηλής πίεσης, αύξηση στις υπόλοιπες. Η παραφωνία εμφανίζεται στην πρώτη βαθμίδα μέσης πίεσης. Αυτή μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι πλέον, τα δεδομένα εισόδου σε αυτή την βαθμίδα, εξαρτώνται από τα αναλυτικά μοντέλα των αναθερμαντών. Αυτό συνεπάγεται εξάρτηση από τις τιμές των καυσαερίων οι οποίες με τη σειρά τους εξαρτώνται από το καύσιμο το οποίο πλέον είναι μια εκ των μεταβλητών βελτιστοποίησης οπότε επηρεάζονται. Επιπλέον εξαρτάται και από τον ψεκασμό μεταξύ των ανάθερμων RH1b και RH2. Πλέον, λόγω του ψεκασμού αυξάνεται και η παροχή του ατμού με ταυτόχρονη μείωση των ιδιοτήτων του ατμού εξόδου ο οποίος με την σειρά του εισέρχεται στην επόμενη βαθμίδα. Επομένως ανάγκη περισσότερου ατμού απαιτείται για την διατήρηση της ισχύος.



Εικόνα 5-12 Μεταβολές της μετάδοσης θερμότητας από και προς το κύκλωμα του νερού – ατμού έπειτα από την εφαρμογή της βελτιστοποίησης που οδήγησε στην αύξηση κατά 0,55% του βαθμού απόδοσης της μονάδας. (Y/Θ: - 1,84%, A/Θ: -2,36%, Συμπυκνωτής: - 3,08%).

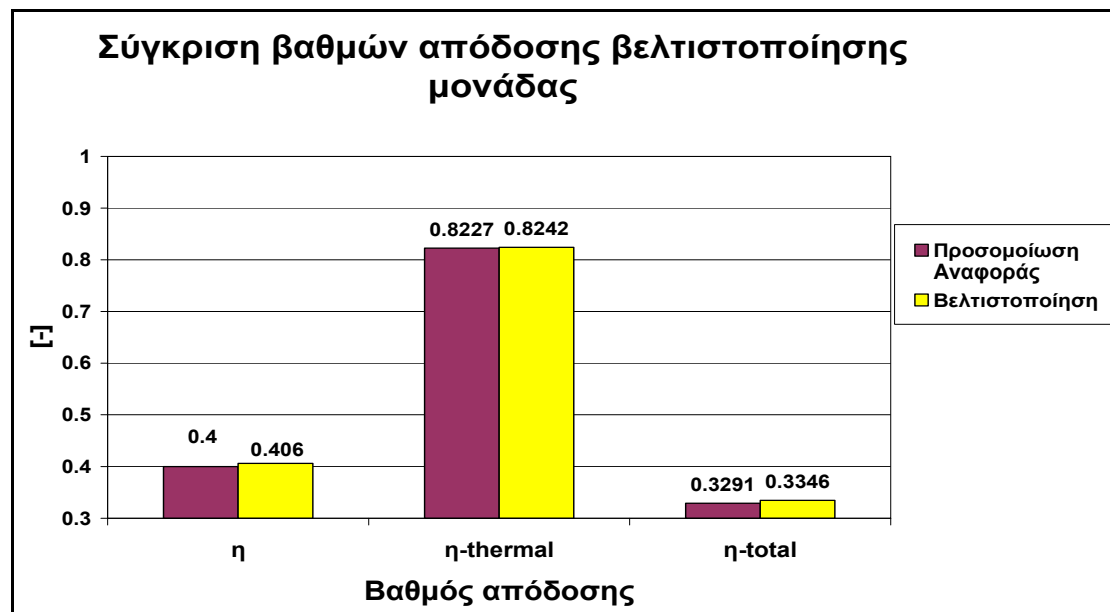
Στην Εικόνα 5-12 φαίνονται οι μεταβολές οι οποίες συνέβησαν στα φορτία από και προς το κύκλωμα του νερού – ατμού. Συγκεκριμένα παρουσιάστηκε μείωση στην συνολική θερμότητα η οποία προσδόθηκε από τους υπερθερμαντές και αναθερμαντές καθώς και μείωση στην θερμότητα η οποία χάνεται κατά την συμπύκνωση του ατμού. Για να υπάρχει αντιστοιχία με τα νούμερα από το αντίστοιχο διάγραμμα του κυκλώματος νερού – ατμού, σαν θερμότητα από τον υπερθερμαντή συγκαταλέγεται και η θερμότητα η οποία προσδόθηκε από τον οικονομητήρα μετά την τελευταία προθέρμανση καθώς και από τον λέβητα κατά την εξάτμιση του νερού. Από τις μεταβολές των παραπάνω μεγεθών δικαιολογείται και η αύξηση του βαθμού απόδοσης του κυκλώματος νερού – ατμού. Αρχικά μέσω της μείωσης της απαιτούμενης θερμότητας για το νερό και τον ατμό μετά τους προθερμαντές του νερού. Αυτή η μείωση έχει άμεσο αντίκτυπο στην σχέση του βαθμού απόδοσης από τη στιγμή που συνεπάγεται μείωση του παρανομαστή. Κατά δεύτερο λόγο, η μείωση των απωλειών στον συμπυκνωτή δείχνει καλύτερη αξιοποίηση του ατμού μέσω των μεταβολών των απομαστεύσεων για την παραγωγή του ίδιου ποσού ηλεκτρικής ενέργειας με μικρότερες απαιτήσεις σε θερμική. Κοινώς βελτίωση της απόδοσης του κυκλώματος.



Εικόνα 5-13 Μεταβολές στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μετά την εφαρμογή της βελτιστοποίησης η οποία οδήγησε στην αύξηση κατά 0,55% του βαθμού απόδοσης της μονάδας. (GEN1: 0,01%, GEN2: 2,43%, GEN3: 3,79%, GEN4: 2,76%, GEN5: 1,07%, GEN6: -1,31%, GEN7: -4,46%, GEN8: -4,98%).

Σε αυτό το σημείο δίνεται η Εικόνα 5-13 στην οποία φαίνεται η σταθερότητα στην παραγωγή της ηλεκτρικής ισχύος από την μονάδα. Αν και υπάρχουν κάποιες αποκλίσεις αυτές εξισορροπούνται. Συγκεκριμένα, αυξάνεται η ισχύς σε τρεις γεννήτριες (GEN2, GEN3, GEN4) και μειώνεται ή μένει σταθερή στις άλλες (μειώνεται στις GEN1, GEN6, GEN7, GEN8 και μένει σταθερή στην GEN5). Να σημειωθεί ότι η αρίθμηση των γεννητριών ξεκινάει από την βαθμίδα στροβίλου HP και καταλήγει στην τελευταία βαθμίδα LP. Αυτή η διακύμανση είναι φυσιολογική. Η βαθμίδα HP δεν εξαρτάται από τις απομαστεύσεις αλλά από την παροχή και θερμοκρασία εισόδου. Και τα δύο αυτά μεγέθη έχουν μειωθεί ελάχιστα επομένως επηρεάζουν ελαφρώς την αποδιδόμενη ισχύ. Από εκεί και πέρα, λόγω της μείωσης των πρώτων απομαστεύσεων, μεγαλύτερη παροχή ατμού περνάει μέσα από τον στρόβιλο αυξάνοντας την ισχύ. Αυτή η μείωση των απομαστεύσεων, μαζί με την μικρότερη αύξηση στις πρώτες βαθμίδες IP συνεπάγεται διατήρηση υψηλότερης παροχής και μετά την αύξηση των παροχών των απομαστεύσεων. Επομένως, οι αυξήσεις ισχύος ως προς τις προσομοιωμένες διατηρούνται μέχρι και την τέταρτη γεννήτρια, σταματάνε στην πέμπτη και αρχίζουν να μειώνονται από την έκτη και μετά. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η διατήρηση της ισχύος στα ίδια επίπεδα με την προσομοίωση το οποίο σε συνδυασμό με την μείωση της καταναλισκόμενης

θερμότητας η οποία παρουσιάστηκε προηγουμένως οδηγούν στην αύξηση του βαθμού απόδοσης του κυκλώματος νερού – ατμού.



Εικόνα 5-14 Σύγκριση του βαθμού απόδοσης των επιμέρους κυκλωμάτων (η-thermal: κύκλωμα λέβητα, η: κύκλωμα νερού – ατμού) και του συνολικού κυκλώματος της μονάδας (η-total) προσομοίωσης και βελτιστοποίησης για το σενάριο λειτουργίας των 300 MW.

Στην Εικόνα 5-14 συγκρίνονται οι βαθμοί απόδοσης των επιμέρους κυκλωμάτων και ο συνολικός της μονάδας μεταξύ προσομοίωσης και βελτιστοποίησης του συνολικού κυκλώματος της μονάδας. Όπως παρατηρείται αύξηση του βαθμού απόδοσης παρατηρείται και στο κύκλωμα νερού – ατμού κατά 0,6% σε απόλυτη τιμή (ή 1,5% σε σχετική) και στο κύκλωμα του λέβητα με τους υπερθερμαντές και αναθερμαντές κατά 0,15% σε απόλυτη (ή 0,18% σε σχετική). Συνεπώς, ο συνολικός βαθμός απόδοσης της μονάδας αυξάνεται και αυτός κατά 0,55% σε απόλυτη τιμή (ή 1,67% σε σχετική). Επομένως, οι μεταβολές στις απομαστεύσεις οδήγησαν στην αύξηση των δεδομένων του προθερμασμένου νερού το οποίο με τη σειρά του οδήγησε στην μείωση της ανάγκης για πρόσδοση θερμότητας από τους υπερθερμαντές και αναθερμαντές. Αυτή η μείωση εκφράζεται μέσω της μείωσης των καυσαερίων η οποία δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την μεταβολή του καυσίμου. Η μείωση της προσδιδόμενης θερμότητας με σταθερή ισχύ συνεπάγεται αύξηση του βαθμού απόδοσης του κυκλώματος νερού – ατμού. Από την άλλη, μείωση του καυσίμου με καλύτερη διαχείριση των υπερθερμαντών και αναθερμαντών καθώς και των ψεκασμών, συνεπάγεται βελτίωση του βαθμού απόδοσης του κυκλώματος του λέβητα, μικρότερης ωστόσο λόγω της ταυτόχρονης μείωσης της προσδιδόμενης θερμότητας στο νερό – ατμό.

Συνεχίζοντας, παρουσιάζεται η επίδραση κάθε μεταβλητής βελτιστοποίησης στην αντικειμενική συνάρτηση όπως αυτή παράγεται από το gPROMS μέσω των κλίσεων των μεταβλητών ως προς την αντικειμενική συνάρτηση (gradients). Στον Πίνακα 5-4 παρουσιάζονται αυτά τα αποτελέσματα και σχολιάζονται στην συνέχεια.

Πίνακας 5-4 Κλίση μεταβλητών βελτιστοποίησης ως προς τον βαθμό απόδοσης της μονάδας.

Μεταβλητές βελτιστοποίησης	Αντικειμενική συνάρτηση
Καυστήρας	n-total
Παροχή καυσίμου	-0.00205
Λέβητας	
Ενθαλπία νερού εισόδου	-0.00089
Απομαστεύσεις	
HP	-0.00179
IP1	-0.00180944
IP2	-0.00270309
IP3	-0.00258025
IP4	-0.00257774
LP1	-0.0025758
LP2	-0.00257348

Οι τιμές του παραπάνω Πίνακα ερμηνεύονται ως αναμενόμενη μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης με την μεταβολή κατά μία μονάδα της εκάστοτε μεταβλητής από την στιγμή που είναι δυνατή η περαιτέρω βελτιστοποίηση. Συνεπώς παρατηρείται η σημαντική επίδραση όπου κάθε μεταβλητή έχει ξεχωριστά στον βαθμό απόδοσης. Συγκεκριμένα την μεγαλύτερη επίδραση έχουν οι απομαστεύσεις των βαθμίδων από την δεύτερη του στροβίλου μέσης πίεσης μέχρι και την τελευταία χαμηλής πίεσης με αύξηση των τιμών της απομάστευσης. Αναλυτικότερα παρατηρείται μείωση της επίδρασης από την βέλτιστη επίδραση στον βαθμό απόδοσης η οποία είναι στην δεύτερη βαθμίδα IP (0,27% σε απόλυτη τιμή) μέχρι την τελευταία βαθμίδα (0,2573%). Η επίδραση της παροχής καυσίμου είναι μικρότερη και ίση με 0,205% με μείωση της παροχής. Την μικρότερη επίδραση έχουν οι αυξήσεις των απομαστεύσεων HP και IP1 (0,18% και 0,181% αντίστοιχα) καθώς και η μείωση της ενθαλπίας του νερού στην είσοδο του λέβητα (0,09%). Να σημειωθεί εδώ ότι το αρνητικό πρόσημο συνεπάγεται ανάγκη για μείωση των τιμών ώστε να επιτευχθεί αύξηση άρα και βελτίωση του βαθμού απόδοσης. Επειδή όμως οι παροχές των απομαστεύσεων, κατά συμφωνία, είναι αρνητικές γιατί είναι έξοδοι, περαιτέρω μείωση των τιμών σημαίνει αύξηση της αρνητικής τιμής επομένως και αύξηση της απομάστευσης. Επειδή οι δύο πρώτες απομαστεύσεις έχουν και την μικρότερη

επίδραση μεταξύ τους, δικαιολογείται και η προτίμηση μείωσης αυτών και αύξηση των υπολοίπων από το πρόγραμμα με την επίλυση της βελτιστοποίησης. Αυτό με τη σειρά του δικαιολογεί την μικρότερη αύξηση στην τελευταία βαθμίδα LP. Τέλος, η μικρότερη επίδραση της ενθαλπίας του νερού εισόδου από όλες τις μεταβλητές δικαιολογεί την επιλογή της μόνο ως μεταβλητή βελτιστοποίησης για την διευκόλυνση των υπολογισμών.

Σε μία προσπάθεια επιβεβαίωσης των τιμών των κλίσεων έγινε βελτιστοποίηση του κυκλώματος της μονάδας αλλά με χρήση των βελτιστοποιημένων τιμών των απομαστεύσεων. Τα αποτελέσματα έδωσαν πολύ μικρές μεταβολές των μεταβλητών βελτιστοποίησης (της τάξης του 10^{-4}) το οποίο οδήγησε σε μία βελτίωση του βαθμού απόδοσης κατά $7 \cdot 10^{-4}$ % απόλυτης τιμής. Υπολογίζοντας την μεταβολή του βαθμού απόδοσης με βάση τις μεταβολές στις μεταβλητές βελτιστοποίησης που υπολογίστηκαν από την βελτιστοποίηση και τις κλίσεις από την ανάλυση ευαισθησίας, η μεταβολή του βαθμού απόδοσης είναι $8,2 \cdot 10^{-4}$ % απόλυτης τιμής. Επομένως οι κλίσεις αυτές μπορούν να θεωρηθούν σωστές.

Σε αυτό το σημείο θα αναφερθούν τα στατιστικά στοιχεία από τον υπολογισμό της βελτιστοποίησης. Ο λόγος που παρουσιάζονται στο τέλος είναι για να τονιστεί παραπάνω η επιλογή του εναλλακτικού μαθηματικού μοντέλου για την διεξαγωγή της βελτιστοποίησης. Αναλυτικότερα, απαιτήθηκαν 54 επαναλήψεις με 161 βήματα αναζήτησης γραμμής (Line Search Steps). Ο χρόνος επίλυσης ανέρχεται στα 471 δευτερόλεπτα είτε περίπου 8 λεπτά. Είναι εμφανής η εξοικονόμηση χρόνου που επιτυγχάνεται με την χρήση του εναλλακτικού μοντέλου. Με μία απλή αναγωγή, για κάθε επανάληψη βελτιστοποίησης με το εναλλακτικό μοντέλο χρειάζονται 8,7 δευτερόλεπτα. Δεδομένης της ανάγκης μεταξύ 8 και 9 δευτερόλεπτα κάθε προσομοίωσης στο αυτό μοντέλο, μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι ο χρόνος προσομοίωσης είναι ίσος με τον χρόνο της κάθε επανάληψης βελτιστοποίησης. Αναλογιζόμενοι τα 2100 δευτερόλεπτα που απαιτούνται για κάθε προσομοίωση με χρήση του αρχικού και αναλυτικού μαθηματικού μοντέλου, θα απαιτούνταν $2100 \times 54 = 113400$ δευτερόλεπτα είτε 31,5 ώρες για την επίτευξη μίας βελτιστοποίησης με το αρχικό μαθηματικό μοντέλο. Εκτός αυτού, προβλήματα διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος, καθιστούσαν δύσκολη την διεξαγωγή της βελτιστοποίησης του αρχικού μοντέλου με τις υπάρχουσες υποδομές.

5.2.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης της μονάδας με χρήση των τιμών της βελτιστοποίησης του κυκλώματος νερού – ατμού.

Όπως παρατηρήθηκε, τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του ολοκληρωμένου κυκλώματος έδωσαν διαφορετικές βέλτιστες τιμές για τις παροχές των απομαστεύσεων των βαθμίδων των στροβίλων από την βελτιστοποίηση η οποία και πραγματοποιήθηκε για το απλοποιημένο κύκλωμα νερού – ατμού. Επιπλέον, η βελτιστοποίηση η οποία επιτεύχθηκε στο κύκλωμα νερού – ατμού ήταν και αυτή μικρότερη από την αντίστοιχη βελτίωση του απλοποιημένου κυκλώματος.

Εξαιτίας των παραπάνω παρατηρήσεων, πραγματοποιήθηκε μια προσπάθεια προσομοίωσης του ολοκληρωμένου κυκλώματος της μονάδας με χρήση των βελτιστοποιημένων τιμών των απομαστεύσεων όπως είχαν υπολογιστεί στην βελτιστοποίηση του απλοποιημένου κυκλώματος στο κεφάλαιο 5.1. Στην προσπάθεια αυτή, το κύκλωμα του λέβητα έπρεπε να υπολογιστεί ξανά με καινούργια πλέον δεδομένα εισόδου. Αυτά τα νέα δεδομένα θα είναι οι ιδιότητες του νερού στην είσοδο του οικονομητήρα καθώς και η διατήρηση των περιορισμών όπως είχαν προσδιοριστεί στο κομμάτι της βελτιστοποίησης της μονάδας, δηλαδή, παροχή, θερμοκρασία και πίεση στην έξοδο του ατμού από τον υπερθερμαντή SH3 και η θερμοκρασία στην έξοδο του ατμού από τον αναθερμαντή RH2. Ο λόγος είναι ότι αυτά είναι και τα σημεία τα οποία συνδέουν τα κυκλώματα του λέβητα και του νερού – ατμού.

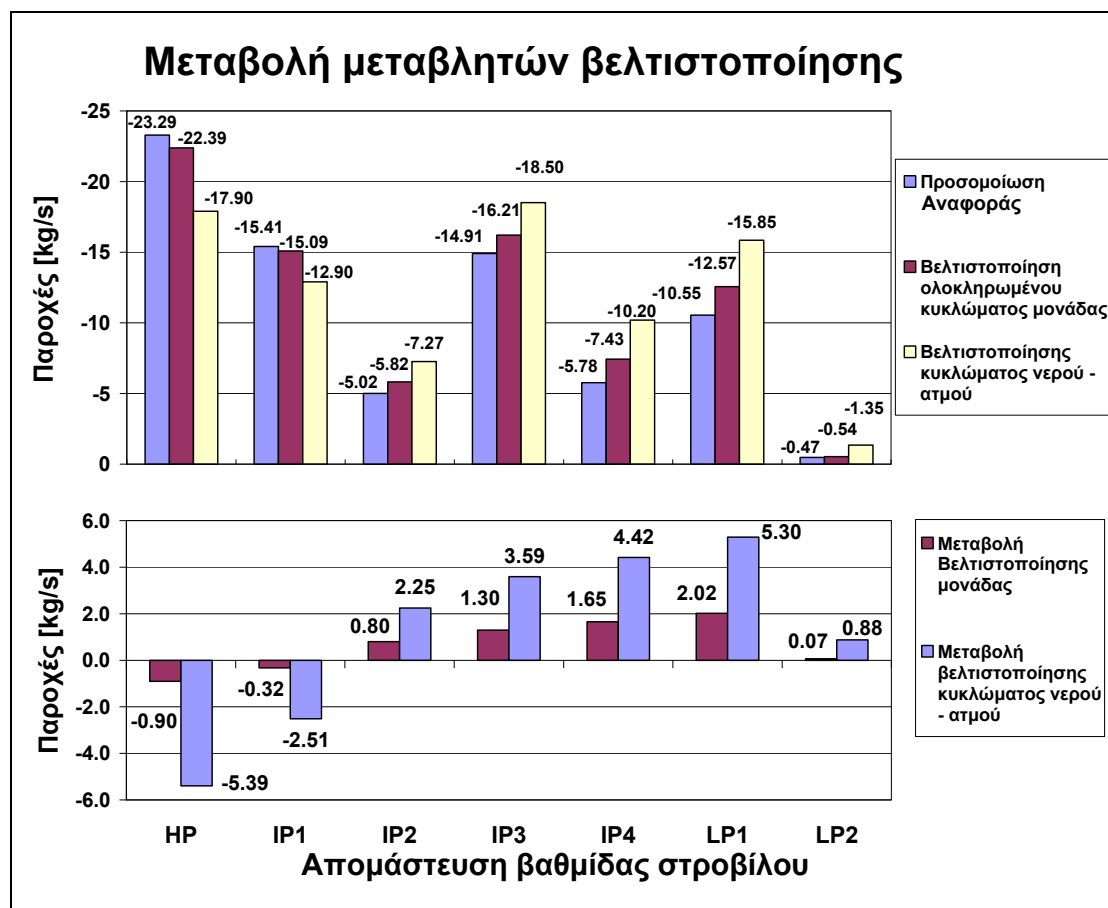
Τα τελικά αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας προσομοίωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-5 μαζί με την μεταβολή αυτών σε σχέση με την προσομοίωση του συνολικού κυκλώματος. Ταυτόχρονα, παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης της μονάδας που προηγήθηκε καθώς και της βελτιστοποίησης όπως είχε πραγματοποιηθεί στο απλοποιημένο κύκλωμα. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η σύγκριση μεταξύ των διαφόρων περιπτώσεων βελτιστοποίησης με την προσομοίωση του ολοκληρωμένου κυκλώματος.

Πίνακας 5-5 Σύγκριση αποτελεσμάτων και μεταβολών των βελτιστοποιημένων προσομοιώσεων με την προσομοίωση του ολοκληρωμένου κυκλώματος της μονάδας.

Στοιχεία	Προσ.	Βελτισ.	Βελτισ. Προσ.	Βελτιστοποίηση κυκλώματος νερού – ατμού	Μεταβολή [%]		
Απομαστεύσεις	Παροχή μάζας απομαστεύσεων βαθμίδων στροβίλων [kg/s]						
HP	-23.29	-22.39	-17.90	-17.90	-3.88	-23.14	-23.14
IP1	-15.41	-15.09	-12.90	-12.90	-2.10	-16.29	-16.29
IP2	-5.02	-5.82	-7.27	-7.27	16.00	44.83	44.83
IP3	-14.91	-16.21	-18.50	-18.50	8.74	24.08	24.08
IP4	-5.78	-7.43	-10.20	-10.20	28.55	76.47	76.47
LP1	-10.55	-12.57	-15.85	-15.85	19.15	50.24	50.24
LP2	-0.47	-0.54	-1.35	-1.35	14.89	187.23	187.23
Καυστήρας	Παροχή μάζας καυσίμου [kg/s]						
BURN	155	151.82	152.76	-	-2.05	-1.45	-
Λέβητας	Ενθαλπία εισόδου νερού στο λέβητα [kJ/kg]						
FURNACE	1538.13	1551.41	1547.81	-	0.86	0.63	-
Γεννήτριες	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια [kW]						
GEN1	-79900	-79691	-79767	-79987	-0.26	-0.17	0.11
GEN2	-30172	-30536	-30754	-30917	1.21	1.93	2.47
GEN3	-30799	-31726	-31636	-31938	3.01	2.72	3.70
GEN4	-24213	-25067	-24931	-24843	3.53	2.97	2.60
GEN5	-39539	-39537	-39583	-39883	-0.01	0.11	0.87
GEN6	-29613	-29463	-29407	-29154	-0.51	-0.70	-1.55
GEN7	-33424	-32437	-32410	-31856	-2.95	-3.03	-4.69
GEN8	-22400	-21768	-21666	-21217	-2.82	-3.28	-5.28
Αντλίες	Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια [kW]						
Αντλία κενού	446	400	420	420	-10.31	-5.83	-5.83
Αντλία κυκλ.	5349	5394	5563	5592	0.84	4.00	4.54
Θερμαντές	Θερμική κατανάλωση [kW]						
S/H	598992	587953	574186	577340	-1.84	-4.14	-3.61
R/H	106734	104213	105392	107524	-2.36	-1.26	0.74
Συμπυκνωτής	Θερμικές απώλειες [kJ/s]						
Cond.	-422138	-409147	-396154	-397906	-3.08	-6.16	-5.74
Μονάδα	Βαθμός απόδοσης κυκλώματος νερού - ατμού [-]						
η	0.4	0.406	0.4136	0.4148	1.50	3.40	3.70
Μονάδα	Βαθμός απόδοσης κυκλώματος λέβητα [-]						
η-thermal	0.8227	0.8242	0.8056	-	0.18	-2.08	-
Μονάδα	Βαθμός απόδοσης μονάδας [-]						
η-total	0.3291	0.3346	0.3332	-	1.67	1.25	-

Όπως παρατηρείται, επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση της ολοκληρωμένης μονάδας ακόμη και με εφαρμογή και μόνο των βελτιστοποιημένων τιμών της βελτιστοποίησης του απλοποιημένου κυκλώματος. Η βελτίωση του βαθμού απόδοσης του κυκλώματος νερού - ατμού ήταν μεγαλύτερη στην βελτιστοποίηση του απλοποιημένου κυκλώματος από αυτή που επιτεύχθηκε από την βελτιστοποίηση στο ολοκληρωμένο μοντέλο της μονάδας (1,36% έναντι 0,6% σε απόλυτη τιμή). Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο από τη στιγμή που οι τιμές των απομαστεύσεων ήταν οι βελτιστοποιημένες του απλοποιημένου κυκλώματος στο οποίο στόχος ήταν μόνο η βελτιστοποίηση του συγκεκριμένου βαθμού απόδοσης. Ωστόσο η τιμή αυτή είναι ελαφρώς μικρότερη της τιμής βελτιστοποίησης του απλοποιημένου που επιτεύχθηκε (1,42% με βάση την τιμή της προσομοίωσης του απλοποιημένου ή 1,48% με βάση την τιμή προσομοίωσης του ολοκληρωμένου κυκλώματος). Η απόκλιση αυτή μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι ατμός απομαστεύεται πριν μπει στο λέβητα για τους ψεκασμούς οπότε προθερμασμένο νερό στο τελευταίο στάδιο χάνεται. Η βελτιστοποίηση του συνολικού βαθμού απόδοσης αντιστοιχεί σε 0,41% απόλυτη αύξηση αυτού (είτε 1,25% σχετική), τιμή ωστόσο μικρότερη από την βελτιστοποίηση που επιτεύχθηκε με την βελτιστοποίηση του ολοκληρωμένου κυκλώματος η οποία όπως αναφέρθηκε προηγουμένως και φαίνεται και στον Πίνακα 5-5, είναι 0,55%. Από τη στιγμή που επιτεύχθηκε βελτίωση του συνολικού βαθμού απόδοσης της μονάδας με εφαρμογή των βελτιστοποιημένων τιμών των απομαστεύσεων του απλοποιημένου κυκλώματος και με παράλληλα σταθερή παραγόμενη ισχύ, επακόλουθη είναι η μείωση του καυσίμου. Η οικονομία καυσίμου από αυτή την βελτίωση του βαθμού απόδοσης ανέρχεται στα 2,24 kg/s ή 8,06 τόνους ανά ώρα. Όπως παρατηρείται η εξοικονόμηση είναι μικρότερη από την βελτιστοποίηση του ολοκληρωμένου κυκλώματος, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο από τη στιγμή που ο βαθμός απόδοσης της μονάδας είναι μικρότερος.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται και συγκρίνονται αναλυτικότερα τα αποτελέσματα μέσω των διαγραμμάτων σύγκρισης των Εικόνων 5-15 έως 5-18. Τα διαγράμματα αυτά είναι τα αντίστοιχα με αυτά των Εικόνων 5-11 έως 5-14 με την προσθήκη πλέον και της προσομοίωσης των βελτιστοποιημένων τιμών του απλοποιημένου κυκλώματος καθώς και την αυτή βελτιστοποίηση του απλοποιημένου κυκλώματος.

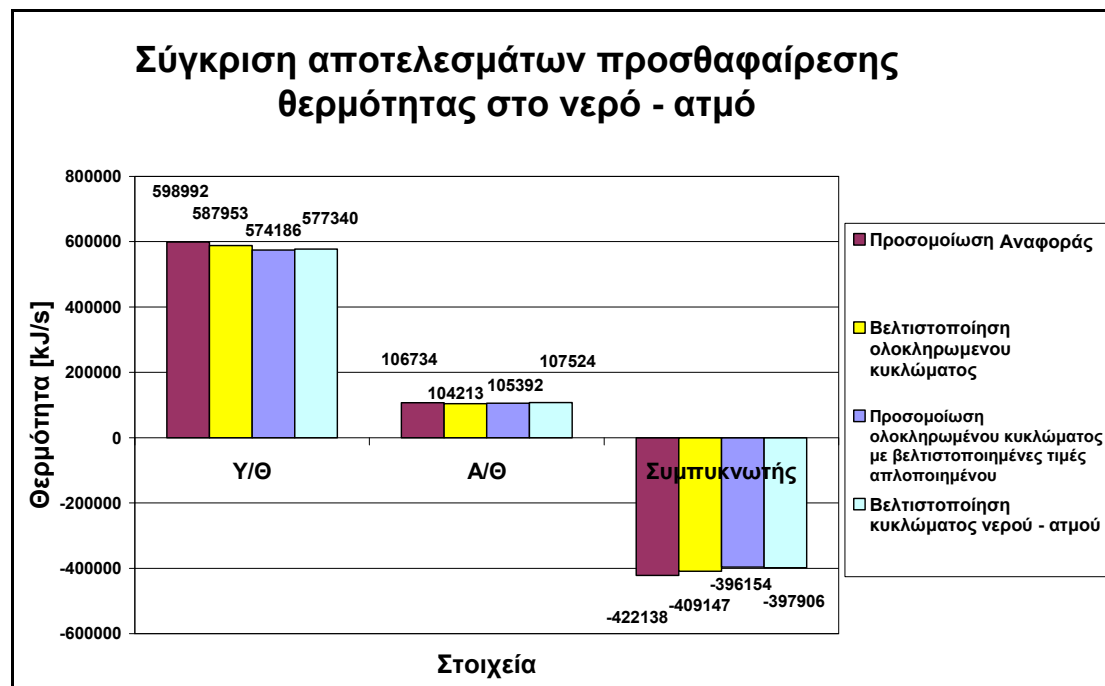


Εικόνα 5-15 Σύγκριση των τιμών και της ποσοτικής μεταβολής των παροχών των απομαστεύσεων των βαθμίδων των στροβίλων (μεταβλητές βελτιστοποίησης) των διαφόρων βελτιστοποιήσεων που πραγματοποιήθηκαν για το σενάριο πλήρους φορτίου.

Στην Εικόνα 5-15 διαπιστώνεται και ο λόγος ο οποίος οδήγησε στην προσομοίωση του ολοκληρωμένου κυκλώματος με τις βελτιστοποιημένες τιμές από το απλοποιημένο κύκλωμα. Οι μεταβολές είναι τουλάχιστον διπλάσιες από τις μεταβολές οι οποίες υπολογίστηκαν από την βελτιστοποίηση του ολοκληρωμένου κυκλώματος της μονάδας. Αυτό δικαιολογείται από την μία με την αύξηση της πολυπλοκότητας και της εξάρτησης του κυκλώματος και από άλλες μεταβλητές και κυρίως από το γεγονός ότι πλέον η αντικειμενική συνάρτηση της βελτιστοποίηση δεν είναι ο βαθμός απόδοσης μόνο του κυκλώματος νερού – ατμού αλλά ολόκληρης της μονάδας επομένως εξαρτάται πλέον και από τον βαθμό απόδοσης του κυκλώματος του λέβητα.

Χαρακτηριστικό ωστόσο είναι ότι η τάση η οποία παρουσιάζεται από τις μεταβολές των απομαστεύσεων είναι η ίδια. Δηλαδή μείωση των απομαστεύσεων των δύο πρώτων βαθμίδων (HP και IP1), σταδιακή αύξηση των απομαστεύσεων των υπολοίπων βαθμίδων με εξαίρεση την τελευταία βαθμίδα LP όπου υπάρχει αύξηση

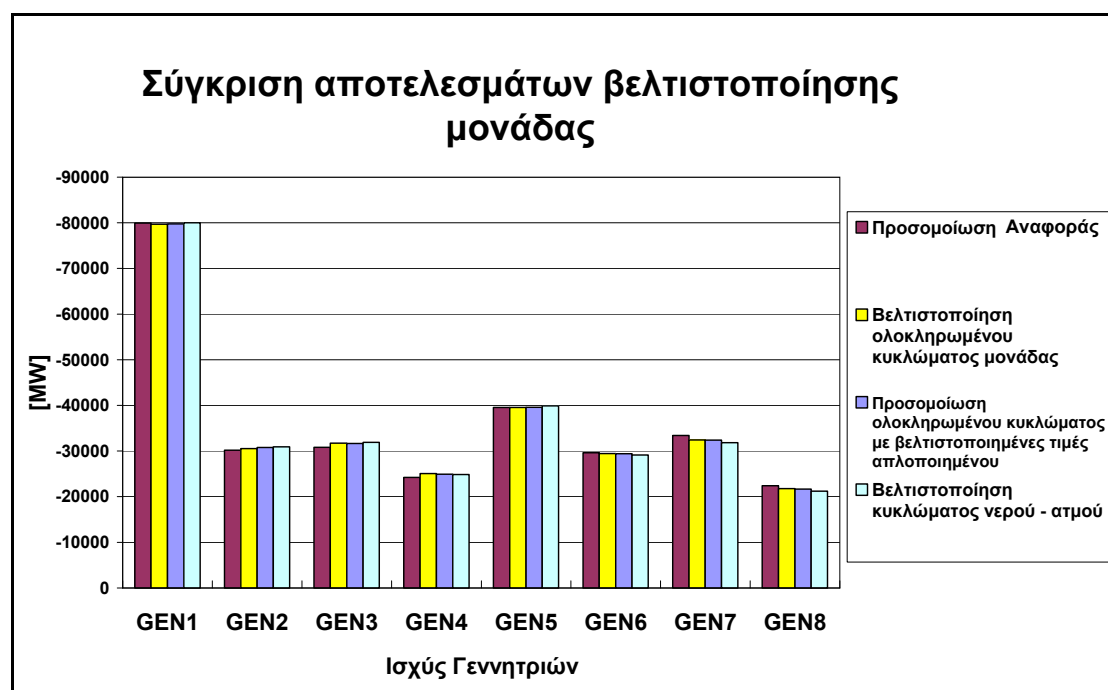
αλλά μικρότερη. Οι λόγοι παραμένουν οι ίδιοι με αυτούς τους οποίους αναφέρθηκαν στην περίπτωση της βελτιστοποίησης του ολοκληρωμένου κυκλώματος.



Εικόνα 5-16 Σύγκριση των μεταβολών της μετάδοσης θερμότητας από και προς το κύκλωμα του νερού – ατμού έπειτα από την εφαρμογή των διαφόρων βελτιστοποιήσεων που πραγματοποιήθηκαν για το σενάριο πλήρους φορτίου.

Σε αντιστοιχία με την Εικόνα 5-12 παρουσιάζονται οι μεταβολές των θερμικών φορτίων από και προς το νερό – ατμό στην Εικόνα 5-16. Παρατηρείται ότι η συμπεριφορά της προσομοίωσης με τις βελτιστοποιημένες τιμές του απλού κυκλώματος είναι παρόμοια με αυτή της αντίστοιχης βελτιστοποίησης. Αυτή είναι λογική συμπεριφορά δεδομένου ότι οι τιμές αυτές των απομαστεύσεων βασίζονται στην βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης του κυκλώματος νερού – ατμού στον υπολογισμό του οποίου οι παραπάνω τιμές είναι οι σημαντικές. Με εξαίρεση την αναθέρμανση, η τάση είναι ίδια με αυτή της βελτιστοποίησης του ολοκληρωμένου κυκλώματος της μονάδας, δηλαδή μείωση υπερθέρμανσης και απωλειών συμπύκνωσης. Η μείωση αυτή μάλιστα είναι ακόμη μεγαλύτερη όταν χρησιμοποιούνται οι βελτιστοποιημένες τιμές των μεταβλητών βελτιστοποίησης του απλοποιημένου κυκλώματος. Στην αναθέρμανση υπάρχει μείωση στην προσομοίωση του ολοκληρωμένου κυκλώματος με τις βελτιστοποιημένες του απλοποιημένου αλλά στο βελτιστοποιημένο απλοποιημένο μοντέλο, ελαφριά αύξηση. Στην περίπτωση της προσομοίωσης του ολοκληρωμένου κυκλώματος με τις βελτιστοποιημένες του απλοποιημένου μοντέλου, η μικρότερη μείωση της αναθέρμανσης μπορεί να

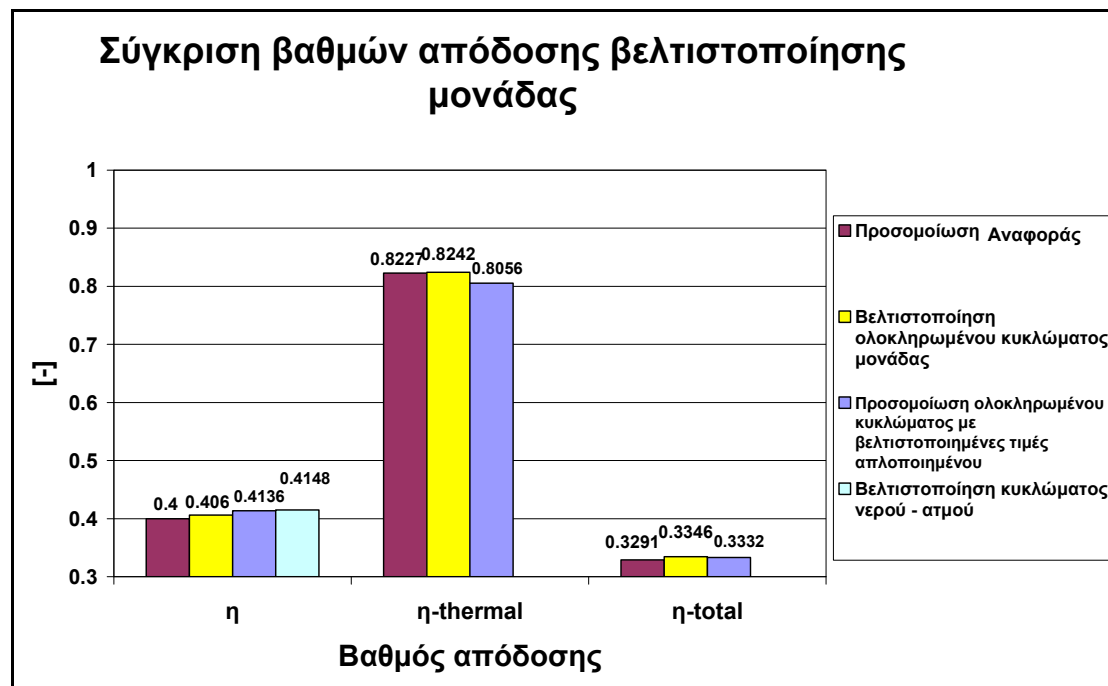
δικαιολογηθεί από το αυξημένο πλέον φορτίο που έχουν τα καυσαέρια λόγω της περαιτέρω μείωσης της ανάγκης των υπερθερμαντών σε σύγκριση με την βελτιστοποίηση του ολοκληρωμένου μοντέλου της μονάδας. Όσον αφορά την βελτιστοποίηση του απλοποιημένου κυκλώματος, η έλλειψη στοιχείων της υπερθέρμανσης και της αναθέρμανσης οδήγησε σε αύξηση της τιμής αλλά περαιτέρω μείωσης των υπολοίπων θερμοτήτων, οι μεταβολές των οποίων αν συγκριθούν με τις τιμές της προσομοίωσης του απλοποιημένου κυκλώματος που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4.1.2 είναι ακόμη μεγαλύτερες.



Εικόνα 5-17 Σύγκριση μεταβολές στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια έπειτα από την εφαρμογή των διαφόρων βελτιστοποιήσεων που πραγματοποιήθηκαν για το σενάριο πλήρους φορτίου.

Όπως και στην βελτιστοποίηση του ολοκληρωμένου κυκλώματος της μονάδας, οι τιμές της παραγόμενης ισχύος από κάθε βαθμίδα στροβίλου βρίσκεται στα ίδια επίπεδα και για την προσομοίωση με τις βελτιστοποιημένες τιμές καθώς και για την βελτιστοποίηση του απλού κυκλώματος όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-17. Η συμπεριφορά και η τάση της παραγόμενης ισχύος ανά βαθμίδα είναι η ίδια και στις τρεις περιπτώσεις: Ελαφριά μείωση της GEN1, αύξηση στις GEN2 έως GEN4, σταθερότητα στην GEN5 και μείωση στις υπόλοιπες. Ο λόγος για αυτή την τάση έχει εξηγηθεί στην ανάλυση της Εικόνας 5-13. Λόγω των μεγαλύτερων μεταβολών στις απομαστεύσεις, η διεύρυνση των μεταβολών είναι μεγαλύτερη στις περιπτώσεις των βελτιστοποιημένων τιμών του απλοποιημένου κυκλώματος. Εξαίρεση αποτελεί η

βαθμίδα ΗΡ καθότι δεν επηρεάζεται από τις απομαστεύσεις το οποίο και δικαιολογεί την μικρή μείωση σε όλες τις περιπτώσεις βελτιστοποίησης.



Εικόνα 5-18 Σύγκριση του βαθμού απόδοσης των επιμέρους κυκλωμάτων (η-thermal: κύκλωμα λέβητα, η: κύκλωμα νερού – ατμού) και του συνολικού κυκλώματος της μονάδας (η-total) προσομοίωσης και βελτιστοποιήσεων για το σενάριο λειτουργίας των 300 MW.

Όπως σχολιάστηκε και προηγουμένως, βελτίωση του βαθμού απόδοσης της μονάδας παρατηρείται και στις δύο προσομοιώσεις του ολοκληρωμένου κυκλώματος αυτής με τις διαφορετικές βελτιστοποιημένες τιμές. Στην Εικόνα 5-18 γίνεται η παρουσίαση και σύγκριση και των τριών βαθμών απόδοσης οι οποίοι υπολογίζονται στη μονάδα. Λογικό είναι να μην υπάρχουν αποτελέσματα από την βελτιστοποίηση του απλοποιημένου κυκλώματος για βαθμό απόδοσης λέβητα και συνολικό της μονάδας καθότι δεν μπορούσαν να υπολογιστούν ελλείψει αναλυτικής προσομοίωσης κυκλώματος λέβητα. Όπως είχε αναφερθεί και προηγουμένως, η βελτίωση στον βαθμό απόδοσης του κυκλώματος νερού – ατμού είναι ακόμη μεγαλύτερη με την χρήση των βελτιστοποιημένων τιμών των απομαστεύσεων του απλοποιημένου κυκλώματος της μονάδας (1,48% απόλυτη ή 3,4% σχετική). Παρόλα αυτά η βελτίωση του βαθμού απόδοσης της μονάδας είναι μικρότερη. Η εξήγηση βρίσκεται στον βαθμό απόδοσης του λέβητα. Ενώ με την βελτιστοποίηση του ολοκληρωμένου κυκλώματος της μονάδας παρουσιάζεται αύξηση αυτού έστω και μικρή, (0,15% απόλυτη αύξηση ή 0,18% σχετική) με την προσομοίωση με τις βελτιστοποιημένες τιμές του απλού κυκλώματος παρουσιάζεται μείωση και μάλιστα σημαντική (-1,71%

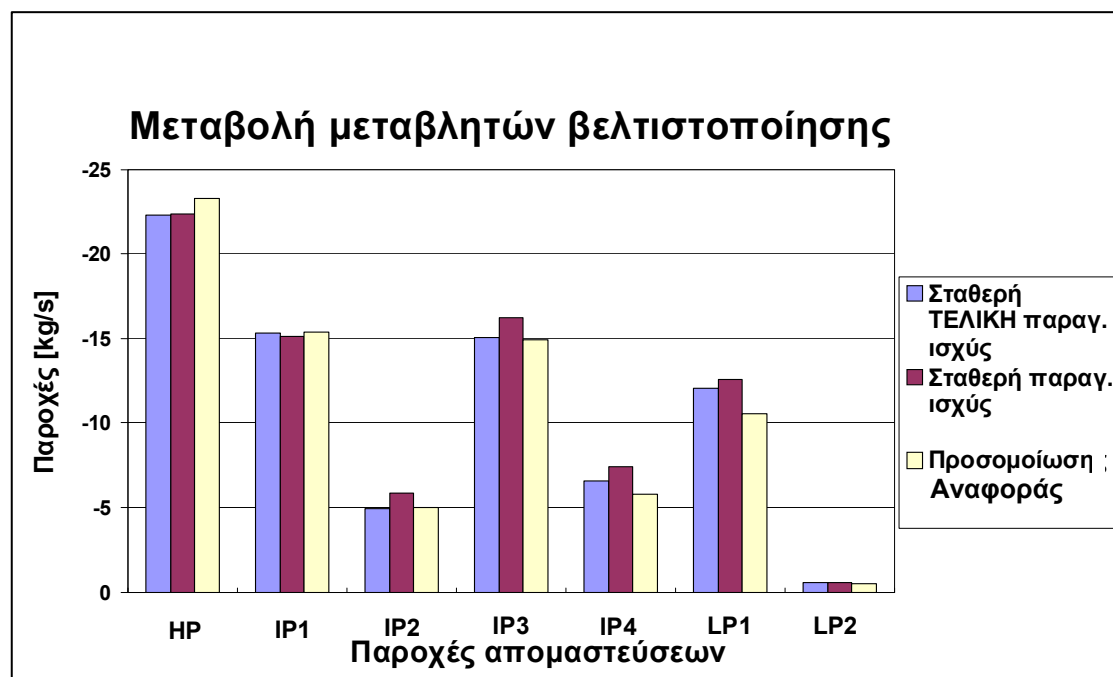
απόλυτη μείωση ή -2,08% σχετική). Δεδομένου ότι ο βαθμός απόδοσης της μονάδας είναι το γινόμενο των δύο επιμέρους βαθμών απόδοσης, αυτή η μείωση στον βαθμό απόδοσης του λέβητα οδηγεί τελικά σε μικρότερη αύξηση του βαθμού απόδοσης του συνολικού κυκλώματος. Αυτή η πτώση του βαθμού απόδοσης του λέβητα δικαιολογείται και από την παρατήρηση που έγινε προηγουμένως σχετικά με τις βελτιστοποιημένες τιμές των απομαστεύσεων βάσει του απλοποιημένου κυκλώματος: Ο υπολογισμός τους έγινε με γνώμονα την βελτίωση του κυκλώματος του νερού – ατμού, μη λαμβάνοντας υπόψη το κύκλωμα του λέβητα, συνεπώς και τον βαθμό απόδοσης της μονάδας.

5.2.3. Επίδραση εκλογής κατάλληλων περιορισμών.

Όπως παρατηρήθηκε, οι μεταβολές στην παροχή του καυσίμου, συνεπώς και το κέρδος από τις εκπομπές, παρουσίασαν μία αισθητή μείωση για τα δεδομένα των μονάδων αυτών. Η αιτιολόγηση για αυτή την έντονη μεταβολή (αν και ποσοστιαία δεν είναι τόσο σημαντική) έχει να κάνει με τον περιορισμό ο οποίος επιλέχθηκε για την ισχύς.

Στα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάστηκαν, η σταθερή ισχύς η οποία επιλέχθηκε ήταν η τελική παραγόμενη ισχύς η οποία είναι η διαφορά των αθροισμάτων της παραγόμενης ισχύος από τις γεννήτριες από το άθροισμα των ιδιοκαταναλώσεων. Αν σαν περιορισμός σταθερής ισχύος χρησιμοποιηθεί η παραγόμενη ισχύς μόνο, τότε τα αποτελέσματα διαφέρουν.

Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και από την Εικόνα **5-19**, παρατηρήθηκε ότι με εξαίρεση την ισχύς από την βαθμίδα στροβίλου υψηλής πίεσης, όλες οι υπόλοιπες μεταβολές είναι μικρότερες από την μεταβολή της αρχικής βελτιστοποίησης. Η διατήρηση της παραγόμενης ισχύος σταθερή είναι η αιτία αυτής της αλλαγής. Πλέον οι μεταβολές στην ισχύς των στροβίλων γίνονται πιο σφιχτές καθότι δεν έχουν το ελεύθερο να αλληλεπιδρούν με τις μεταβολές ισχύος των αντλιών. Επομένως δεν μπορούν να γίνουν έντονες και οι μεταβολές στις απομαστεύσεις.



Εικόνα 5-19 Σύγκριση μεταβολών απομαστεύσεων περιπτώσεων βελτιστοποίησης με διαφορετικό περιορισμό ισχύος.

Συνεχίζοντας με την παροχή του καυσίμου παρατηρείται ότι η κύρια επίδραση έχει εμφανιστεί σε αυτό, όσον αφορά τις μεταβλητές βελτιστοποίησης. Μηδενική μεταβολή. Σε αυτήν δικαιολογείται και η διατήρηση των θερμικών φορτίων τα οποία επίσης παρουσιάζουν μηδενικές μεταβολές καθότι τα καυσαέρια διαθέτουν σταθερό θερμικό φορτίο το οποίο και θα χρησιμοποιηθεί στην υπερθέρμανση και την αναθέρμανση. Μοναδική εξαίρεση αποτελούν οι απώλειες στο συμπυκνωτή στις οποίες και οφείλεται το κέρδος από αυτή την περίπτωση βελτιστοποίησης.

Επιπλέον όμως αυτό που κερδίζεται είναι και η μείωση της ιδιοκατανάλωσης. Πλέον οι μεταβολές των παροχών στόχο έχουν την μείωση των απωλειών είτε ιδιοκατανάλωσης είτε θερμότητας. Αυτό φαίνεται και στην τελική μεταβολή του βαθμού απόδοσης. Η βελτίωση υπάρχει, αλλά σε μικρότερο βαθμό. Ενώ με την αρχική βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται βελτίωση του βαθμού απόδοσης κατά 0,55% σε απόλυτη μεταβολή, στην βελτιστοποίηση με τον τροποποιημένο περιορισμό ισχύος η βελτιστοποίηση η οποία επιτυγχάνεται είναι 0,33%.

Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι η επίδραση των απωλειών θερμότητας. Με όλες τις υπόλοιπες πηγές ενέργειας αμετάβλητες και με τις μεταβολές στις ιδιοκαταναλώσεις μικρές σε σχέση με την συνολική παραγόμενη ισχύς, μπορεί να γίνει υπόθεση ότι η μεταβολή αυτή στον βαθμό απόδοσης οφείλεται στον

συμπυκνωτή. Γενικότερα στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις όπου μελετάτε κατά μέρους η βελτίωση του συμπυκνωτή.

Συνεπώς παρατηρείται ότι βελτιστοποίηση συνεχίζει να υπάρχει αλλά οι μεταβολές στους περιορισμούς καθώς και στην αντικειμενική είναι διαφορετικοί. Επίσης αυτό που παρατηρείται είναι ότι η τάση στις μεταβολές των απομαστεύσεων δεν μεταβάλλεται καθότι και εδώ παρουσιάζεται αύξηση των απομαστεύσεων σε όλες τις περιπτώσεις πλην της υψηλής πίεσης.

Κλείνοντας το κεφάλαιο της βελτιστοποίησης, συμπεραίνεται ότι είναι δυνατή η βελτιστοποίηση του σύνθετου κυκλώματος μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής λιγνίτη ως προς τον βαθμό απόδοσης αυτής και με μεταβλητές βελτιστοποίησης την παροχή του καύσιμου καθώς και τις απομαστεύσεις των βαθμίδων των στροβίλων. Κάτι τέτοιο είναι δυνατό να γίνει με την εγκατάσταση ρυθμιστικών βαλβίδων με αγωγούς κατάλληλου διαμετρήματος από το τεχνικό προσωπικό της μονάδας, ώστε να μπορεί να ελεγχθεί η παροχή των απομαστεύσεων. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε με στόχο την διατήρηση του παραγόμενου ηλεκτρικού φορτίου της μονάδας και συγκεκριμένα για την περίπτωση μέγιστου ονομαστικού φορτίου. Αυτό με την σειρά του συνεπάγεται ανάγκη μείωσης του θερμικού φορτίου από τα καυσαέρια στο νερό και στον ατμό με αποτέλεσμα την μείωση της παροχής του καυσίμου. Η μείωση αυτή σε ανάγκη καυσίμου έχει διπλό όφελος για την μονάδα:

1. Εξοικονόμηση στο διαθέσιμο απόθεμα λιγνίτη. Αυτή υπολογίστηκε περίπου στους 11,5 τόνους ανά ώρα ή 2,05%, ποσοστό το οποίο σαν απόλυτη τιμή δεν είναι σημαντικό αλλά για τα μεγέθη των μονάδων τα οποία αναφέρονται, αρκετά σημαντική σε ημερήσια βάση. Αυτό συνεπάγεται αύξηση και της διάρκειας ζωής των ορυχείων.
2. Μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Αυτή ενδεικτικά υπολογίστηκε περίπου στους 4,8 τόνους ανά ώρα το οποίο μεταφράζεται σε ποσοστό αντίστοιχο με αυτό του καυσίμου, συγκεκριμένα 2,06%. Αυτό συνεπάγεται μείωση και των προστίμων λόγω περιβαλλοντικής μόλυνσης.

Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι η βελτιστοποίηση, στηριζόμενη στον βαθμό απόδοσης της μονάδας, δίνει καλύτερα αποτελέσματα απ'ότι μια βελτιστοποίηση η οποία στηρίζεται στην βελτιστοποίηση ενός εκ των βαθμών απόδοσης των δύο επιμέρους κυκλωμάτων νερού – ατμού και λέβητα υπερθερμαντών.

Τέλος παρατηρήθηκε ότι είναι επίσης σημαντική η επίδραση της εκλογής των περιορισμών κατά την διάρκεια της βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, εκλογή διαφορετικής σχέσης για την τελική ισχύ οδήγησε πάλι μεν σε βελτίωση του βαθμού απόδοσης αλλά μικρότερης τιμής καθότι ήταν διαφορετική η αλληλεπίδραση της ισχύος της παραγόμενης από τις γεννήτριες και από την ισχύς την καταναλωσκόμενη από τις αντλίες.

6 Συμπεράσματα

6.1. Στόχοι που επιτεύχθηκαν

Η δουλειά η οποία περιγράφεται σε αυτή την διατριβή εστίασε στην θερμοδυναμική ανάλυση των επιμέρους μοντέλων του κυκλώματος νερού – ατμού και του κυκλώματος του λέβητα με τους υπερθερμαντές και αναθερμαντές λιγνιτικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέγιστου ηλεκτρικού φορτίου 300 MW και του τελικού, συζευγμένου, ενιαίου μοντέλου της μονάδας (παρόμοιας με την μονάδα IV του Α.Η.Σ. Καρδιά). Δύο λογισμικά, το D.N.A. και το gPROMS, χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των κυκλωμάτων, με το τελευταίο να έχει επίσης χρησιμοποιηθεί και για την βελτιστοποίηση τους. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του κυκλώματος νερού – ατμού ήταν ικανοποιητικά σε σύγκριση με τα δεδομένα από τα διαγράμματα ισοζυγίων μάζας και ενέργειας που υπήρχαν στην μονάδα. Το σχετικό σφάλμα των αποτελεσμάτων ήταν μικρότερο του 4.39% για όλα τα στοιχεία. Η μεταβολή αυτή δεν είχε σημαντική επίδραση στη μεταβολή του βαθμού απόδοσης (0,3% σχετική μεταβολή στον τελικό βαθμό απόδοσης). Εφαρμογή του αλγόριθμου βελτιστοποίησης στο κύκλωμα νερού – ατμού οδήγησε σε βελτίωση κατά 1.42% σε απόλυτη τιμή, του θερμικού βαθμού απόδοσης με μεταβλητές βελτιστοποίησης τις παροχές μάζας των απομαστεύσεων των βαθμίδων των στροβίλων. Τέτοιου μεγέθους βελτιστοποίηση είναι αξιοσημείωτη για σταθμούς παραγωγής ενέργειας δεδομένου ότι η ανάγκη για μείωση της κατανάλωσης καυσίμου καθώς και των εκπομπών του είναι μείζονος σημασίας.

Επιπλέον, είναι η πρώτη φορά όπου έγινε βελτιστοποίηση της λειτουργίας λιγνιτικού σταθμού παραγωγής ενέργειας, χρησιμοποιώντας σαν μεταβλητές βελτιστοποίησης τις παροχές μάζας των απομαστεύσεων. Η ανάλυση ευαισθησίας έδειξε ότι αν και μεγάλη η μεταβολή των τιμών, η βελτίωση του βαθμού απόδοσης μπορεί να φτάσει ~1.42%.

Η αύξηση του βαθμού απόδοσης για μία μονάδα η οποία λειτουργεί σε μέγιστο φορτίο συνεπάγεται εξοικονόμηση σε καύσιμη ύλη μέσω της μείωσης της παροχής ανά ώρα. Μείωση της παροχής συνεπάγεται ταυτόχρονα αύξηση χρόνου ζωής των διαθέσιμων αποθεμάτων λιγνίτη στη χώρα καθώς και μείωση των εκπομπών αερίων

του θερμοκηπίου λόγω της μείωσης παραγωγής καυσαερίων κάτι το οποίο συνεπάγεται από τη μείωση του καυσίμου. Για να είναι δυνατός ο υπολογισμός της εξοικονόμησης του καυσίμου είναι αναγκαία η αναλυτική μοντελοποίηση του κυκλώματος του λέβητα με τους υπερθερμαντές και αναθερμαντές ώστε να είναι πιο ακριβής η προσομοίωση της μονάδας αλλά και η προσπάθεια βελτιστοποίησης αυτής.

Το δεύτερο βήμα ήταν η μεταφορά των μαθηματικών μοντέλων από το D.N.A. στο gPROMS καθώς και των αναλυτικών αριθμητικών μοντέλων υπολογισμού μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή για το νερό και με συναγωγή και ακτινοβολία για τα καυσαέρια. Στο βήμα αυτό τα επιμέρους στοιχεία του κυκλώματος, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην περιγραφή του κυκλώματος παραπάνω, είχαν σχεδιαστεί και τεκμηριωθεί για την σωστή λειτουργία τους μέσω των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης τους στο D.N.A. με στοιχεία εισόδου, τα δεδομένα από την προσομοίωση του κυκλώματος που είχε σχεδιαστεί και δούλευε στο D.N.A. από τον Παπανικολάου (2008) και τα οποία βασίζονται σε δεδομένα της Δ.Ε.Η. Τα μετέπειτα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο gPROMS παρουσίασαν ικανοποιητική ακρίβεια με τα αποτελέσματα από την προσομοίωση στο D.N.A. Αυτό οδήγησε στο συμπέρασμα ότι τα μοντέλα των στοιχείων μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στη δημιουργία λεπτομερέστερου μοντέλου κυκλώματος λέβητα υπερθερμαντών στο gPROMS. Σε αυτό το αναλυτικότερο μοντέλο συμπεριλήφθησαν τα υδροτοιχώματα, ο διαχωριστής ατμού (τύμπανο), απλοποιημένο μοντέλο οικονομητήρα, αναμίκτης νερού πριν την είσοδο στο λέβητα και καυστήρας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και του αναλυτικού μοντέλου του κυκλώματος του λέβητα ήταν ικανοποιητικά σε σύγκριση με μετρημένα τα οποία προμηθεύτηκαν από το κέντρο ελέγχου σε αντίθεση με τις μέσες τιμές του ισοζυγίου ενέργειας οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για το απλοποιημένο μοντέλο λέβητα του D.N.A. Η απόκλιση των αποτελεσμάτων του PROMS και σε αυτή την περίπτωση ήταν μικρότερη του 5% από αυτά του κέντρου ελέγχου.

Αυτό που παρατηρήθηκε με την προσομοίωση του λεπτομερέστερου μοντέλου του κυκλώματος του λέβητα ήταν η σημαντική αύξηση του αριθμού των μεταβλητών και των εξισώσεων σε δύο τάξεις μεγέθους πάνω (από μερικές χιλιάδες σε μερικές εκατοντάδες χιλιάδες). Η μεγάλη αυτή αύξηση οφειλόταν στα μοντέλα υπολογισμού των ιδιοτήτων μετάδοσης θερμότητας. Επίσης και ο χρόνος επίλυσης είχε αυξηθεί κατά τρεις τάξεις μεγέθους πάνω (από μερικά δευτερόλεπτα σε δύο χιλιάδες

δευτερόλεπτα και άνω). Δεδομένου και του τρόπου επίλυσης της βελτιστοποίησης η οποία αποτελείται από επαναληπτικές επιλύσεις του μοντέλου προσομοίωσης, ο χρόνος για την επίτευξη μίας βελτιστοποίησης μπορούσε να ανέλθει μέχρι και 10 μέρες με τον παρόν εξοπλισμό, χρόνος ο οποίος είναι αρκετά μεγάλος. Η ανάγκη για αύξηση του χρόνου επίλυσης συνεπάγεται και την ανάγκη για μείωση του μεγέθους του μοντέλου. Ένας τρόπος επίτευξης μείωσης ήταν η δημιουργία εξωτερικού αντικειμένου το οποίο θα μπορούσε να συνεργαστεί με το gPROMS για την διεξαγωγή κάποιων εκ των υπολογισμών (FOREIGN OBJECT). Έτσι μειώνονται οι μεταβλητές κατά τόσες, όσες και αυτές οι οποίες αναλώνονταν στους υπολογισμούς τους οποίους αναλαμβάνει πλέον το εξωτερικό πρόγραμμα. Αυτό επιτεύχθηκε για τους υπολογισμούς των ιδιοτήτων μετάδοσης θερμότητας μειώνοντας αισθητά και το μέγεθος του προβλήματος (10667 εξαρτημένες μεταβλητές και εξισώσεις) και τον χρόνο επίλυσης (8 δευτερόλεπτα) επιτρέποντας σε πιο άμεσα αποτελέσματα χωρίς κάποια σημαντική αλλοίωση των αποτελεσμάτων της αρχικής προσομοίωσης (μικρότερη του 1% η απόκλιση).

Το τελευταίο βήμα ήταν η συναρμολόγηση των επιμέρους κυκλωμάτων στο τελικό όπως αυτό παρουσιάστηκε στο τέλος της περιγραφής των μοντέλων από το διάγραμμα ροής της Εικόνας 2-3 και η βελτιστοποίηση αυτού ως προς τον βαθμό απόδοσης πλέον ολόκληρης της μονάδας συναρτήσεως των απομαστεύσεων αλλά και της παροχής του καυσίμου. Η σύνθεση πραγματοποιήθηκε με κάποιες υποθέσεις και απλοποιήσεις οι οποίες είχαν σαν αποτελέσματα η προσομοίωση αυτού να έρθει σε ικανοποιητική συμφωνία με τα μετρημένα δεδομένα με αποκλίσεις οι οποίες δεν ξεπερνάνε το 1% στο κύκλωμα του λέβητα με τους υπερθερμαντές και αναθερμαντές και το 2% στο κύκλωμα του νερού ατμού. Μία εξαίρεση στο δεύτερο αποτέλεσε η αντλία μετά τον συμπυκνωτή όπου η απόκλιση ήταν στο 6% λόγω της προηγουμένως υπόθεσης σταθερής τιμής η οποία πλέον εξισώνονταν από τις σχέσεις του αναλυτικού κυκλώματος του λέβητα. Να σημειωθεί ότι η σύγκριση των τιμών των μεγεθών του λέβητα έγινε με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του κυκλώματος του λέβητα τα οποία πραγματοποιήθηκαν αρχικά και στα οποία είχαν εφαρμοστεί παραδοχές σχετικά με την απαιτούμενη τελική θερμοκρασία μετά τους ψεκασμούς λόγω έλλειψης δεδομένων παροχών καυσαερίων και λόγω της επαναδιαστασιολόγησης του υπερθέρμου SH1b, την έλλειψη κυκλώματος αντλίας κυκλοφορίας και την υπόθεση τέλει καύσης του καυστήρα που παρουσιάστηκαν στο 4^ο Κεφάλαιο. Με αυτό τον

τρόπο συγκρίνεται η συμπεριφορά του μοντέλου ως προς τα επιμέρους μοντέλα τα οποία ήδη έχουν δείξει καλή συμπεριφορά ως προς τα μετρημένα δεδομένα και οι αποκλίσεις ήταν σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα (μικρότερες του 1% με ελάχιστες εξαιρέσεις όπου η απόκλιση έφτασε το 3,5%).

Η βελτιστοποίηση του σύνθετου κυκλώματος μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής λιγνίτη ως προς τον βαθμό απόδοσης αυτής και με μεταβλητές βελτιστοποίησης την παροχή του καυσίμου καθώς και τις απομαστεύσεις των βαθμίδων των στροβίλων είναι δυνατή. Συγκεκριμένα παρουσιάστηκε αύξηση κατά 0,55% ποσοστό πολύ σημαντικό δεδομένου ότι αφορά τον βαθμό απόδοσης της μονάδας στον οποίο εμπεριέχεται και ο βαθμός απόδοσης του λέβητα και οι αλληλεπιδράσεις των διαφόρων φαινομένων μεταφοράς και μετάδοσης θερμότητας είναι περισσότερο πεπλεγμένες. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε με στόχο την διατήρηση του παραγόμενου ηλεκτρικού φορτίου της μονάδας και συγκεκριμένα για την περίπτωση μέγιστου ονομαστικού φορτίου. Αυτό με την σειρά του συνεπάγεται ανάγκη μείωσης του θερμικού φορτίου από τα καυσαέρια στο νερό και στον ατμό με αποτέλεσμα την μείωση της παροχής του καυσίμου. Η μείωση αυτή σε ανάγκη καυσίμου έχει διπλό όφελος για την μονάδα:

1. Εξοικονόμηση στο διαθέσιμο απόθεμα λιγνίτη. Αυτή υπολογίστηκε περίπου στους 11,5 τόνους ανά ώρα ή 2,05%, ποσοστό το οποίο σαν απόλυτη τιμή δεν είναι σημαντικό αλλά για τα μεγέθη των μονάδων τα οποία αναφέρονται, αρκετά σημαντική σε ημερήσια βάση. Αυτό συνεπάγεται αύξηση και της διάρκειας ζωής των ορυχείων.
2. Μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Αυτή ενδεικτικά υπολογίστηκε περίπου στους 4,8 τόνους ανά ώρα το οποίο μεταφράζεται σε ποσοστό αντίστοιχο με αυτό του καυσίμου, συγκεκριμένα 2,06%. Αυτό συνεπάγεται μείωση και των προστίμων λόγω περιβαλλοντικής μόλυνσης.

Είναι εμφανής η επίδραση της φαινομενικά μικρής αύξησης του βαθμού απόδοσης από τη στιγμή που αναφερόμαστε σε τέτοιου μεγέθους μονάδες. Να σημειωθεί ότι τέτοια επίπεδα βελτιστοποίησης γενικά θεωρούνται υψηλά για υφιστάμενες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής.

Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι η βελτιστοποίηση, στηριζόμενη στον βαθμό απόδοσης της μονάδας, δίνει καλύτερα αποτελέσματα απ'ότι μια βελτιστοποίηση η οποία

στηρίζεται στην βελτιστοποίηση ενός εκ των βαθμών απόδοσης των δύο επιμέρους κυκλωμάτων νερού – ατμού ή λέβητα υπερθερμαντών. Τέλος ο χρόνος επίτευξης της βελτίωσης μειώθηκε σημαντικά (471 δευτερόλεπτα) σε σχέση με τον αναμενόμενο χρόνο των 31,5 ωρών που θα απαιτούνταν αν γινόταν χρήση του αρχικού μοντέλου, χωρίς τα FOs.

Τέλος παρατηρήθηκε ότι είναι επίσης σημαντική η επίδραση της εκλογής των περιορισμών κατά την διάρκεια της βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, εκλογή διαφορετικής σχέσης για την τελική ισχύς οδήγησε πάλι μεν σε βελτίωση του βαθμού απόδοσης αλλά μικρότερης τιμής καθότι ήταν διαφορετική η αλληλεπίδραση της ισχύος της παραγόμενης από τις γεννήτριες και από την ισχύς την καταναλωσκόμενη από τις αντλίες.

Αξίζει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι εξαιτίας της χρήσης αλγόριθμων τοπικών βέλτιστων για την επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος, αποδεκτό δεδομένης της εφαρμογής τους σε συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας, ολικό βέλτιστο οποιασδήποτε λύσης δεν μπορεί φυσιολογικά να επιτευχθεί. Αυτή είναι μια συνηθισμένη ανεπάρκεια μεθόδων σχεδιασμού βασισμένες στην βελτιστοποίηση η οποία μπορεί να αποφευχθεί με την υιοθέτηση τεχνικών ολικής βελτιστοποίησης. Παρόλα αυτά, η αύξηση στον βαθμό απόδοσης ήταν και πάλι πολύ καλή για το μέγεθος της μονάδας.

Συμπερασματικά, η μαθηματική μοντελοποίηση του ολοκληρωμένου κυκλώματος μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής στο λογισμικό βελτιστοποίησης μας έδωσε την δυνατότητα να γνωρίσουμε σε βάθος τις διεργασίες που πραγματοποιούνται σε αυτήν καθώς και να προσδιορίσουμε και να αξιολογήσουμε τις παραμέτρους βελτιστοποίησης.

6.2. Προτάσεις για μελλοντική δουλειά

Μελλοντική δουλειά η οποία θα μπορούσε να γίνει είναι η δημιουργία δυναμικού μοντέλου το οποίο θα μπορεί να προσομοιώσει και καταστάσεις εκκίνησης, μεταβολής φορτίου και κλεισίματος της μονάδας, κάτι το οποίο είναι εφικτό με το gPROMS. Έπειτα και από την επιβεβαίωση της δυνατότητας προσομοίωσης και βελτιστοποίησης του ολοκληρωμένου κυκλώματος της μονάδας σε μικρά, αποδεκτά χρονικά διαστήματα, η διερεύνηση δυναμικών μοντέλων παρουσιάζεται ελκυστική.

Επιπλέον μελλοντικός στόχος θα μπορεί να είναι η εφαρμογή του αλγόριθμου βελτιστοποίησης στο τελικό μοντέλο για βελτιστοποίηση συναρτήσεων και άλλων μεταβλητών βελτιστοποίησης αλλά και άλλων αντικειμενικών συναρτήσεων προς βελτιστοποίηση όπως η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα θα μπορούσε να τεθεί ως στόχος η επίτευξη των επιτρεπτών ορίων που έχουν τεθεί από τη συνθήκη του Κιότο ή από κάποια νεότερη συνθήκη που θα πραγματοποιηθεί στο μέλλον. Προσθήκη θερμοοικονομικού ή οικονομοτεχνικού μοντέλου θα μπορέσει να δώσει πρακτικότερα αποτελέσματα σχετικά με συνδυασμό οικονομικών και συνάμα αξιόλογων λύσεων για βελτιστοποίηση της μονάδας όσο και για οικονομικά οφέλη από πιθανή μείωση προστίμων μέσω της μείωσης των εκπομπών CO₂ και των λοιπών ρύπων. Τα σενάρια βελτιστοποίησης μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

1. Μικρής επένδυσης. Τέτοια σενάρια είναι αυτά τα οποία συνιστούν επέμβαση μόνο στα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μονάδας.
2. Μέσης επένδυσης. Σενάρια στα οποία προτείνονται μέτρα τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν κατά την συντήρηση της μονάδας και σε λειτουργία μετά αυτής.
3. Μεγάλης επένδυσης. Σενάρια τα οποία προϋποθέτουν επεμβάσεις στα κατασκευαστικά στοιχεία της μονάδας.

Όλα αυτά τα σενάρια μπορούν να μελετηθούν μεταβάλλοντας ορισμένες παραμέτρους ή μεταβλητές του προβλήματος και έτσι μπορούν να προβλεφθούν ποιοτικά και ποσοτικά οι αλλαγές. Η διάρθρωση του μοντέλου αλλά και η λειτουργία του gPROMS το καθιστούν κατάλληλο εργαλείο για την εφαρμογή του σε σενάρια βελτιστοποίησης εναλλακτικών αντικειμενικών συναρτήσεων και μεταβλητών.

Πέραν των εναλλακτικών σεναρίων βελτιστοποίησης καθώς και μεταβλητών βελτιστοποίησης είναι δυνατή και η εφαρμογή εναλλακτικών λυτών προσομοίωσης και βελτιστοποίησης. Η δυνατότητα αυτή υπάρχει εξαιτίας της ύπαρξης των εξωτερικών στοιχείων (FO) τα οποία και έχουν χρησιμοποιηθεί και στην εργασία αυτή. Συνεπώς, χρήση βελτιωμένων αλγόριθμων, οι οποίοι θα είναι ταχύτεροι στους υπολογισμούς τους αλλά και πιο ευσταθείς, θα είναι δυνατή για καλύτερα αποτελέσματα.

Η δουλειά αυτή σε βάθος χρόνου μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ενός λογισμικού αποφάσεων για το δωμάτιο ελέγχου όπου το μοντέλο θα έχει σαν είσοδο δεδομένα πραγματικού χρόνου (real-time) από την μονάδα και ο μηχανικός βάρδιας θα μπορεί να προχωρήσει σε βελτιστοποίηση της λειτουργίας με βάση συγκεκριμένες μεταβλητές εισόδου. Σε αυτή την κατεύθυνση βοηθάει η ύπαρξη του FPI (Foreign Process Interface) και του OCI (Output Channel Interface) καθώς και ο τελικά μειωμένος χρόνος επίλυσης ο οποίος καθιστά τον χρόνο αντίδρασης του προγράμματος στις μεταβολές των δεδομένων εισόδου της μονάδας ρεαλιστικό ώστε να επιτρέψει την εφαρμογή του.

Βιβλιογραφία

- Alie C.**, Douglas P. L., Davison J., 2009, “On the operability of power plants with CO₂ capture and storage”, *Energy Procedia*, 1, pp. 1521–1526
- Ascher U. M.**, Petzold L. R., 1998, “Computer Methods for Ordinary Differential Equations and Differential-Algebraic Equations“, SIAM, ISBN 0-89871-412-5
- Bazaraa M. S.**, Sherali H. D., Shetty C. M., 1993, “Nonlinear Programming: Theory and Algorithms. 2nd Edition”, John Wiley & Sons Inc., ISBN 0-471-55793-5
- Binder T.**, Cruse A., Cruz Villar C.A., Marquardt W., 2000, “Dynamic optimization using a wavelet based adaptive control vector parameterization strategy”, *Computers and Chemical Engineering*, 24, pp. 1201-1207
- Booth C.** and J. R. McDonald, 1998, “The use of artificial neural networks for condition monitoring of electrical power transformers”, *Neurocomputing*, Volume 23, Issues 1-3, pp. 97-109
- Box M. J.**, 1965, “A New Method of Constrained Optimization and a Comparison with Other Methods”, *Computer Journal*, Vol. 8, No. 1, pp. 42-52
- Box M. J.**, 1966, “A Comparison of Several Current Optimization Methods and the Use of Transformations in Constrained Problems”, *Computer Journal*, Vol. 9, pp. 67-77
- Broyden C. G.**, 1967, “Quasi-Newton Methods and their Application to Function Minimization”, *Mathematics of Computation*, Vol. 21, pp. 368
- Broyden C. G.**, 1970, “The Convergence of a Class of Double-Rank Minimization Algorithms, Parts I and II”, *Journal of the Institute of Mathematics and Its Applications*, Vol. 6, pp. 76-90, 222-231
- Busetti**, 2004, “Genetic Algorithms Overview”,
<http://www.geocities.com/francorbusetti/gaweb.pdf>
- Chase M.W. et.al.**, 1985, “JANAF Thermochemical Tables, 3rd Edition, Part I and Part II”, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Vol. 14, Supplement No. 1
- Cheney E. W.** and Goldstein A. A., 1959, “Newton’s Method of Convex Programming and Tchebycheff Approximation” *Numerische Mathematik*, Vol. 1, pp. 253-268

- Chungen** Y., Zhongyang L., Junhu Z., Kefa C., 2000, “ A Novel Non-Linear Programming-Based Coal Blending Technology for Power Plants”, Trans IChemE, Vol 78, Part A
- Conradie** A. E., Buys J. D., Kröger D. G., 1998, “Performance Optimization of Dry-Cooling Systems for Power Plants Through SQP Methods”, Applied Thermal Engineering Vol. 18, Nos. 1-2, pp. 25-45
- Daubert** T.E. and Danner, R.P., 1984, „Data Compilation Tables of Properties of Pure Compounds”, Design Institute for Physical Property Data & American Institute of Chemical Engineers, New York
- Davidon** W. C., 1959, “Variable Metric Method for Minimization”, Argonne National Laboratory, ANL-5990
- Del Angel** Alberto, Mevludin Glavic, Louis Wehenkel, 2003, “Using Artificial Neural Networks to Estimate Rotor Angles and Speeds from Phasor Measurements”, Proceedings of Intelligent Systems Applications to Power Systems, ISAP03 – 2003
- Elmegaard**, B., 1999, “Simulation of Boiler Dynamics – Development, Evaluation and Application of a General Energy System Simulation Tool”, Ph.D. Thesis: Report Number ET–PhD 99–02, Department of Energy Engineering, Technical University of Denmark
- Estoperez** N., Nagasaka K., 2006, “An artificial neural network based micro-hydropower generation scheduling: considering demand profile and environmental impact”, (Journal) Clean Technologies and Environmental Policy, Publisher: Springer Berlin/Heidelberg, Vol.8, No.2, pp. 123-130
- Exergetic Systems**, 2004, “Introduction to the Input/Loss Method”, San Rafael, California
- Fletcher** R. and **Powell** M. J. D., 1963, “A Rapidly Convergent Descent Method for Minimization”, Computer Journal, Vol. 6, No. 2, pp. 163-168
- Fletcher** R. and **Reeves** C. M., 1964, “Function Minimization by Conjugate Gradients”, Computer Journal, Vol. 7, No. 2, pp. 149-154
- Fletcher** R., 1970, “A New Approach to Variable Metric Algorithms”, Computer Journal, Vol. 13, pp. 317-322

- Fletcher** R., Mangasarian O. L., Meyer R. R., Robinson S. M., 1981, "Numerical Experiments with an L_1 Exact Penalty Function Method", Nonlinear Programming, 4, Academic Press, New York
- Fox** R. L., 1971, "Optimization Methods for Engineering Design", Addison-Wesley, Reading, Mass.
- Gabriele** G. A. and Ragsdell K. M., 1977, "The Generalized Reduced Gradient Method: A Reliable Tool for Optimal Design", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 99, pp. 384-400
- Goldfarb** D., 2000, "A Family of Variable Metric Methods Derived by Variational Means", Mathematics of Computation, Vol. 24, pp. 23-26
- Gurney** K., 1997, "An Introduction to Neural Networks", London: Routledge, ISBN 1-85728-673-1 (hardback) or ISBN 1-85728-503-4 (paperback)
- Hadvig** S., 1986, "Thermal Radiation for Engineers" [Book]. [s.l.] : Polyteknisk Forlag
- Hanson** K. Ronald, Jay B. Jeffries, Xin Zhou, Xiang Liu, Hejie Li, Dan Mattison, Adam Klingbeil, 2006 , "Smart Sensors for Advanced Combustion Systems", GCEP Technical Report
- Herskovits** J., Mappa P., Goulart E., Mota Soares C.M., 2005, "Mathematical programming models and algorithms for engineering design optimization", Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 194, pp. 3244–3268
- Hooke** R. and **Jeeves** T. A., 1961, "Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems", Journal of the ACM, Vol. 8, No. 2, pp. 212-229
- Huang** H. Y., 1970, "Unified Approach to Quadratically Convergent Algorithms for Function Minimization", Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 5, pp. 405-423
- Infochem Computer Services Ltd.**, 2007, "User Guide for Multiflash for Windows Version 3.7"
- International Energy Agency – IEA**, 2007, "World Energy Outlook 2007", ISBN: 978-92-64-02730-5

- Kakac S.**, Shah R. K. and Aung W., 1987, “Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer”, Poulsbo, USA: John Wiley & Sons
- Kantubhukta V.** Vijaya, Mohamed Abdelrahman, 2004, “A Feasibility Study on Using Neural Networks in Performance Analysis of Coal-Fired Power Plants”, Proceedings of the Thirty-Sixth Southeastern on System Theory 2004, pp. 541-545
- Kelly J. E.**, 1960, “The Cutting Plane Method for Solving Convex Programs”, Journal of SIAM, Vol. VIII, No. 4, pp. 703-712
- Kern D. Q.**, 1965, “Process Heat Transfer”, McGraw – Hill International Editions, ISBN 9780070341906
- Kraft D.**, 1985, “On converting optimal control problems into nonlinear programming problems.”, Computational Mathematics and Programming, 15, 261–280.
- Krüger K.**, Franke R., Rode M., 2004, “Optimization of boiler start-up using a nonlinear boiler model and hard constraints”, Energy 29, pp. 2239–2251
- Lang D. Fred**, P.E., 2000, “Monitoring and Improving Coal-Fired Power Plants Using the Input/Loss Method – Part III”, Proceedings of 2000 International Joint Power Generation Conference Miami Beach, Florida, IJPGC2000-15079
- Lang D. Fred**, 2004, “F factor method for determining heat rate and emission rates of a fossil-fired system”, United States Patent 6691054
- Laux S.**, J. Grusha, K. McCarthy, and T. Rosin, 1999, “Real Time Coal Flow and Particle Size Measurement for Improved Boiler Operation”, Power-Gen 1999, New Orleans, LA
- Lawal A.**, Wang M., Stephenson P., Yeung H., 2009, “Dynamic modelling of CO₂ absorption for post combustion capture in coal-fired power plants”, Fuel, 88, pp. 2455–2462
- Lehigh University**, 1996, “Using CEM flow measurements for unit heat rate monitoring”, Lehigh Energy Update, Vol. 14 (2)

- Löhl**, T., Schulz C., Engell S., 1998, "Sequencing of Batch Operations for a Highly Coupled Production Process: Genetic Algorithms Versus Mathematical Programming", *Computers chem. Engng* Vol. 22, Suppl. pp. S579-S585
- Lorentzen** B., 1995, "Power Plant Simulation.", PhD thesis, Technical University of Denmark, Laboratory for Energetics, Report 1995.
- Manninen** J., Zhu X.X., 1998, "Thermodynamic Analysis and Mathematical Optimisation of Power Plants" *Computers chem. Engng* Vol. 22, Suppl., pp. S537-S544
- Marquardt** D., 1963, "An Algorithm for Least Squares Estimations of Nonlinear Parameters", *SIAM Journal of Applied Mathematics*, Vol. 11, No. 2, pp. 431-441
- Martin** H. C., 2009, "A hybrid genetic algorithm/mathematical programming approach to the multi-family flowshop scheduling problem with lot streaming", *Omega* 37, pp 126 – 137
- Mosca** E., 2001, "Model-Based Predictive Control", Dipartimento di Sistemi e Informatica, Università di Firenze, EOLSS
- Munukutla** Sastry, Robert Craven, 2006, "Coal-fired power plant performance monitoring in real-time", Centre for Energy Systems Research, Tennessee Tech University
- Nilsson**, Nils, 1998, "Artificial Intelligence: A New Synthesis" Morgan Kaufmann Publishers, ISBN 978-1-55860-467-4
- Park** J., Park Y., Won J., Lee Y. K., 2000, "An Improved Genetic Algorithm for Generation Expansion Planning", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, Vol. 15, No. 3
- Patel**, V.C., Wang, M., 2007, "Virtual Power Plant Demonstration Model", Alstom Power Technology Centre
- PCME Ltd.**, 2006, "Emission monitoring solutions for Power Generation", EN-14181
- Pereira** C. M.N.A., Lapa C. M.F., 2003, "Parallel island genetic algorithm applied to a nuclear power plant auxiliary feedwater system surveillance tests policy optimization", *Annals of Nuclear Energy* 30, pp. 1665–1675

- Perrin**, P., 2007, “Modeling, Simulation and Optimisation of a Coal-Fire Power Plant”, Msc Thesis, School of Engineering, Cranfield University.
- Perstrup** C., 1991, “Analysis of Power Plant by Application of Network Theory (in Danish)”, Master’s thesis, Technical University of Denmark, Laboratory for Energetics, Report PE 91-2
- Powell**, M. J. D., July 1964, “An Efficient Method for Finding the Minimum of a Function of Several Variables Without Calculating Derivatives”, Computer Journal, Vol. 7, pp. 155-162
- Powell**, M. J. D., 1964, “An Efficient Method for Finding the Minimum of a Function of Several Variables Without Calculating Derivatives”, Computer Journal, Vol. 7, No. 4, pp. 303-307
- Pozrikidis** C., 2005, “Αριθμητικές Υπολογιστικές Μέθοδοι στην Επιστήμη και τη Μηχανική”, Εκδόσεις Τζιόλα, ISBN 960-418-097-5
- Process Systems Enterprise (PSE)**, 2004, “gPROMS Advanced User Guide”
- Process Systems Enterprise (PSE)**, 2004, “gPROMS Introductory User Guide”
- Process Systems Enterprise (PSE)**, 2004, “gPROMS Programmers Guide”
- Process Systems Enterprise (PSE)**, 2008, “gPROMS: General process modeling system.”, URL <http://www.psenderprise.com>
- Rao** S. S., 1984, “Optimization: Theory and Applications, 2nd Edition”, Wiley Eastern, New Delhi
- Rao** S. S., 1996, “Engineering Optimization: Theory and Practice, 3rd Edition”, John Wiley & Sons Inc., ISBN 0-471-55034-5
- Rosenbrock** H. H., 1960, “An Automatic Method for Finding the Greatest or Least Value of a Function”, Computer Journal, Vol. 3, No. 3, pp. 175-184
- Richardson** M.J., 1993, “The Specific Heats of Coals, Cokes and Their Ashes”, Fuel, 72(7), pp. 1047-1053.
- Rodrigues**, C. P., Lansarin, M. A., Secchi, A. R., Mendez, A. F., 2005, “Simulation of Pulverised Coal Fired Boiler: Reaction Chamber”, Thermal Engineering, Vol. 4 (1), pp. 61-68.

- Schlegel M.**, Stockmann K., Binder T., Marquardt W., 2005, “Dynamic optimization using adaptive control vector parameterization”, *Computers and Chemical Engineering*, 29, pp. 1731–1751
- Schmidt E.** and Grigull U., 1982, “Properties of Water and Steam in SI–Units”. Springer–Verlag, 3, enlarged printing
- Shanno D. F.**, 1970, “Conditioning of Quasi-Newton Methods for Function Minimization”, *Mathematics of Computation*, Vol. 24, pp. 647-656
- Spangelo I.**, 1994, “Trajectory Optimization for Vehicles Using Control Vector Parameterization and Nonlinear Programming”, Report 94-111-W, Dept. of Engineering Cybernetics, The Norwegian Institute of Technology, Norway
- Srinivasan B.**, Palanki S., Bonvin D., 2003, “Dynamic optimization of batch processes: I. Characterization of the nominal solution”, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27, pp. 1-26
- Valdes M.**, Duran M. D., Rovira A., 2003, “Thermoeconomic optimization of combined cycle gas turbine power plants using genetic algorithms”, *Applied Thermal Engineering* 23, pp. 2169–2182
- Vera J.**, González-Alcón C., Marín-Sanguino A., Torres N., 2009, “Optimization of biochemical systems through mathematical programming: Methods and applications”, **ARTICLE IN PRESS**
- Weber R.**, 2008, “Pontryagin’s Maximum Principle”,
<http://www.statslab.cam.ac.uk/~rrw1/oc/L13.pdf>
- Weise T.**, 2009, “Global Optimization Algorithms – Theory and Application –, 2nd Edition”, <http://www.it-weise.de/projects/book.pdf>
- Yangping Z.**, Bingquan Z., DongXin W., 2000, “Application of genetic algorithms to fault diagnosis in nuclear power plants”, *Reliability Engineering and System Safety* 67, pp. 153–160
- Yao Xin**, 1999, “Evolving Artificial Neural Networks”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 87, No. 9

Zhang, C., Wang, Y., Zheng, C., Lou, X., 2006, “Exergy cost analysis of a coal fired power plant based on structural theory of thermoeconomics”, Energy Conversion and Management, Vol. 47, pp. 817-843.

Διεύθυνση Εκπαίδευσης Σ.Τ.Ε. Καρδιάς, 1982, “Εγχειρίδιο Λειτουργίας Λεβήτων” [Book]. - Αθήνα : Δ.Ε.Η. Α.Ε.

Παπαγεωργίου, Ν., 1991, “ΑΤΜΟΠΑΡΑΓΩΓΟΙ Ι”, Εκδόσεις Συμείων, ISBN 960-7888-61-8

Παπανικολάου Π., 2008, “Μελέτη Φαινομένου Επικαθήσεων και Μοντελοποίηση-Προσομοίωση της Επίδρασής τους σε Ατμοπαραγωγό”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Διαχείρισης ενεργειακών Πόρων, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.

Πετράκης Ε., Μαθιουδάκης Ν., 2006, “Υπολογιστική Μελέτη Βαθμού Απόδοσης Ατμοπαραγωγικών Εγκαταστάσεων, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Διαχείρισης ενεργειακών Πόρων, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.

Υπουργείο Ανάπτυξης, 2007, “ 1^η ΕΚΘΕΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ 2008-2020”

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

A. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ.

Σε αυτό το σημείο δίνονται οι πίνακες με τις τιμές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για να προσδιορίζουν τις εκάστοτε παραμέτρους του κάθε στοιχείου στο αντίστοιχο κύκλωμα. Να σημειωθεί πως δεν απαιτούνταν ο προσδιορισμός κάποιας παραμέτρου σε όλα τα στοιχεία επομένως θα παρουσιαστούν μόνο τα στοιχεία στα οποία ο προσδιορισμός κάποιας παραμέτρου ήταν αναγκαίος.

◆ Κύκλωμα νερού – ατμού

Όπως είχε αναφερθεί, είναι το απλοποιημένο κύκλωμα της μονάδας όπου ο λέβητας και οι υπερθερμάνσεις και αναθερμάνσεις του ατμού απλοποιήθηκαν από μία απλή υπερθέρμανση και αναθέρμανση με μοναδική παράμετρο της επιθυμητή πτώση πίεσης η οποία σε συνδυασμό με την προκαθορισμένη είσοδο ατμού στην βαθμίδα υψηλής πίεσης και στην πρώτη βαθμίδα μέσης πίεσης δίνει την επιθυμητή θερμότητα για υπερθέρμανση και αναθέρμανση αντίστοιχα.

Υπερθέρμανση – Αναθέρμανση (*SH – RH*)

Παράμετρος	Στοιχείο	
	SH	RH
Πτώση πίεσης (ΔP) [bar]	40,9	3,6

Βαθμίδες Στροβίλων (*HP, IP1, IP2, IP3, IP4, LP1, LP2, LP3*)

Παράμετρος	Στοιχείο							
	HP	IP1	IP2	IP3	IP4	LP1	LP2	LP3
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης (η_{is}) [-]	0,82	0,62	0,73	0,77	0,91	0,886	0,82	0,77
Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης (η_{pol}) [-]	0,792	0,602	0,715	0,758	0,9	0,874	0,801	0,761
Λόγος θερμοχωρητικότητας (γ) [-]	1,334	1,315	1,305	1,301	1,301	1,297	1,206	1,1

Βαθμίδες Γεννητριών (*GEN1, GEN2, GEN3, GEN4, GEN5, GEN6, GEN7, GEN8*)

Παράμετρος	Στοιχείο							
	GEN1	GEN2	GEN3	GEN4	GEN5	GEN6	GEN7	GEN8
Βαθμός απόδοσης γεννήτριας (η) [-]	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

Συμπυκνωτής (COND.)

	Στοιχείο
Παράμετρος	COND.
Πτώση πίεσης (ΔP) [bar]	0

Προθερμαντές νερού (R1, R2, R3, R4, R5, R6)

Παράμετρος	Στοιχείο							
	HP	IP1	IP2	IP3	IP4	LP1	LP2	LP3
Πτώση πίεσης νερού ($\Delta P1$) [bar]	0	0	0	0	0	0	0	0
Πτώση πίεσης ατμού ($\Delta P2$) [bar]	0	0	0	0	0	0	0	0

Αντλίες (Cond. Pump, FW Pump)

Παράμετρος	Στοιχείο	
	Cond. Pump	FW Pump
Βαθμός απόδοσης αντλίας (η) [-]	1	1

◆ Κύκλωμα λέβητα

Τα στοιχεία της υπερθέρμανσης και αναθέρμανσης του απλοποιημένου κυκλώματος νερού – ατμού αποτελούν το ολοκληρωμένο κύκλωμα του λέβητα στη συνέχεια.

Θάλαμος Καύσης, Υδροτοιχώματα (FURNACE, F_SH1a, F_SH1b, F_SH2, F_SH3, F_RH1a, F_RH1b, F_RH2)

Παράμετρος	Στοιχείο							
	FURN.	F_SH1a	F_SH1b	F_SH2	F_SH3	F_RH1a	F_RH1b	F_RH2
Ύψος [m]	26	2	3,5	4	3,2	4	1,9	4
Πλάτος [m]	15	15	15	15	15	15	15	15
Βάθος [m]	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5
Ύψος τεφρολεκάνης [m]	10,14	-	-	-	-	-	-	-
Ύψος κυρίως καυστήρα [m]	16,8	-	-	-	-	-	-	-
Επιπρόσθετο ύψος για υπολογισμό πίεσης [m]	79,96	4	4	4	4	4	4	4
Πρόσθετη αντίσταση τριβής [-]	0	0	0	0	0	0	0	0
Εξωτερική διάμετρος αυλών [m]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Εσωτερική διάμετρος αυλών [m]	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Πλήθος αυλών [-]	210	210	210	210	210	210	210	210
Εκπεριψιμότητα αυλών [-]	0,8	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
Θερμική αγωγιμότητα αυλών [kW/mK]	0,0407	0,0207	0,0207	0,0207	0,0207	0,0207	0,0207	0,0207

Συντελεστής ρύπανσης [-]	0	0	0	0	0	0	0	0
Κλάσμα μάζας σωματιδίων [-]	0,104	0,104	0,104	0,104	0,104	0,104	0,104	0,104
Μέση διάμετρος σωματιδίων [-]	4E-5	4E-5	4E-5	4E-5	4E-5	4E-5	4E-5	4E-5
Πυκνότητα σωματιδίων [kg/m ³]	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11

Υπερθερμαντές, Αναθερμαντές (SH1a, SH1b, SH2, SH3, RH1a, RH1b, RH2)

Παράμετρος	Στοιχείο						
	SH1a	SH1b	SH2	SH3	RH1a	RH1b	RH2
Αριθμός περασμάτων [-]	4	6	3	2	4	4	3
Εξωτερική διάμετρος αυλών [m]	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,057
Εσωτερική διάμετρος αυλών [m]	0,0308	0,026	0,026	0,0242	0,0308	0,0308	0,044
Βήμα στην οριζόντια διεύθυνση [m]	0,138	0,138	0,828	0,138	0,138	0,138	0,276
Βήμα στην κάθετη διεύθυνση [m]	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,1
Πλήθος σειρών [-]	12	4	20	8	12	12	8
Πλήθος αυλών σε κάθε σειρά [-]	120	120	20	60	120	120	60
Πλάτος καναλιού [m]	15	23,21	15	15	15	15	15
Βάθος καναλιού [m]	1,8	5,133	4,44	1,8	1,8	4	4,9
Εκπεριφιμότητα αυλών [-]	0,5	0,322	0,3	0,2776	0,1	0,34	0,11
Θερμική αγωγιμότητα αυλών [kW/mK]	0,0407	0,038	0,0308	0,0423	0,0452	0,0452	0,0355
Συντελεστής ρύπανσης [-]	0	0	0	0	0	0	0
Κλάσμα μάζας σωματιδίων στα καυσαέρια [-]	0,104	0,104	0,104	0,104	0,104	0,104	0,104
Μέση διάμετρος σωματιδίων στα καυσαέρια [-]	4E-5	4E-5	4E-5	4E-5	4E-5	4E-5	4E-5
Πυκνότητα σωματιδίων στα καυσαέρια [kg/m ³]	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
Διάταξη ροής [-]	1	1	0	0	1	1	1
Επιπρόσθετη πτώση πίεσης λόγω τριβών [kg/m ³]	20	0,3	0,8	0,6	0,1943	0,2987	0,4156

Στο πλάτος καναλιού και στο βάθος καναλιού για τον υπέρθερμο SH1b οι τιμές είναι διαφορετικές από τις αναμενόμενες γιατί έγιναν προσαρμογές των παραμέτρων ώστε να προσομοιωθεί ο συγκεκριμένος υπερθερμαντής σαν υπερθερμαντής αυλών διατεταγμένων σε σειρά όπως στην Εικόνα 3-6, αντί σε εναλλασσόμενη διάταξη που είναι στην πραγματικότητα. Σαν διάταξη ροής εννοείται το κατά πόσο η ροή του ατμού ακολουθεί ανοδική πορεία (ίδια κατεύθυνση με τη ροή των καυσαερίων) ή καθοδική (αντίθετη με αυτή των καυσαερίων) εντός των αυλών. Ως «0» ορίζεται η ροή στην ίδια κατεύθυνση με τα καυσαέρια και «1» η αντίθετη.

Ψεκασμοί (*ATEMP_SH1b, ATEMP_SH2, ATEMP_RH1b*)

Παράμετρος	Στοιχείο		
	ATEMP_SH1b	ATEMP_SH2	ATEMP_RH1B
Επιθυμητή θερμοκρασία εξόδου ατμού (T_{reff}) [°C]	422	496	431

Στο τελικό κύκλωμα της μονάδας όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος νερού – ατμού θα παραμείνουν ως έχουν, οι παράμετροι τους δεν θα αλλάξουν από αυτές που θα ισχύουν και στο κύκλωμα του νερού – ατμού.