



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Ναυτικής Μηχανολογίας

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΓΡΑΦΩΝ  
ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΟΜΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ  
ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ**

Διπλωματική Εργασία  
**Καραδελόγλου Παύλος**

Επιβλέπων  
Χρίστος Α. Φραγκόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

**Αθήνα, Ιούλιος 2013**



## **Ευχαριστίες**

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας κλείνει ο κύκλος των σπουδών μου στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Θα ήθελα συνεπώς να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου απέναντι στα πρόσωπα που με υποστήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου και υπεύθυνο της διπλωματικής αυτής εργασίας, κ. Χ. Α. Φραγκόπουλο. Η καθοδήγησή του στα ζητήματα των ενεργειακών συστημάτων και την συγγραφή της εργασίας υπήρξε πολύτιμη, ενώ ενημερωμένος για την πορεία της εργασίας ήταν ανά πάσα στιγμή πρόθυμος να προσφέρει κάθε βοήθεια.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα τέλος να απευθύνω στο επιστημονικό συνεργάτη του τομέα Ναυτικής Μηχανολογίας και μέντορά μου, κ. Δ. Γρέκα. Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί συνέχεια της δικής του διδακτορικής διατριβής και η αμέριστη βοήθειά του υπήρξε καθοριστική κατά την εκπόνησή της, ενώ ταυτόχρονα ο ίδιος αποτέλεσε πρότυπο συνεργάτη αλλά και ανθρώπου.



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας	7
---	---

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

2.1 Εισαγωγή	9
2.1.1 Η έννοια του δείκτη και η σημασία του στη μοντελοποίηση	9
2.1.2 Εισαγωγή στη θεωρία δαγράφων	9
2.2 Τα Αντικείμενα της Δομής Δεδομένων	10
2.2.1 Η κλάση ΑΚΜΗ	12
2.2.2 Η κλάση ΚΟΜΒΟΣ	13
2.2.3 Η κλάση ΣΥΣΤΗΜΑ	17
2.3 Σύνθεση Διαγράμματος Μοντελοποίησης	17
2.3.1 Παράδειγμα μοντελοποίηση συστήματος συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο	17
2.3.2 Διαμόρφωση γράφων Ενέργειας και Μάζας	19
2.4 Αυτόματη Κατασκευή της Δομής του Συστήματος	19

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή	21
3.1.1 Ανεξάρτητες Μεταβλητές	21
3.1.2 Εξαρτημένες Μεταβλητές	23
3.2 Η Λειτουργία του Διαχωριστή	23
3.3 Υπολογισμός Ροών Μάζας και Ενέργειας	26
3.3.1 Αυτόματος χαρακτηρισμός των ροών	27
3.3.2 Καθορισμός του γραμμικού συστήματος για τον υπολογισμό των παροχών μάζας και ενέργειας	29
3.3.3 Επίλυση του γραμμικού συστήματος και υπολογισμός των παροχών μάζας και ενέργειας	32
3.4 Υπολογισμός Πιέσεων	32
3.4.1 Δομή δαγράφου αλυσίδων πιέσεων	33
3.4.2 Υπολογισμός των πιέσεων με χρήση της δομής των αλυσίδων	34

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

4.1 Εισαγωγή	37
4.2 Υπολογισμός Θερμοδυναμικών Ιδιοτήτων	37

4.2.1 Ειδική ενθαλπία, θερμοκρασία, εντροπία	37
4.2.1.1 Νερό και ατμός	38
4.2.1.2 Αέρας και καυσαέριο	38
4.2.2 Θερμοδυναμική και παραδοχές της καύσης	41
4.3 Θερμοδυναμικοί Περιορισμοί και Θερμοδυναμικές Παραδοχές	43
4.3.1 Τύμπανο	44
4.3.2 Ψυχρό ρεύμα εναλλάκτη	45
4.3.3 Ψυχρό ρεύμα εναλλάκτη (Εξατμιστής)	47
4.3.4 Ψυχρό ρεύμα εναλλάκτη (Οικονομητήρας)	47
4.3.5 Θερμό ρεύμα εναλλάκτη	47
4.3.6 Βαλβίδα	48
4.3.7 Ατμοστροβίλος	49
4.3.8 Αντλία νερού	49
4.3.9 Αεριοστροβίλος	49
4.3.10 Συμπιεστής αέρα	51
4.3.11 Θάλαμος καύσης	51
4.3.12 Συμπυκνωτής	52
4.3.13 Απώλειες μεταφοράς ενέργειας	52
4.3.14 Αντικειμενική συνάρτηση	52
4.4 Σταθερές Τιμές Περιορισμών	52
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ</b>	
5.1 Εισαγωγή	55
5.2 Η δομή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης	55
5.2.1 Περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού των τιμών των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης	57
5.2.2 Ποιότητα λύσης	58
5.3 Εφαρμογή Α': Σύστημα Αεριοστροβίλου με Αναγεννητική Προθέρμανση τού Αέρα και Αναθέρμανση του Καυσαερίου	60
5.4 Εφαρμογή Β': Ενεργειακό Σύστημα Συμπαράγωγής με Αεριοστροβίλο	66
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ</b>	
6.1 Συμπεράσματα	75
6.2 Προοπτικές Μελλοντικής Έρευνας	76
Βιβλιογραφία	77

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

A.1 Τα Αρχεία Εισόδου	79
A.1.1 Περιγραφή του αρχείου εισόδου <i>System#.txt</i>	80
A.1.2 Περιγραφή του αρχείου εισόδου <i>System#_Critical_Flows.txt</i>	81
A.1.3 Περιγραφή του αρχείου εισόδου <i>System#_Compositions.txt</i>	83
A.1.4 Αρχείο εισόδου τύπου HEADER	83
A.2 Τα Αρχεία Εξόδου	85
A.2.1 Τα αρχεία που αποτυπώνουν τη δομή του διαγράμματος μοντελοποίησης	85
A.2.1.1 Το αρχείο SYSTEM_OUTPUT.txt	85
A.2.1.2 Το αρχείο PRESSURE_CHAINS.txt	85
A.2.2 Τα αρχεία που περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης	85
A.2.2.1 Τα αρχεία DENDRITES ENERGEIAS, DENDRITES MAZAS και LINEAR_SYSTEM86	
A.2.2.2 Το αρχείο COMPOSITIONS	86
A.2.2.3 Το αρχείο THERMODYNAMIC_VALUES	86
A.2.2.4 Το αρχείο CONSTRAIN_VALIDATION	87





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ενεργειακή ανάλυση και βελτιστοποίηση ενεργειακού συστήματος. Η μοντελοποίηση που προτείνει η παρούσα εργασία δίνει τη δυνατότητα να πραγματοποιείται βελτιστοποίηση μιας ποικιλίας ενεργειακών συστημάτων καθώς το μαθηματικό μοντέλο της βελτιστοποίησης προσαρμόζεται αυτόματα στο εκάστοτε ενεργειακό σύστημα.

Για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας και των τεχνικών χαρακτηριστικών των εξαρτημάτων ενός ενεργειακού συστήματος εγείρεται η ανάγκη να αναπτυχθεί ένα μοντέλο του συστήματος. Το μοντέλο αυτό αποκτάται εάν ενωθούν, με τρόπο που εξασφαλίζει τη θερμοδυναμική λογική, τα μοντέλα των στοιχείων που αποτελούν το ενεργειακό σύστημα. Η μοντελοποίηση αυτή βασίζεται στη θεωρία γράφων, η οποία έχει αναπτυχθεί στη γλώσσα προγραμματισμού C++[GrekasDN, PhDThesis]. Η γλώσσα προγραμματισμού C++ αποτελεί την καλύτερη επιλογή για την ανάπτυξη αλγορίθμων που διαχειρίζονται γράφους. Επιπρόσθετα η γλώσσα αυτή επιτρέπει τη χρήση αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού που είναι απαραίτητος για τη μοντελοποίηση που έχει επιλεγεί να πραγματοποιηθεί. Ο αντικειμενοστραφής προγραμματισμός δίνει τη δυνατότητα να δημιουργηθεί αυτόματα το μοντέλο όλου του ενεργειακού συστήματος με τη χρήση μοντέλων εξαρτημάτων από μια βιβλιοθήκη εξαρτημάτων και πληροφορία για την τοπολογία του συστήματος (δηλαδή τα στοιχεία που αποτελούν το σύστημα και τον τρόπο που συνδέονται).

Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζεται η αυτοματοποίηση της διαδικασίας δημιουργίας αυτού του μοντέλου, καθώς επίσης και η αποθήκευση της δομής του σε βάση δεδομένων στον υπολογιστή. Επίσης αναπτύσσεται το μαθηματικό μοντέλο, το οποίο υπολογίζει μέσω ενός διανύσματος ανεξάρτητων μεταβλητών τους περιορισμούς και την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Για τον σκοπό αυτόν έχουν επιλεγεί να βελτιστοποιηθούν δύο ενεργειακά συστήματα ως παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

# ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

### 2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο δημιουργείται αυτόματα το μοντέλο του ενεργειακού συστήματος, η μοντελοποίηση των στοιχειωδών εξαρτημάτων και ο τρόπος με τον οποίο η τοπολογία αποθηκεύεται στη δομή δεδομένων *γράφος*.

#### 2.1.1 Η έννοια του δείκτη και η σημασία του στη μοντελοποίηση

Η C++ μας δίνει τη δυνατότητα να ορίσουμε μεταβλητές οι οποίες θα περιέχουν τις διευθύνσεις στη μνήμη που περιέχουν τις τιμές άλλων μεταβλητών. Έτσι μία μεταβλητή η οποία περιέχει μια τιμή διεύθυνσης ονομάζεται μεταβλητή δείκτη ή απλά δείκτης.

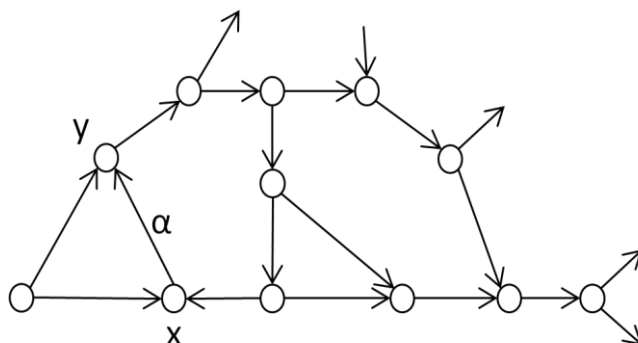
Μπορούμε να δηλώσουμε δείκτες οι οποίοι θα περιέχουν τις διευθύνσεις οποιουδήποτε τύπου μεταβλητής ακόμα και ολόκληρων αντικειμένων. Το αντικείμενο αποτελεί βασική μονάδα της C++ που, περιγραφικά, περιλαμβάνει άλλες προκαθορισμένες μεταβλητές που ονομάζονται ιδιότητες και συναρτήσεις που ονομάζονται μέθοδοι. Το μέγεθος του δείκτη στη μνήμη δεν επηρεάζεται από τον τύπο των δεδομένων της μεταβλητής της οποίας συγκρατεί τη διεύθυνση. Έτσι η διεύθυνση μιας μεταβλητής char (1 byte), μιας float (4 byte) ή μιας double (8 byte), είναι πάντα η διεύθυνση του πρώτου byte. Έτσι το μέγεθος των δεικτών είναι σταθερό και ίσο με το χώρο που χρειάζεται ο υπολογιστής για να μετατρέψει και να αποθηκεύσει μια διεύθυνση.

#### 2.1.2 Εισαγωγή στη θεωρία διγράφων

Ένα κατευθυνόμενο γράφημα ή διγάφος είναι ένα διατεταγμένο ζεύγος  $\Delta = (K, A)$  όπου  $K$ , είναι ένα σύνολο του οποίου τα στοιχεία λέγονται *κόμβοι* και  $A$ , είναι μια σειρά από διατεταγμένα ζεύγη κόμβων, τα οποία ονομάζονται *διατεταγμένες ακμές* ή απλούστερα *ακμές*. Μία ακμή  $a = (x, y)$  θεωρείται ότι κατευθύνεται από τον κόμβο  $x$  στον κόμβο  $y$ . Ο βαθμός ενός κόμβου είναι ο αριθμός των ακμών που συνδέονται με αυτόν. Για παράδειγμα, στο Σχ. 2.1, ο βαθμός εισόδου του κόμβου  $X$  είναι 2 ενώ ο βαθμός εξόδου είναι 1.

Μονοπάτι από έναν κόμβο σε έναν άλλο ενός γράφου ονομάζεται μια ακολουθία κόμβων, όπου κάθε κόμβος της ακολουθίας συνδέεται με τον επόμενο του μέσω ακμής. Στην

παρούσα εργασία μας ενδιαφέρουν τα διατεταγμένα μονοπάτια στα οποία η φορά των ακμών ταυτίζεται με τη φορά διαγραφής του μονοπατιού.



Σχ. 2.1 Παράδειγμα διγράφου

## 2.2 Τα Αντικείμενα της Δομής Δεδομένων

Το αντικείμενο είναι ένα σύνολο από μεταβλητές που ονομάζονται ιδιότητες, οι οποίες είναι είτε απλές μεταβλητές (ακέραιοι, πραγματικοί, αλφαριθμητικά κλπ.) είτε άλλα αντικείμενα, είτε δείκτες, καθώς επίσης και από ρουτίνες που ονομάζονται μέθοδοι οι οποίες σχετίζονται με την τροποποίηση των τιμών αυτών των μεταβλητών. Κάθε μεταβλητή καταλαμβάνει συγκεκριμένη έκταση μνήμης (πχ ακέραιοι, πραγματικοί και δείκτες καταλαμβάνουν 4ψηφιολέξεις(bytes), τα αλφαριθμητικά τον αριθμό των χαρακτήρων τους συν ένα, κλπ). Ένα αντικείμενο καταλαμβάνει (συνήθως) μνήμη ίση με το άθροισμα της μνήμης που καταλαμβάνουν οι μεταβλητές του. Η μνήμη ενός αντικειμένου αποτελείται από συνεχόμενες ψηφιολέξεις μνήμης και η διεύθυνση του πρώτου byte από αυτά είναι η τιμή του δείκτη του αντικειμένου. Η δέσμευση της μνήμης που καταλαμβάνει ένα αντικείμενο μπορεί να οριστεί στατικά (πριν την εκτέλεση προγράμματος) ή δυναμικά (κατά την εκτέλεση προγράμματος) με βάση κάποια δήλωση ορισμού των μεταβλητών που περιέχει, η οποία ονομάζεται *κλάση*. Μια κλάση ορίζεται μία φορά, ενώ με βάση αυτή μπορούν να οριστούν πολλά αντικείμενα, κάθε ένα από τα οποία περιέχει το ίδιο σύνολο μεταβλητών αλλά οι αντίστοιχες μεταβλητές τους καταλαμβάνουν διαφορετικές περιοχές της μνήμης (μπορούν δηλ. να λάβουν διαφορετικές τιμές). Οι δομές δεδομένων, σαν αυτή που παρουσιάζεται εδώ, χρησιμοποιεί δυναμική διαχείριση μνήμης.

Στο Σχήμα 2.2 φαίνονται οι τέσσερις βασικές κλάσεις με διαφορετική γραμμοσκίαση η κάθε μία[GrekasDN, PhDThesis]. Η κλάση KOMBOΣ περιέχει πληροφορίες για το όνομα και

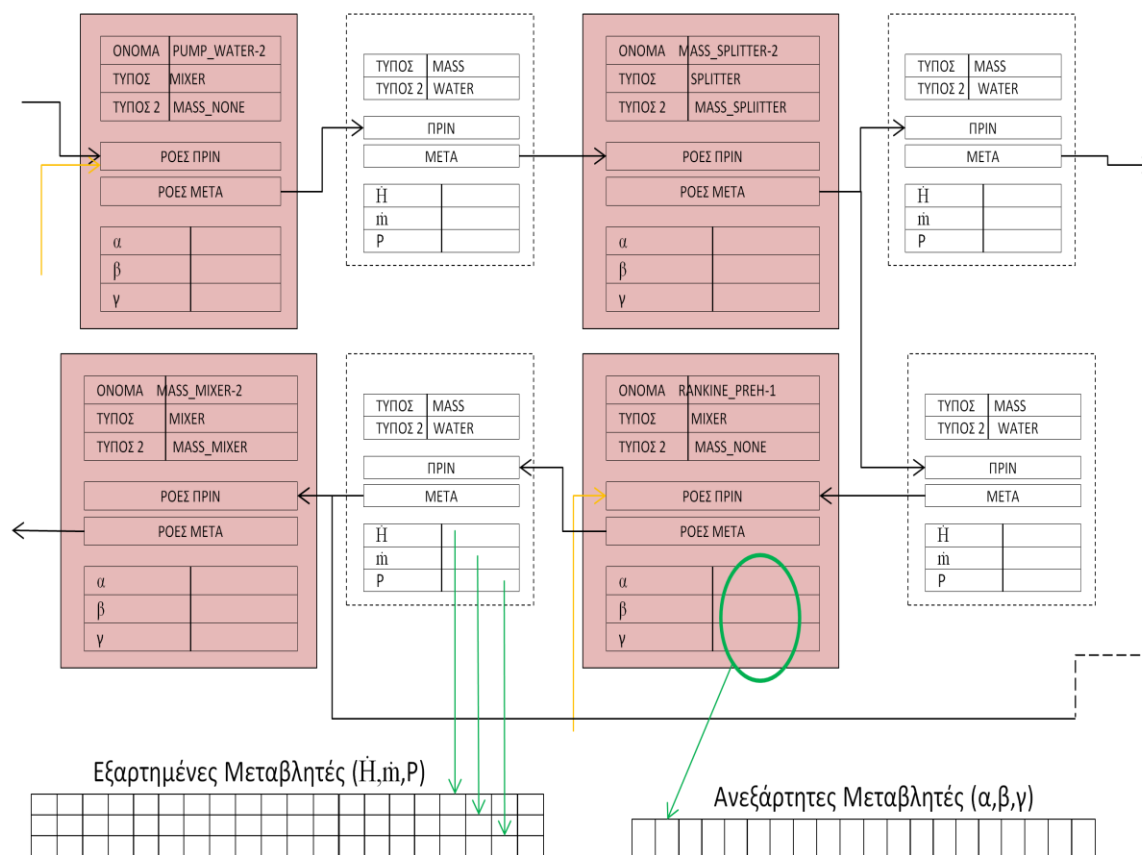
τον τύπο του κάθε κόμβου. Περιέχει επίσης διάνυσμα (array) από δείκτες σε αντικείμενα ΑΚΜΗ τα οποία αντιστοιχούν στις ακμές που έχουν φορά προς τον κόμβο και διάνυσμα από δείκτες σε αντικείμενα ΑΚΜΗ τα οποία αντιστοιχούν στις ακμές που έχουν αρχή τον κόμβο. Τα διανύσματα αυτά περιέχουν ακμές που αντιστοιχούν σε ροές μάζας και ακμές που αντιστοιχούν σε ροές ενέργειας. Όμοια, κάθε αντικείμενο ΑΚΜΗ περιέχει πληροφορίες για το όνομα και τον τύπο της κάθε ακμής του διγράφου καθώς και δύο δείκτες, έναν που δείχνει στον προηγούμενο κόμβο του διαγράμματος μοντελοποίησης και έναν που δείχνει στον επόμενο. Μέσω των δεικτών που βρίσκονται σε κάθε ΚΟΜΒΟ και σε κάθε ΑΚΜΗ, είναι δυνατόν ένας αλγόριθμος να διασχίσει οποιοδήποτε διατεταγμένο μονοπάτι του διαγράμματος μοντελοποίησης. Τη δυνατότητα αυτή, τη χρησιμοποιούν οι διάφοροι αλγόριθμοι αυτόματης σύνθεσης του μαθηματικού μοντέλου της βελτιστοποίησης του συστήματος, καθώς και οι αλγόριθμοι ελέγχου και κατασκευής εγκύρων διαγραμμάτων μοντελοποίησης που συνάδουν με το ενεργειακό αυτόματο του προβλήματος.

Οι τιμές των διαφόρων φυσικών μεταβλητών περιέχονται σαν μεταβλητές στην κλάση ΑΚΜΗ. Στο Σχ. 2.2 παρουσιάζονται για λόγους οικονομίας του χώρου μόνο μερικές φυσικές μεταβλητές (m παροχή μάζας, H παροχή ενθαλπίας, p πίεση). Άλλες φυσικές μεταβλητές επίσης περιέχονται στην κλάση ΑΚΜΗ, που δεν εμφανίζονται στο Σχήμα 2.2 όπως s (ειδική εντροπία), T(θερμοκρασία), x(ξηρότητα υγρού ατμού). Επίσης περιέχονται μεταβλητές που αφορούν τη σύσταση των ροών καυσαερίων καθώς και τη στοιχειομετρική σύσταση και τη θερμογόνο ικανότητα των ροών καυσίμου. Οι φυσικές μεταβλητές υπάρχουν σε κάθε ΑΚΜΗ ως δείκτες σε διανύσματα του αντικειμένου ΣΥΣΤΗΜΑ.

Η κλάση ΣΥΣΤΗΜΑ περιέχει δύο διανύσματα στα οποία αποθηκεύονται όλα τα αντικείμενα τύπου ΚΟΜΒΟΣ και ΑΚΜΗ που δημιουργούνται κατά τη δήλωση της τοπολογίας του συστήματος από τον εκάστοτε χρήστη. Συνοπτικά η κλάση αυτή περιέχει όλη την πληροφορία για την τοπολογία του συστήματος, τα μέλη που την αποτελούν και όλες τις ρουτίνες για τη διαχείριση του μοντελοποιημένου συστήματος, την επίλυση και βελτιστοποίησή του.

Η κλάση των ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ τέλος, περιλαμβάνει τα διανύσματα των ανεξάρτητων μεταβλητών που απαιτούνται κατά τη μαθηματική επίλυση και προσδιορισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων που περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

Στην παρούσα ενότητα περιγράφονται αναλυτικότερα οι προαναφερθείσες κλάσεις και ο ρόλος της κάθε μίας.



Σχ. 2.2 Παράδειγμα της υλοποιούμενης δομής δεδομένων.

### 2.2.1 Η κλάση ΑΚΜΗ

Η κλάση ΑΚΜΗ αντιστοιχεί στις ακμές της βασικής δομής γράφου που περιγράφηκε στην Ενότητα 2.1.2 και αντιπροσωπεύει το μέσο (ροή μάζας, ενέργειας) που συνδέει τα εξαρτήματα, ΚΟΜΒΟΥΣ, του ενεργειακού συστήματος. Στο διάγραμμα μοντελοποίησης περιλαμβάνονται οι ροές μάζας αλλά και οι ροές ενέργειας. Η ροή μάζας φέρει ενέργεια ενώ στη ροή ενέργειας η παροχή μάζας είναι μηδενική.

Μέσω μίας μακροσκελούς ανάλυσης και προσπέλασης της τοπολογίας του ενεργειακού συστήματος εσωτερικά της αλγοριθμικής δομής δίνεται χαρακτηρισμός στα αντικείμενα της κλάσης ΑΚΜΗ ανάλογα με το ρέον μέσο. Οι χαρακτηρισμοί αυτοί είναι 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> επιπέδου. Σε 1<sup>ο</sup> επίπεδο εξετάζεται και προσδιορίζεται αν το αντικείμενο ΑΚΜΗ αντιστοιχεί σε ροή ενέργειας ή μάζας. Σε 2<sup>ο</sup> επίπεδο προσδιορίζεται το είδος της ενέργειας και της ροής μάζας.

Πίνακας 2.1 Ταξινόμηση των αντικειμένων ΑΚΜΗ.

ΕΠΙΠΕΔΟ 1	ΕΠΙΠΕΔΟ 2
Ροή Ενέργειας	Μηχανική Ενέργεια Θερμική Ενέργεια Ηλεκτρική Ενέργεια
Ροή Μάζας	Παροχή Αέρα Παροχή Ατμού/Νερού Παροχή Καυσίμου Παροχή Καυσαερίου
Ροή Περιβάλλοντος	Μάζα και Ενέργεια (Μεικτός Τύπος)

Ο χαρακτηρισμός του 1<sup>ου</sup> επιπέδου είναι απαραίτητος για τη διατύπωση του μαθηματικού προβλήματος που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3. Ο χαρακτηρισμός του 2<sup>ου</sup> επιπέδου είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων κάθε ροής όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.

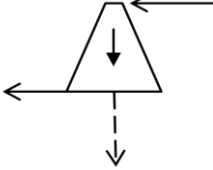
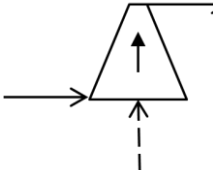
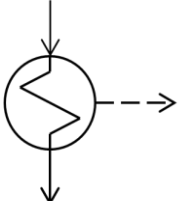
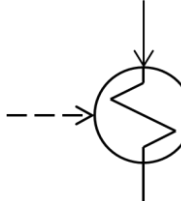
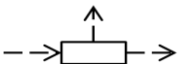
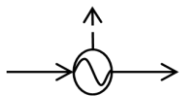
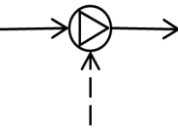

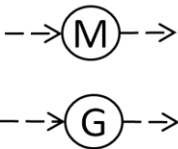
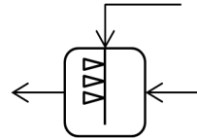
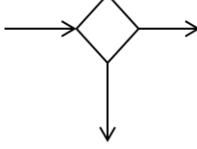
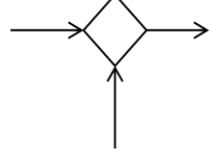
Η κλάση ΑΚΜΗ περιέχει πληροφορία σχετικά με τους κόμβους τους οποίους συνδέει. Πιο συγκεκριμένα μέλη της κλάσης αποτελούν δείκτες σε αντικείμενα της κλάσης ΚΟΜΒΟΣ που το εκάστοτε αντικείμενο ΑΚΜΗ συνδέει.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα αντικείμενα της κλάσης ΑΚΜΗ περιέχουν όλη τη θερμοδυναμική πληροφορία που χαρακτηρίζει τις αντίστοιχες ροές στο διάγραμμα μοντελοποίησης.

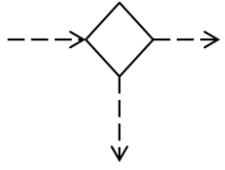
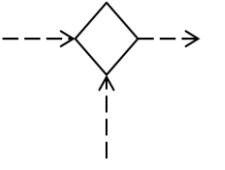
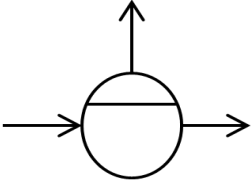
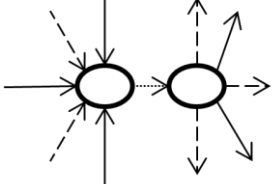
### 2.2.2 Η κλάση ΚΟΜΒΟΣ

Η κλάση ΚΟΜΒΟΣ αντιστοιχεί στους κόμβους της βασικής δομής γράφου που περιγράφηκε στο πρώτο κεφάλαιο και αντιπροσωπεύει τα στοιχειώδη εξαρτήματα τα οποία μπορεί να διαθέτει ένα ενεργειακό σύστημα (π.χ. ατμοστρόβιλος, αεριοστρόβιλος, συμπιεστής, θάλαμος καύσης κ.α.). Στην παρούσα μελέτη έχουν προβλεφθεί και μοντελοποιηθεί μια σειρά εξαρτημάτων τα οποία είναι ικανά να συνθέσουν μια ευρεία γκάμα ενεργειακών συστημάτων.

Πίνακας 2.2 Τύποι αντικειμένων της κλάσης KOMBOΣ.

ΤΥΠΟΙ ΚΟΜΒΩΝ			
<p>Αεριοστρόβιλος Ατμοστρόβιλος</p> 	<p>TURBINE GASTURBINE</p>	<p>Αεροσυμπιεστής Συμπιεστής Καυσαερίων</p> 	<p>AIR_COMPRESSOR FUEL_GAS_COMPRESSOR</p>
<p>Θερμό Ρεύμα Εναλλάκτη</p> 	<p>RANKINE_ CONDENCER</p> <p>WATER_HEATER STEAM_HEATER AIR_GAS_COOLER</p>	<p>Ψυχρό Ρεύμα Εναλλάκτη</p> 	<p>RANKINE_PREHEATER RANKINE_EVAPORATOR RANKINE_SUPERHEATER RANKINE_REHEATER AIR_GAS_PREHEATER</p>
<p>Απώλειες Μεταφοράς Ενέργειας</p> 	<p>ENERGY_LOSS</p>	<p>Απώλεια Θερμότητας Αγωγού</p> 	<p>ENERGY_LOSS _FROM_FLOW</p>
<p>Αντλία</p> 	<p>PUMP_WATER</p>	<p>Βαλβίδα</p> 	<p>VALVE</p>
<p>Κινητήρας Γεννήτρια</p> 	<p>MOTOR GENERATOR</p>	<p>Θάλαμος Καύσης</p> 	<p>COMBUSTOR</p>
<p>Διαχωριστής Μάζας</p> 	<p>MASS_SPLITTER</p>	<p>Αναμείκτης Μάζας</p> 	<p>MASS_MIXER</p>



<p>Διαχωριστής Ενέργειας</p> 	<p>ENERGY_SPLITTER</p>	<p>Αναμείκτης Ενέργειας</p> 	<p>MASS_MIXER ENERGY_MIXER</p>
<p>Τύμπανο</p> 	<p>DRUM</p>	<p>Περιβάλλον : Αναμείκτης Περιβάλ. Διαχωριστής Περιβάλ.</p> 	<p>ENVIRONMENT_MIXER ENVIRONMENT_SPLITTER</p>

Η μοντελοποίηση πραγματοποιείται έτσι ώστε κάθε εξάρτημα να διαθέτει είτε μία είσοδο είτε μία έξοδο. Κάθε κόμβος διαθέτει δηλαδή μοναδικό δείκτη σε αντικείμενο AKMH που έπεται του KOMBOY ή μοναδικό δείκτη σε αντικείμενο AKMH που προηγείται. Τα στοιχειώδη εξαρτήματα ορίστηκαν έτσι ώστε να έχουν ακριβώς αυτή την ιδιότητα σε αντιδιαστολή με τα κλασσικά εξαρτήματα όπως αυτά είναι γνωστά στην κλασσική ανάλυση θερμοδυναμικών κύκλων. Αυτή η σύμβαση μοντελοποιεί την πλειονότητα των εξαρτημάτων, ενώ ιδιαίτερη περίπτωση αποτελεί η μοντελοποίηση των στοιχείων των εναλλακτών, τα οποία στα αντίστοιχα διαγράμματα ροής διαθέτουν δύο εισόδους (θερμού και ψυχρού ρεύματος) και δύο ροές εξόδου αντίστοιχα. Στην παρούσα μελέτη ο εναλλάκτης θερμότητας μοντελοποιείται με δύο KOMBOYΣ, έναν για το θερμό και έναν για το ψυχρό ρεύμα. Από τον KOMBO του θερμού ρεύματος εξέρχεται ρεύμα θερμότητας το οποίο εισέρχεται και τροφοδοτεί τον KOMBO ψυχρού ρεύματος. Ο σκοπός της επιλογής αυτής αναλύεται στο Κεφάλαιο 3.

Το περιβάλλον μοντελοποιείται και αυτό με χρήση δύο κόμβων. Ο ένας συγκεντρώνει τις ροές ενέργειας και μάζας που καταλήγουν στο περιβάλλον και ο δεύτερος παρέχει στο σύστημα τις ροές που εισέρχονται σε αυτό. Η ύπαρξη των δύο αυτών κόμβων είναι αναγκαία ώστε να πληρείται ο ενεργειακός ισολογισμός του συστήματος όπως αυτός περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.

Με βάση λοιπόν την ανωτέρω ανάλυση μέλος της κλάσης KOMBOΣ αποτελεί μια ιδιότητα που χαρακτηρίζει το είδος του κάθε αντικειμένου ανάλογα με τον βαθμό εισόδου και

εξόδου που διαθέτουν. Τονίζεται πως οι ροές μάζας φέρουν και ενέργεια αλλά όχι το αντίθετο. Συνεπώς οι κόμβοι διαχωρίζονται σε Μείκτες ή Διαχωριστές Ενέργειας, Μείκτες ή Διαχωριστές Μάζας και σε Ουδέτερα στοιχεία Μάζας ή Ενέργειας. Για παράδειγμα, ουδέτερο στοιχείο ως προς τη μάζα ονομάζεται το στοιχείο που είτε διαθέτει βαθμό εισόδου= βαθμό εξόδου= 1 είτε διαθέτει μία και μόνο μία είσοδο τύπου μάζας και μία και μόνο μία έξοδο τύπου μάζας.

Σημειώνεται για καλύτερη κατανόηση πως ένας μείκτης/διαχωριστής μάζας αποτελεί αυτόματα και μείκτη/διαχωριστή ενέργειας. Στον Πίνακα 2.3 τα στοιχειώδη εξαρτήματα του πίνακα κατηγοριοποιούνται.

Πίνακας 2.3 Κατηγορίες αντικειμένων της κλάσης ΚΟΜΒΟΣ.

ΟΝΟΜΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΟΣ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ(ΕΝΕΡΓΕΙΑ)	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ(ΜΑΖΑ)
Αεριοστρόβιλος Ατμοστρόβιλος	Διαχωριστής	Ουδέτερο Στοιχείο
Αεροσυμπιεστής Συμπιεστής Καυσαερίων	Μείκτης	Ουδέτερο Στοιχείο
Θερό Ρεύμα Εναλλάκτη	Διαχωριστής	Ουδέτερο Στοιχείο
Ψυχρό Ρεύμα Εναλλάκτη	Μείκτης	Ουδέτερο Στοιχείο
Απώλειες Μεταφοράς Ενέργειας	Διαχωριστής	-
Απώλεια Θερμότητας Αγωγού	Διαχωριστής	Ουδέτερο Στοιχείο
Αντλία	Μείκτης	Ουδέτερο Στοιχείο
Γεννήτρια Κινητήρας	Ουδέτερο Στοιχείο	-
Θάλαμος Καύσης	Μείκτης	Μείκτης
Αναμείκτης Ενέργειας	Μείκτης	-
Διαχωριστής Ενέργειας	Διαχωριστής	-
Αναμείκτης Μάζας	Μείκτης	Μείκτης
Διαχωριστής Μάζας	Διαχωριστής	Διαχωριστής
Τύμπανο	Διαχωριστής	Διαχωριστής
Αναμείκτης Περιβάλλοντος	Μείκτης	Μείκτης
Διαχωριστής Περιβάλλοντος	Διαχωριστής	Διαχωριστής

Τα λοιπά μέλη της κλάσης ΚΟΜΒΟΣ φαίνονται και αναλύονται στα Κεφάλαια 3 και 4. Αυτά περιλαμβάνουν και χαρακτηριστικά του εκάστοτε εξαρτήματος, όπως είναι οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης συμπίεσης και εκτόνωσης στους συμπιεστές και στους στρόβιλους, η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στα ρεύματα των εναλλακτών κ.α. (βλ. Ενότητα 4.3).

### **2.2.3 Η κλάση ΣΥΣΤΗΜΑ**

Στην κλάση ΣΥΣΤΗΜΑ είναι αποθηκευμένες όλες οι πληροφορίες σχετικά με τα στοιχεία που αποτελούν την τοπολογία του συστήματος. Μέλη της κλάσης αποτελούν διανύσματα με δείκτες σε αντικείμενα των κλάσεων ΚΟΜΒΟΣ και ΑΚΜΗ που αποτελούν το σύστημα. Αυτό μας επιτρέπει να αναπτύξουμε ρουτίνες της κλάσης αυτής, οι οποίες διαχειρίζονται τα αντικείμενα των κλάσεων ΚΟΜΒΟΣ και ΑΚΜΗ και προσπελαίνουν την τοπολογία για να εκμαιεύσουν πληροφορία από αυτή και για να αποδώσουν πληροφορία στα αντικείμενα αυτά.

## **2.3 Σύνθεση Διαγράμματος Μοντελοποίησης**

### **2.3.1 Παράδειγμα μοντελοποίησης συστήματος συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο**

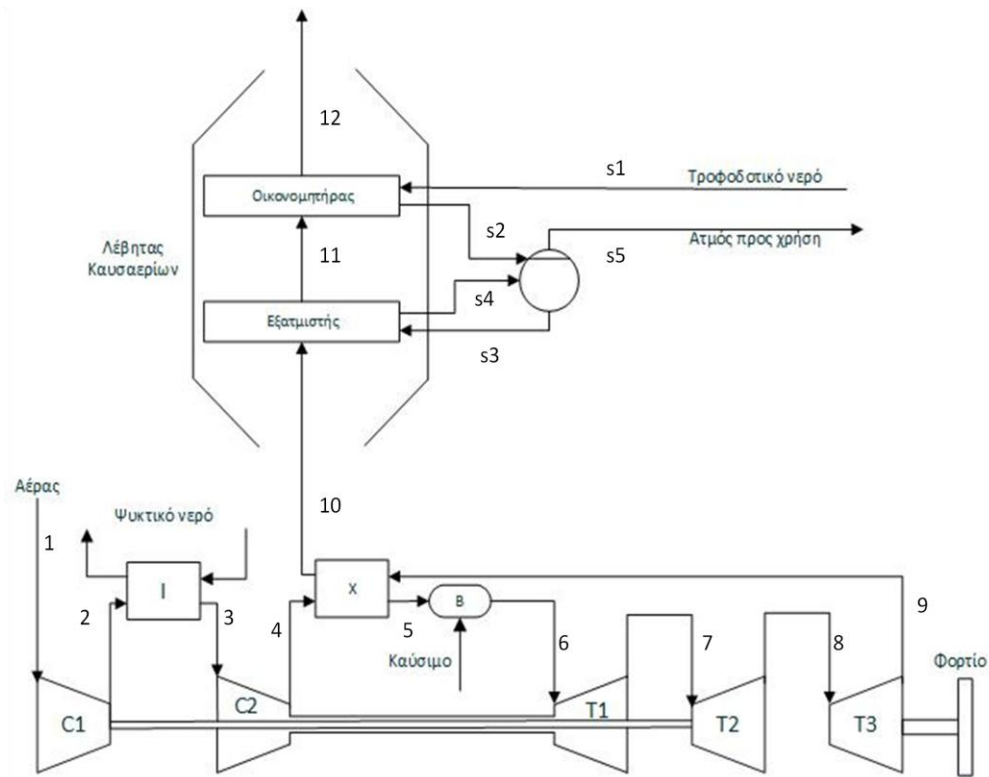
Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής ενός ενεργειακού συστήματος και εξετάζεται η μετατροπή του σε διάγραμμα μοντελοποίησης.

Το σύστημα συμπαραγωγής που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3 χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού και κορεσμένου ατμού. Το σύστημα έχει ως βάση μονάδα αεριοστρόβιλου με ενδιάμεση ψύξη και αναγεννητική προθέρμανση, ο οποίος έχει αεριογόνο διπλού τυμπάνου και στρόβιλο ισχύος. Τα καυσαέρια στην έξοδό τους από τη μονάδα αεριοστρόβιλου χρησιμοποιούνται σε λέβητα καυσαερίων για την παραγωγή κορεσμένου ατμού.

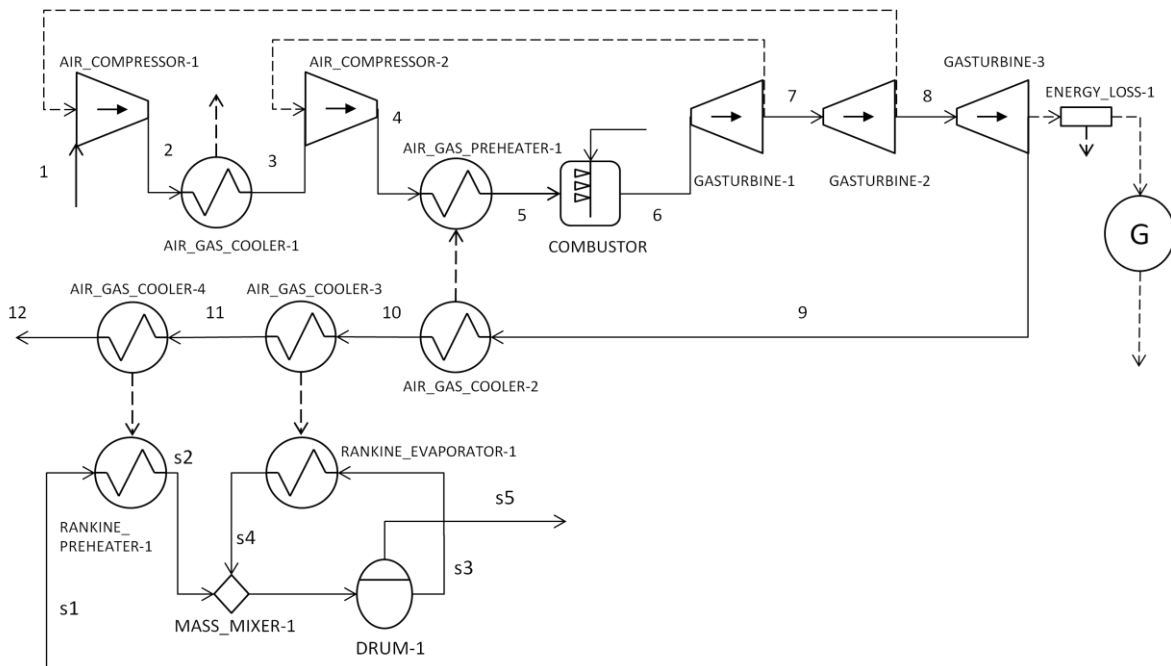
Βασική διαφορά του διαγράμματος ροής και του διαγράμματος μοντελοποίησης είναι πως στο τελευταίο φαίνονται εκτός των ροών μάζας και οι ροές ενέργειας (διακεκομμένες γραμμές). Για παράδειγμα ο άξονας που μεταφέρει ενέργεια από τον στρόβιλο 1 στον συμπιεστή 2 μοντελοποιείται από ένα αντικείμενο της κλάσης ΑΚΜΗ που αντιπροσωπεύει τη ροή ενέργειας από τον στρόβιλο στον συμπιεστή.

Υπενθυμίζεται πως η μοντελοποίηση πραγματοποιείται έτσι ώστε κάθε εξάρτημα να διαθέτει είτε μία είσοδο είτε μία έξοδο και για τον λόγο αυτόν οι παροχές s2 και s4 δεν μπορούν να ενωθούν με τον κόμβο του τυμπάνου (DRUM-1) καθώς διαθέτει δύο εξόδους. Για να υλοποιηθεί η μοντελοποίηση παρεμβάλλεται κόμβος αναμείκτη μάζας (MASS\_MIXER-1) ο

οποίος αναμειγνύει τις δύο παροχές σε μια κοινή έξοδο η οποία συνδέεται με τον κόμβο του τυμπάνου.



Σχ. 2.3 Διάγραμμα ροής Συστήματος Συμπαράγωγής.



Σχ. 2.4 Διάγραμμα μοντελοποίησης του Συστήματος Συμπαράγωγής.

Όλες οι ροές που καταλήγουν στο περιβάλλον αποτελούν είσοδο στον κόμβο του μείκτη περιβάλλοντος, ενώ οι ροές που εισέρχονται στο σύστημα προέρχονται από την έξοδο του κόμβου του διαχωριστή περιβάλλοντος. Οι δύο κόμβοι που μοντελοποιούν το περιβάλλον για απλούστευση παραλείπονται από το Σχ. 2.4.

### **2.3.2 Διαμόρφωση γράφων Ενέργειας και Μάζας**

Η κλάση ΣΥΣΤΗΜΑ περιέχει ρουτίνες για την κατασκευή δομών γράφων όπως αυτές περιγράφηκαν στην Ενότητα 2.1.3. Οι δύο γράφοι που διαμορφώνονται είναι ο γράφος της ενέργειας και ο γράφος της μάζας. Τα αντικείμενα τύπου ΚΟΜΒΟΣ(εξαρτήματα) του διαγράμματος μοντελοποίησης αποτελούν τους κόμβους του γράφου και τα αντικείμενα τύπου ΑΚΜΗ(ροές) τις ακμές του γράφου.

Ο γράφος της ενέργειας περιλαμβάνει το σύνολο των κόμβων και των ακμών καθώς κάθε ακμή που φέρει ροή μάζας χαρακτηρίζεται και από ροή ενέργειας. Σχηματικά ο γράφος της ενέργειας ταυτίζεται με το διάγραμμα μοντελοποίησης.

Ο γράφος της μάζας προέρχεται από τον γράφο της ενέργειας, εάν από τον τελευταίο εξαιρεθούν όλες οι ακμές που ταυτίζονται με ροές καθαρής ενέργειας.

Παράδειγμα τέτοιας ανάλυσης φαίνεται στην Ενότητα 3.3.1.

## **2.4 Αυτόματη Κατασκευή της Δομής του Συστήματος**

Πριν την έναρξη του προγράμματος είναι απαραίτητη η δήλωση της τοπολογίας του διαγράμματος μοντελοποίησης του συστήματος προς βελτιστοποίηση. Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α και ξεφεύγει από τους σκοπούς αυτού του κεφαλαίου. Πιο συγκεκριμένα, ορίζεται ο τύπος των εξαρτημάτων που το αποτελούν και ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται. Επιπλέον ορίζεται η τιμή της παροχής μάζας και ενέργειας, ενθαλπίας των ροών που εξέρχονται από τον κόμβο του διαχωριστή περιβάλλοντος είτε ως σταθερές τιμές είτε ως μεταβλητές προς βελτιστοποίηση τιμές. Το ποιές είναι οι ροές αυτές αναλύεται στο Κεφάλαιο 3. Τέλος, δηλώνονται οι συστάσεις του αέρα και του καυσίμου που εισέρχονται από το περιβάλλον. Τα βήματα της κατασκευής της δομής του συστήματος είναι τα ακόλουθα :

Αρχικά δημιουργείται αντικείμενο της κλάσης ΣΥΣΤΗΜΑ όπου θα αποθηκευτεί η τοπολογία του διαγράμματος μοντελοποίησης. Με τη δημιουργία του αντικειμένου ΣΥΣΤΗΜΑ

αυτόματα δημιουργούνται και ενώνονται με αντίστοιχη ακμή οι δύο κόμβοι που μοντελοποιούν το περιβάλλον (διαχωριστής και μείκτης περιβάλλοντος). Ακολούθως εκμαιεύονται οι πληροφορίες της τοπολογίας του συστήματος και κτίζεται σταδιακά η δομή δεδομένων.

Η τοπολογία προσδιορίζεται από το χρήστη με ζεύγη κόμβων. Δηλώνεται δηλαδή ζεύγος κόμβων με όνομα που χαρακτηρίζει το είδος τους το οποίο συνδέεται με αντικείμενο τύπου ΑΚΜΗ. Μόλις ένα τέτοιο ζεύγος αναγνωστεί από την αλγοριθμική υποδομή, αυτόματα δημιουργούνται δύο αντικείμενα τύπου ΚΟΜΒΟΣ και οι διευθύνσεις τους αποθηκεύονται σε διάνυσμα που περιέχει δείκτες αντικειμένων τύπου ΚΟΜΒΟΣ στο αντικείμενο ΣΥΣΤΗΜΑ. Σε περίπτωση που σε ένα ζεύγος εντοπίζεται αντικείμενο τύπου ΚΟΜΒΟΣ που έχει ήδη αποθηκευτεί στη δομή, τότε δεν δημιουργείται δεύτερη φορά, καθώς προϋπάρχει στο διάνυσμα δεικτών των αντικειμένων τύπου ΚΟΜΒΟΣ. Με τη δημιουργία του κάθε αντικειμένου τύπου ΚΟΜΒΟΣ αυτόματα προσδιορίζεται η κατηγορία στην οποία ανήκει ως προς τον γράφο μάζας και ενέργειας.

Ταυτόχρονα με τη δημιουργία κάθε ζεύγους κόμβων, αυτόματα δημιουργείται αντικείμενο τύπου ΑΚΜΗ η οποία συνδέει τους δύο κόμβους. Κατά τη δημιουργία του ζεύγους ο δείκτης εισόδου του ενός και ο δείκτης εξόδου το δεύτερου αντικειμένου ΚΟΜΒΟΣ λαμβάνουν τη διεύθυνση του αντικειμένου ΑΚΜΗ που τους συνδέει. Αντίστοιχα το αντικείμενο ΑΚΜΗ λαμβάνει στους αντίστοιχους δείκτες τις διευθύνσεις των αντικειμένων ΚΟΜΒΩΝ που συνδέει. Το αντικείμενο ΑΚΜΗ αποθηκεύεται αντίστοιχα στη δομή σε δοχείο αντικειμένων τύπου ΑΚΜΗ στο αντικείμενο του συστήματος. Μετά τη δημιουργία του προσδιορίζεται και ο τύπος της ακμής με ανάλυση περιπτώσεων των κόμβων που συνδέει.

Μετά τη δημιουργία της βασικής τοπολογίας εξετάζεται ποιόι κόμβοι διαθέτουν δείκτες εισόδου ή εξόδου ελεύθερους, χωρίς δηλαδή να περιέχουν διευθύνσεις αντικειμένων ΑΚΜΗ. Σε αυτή την περίπτωση δημιουργούνται ακμές που δεσμεύουν τους ελεύθερους δείκτες και συνδέουν τον κόμβο με τον αντίστοιχο κόμβο του περιβάλλοντος.

Τέλος, προσδίδονται τα χαρακτηριστικά στις ροές που εξέρχονται από τον κόμβο του περιβάλλοντος και κάποια λειτουργικά χαρακτηριστικά στα εξαρτήματα έτσι ώστε να μπορέσει να προσδιοριστεί η θερμοδυναμική τους συμπεριφορά. Τα τελευταία περιγράφονται αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 4.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

# ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

### 3.1 Εισαγωγή

Για τη δόμηση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης υπάρχει η ανάγκη να υπολογιστεί η αντικειμενική συνάρτηση και να καθοριστούν περιορισμοί συναρτήσεως ενός διανύσματος ανεξάρτητων μεταβλητών. Οι περιορισμοί εξασφαλίζουν την εφικτότητα κτήσεως και λειτουργίας του βελτιστοποιημένου συστήματος και τη συνέπειά του με τους νόμους της θερμοδυναμικής.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια νύξη στη φύση και τον ρόλο των ανεξάρτητων μεταβλητών για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων κάθε ακμής του διαγράμματος μοντελοποίησης. Η αντικειμενική συνάρτηση και οι θερμοδυναμικοί περιορισμοί διατυπώνονται ως συναρτήσεις των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και κατά συνέπεια των ανεξάρτητων μεταβλητών της βελτιστοποίησης.

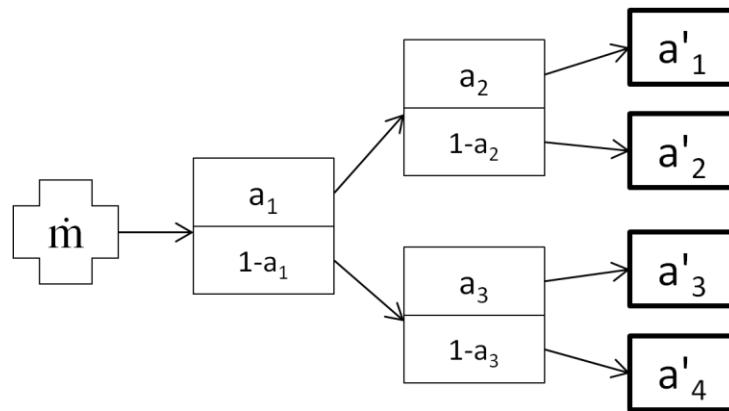
#### 3.1.1 Ανεξάρτητες Μεταβλητές

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος βελτιστοποίησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο που εμπλέκονται στον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων στο σύνολο των ροών:

- α : Ποσοστιαίος διαχωρισμός ροής μάζας
  - β : Ποσοστιαίος διαχωρισμός ροής ενέργειας
  - γ : Ανεξάρτητη μεταβλητή ποσοστιαίας αύξησης/πτώσης της πίεσης
  - δ : Ειδική ενθαλπία ροών που χαρακτηρίζουν κλειστούς βρόχους
  - ε : Παροχή μάζας ροών που χαρακτηρίζουν κλειστούς βρόχους
- ο Οι μεταβλητές α, β, γ σχετίζονται με το διαμοιρασμό των ενεργειών, των μαζών σε εξαρτήματα διαχωριστές ενέργειας και μάζας και των ποσοστών αύξησης/πτώσης της

πίεσης της ροής, όταν αυτή διέρχεται από εξαρτήματα που μεταβάλλουν την πίεση. Οι μεταβλητές αυτές εκφράζουν ποσοστά και κυμαίνονται στο διάστημα  $R(0,1)$ . Κατά την καταχώρηση της τοπολογίας του ενεργειακού συστήματος στη δομή δεδομένων εντοπίζονται αυτόματα τα εξαρτήματα των οποίων η λειτουργία επηρεάζεται από τις μεταβλητές  $\alpha, \beta, \gamma$ .

Ας θεωρήσουμε ότι μία ροή μάζας(ακμή) διαμοιράζεται περνώντας από ένα κόμβο σε τέσσερις ακμές. Αυτός ο διαμοιρασμός επηρεάζεται από τρεις ανεξάρτητες μεταβλητές τύπου  $\alpha$ ,κάθε μια από τις οποίες χαρακτηρίζει τον κάθε κόμβο.



Σχ. 3.1 Δυαδικό δέντρο για το διαμοιρασμό της παροχής μάζας.

Το ίδιο συμβαίνει και με τις ανεξάρτητες μεταβλητές  $\beta$ , ενώ η λειτουργία των μεταβλητών  $\gamma$  περιγράφεται αναλυτικά στην Ενότητα 3.4.

- Οι μεταβλητές  $\delta, \epsilon$  σχετίζονται με παροχή μάζας και ειδική ενθαλπία ροών που χαρακτηρίζουν κλειστούς βρόχους του ενεργειακού συστήματος. Πρέπει να δίδεται ως ανεξάρτητη μεταβλητή μία και μόνο μία ροή κλειστού βρόγχου ώστε να αποφευχθεί ο μηδενισμός των βαθμών ελευθερίας του συστήματος κατά την επίλυση και βελτιστοποίησή του.(Αν η ειδική ενθαλπία μιας ροής χαρακτηριστεί ως ανεξάρτητη μεταβλητή τότε πρέπει να προσδιοριστεί ως μεταβλητή ή σταθερά και η αντίστοιχη παροχή μάζας, και αντίστροφα). Αντίθετα από τις μεταβλητές  $\alpha, \beta, \gamma$ , οι μεταβλητές  $\delta, \epsilon$  χαρακτηρίζουν ροές μάζας και ενέργειας και πρέπει να επιλεγούν από τον μελετητή καθώς επίσης και να καθοριστεί το διάστημα στο οποίο μεταβάλλονται. Σημειώνεται πως



υπάρχει η δυνατότητα η παροχή μάζας και/ή η ειδική ενθαλπία στις ροές αυτές να προσδιοριστεί ως σταθερή παράμετρος και όχι ως μεταβλητή.

### 3.1.2 Εξαρτημένες Μεταβλητές

Οι εξαρτημένες μεταβλητές χωρίζονται σε μεταβλητές πρώτου και δεύτερου βαθμού και αφορούν στις θερμοδυναμικές ιδιότητες των ροών του συστήματος. Οι μεταβλητές 1<sup>ου</sup> βαθμού υπολογίζονται ευθέως ως συναρτήσεις των ανεξάρτητων μεταβλητών, ενώ οι εξαρτημένες 2<sup>ου</sup> βαθμού ως συναρτήσεις των μεταβλητών 1<sup>ου</sup> βαθμού. Μεταβλητές 1<sup>ου</sup> βαθμού αποτελούν οι παροχές μάζας, παροχές ενέργειας/ενθαλπίας και οι πιέσεις. Μεταβλητές 2<sup>ου</sup> βαθμού αποτελούν η ειδική ενθαλπία, η θερμοκρασία και η εντροπία.

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος υπολογισμού των μεταβλητών 1<sup>ου</sup> βαθμού. Η μέθοδος αυτομάτου καθορισμού των ροών μάζας και ενέργειας μέσω των ανεξαρτητών μεταβλητών θα παρουσιαστεί στην Ενότητα 3.3.2 ενώ η χρήση του “Διαχωριστή” με διαφορετική ομάδα ανεξαρτητών μεταβλητών για την απόδοση τιμών στις εξαρτημένες μεταβλητές των πιέσεων, έτσι ώστε αυτές να πληρούν αυτόματα τις προφανείς μεταξύ τους ανισοτικές σχέσεις, θα παρουσιαστεί στην Ενότητα 3.4.2.

Ο αυτόματος υπολογισμός των υπολοίπων θερμοδυναμικών μεγεθών ως συναρτήσεις των μεταβλητών 1<sup>ου</sup> βαθμού θα παρουσιαστεί στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

## 3.2 Η Λειτουργία του Διαχωριστή

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστεί η λειτουργία του διαχωριστή που αναφέρθηκε στη δομή δεδομένων, στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Όλοι οι κόμβοι του διαγράμματος μοντελοποίησης, όπως ορίστηκαν έχουν την εξής ιδιότητα: Κάθε κόμβος έχει είτε βαθμό εισόδου ίσο με 1 είτε βαθμό εξόδου ίσο με 1 (Π.χ. οι κόμβοι *TURBINE* και *GAS\_COOLER* έχουν βαθμό εισόδου ίσο με 1, οι *PUMP\_WATER* και *COMBUSTOR* έχουν βαθμό ίσο με 1, ενώ ο κόμβος *VALVE* έχει βαθμό εισόδου και εξόδου ίσο με 1.)

Θεωρώντας τον διγράφο του διαγράμματος μοντελοποίησης ως διάγραμμα ενεργειακού ισολογισμού, δηλαδή αντιστοιχίζοντας μια τιμή παροχής ενέργειας σε κάθε ακμή του, μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες επισημάνσεις. Ας υποθέσουμε ότι μία παροχή ενέργειας  $E_j$  που εισέρχεται σε κόμβο με αύξοντα αριθμό  $j$  τέτοιον ώστε να έχει βαθμό ίσο με 1, και βαθμό εξόδου  $n$  μεγαλύτερο του 1, διαχωρίζεται σε  $n > 1$  ροές  $E_{ji}$ ,  $j = 1 \dots n$  τέτοιες ώστε:

$$E_j = \sum_{i=1}^n E_{ji} \quad (3.1)$$

Θα επιθυμούσαμε να ορίσουμε ως (μερικές από τις) ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος τους λόγους:

$$\beta'_{ji} = \frac{E_{ji}}{E_j} \quad \text{ή απλά} \quad \beta'_i = \frac{E_i}{E} \quad (3.2)$$

Επιπλέον όμως, θα έπρεπε να επιβληθούν και οι ακόλουθοι ισοτικοί περιορισμοί:

$$\sum_{i=1}^n \beta'_{ji} = 1 \quad (3.3)$$

Ο αριθμός των ανεξαρτήτων μεταβλητών που σχετίζονται σε κάθε κόμβο, μείον τον αριθμό ισοτικών περιορισμών που σχετίζονται με κάθε κόμβο είναι ίσος με  $\mathbf{n-1}$ , και είναι ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας του κόμβου, όσον αφορά τον καθορισμό των ροών ενέργειας γύρω από τον κόμβο έτσι ώστε να πληρούται η αρχή διατήρησης της ενέργειας.

Η ρουτίνα του διαχωρισμού υλοποιεί έναν αλγόριθμο μέσω του οποίου οι τιμές  $\mathbf{n-1}$  ανεξαρτήτων μεταβλητών  $\beta_i$  (διαφορετικές από τις  $\beta_i$  που ορίζονται από την Εξ.(3.2)) καθορίζουν μονοσήμαντα τις  $\mathbf{n}$  ροές ενέργειας εξόδου  $E_i$  του κάθε κόμβου με μια είσοδο ροής ενέργειας  $E$ . Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ανά πάσα στιγμή ο ισολογισμός ενέργειας.

Αντίστοιχα από τις μεταβλητές  $\beta_i$  ορίζονται οι μεταβλητές  $\alpha_i$  για την κατανομή των ροών μάζας σε όλους τους κόμβους διαχωρισμού παροχής μάζας, όπως είναι οι κόμβοι *SPLITTER* και *DRUM*. Κάθε μία από τις μεταβλητές αυτές  $\alpha_i$  και  $\beta_i$  ορίζεται στο διάστημα  $[0,1]$  και οποιαδήποτε τυχαία τιμή και αν ανατεθεί σε κάθε μία από αυτές, οι τιμές όλων των παροχών μάζας και ενέργειας (άρα και ειδικής ενθαλπίας) σε κάθε ροή του ενεργειακού συστήματος μπορούν να καθοριστούν μονοσήμαντα, έτσι ώστε να εκπληρούνται οι αρχές διατήρησης της μάζας και της ενέργειας σε κάθε κόμβο. Δεν λαμβάνεται υπόψη η σύσταση των κατασκευαστών του λογισμικού βελτιστοποίησης GRG σύμφωνα με την οποία οφείλει ο χρήστης να εισάγει λογικές φυσικές τιμές των μεταβλητών προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία της μεθόδου. Η απαλλαγή από αυτήν την απαίτηση είναι αναγκαία καθώς ο αλγόριθμος εντοπίζει τη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης παρέχοντας με μεγαλύτερη αξιοπιστία αποδεκτό αποτέλεσμα.

Τα εξαρτήματα τα οποία διαθέτουν δύο εξόδους διέπονται από τη βασική αρχή :

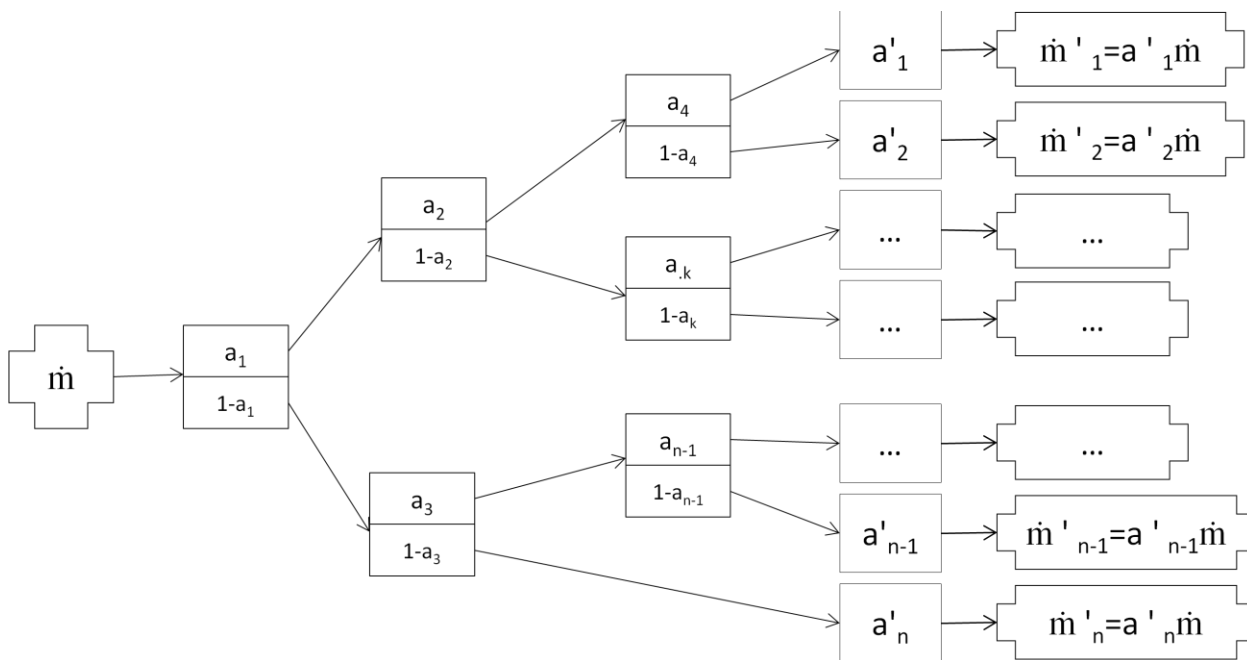
$$m'_{j1} = \alpha'_{j1} \cdot m_j \text{ και } m'_{j2} = (1 - \alpha'_{j1}) \cdot m_j \quad (3.4)$$

Στην περίπτωση που κάποιο εξάρτημα διαθέτει επί πλέον των δύο εξόδων, όπως προβλέπεται στα εξαρτήματα με την ονομασία *energy/mass\_splitter*, τότε εφαρμόζεται αλγόριθμος ο οποίος υπολογίζει τις τιμές  $\alpha'_{ji}$  του Σχ. 3.2. Καθορίζεται ο λόγος :

$$\alpha'_{ji} = \frac{m_{ji}}{m_j}, \quad i=1 \dots n \text{ ή απλά } \alpha'_i = \frac{m_i}{m} \quad (3.5)$$

που αντιστοιχεί σε κάθε μία από τις  $n$  εξόδους ενός κόμβου *SPLITTER* με αριθμό  $j$ . Από κάθε έξοδο εξέρχεται ροή μάζας  $m'_{ij}$ , ως συνάρτηση  $n-1$  ανεξαρτήτων μεταβλητών  $\alpha_i$ . Ισχύει σχέση:

$$\sum_{i=1}^n \alpha'_{ji} = 1 \quad (3.6)$$



Σχ. 3.2 Παράδειγμα λειτουργίας του Διαχωριστή.

Στο Σχ.3.2 παρουσιάζονται οι μεταβλητές  $\alpha_k$  και τα συμπληρώματά τους από την μονάδα ως κόμβοι ενός δυαδικού δένδρου.

Όσον αφορά στην υλοποίηση, οι μεταβλητές  $\alpha_k$  βρίσκονται στο αντικείμενο *SPLITTER* με αριθμό  $j$  σε ένα διάνυσμα (array) πραγματικών αριθμών και όχι σε δομή δεδομένων δένδρου.

Το Σχ. 3.2 βοηθάει στην καλύτερη κατανόηση του αλγορίθμου. Η τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής που βρίσκεται σε κάθε κόμβο του δυαδικού δένδρου εκφράζει τον λόγο της παροχής της εξόδου από αυτόν τον κόμβο προς την παροχή εισόδου σε αυτόν τον κόμβο. Υπενθυμίζεται ότι το πεδίο τιμών κάθε μεταβλητής  $a_k$  είναι το διάστημα  $[0,1]$ . Το συμπλήρωμα  $1-a_k$  εκφράζει έτσι το λόγο της παροχής της κάτω εξόδου από τον κόμβο του δυαδικού δένδρου προς την παροχή εισόδου σε αυτήν.

### 3.3 Υπολογισμός Ροών Μάζας και Ενέργειας

Τα εξαρτήματα που περιγράφονται στα ανωτέρω κεφάλαια κατανέμονται σε τρεις κατηγορίες αναφορικά με τον ρόλο τους στη διοχέτευση ενέργειας και μάζας. Οι κατηγορίες αυτές είναι διαχωριστές ενέργειας/μάζας, μείκτες ενέργειας/μάζας και ουδέτερα στοιχεία. Οι διαχωριστές ενέργειας/μάζας, όπως είδαμε ανωτέρω, χαρακτηρίζονται από έναν αριθμό ανεξάρτητων μεταβλητών τύπου  $a/\beta$  έτσι ώστε να πληρούται η αρχή διατήρησης της ενέργειας/μάζας. Αντίστοιχα οι μείκτες ενέργειας/μάζας διαθέτουν βαθμό εξόδου ίσο με 1 και βαθμό εισόδου  $>1$ . Στους κόμβους αυτούς οι παροχές ενέργειας/μάζας που εισέρχονται σε αυτούς αθροίζονται σε μια κοινή έξοδο. Τέλος, τα ουδέτερα στοιχεία είναι αυτά τα οποία έχουν βαθμό εισόδου ίσο με το βαθμό εξόδου ίσο με τη μονάδα. Κάθε στοιχείο μπορεί να έχει διαφορετικό χαρακτηρισμό ως προς την ενέργεια και τη μάζα. Για παράδειγμα, λέμε πως το ψυχρό ρεύμα εναλλάκτη στο οποίο αθροίζεται η ενέργεια της εισερχόμενης ροής και το ρεύμα θερμότητας που προέρχεται από το αντίστοιχο θερμό ρεύμα αποτελεί μείκτη ενέργειας ενώ χαρακτηρίζεται ουδέτερο ως προς τη ροή μάζας. Εύκολα φαίνεται πως οποιοδήποτε στοιχείο διαχωριστής/μείκτης μάζας αποτελεί αυτόματα και διαχωριστή/μείκτη ενέργειας αλλά όχι το αντίστροφο.

Στη συνέχεια με βάση τη λογική αυτή δημιουργούνται και αναλύονται δύο δομές γράφων για τη ροή ενέργειας και τη ροή μάζας, αντίστοιχα. Παρατηρείται πως ο γράφος της μάζας ταυτίζεται με τον γράφο ενέργειας αν από τον τελευταίο αφαιρεθούν όλες οι ροές καθαρής ενέργειας, καθώς κάθε ροή μάζας μεταφέρει ενέργεια αλλά όχι το αντίστροφο. Στην παρούσα παράγραφο επιλέγεται να γίνει η ανάλυση του γράφου που δημιουργείται από τις ροές ενέργειας καθώς ο γράφος των ροών μάζας αναλύεται με όμοιο τρόπο.

### 3.3.1 Αυτόματος χαρακτηρισμός των ροών

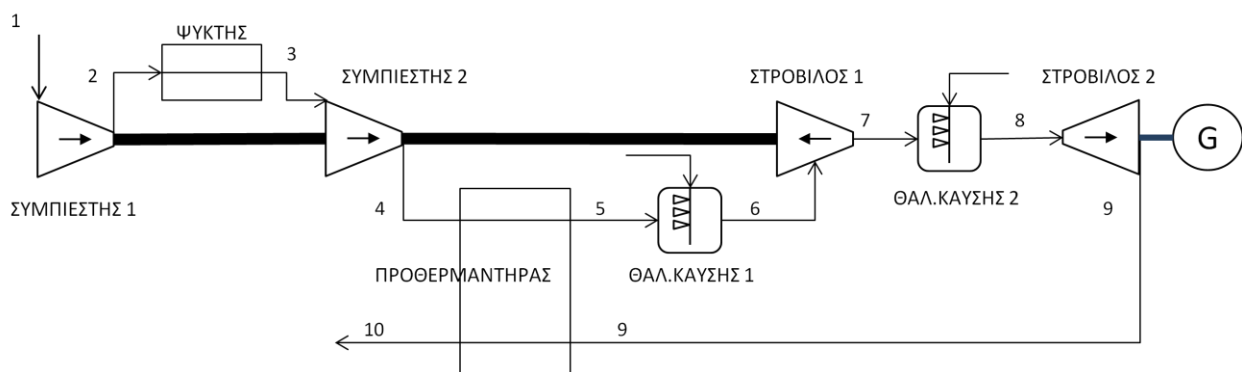
Οι ροές ταξινομούνται, ανάλογα με τον τύπο των εξαρτημάτων που συνδέουν, σε τέσσερα είδη [GrekasDN, PhDThesis]. Ροές που συνδέουν :

- Μείκτη με Διαχωριστή (ΜΔ)
- Διαχωριστή με Μείκτη (ΔΜ)
- Μείκτη με Μείκτη (ΜΜ)
- Διαχωριστή με Διαχωριστή (ΔΔ)

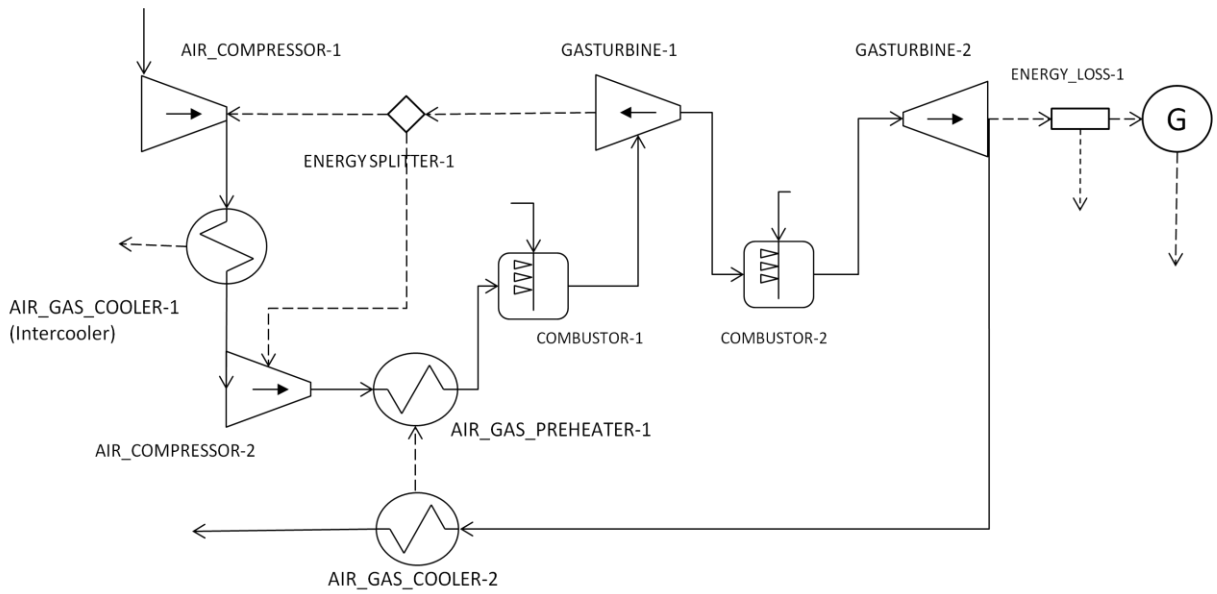
Οι πρώτες δύο κατηγορίες είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τη διαμόρφωση του αριθμητικού μοντέλου υπολογισμού των ροών ενέργειας.

Επιλέγουμε να ονομάσουμε Δενδρίτη τον υπογράφο του διαγράμματος μοντελοποίησης ο οποίος περιέχει μία και μόνο μία ροή τύπου ΜΔ και έχει ως απολήξεις ροές τύπου ΔΜ. Με μία σχετικά απλή ανάλυση βασισμένη σε κανόνες λογικής, φαίνεται πως κάθε διάγραμμα μοντελοποίησης αποτελείται από συνδεδεμένους Δενδρίτες με τρόπο τέτοιο ώστε κάθε κόμβος και κάθε ακμή του διαγράμματος μοντελοποίησης να συμπεριλαμβάνεται σε τουλάχιστον ένα Δενδρίτη. Στα Σχ. 3.3-3.5 φαίνεται ένα παράδειγμα αποτύπωσης του διαγράμματος ροής ενός ενεργειακού συστήματος σε δομή γράφου ενέργειας.

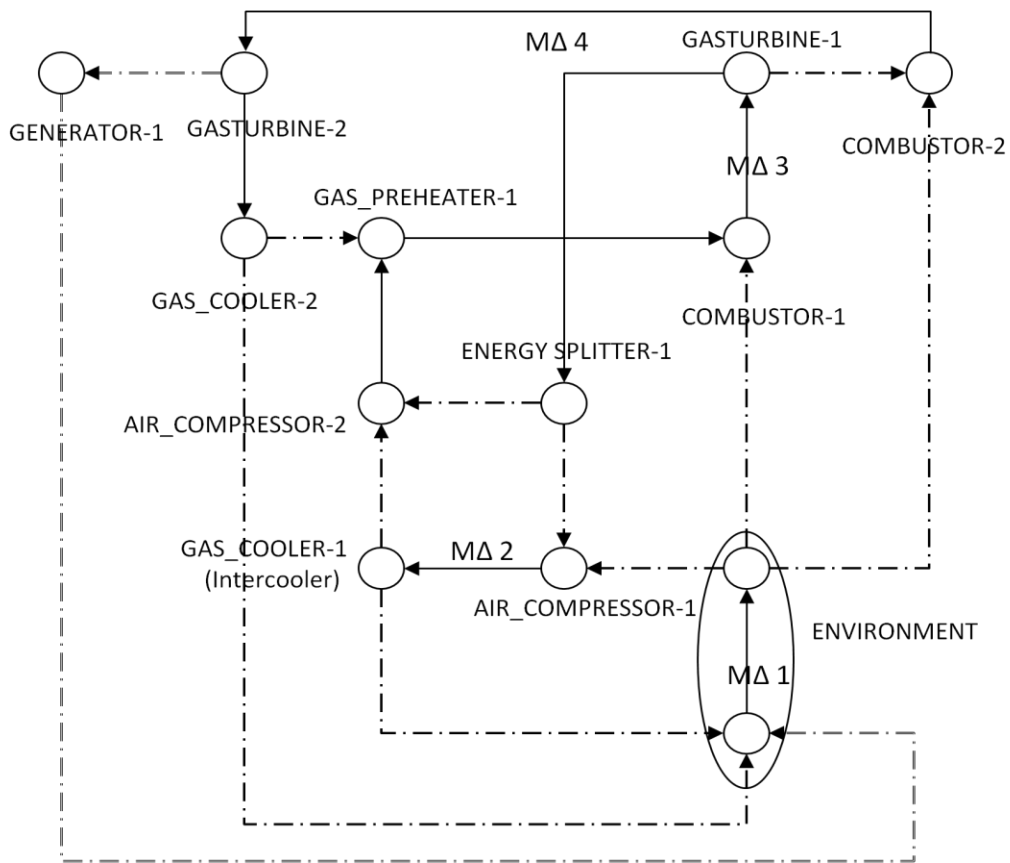
Στο Σχ. 3.5 οι ροές ΔΜ απεικονίζονται με αξονική γραμμή. Το παρόν σύστημα διαθέτει τέσσερις Δενδρίτες, όσες δηλαδή και οι ροές τύπου ΜΔ. Η βασική αρχή της ανάλυσης έγκειται στο γεγονός ότι κάθε Δενδρίτης δίνει ποσοστό της ενέργειάς του σε έναν ή περισσότερους Δενδρίτες μέσω των απολήξεων ΔΜ. Αντίστοιχα ο κάθε Δενδρίτης τροφοδοτείται από έναν ή περισσότερους Δενδρίτες συμπεριλαμβανομένου ενίοτε και του εαυτού του.



Σχ. 3.3 Διάγραμμα ροής συστήματος αεριοστροβίλου με αναγεννητική προθέρμανση του αέρα και αναθέρμανση του καυσαερίου.



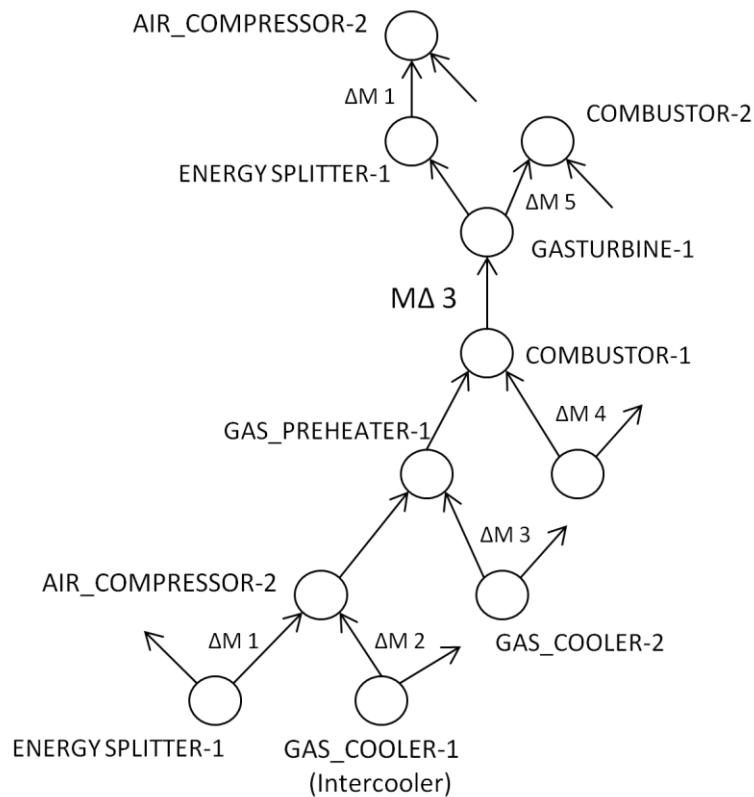
Σχ. 3.4 Διάγραμμα μοντελοποίησης του ενεργειακού συστήματος του Σχ.3.3.



Σχ. 3.5 Γράφος ενέργειας του ενεργειακού συστήματος του Σχ. 3.3.

### 3.3.2 Καθορισμός του γραμμικού συστήματος για τον υπολογισμό των παροχών μάζας και ενέργειας

Από τον γράφο του Σχ. 3.5 λαμβάνεται για παράδειγμα ο Δενδρίτης της ροής ΜΔ 3 και απομονώνεται στο Σχ.3.6. Κάθε ροή τύπου ΔΜ ενός Δενδρίτη τροφοδοτείται από μία και μόνο μία ροή τύπου ΜΔ και τροφοδοτεί ένα και μόνον ένα Δενδρίτη. Συνεπώς η ροή ΔΜ 2, η οποία εμπεριέχεται και στο Δενδρίτη 2, τροφοδοτεί το Δενδρίτη 3 με ποσοστό από τη ροή ενέργειας της ροής ΜΔ 2. Η ροή ΔΜ 3 τροφοδοτείται από τη ροή ΜΔ 4 και η ροή ΔΜ 4 από το Δενδρίτη του περιβάλλοντος ΜΔ1. Παρατηρείται πως η ροή ΜΔ 1 τροφοδοτείται και τροφοδοτεί τη ροή ΜΔ 3.



Σχ. 3.6 Παράδειγμα δομής Δενδρίτη.

Οι ροές τύπου ΔΔ και ΜΜ εμφανίζονται εσωτερικά στους Δενδρίτες και συμμετέχουν δευτερογενώς στη μοντελοποίηση του αριθμητικού μοντέλου υπολογισμού των ροών ενέργειας. Οι ροές ΔΔ ακολουθούν τις ροές ΜΔ και οι ροές ΜΜ προηγούνται των ροών ΜΔ.

Περιγράφεται στη συνέχεια η μέθοδος υπολογισμού που ακολουθείται για τον υπολογισμό των ποσοστών αυτών. Αφού πραγματοποιηθεί ο αυτόματος χαρακτηρισμός των ροών, εντοπίζονται οι ροές τύπου ΜΔ. Με έναρξη τις ροές αυτές εφαρμόζεται ένας αναδρομικός αλγόριθμος που διασχίζει τον Δενδρίτη με φορά ίδια με τη φορά των ροών ενέργειας μέχρι να συναντήσει ροές τύπου ΔΜ. Οι ροές που μεσολαβούν και διασχίζονται είναι κατά λογική αναγκαιότητα τύπου ΔΔ και κατά την προσπέλαση εφαρμόζεται στους κόμβους ο αλγόριθμος διαχωριστή. Κάθε κόμβος χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο μεταβλητών τύπου β και κατά συνέπεια μέσω της εφαρμογής του αλγορίθμου του διαχωριστή υπολογίζεται το προερχόμενο από την κεντρική ροή ΜΔ ποσοστό παροχής ενέργειας σε κάθε ροή ΔΔ και τελικά σε κάθε ροή ΔΜ.

Ο αλγόριθμος αυτός εφαρμόζεται για κάθε ροή τύπου ΜΔ. Με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται ότι όλες οι ροές τύπου ΔΜ έχουν προσπελασθεί και διαθέτουν τις ακόλουθες πληροφορίες: το ποσοστό της παροχής ενέργειας της αντίστοιχης ροής ΜΔ που καταλήγει σε κάθε μία από αυτές και τη ροή ΜΔ από την οποία τροφοδοτούνται.

Μία δεύτερη ρουτίνα λαμβάνει ως εναρκτήριο σημείο κάθε μία από τις ροές ΔΜ και διατρέχει τον γράφο ενέργειας με φορά ίδια με αυτή των ροών ενέργειας μέχρι να εντοπίσει ροή τύπου ΜΔ. Εύκολα φαίνεται πως κατά τη διαδρομή αυτή οι ροές που συναντώνται είναι τύπου ΜΜ και συνεπώς κάθε ροή ΔΜ καταλήγει σε μοναδική ροή ΔΜ χωρίς να συναντώνται διακλαδώσεις διαχωρισμού. Τέλος, σε κάθε ροή ΔΜ αποθηκεύεται η πληροφορία για το ποιος ροές ΜΔ αυτές τροφοδοτούν.

Με την ανάλυση αυτή προσδιορίζεται σε ποιό/ούς Δενδρίτες ανήκει κάθε ροή ΔΜ, δηλαδή από ποιόν Δενδρίτη τροφοδοτείται και ποιόν τροφοδοτεί. Για τη διατύπωση του αριθμητικού προβλήματος πρέπει λοιπόν να καθοριστεί ποιος Δενδρίτης τροφοδοτεί ποιόν και με τι ποσοστό της ενέργειάς του.

Ορίζουμε πίνακα P, διαστάσεων n×n όπου n ο αριθμός των Δενδριτών του συστήματος. Ο Δενδρίτης j παρέχει στο Δενδρίτη i ποσοστό της ενέργειάς του. Για να βρεθεί το ποσοστό P<sub>ij</sub> του πίνακα αθροίζονται όλα τα ποσοστά των ροών ΔΜ με κοινούς δείκτες ΜΔ<sub>i</sub> και ΜΔ<sub>j</sub>. Ορίζουμε διάνυσμα X διαστάσεων n×1 και με X<sub>i,1</sub> λογίζεται η ροή ενέργειας του ΜΔ i.

Κατασκευάζεται αυτόματα το ακόλουθο γραμμικό σύστημα :

$$[P]_{n \times n} \cdot [x]_{n \times 1} = [x]_{n \times 1} \quad (3.7)$$



με χαρακτηριστική ιδιότητα :

$$\sum_{i=1}^n P_{i,j} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (3.8)$$

Παράγεται ισοδύναμο σύστημα :

$$[P]_{n \times n} \cdot [x]_{n \times 1} = [x]_{n \times 1} \quad (3.9)$$

$$([P]_{n \times n} - [I]_{n \times n}) \cdot [x]_{n \times 1} = [0]_{n \times 1} \quad (3.10)$$

$$([A]_{n \times n}) \cdot [x]_{n \times 1} = [0]_{n \times 1} \quad \mu\epsilon \quad \sum_{i=1}^n A_{i,j} = 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (3.11)$$

Ο πίνακας  $A$  έχει ορίζουσα 0, συνεπώς το σύστημα διαθέτει άπειρες μη μηδενικές λύσεις που απεικονίζονται μέσω του  $A$  στον μηδενικό χώρο (Ο μηδενικό χώρος (nullspace) αποτελείται από όλα τα διανύσματα  $x$  για τα οποία  $A \cdot x = 0$ ). Για τον λόγο αυτόν πρέπει ένα στοιχείο του διανύσματος  $X$  να δοθεί στο σύστημα ως σταθερά. Με αφετηρία δηλαδή την παροχή ενέργειας σε έναν Δενδρίτη και τα ποσοστά με τα οποία διαμοιράζεται η ενέργεια στους Δενδρίτες υπολογίζονται τελικά η ροή ενέργειας κάθε ροής ΜΔ. Επιλέγεται συνήθως ο προσδιορισμός της ροής ενέργειας στον Δενδρίτη του περιβάλλοντος, καθώς γνωρίζουμε την ειδική ενθαλπία των ροών που ρέουν από τον διαχωριστή του περιβάλλοντος, ενώ οι αντίστοιχες παροχές μάζας καθορίζονται ως ανεξάρτητες μεταβλητές τύπου  $\epsilon$ . Η επιλογή βέβαια αυτή μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τη φύση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Η περιγραφή του πώς δίδεται η γνωστή παροχή ενέργειας  $X$  από τον χρήστη του προγράμματος πραγματοποιείται στο Παράρτημα Α. Έστω ότι επιλέγεται ως γνωστή η ροή του περιβάλλοντος και ο Δενδρίτης καταλαμβάνει τη χαρακτηριστική θέση στον πίνακα  $n$ . Τότε το γραμμικό σύστημα παίρνει τη μορφή :

$$\begin{bmatrix} A_{1,1} & \dots & A_{1,n-1} \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{n-1,1} & \dots & A_{n-1,n-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_k \cdot P_{1,n} \\ \dots \\ -x_{n-1} \cdot P_{n-1,n} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Μία ιδιαίτερη περίπτωση που εξετάζεται είναι ένας Δενδρίτης να είναι ανεξάρτητος από τους υπόλοιπους, δηλαδή να τροφοδοτεί και να τροφοδοτείται μόνο από τον εαυτό του. Αυτό

παρατηρείται εντονότερα στον γράφο της μάζας, όπου μπορεί να συναντώνται κλειστοί βρόχοι κύκλου Rankine ή κυκλοφορία σε βρόχο εξατμιστή-τυμπάνου. Σε τέτοια περίπτωση δίνεται η τιμή της παροχής ενέργειας/μάζας μίας ροής από τον χρήστη ως ανεξάρτητη μεταβλητή τύπου δ/ε που παρέχει πληροφορία ικανή για τον υπολογισμό της ενέργειας/μάζας της ροής ΜΔ του βρόγχου.

### **3.3.3 Επίλυση του γραμμικού συστήματος και υπολογισμός των παροχών μάζας και ενέργειας**

Το σύστημα (3.12) επιλύεται με τη μέθοδο Gauss-Elimination with pivoting και υπολογίζεται η ροή ενέργειας σε κάθε μία από τις ροές ΜΔ. Ακολούθως, με αφετηρία όλες τις ροές ΜΔ, τον αλγόριθμο της αναδρομικής προσπέλασης και τον αλγόριθμο του διαχωριστή υπολογίζεται η παροχή ενέργειας σε όλες τις ροές ΔΔ και ΔΜ. Τέλος, με αφετηρία τις ροές ΔΜ, τον αλγόριθμο της αναδρομικής προσπέλασης και αθροίζοντας τις παροχές ενέργειας που εισέρχονται στα στοιχεία τύπου μείκτη υπολογίζονται οι παροχές ενέργειας στις ροές ΜΜ.

Κατά αναλογία γίνεται η ανάλυση του γράφου των ροών μάζας, ο οποίος περιέχει τους θερμοδυναμικούς κύκλους του διαγράμματος ροής του συστήματος.

Συμπερασματικά, μετά το πέρας αυτής της αυτόματης διαδικασίας, κάθε ακμή του διαγράμματος μοντελοποίησης περιέχει την τιμή της παροχής ενέργειας και μάζας που τη διατρέχει, χρησιμοποιώντας σαν αρχική πληροφορία εισόδου το σύνολο των εκάστοτε τιμών των μεταβλητών τύπου α και β που εδώ θεωρούνται προσωρινά σταθερές. Η ρουτίνα επίλυσης αυτού του γραμμικού συστήματος θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω στην επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος βελτιστοποίησης, όπου οι μεταβλητές τύπου α και β θα είναι ανεξάρτητες μεταβλητές.

## **3.4 Υπολογισμός Πιέσεων**

Η πίεση αποτελεί μια θερμοδυναμική ιδιότητα που σχετίζεται με τον γράφο της μάζας. Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει, περιγράφεται ο υπολογισμός των πιέσεων σε όλες τις ροές μάζας με δεδομένες τις τιμές των μεταβλητών γ. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας μια νέας βοηθητικής δομής διγράφου που ονομάζεται δομή « αλυσίδες πιέσεων ».

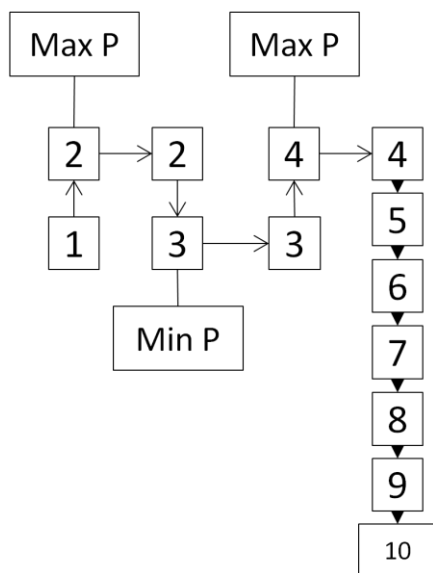
### 3.4.1 Δομή διγράφου αλυσίδων πιέσεων

Για την υλοποίηση αυτής της βοηθητικής δομής τα εξαρτήματα που έχουν περιγραφεί ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες αναφορικά με τη μεταβολή που επιφέρουν στην πίεση της ροής μάζας που διέρχεται από αυτά.

Στην κατηγορία  $\Pi^+$  ανήκουν τα στοιχεία των οποίων η πίεση στην έξοδο είναι μεγαλύτερη από την πίεση της εισόδου και στην κατηγορία  $\Pi^-$  ανήκουν τα στοιχεία στα οποία η πίεση της ροής μάζας ελαττώνεται κατά τη διέλευση από αυτά. Τέλος, στην κατηγορία  $\Pi^0$  ανήκουν τα ουδέτερα ως προς την πίεση στοιχεία, για τα οποία θεωρούμε στην ανάλυσή μας ότι η πίεση δεν μεταβάλλεται.

Βασιζόμενοι σε αυτή την κατηγοριοποίηση και με αφετηρία τις ροές μάζας που εισέρχονται στο σύστημα από το περιβάλλον καθώς επίσης και τις χαρακτηριστικές ροές τυχόν κλειστών βρόχων που εντοπίστηκαν στην ανωτέρω ανάλυση, κατασκευάζεται η δομή των αλυσίδων πιέσεων. Στη δομή αυτή οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν τις τιμές των πιέσεων στις αντίστοιχες ροές μάζας και οι ακμές τα εξαρτήματα του συστήματος.

Στη συνέχεια φαίνεται και περιγράφεται ένα παράδειγμα μιας τέτοιας ανάλυσης. Ας λάβουμε το σύστημα του Σχ. 3.3, το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στην Παράγραφο 3.3.1.



Σχ. 3.7 Δομή αλυσίδων του συστήματος του Σχ. 3.3.

Με αφετηρία τις ροές που προέρχονται από το περιβάλλον προσπελάται ο γράφος της μάζας και για κάθε ροή που συναντάται δημιουργείται ένας κόμβος στη δομή των αλυσίδων. Η θέση του κόμβου αυτού σε σχέση με την προηγούμενη ροή που προσπελάστηκε εξαρτάται από το είδος του εξαρτήματος που μεσολαβεί. Κάθε αλυσίδα αποκτά χαρακτηριστική φορά αυξανόμενης ή μειούμενης πίεσης όταν σε αυτή τοποθετηθεί ο δεύτερος κόμβος. Αν ο δεύτερος κόμβος έχει πίεση μεγαλύτερη του αρχικού(μεσολαβεί κόμβος  $\Pi^+$ ), τοποθετείται πάνω από αυτόν και η αλυσίδα λέμε ότι είναι αύξουσα, ενώ σε αντίθετη περίπτωση η αλυσίδα χαρακτηρίζεται ως φθίνουσα. Σε περίπτωση που κατά την προσπέλαση του γράφου της μάζας συναντηθεί ροή με πίεση η οποία σε σχέση με την πίεση της προηγούμενης ροής έχει φορά διαφορετική από αυτή της αλυσίδας στην οποία ανήκει η προηγούμενη ροή, τότε δημιουργείται νέα αλυσίδα. Η νέα αυτή αλυσίδα έχει αναγκαστικά φορά αντίθετη της προηγούμενης αλυσίδας και αρχικό κόμβο κοινό με τον κόμβο στον οποίο τερμάτισε η προηγούμενη αλυσίδα. Με τον τρόπο αυτόν, όπως φαίνεται και στο Σχ.3.6, διαμορφώνεται η δομή των αλυσίδων που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των πιέσεων των ροών μάζας του εκάστοτε ενεργειακού συστήματος.

Η φορά των ακμών του σχ. 3.7 χαρακτηρίζει το πως προσπελάζεται η δομή του γράφου της μάζας ενώ η σειρά των κόμβων από πάνω προς τα κάτω χαρακτηρίζει τη μειούμενη φορά της πίεσης. Η θέση των αλυσίδων πιέσεων από τα δεξιά προς τα αριστερά καθορίζεται από τη σειρά δημιουργίας τους. Ο κανόνας που πρέπει να διέπει αυτή τη δομή είναι ο πρώτος και τελευταίος κόμβος κάθε αλυσίδας να χαρακτηρίζονται από γνωστή πίεση. Η αναγκαιότητα του κανόνα αυτού φαίνεται στην ακόλουθη παράγραφο.

### **3.4.2 Υπολογισμός των πιέσεων με χρήση της δομής των αλυσίδων**

Οι πιέσεις που θεωρούμε ως γνωστές είναι οι ατμοσφαιρικές πιέσεις και αυτές οι οποίες έχουν ήδη υπολογιστεί σε αλυσίδα ευρισκόμενη εξ αριστερών της εξεταζόμενης. Αυτό συμβαίνει γιατί ο υπολογισμός των πιέσεων, όπως θα περιγραφεί στην παρούσα παράγραφο, πραγματοποιείται ανά αλυσίδα με σειρά ίδια με τη σειρά δημιουργίας τους. Σε περίπτωση που η πρώτη ή η τελευταία πίεση της εξεταζόμενης αλυσίδας δεν είναι γνωστή, ορίζονται από τον χρήστη τεχνητά όρια που εκφράζουν τη μέγιστη και ελάχιστη πίεση που μπορεί να επιτύχει το ενεργειακό σύστημα. Τοποθετείται έτσι κόμβος μέγιστης ή ελάχιστης πίεσης αντίστοιχα, που σκοπό έχει να φράξει την αλυσίδα και δεν συνδέεται με κάποια ροή του γράφου της μάζας.

Με γνωστές τις πιέσεις του πρώτου και του τελευταίου κόμβου κάθε αλυσίδας  $P_0$  και  $P_n$ , αντίστοιχα, οι ενδιάμεσες πιέσεις υπολογίζονται με την ακόλουθη διαδικασία. Έστω :

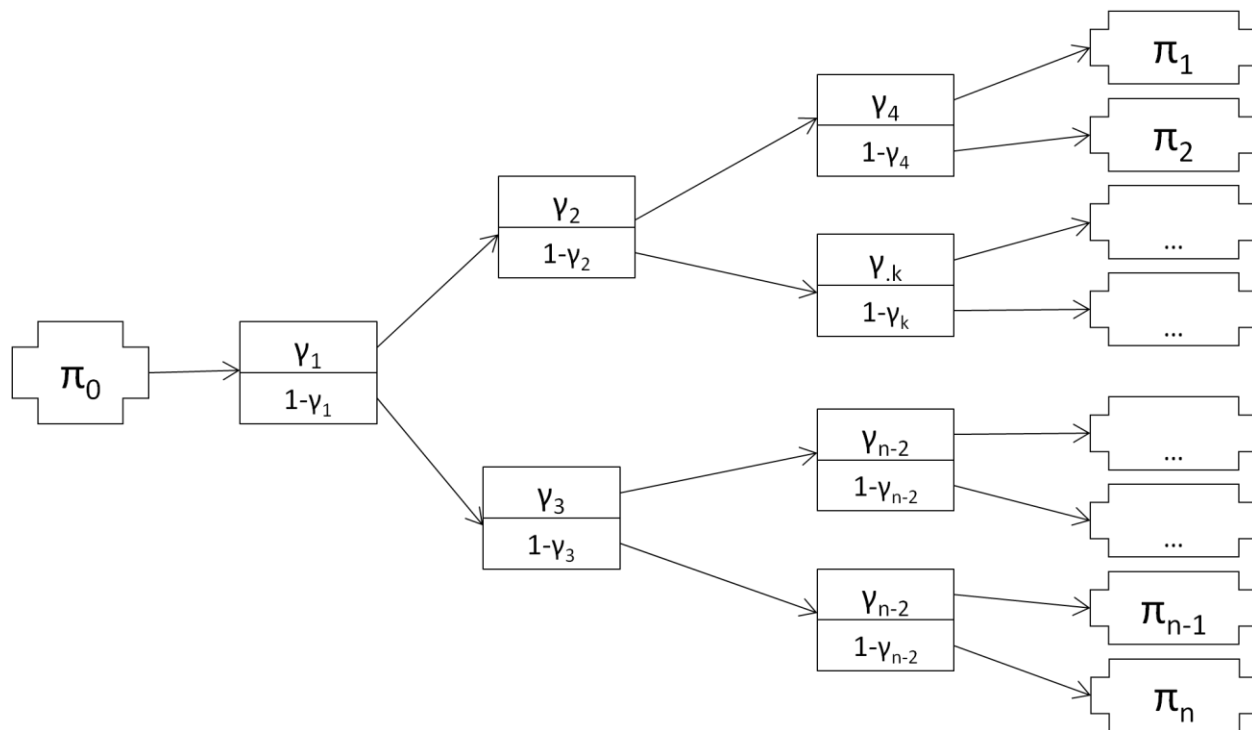
$$P_0 < P_1 < \dots < P_{n-1} < P_n \quad (3.13)$$

Ορίζουμε τους λόγους :

$$\pi_0 = \ln\left(\frac{P_0}{P_n}\right) \quad (3.14)$$

$$\pi_i = \ln\left(\frac{P_{i-1}}{P_i}\right), \quad i = 1 \dots n \quad (3.15)$$

Δημιουργείται το ακόλουθο διάγραμμα σε κάθε μία από τις αλυσίδες.



Σχ. 3.7 Παράδειγμα λειτουργίας του Διαχωριστή στον υπολογισμό των πιέσεων.

Οι  $\gamma$  είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές των πιέσεων και λαμβάνουν, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τιμές στο διάστημα  $[0,1]$ . Εκφράζουν δηλαδή τα ποσοστά με τα οποία ο λόγος πίεσης των ακραίων κόμβων μιας αλυσίδας διαμοιράζεται στους ενδιάμεσους λόγους πίεσης.

Ισχύει η σχέση :

$$\pi_0 = \sum_{i=1}^n \pi_i \quad (3.16)$$

Η δομή του διαγράμματος αυτού και οι αρχές που το διέπουν είναι όμοιες με την αρχή λειτουργίας της ρουτίνας του Διαχωριστή. Με χρήση λοιπόν της ρουτίνας αυτής υπολογίζονται οι λόγοι  $\pi_i$ . Και με την Εξ.(3.17) υπολογίζονται τελικά οι πιέσεις σε κάθε κόμβο :

$$P_i = \frac{P_{i-1}}{\exp(\pi_i)} \quad (3.17)$$

Στο σημείο αυτό έχουν υπολογιστεί οι ροές ενέργειας και μάζας καθώς επίσης και οι πιέσεις σε όλα τα σημεία του συστήματος ως συναρτήσεις των ανεξάρτητων μεταβλητών  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$ . Συνεπώς, έχει οριστεί πλήρως η θερμοδυναμική κατάσταση του.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

#### 4.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια περιγράφεται η ανάλυση του συστήματος μοντελοποίησης με βάση τη θεωρία των γράφων ενώ δεν γίνεται άμεσα εμφανής η ύπαρξη θερμοδυναμικής συνέπειας στη μοντελοποίηση.

Έχοντας προσδιορίσει τον τρόπο υπολογισμού των τριών βασικών θερμοδυναμικών ιδιοτήτων (παροχή ενθαλπίας, παροχή μάζας και πίεση) κάθε ροής μάζας στο Κεφάλαιο 3, στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού των υπόλοιπων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων κάθε ροής ως συνάρτηση των τριών βασικών. Επιπλέον περιγράφονται οι συμβάσεις και ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζονται οι ιδιότητες των καυσαερίων μετά τον θάλαμο καύσης.

Βασικά στοιχεία ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης, όπως είναι και αυτός που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία, είναι ένα διάλυμα ανεξάρτητων μεταβλητών, μια σειρά περιορισμών που εξασφαλίζουν την ποιότητα των αποτελεσμάτων και η αντικειμενική συνάρτηση που χρήζει βελτιστοποίησης πληρούμενων των περιορισμών. Στο κεφάλαιο αυτό ορίζονται οι περιορισμοί και η αντικειμενική συνάρτηση του εκάστοτε συστήματος.

#### 4.2 Υπολογισμός Θερμοδυναμικών Ιδιοτήτων

Όπως φάνηκε στο Κεφάλαιο 2, οι εξαρτημένες μεταβλητές 1<sup>ου</sup> βαθμού ( $\dot{m}$ ,  $\dot{H}$ ,  $p$ ) υπολογίζονται συναρτήσει των ανεξάρτητων μεταβλητών. Οι εξαρτημένες μεταβλητές 2<sup>ου</sup> βαθμού ( $h$ ,  $T$ ,  $S$ ) υπολογίζονται συναρτήσει των μεταβλητών 1<sup>ου</sup> βαθμού και δευτερογενώς από τις ανεξάρτητες μεταβλητές.

##### 4.2.1 Ειδική ενθαλπία, θερμοκρασία, εντροπία

Οι εξαρτημένες μεταβλητές 2<sup>ου</sup> βαθμού υπολογίζονται με διαφορετικό τρόπο σε κάθε ροή μάζας, ανάλογα με το εργαζόμενο μέσο. Εξαίρεση αποτελεί η ειδική ενθαλπία που ισούται σε κάθε περίπτωση με :

$$h = \dot{H} / \dot{m} \quad (4.1)$$

#### 4.2.1.1 Νερό και ατμός

Στην περίπτωση που το εργαζόμενο μέσο είναι νερό-ατμός, η ανάλυση γίνεται με βάση τη Διεθνή Σύμβαση για τις Ιδιότητες Νερού και Ατμού (I.A.P.W.S.). Η σύμβαση αυτή μοντελοποιεί το διάγραμμα Mollier και παρέχει ρουτίνες υπολογισμού των ιδιοτήτων νερού ατμού συναρτήσει οποιωνδήποτε δύο θερμοδυναμικών ιδιοτήτων συμπεριλαμβανομένης και της ξηρότητας. Η ανάλυση της σύμβασης IAPWS δεν αποτελεί αντικείμενο αυτής της μελέτης.

Ταυτόχρονα με τη δημιουργία του αντικειμένου ΣΥΣΤΗΜΑ δημιουργείται και αντικείμενο κλάσεως NEPO-ATMOS. Η κλάση αυτή περιέχει μόνο τις απαραίτητες ρουτίνες για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του νερού. Μετά τον προσδιορισμό των τιμών των παροχών ενέργειας και μάζας στις ακμές μάζας, ανατρέχουμε στο διάγραμμα διευθύνσεων του αντικειμένου ΣΥΣΤΗΜΑ όπου είναι αποθηκευμένα τα αντικείμενα τύπου AKMH και εξετάζουμε αν το εργαζόμενο μέσο είναι νερό. Στις ροές μάζας νερού-ατμού καλούνται οι ρουτίνες.

$$T(h,p) \quad (4.2)$$

$$s(h,p) \quad (4.3)$$

που αποδίδουν τιμή στα μέλη των αντικειμένων AKMH που σχετίζονται με τις αντίστοιχες ποσότητες.

#### 4.2.1.2 Αέρας και καυσαέριο

Για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων στις ροές που περιέχουν αέρα-καυσαέριο χρησιμοποιούνται πολυωνυμικές εκφράσεις  $h(T)$  για κάθε στοιχείο της σύστασης της ροής. Ο τρόπος που προσδιορίζεται η σύσταση των καυσαερίων μετά από τον θάλαμο καύσης περιγράφεται στην Ενότητα 4.2.2. Σημειώνεται πως η σύσταση του αέρα και του καυσαερίου προσδιορίζεται από τη γραμμομοριακή περιεκτικότητά τους σε  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$  και  $SO_2$ .

Η ειδική ενθαλπία καθενός από τα συστατικά τις ροής δίδεται από την πολυωνυμική Εξ.(4.4) [NASAREportTM-4513,B.J. McBrideetal., 1993] :

$$\frac{\tilde{h}_i}{\tilde{R} \cdot T} = A_1 + A_2 \cdot \frac{T}{2} + A_3 \cdot \frac{T^2}{3} + A_4 \cdot \frac{T^3}{4} + A_5 \cdot \frac{T^4}{5} + \frac{A_6}{T} \quad (4.4)$$

όπου

$\tilde{h}$  γραμμομοριακή ενθαλπία σε kJ/kmol

$\tilde{R}$  γενική σταθερά των αερίων σε kJ/kmolK



T απόλυτη θερμοκρασία σε K.

Συνεπώς για τον αέρα-καυσαέριο :

$$\tilde{h}_{GAS/AIR} = \sum_{i=N_2...SO_2} x_i \cdot \tilde{h}_i \quad (4.5)$$

$$M_{GAS/AIR} = \sum_{i=N_2...SO_2} x_i \cdot M_i \quad (4.6)$$

$$h = \frac{\tilde{h}_{GAS/AIR}}{M_{GAS/AIR}} \quad (4.7)$$

Οι συντελεστές  $A_i$  του πολυωνύμου της Εξ.(4.4) λαμβάνονται από πίνακες ιδιοτήτων τωσυστατικών [NASAREportTM-4513,B.J. McBrideetal., 1993]. Οι τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Η εύρεση της θερμοκρασίας δεδομένης της ειδικής ενθαλπίας σε κάθε ροή μπορεί να πραγματοποιηθεί με εφαρμογή απλού αλγορίθμου αριθμητικής επίλυσης τύπουNewton-Raphson. Παρατηρείται πως σύγκλιση πραγματοποιείται σχετικά γρήγορα εντός 5 επαναλήψεων.

Έχοντας υπολογίσει τη θερμοκρασία σε κάθε ροή αέρα-καυσαερίου, εύκολα με χρήση πολυωνυμικών εκφράσεων για κάθε συστατικό[NASAREportTM-4513,B.J. McBrideetal., 1993] υπολογίζεται η εντροπία κάθε ροής με παρόμοιο τρόπο.

$$\frac{\tilde{s}}{\tilde{R}} = A_1 \cdot \ln(T) + A_2 \cdot T + A_3 \cdot \frac{T^2}{2} + A_4 \cdot \frac{T^3}{3} + A_5 \cdot \frac{T^4}{3} + A_7 - \ln(p) \quad (4.8)$$

όπου

$\tilde{s}$  γραμμομοριακή ενθαλπία σε kJ/kmolK

$\tilde{R}$  γενική σταθερά των αερίων σε kJ/kmolK

T απόλυτη θερμοκρασία σε K

Συνεπώς για τον αέρα-καυσαέριο :

$$\tilde{s}_{GAS/AIR} = \sum_{i=N_2...SO_2} x_i \cdot \tilde{s}_i \quad (4.9)$$

Πίνακας 4.1 Συντελεστές πολυονυμικών εκφράσεων.

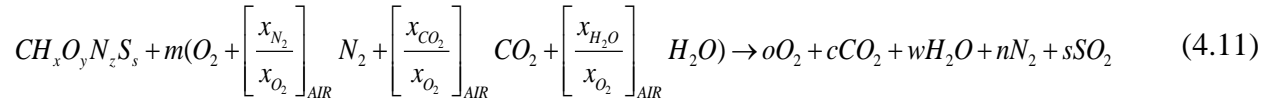
<b>ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ N<sub>2</sub></b>			
298 < T <= 1000 [K]		1,000 < T < 5000 [K]	
<b>A1</b>	3.6748261000E+00	<b>A1</b>	2.8963194000E+00
<b>A2</b>	-1.2081500000E-03	<b>A2</b>	1.5154866000E-03
<b>A3</b>	2.3240102000E-06	<b>A3</b>	-5.7235277000E-07
<b>A4</b>	-6.3217559000E-10	<b>A4</b>	9.9807393000E-11
<b>A5</b>	-2.2577253000E-13	<b>A5</b>	-6.5223555000E-15
<b>A6</b>	-1061.1588	<b>A6</b>	-9.0586184000E+02
<b>A7</b>	2.3580424000E+00	<b>A7</b>	6.1615148000E+00
<b>ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ O<sub>2</sub></b>			
298 < T <= 1000 [K]		1,000 < T < 5000 [K]	
<b>A1</b>	3.6255985000E+00	<b>A1</b>	3.6219535000E+00
<b>A2</b>	-1.8782184000E-03	<b>A2</b>	7.3618264000E-04
<b>A3</b>	7.0554544000E-06	<b>A3</b>	-1.9652228000E-07
<b>A4</b>	-6.7635137000E-09	<b>A4</b>	3.6201558000E-11
<b>A5</b>	2.1555993000E-12	<b>A5</b>	-2.8945627000E-15
<b>A6</b>	-1.0475226000E+03	<b>A6</b>	-1.2019825000E+03
<b>A7</b>	4.3052778000E+00	<b>A7</b>	3.6150960000E+00
<b>ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ H<sub>2</sub>O</b>			
298 < T <= 1000 [K]		1,000 < T < 5000 [K]	
<b>A1</b>	4.0701275000E+00	<b>A1U</b>	2.7167633000E+00
<b>A2</b>	-1.1084499000E-03	<b>A2U</b>	2.9451374000E-03
<b>A3</b>	4.1521180000E-06	<b>A3U</b>	-8.0224374000E-07
<b>A4</b>	-2.9637404000E-09	<b>A4U</b>	1.0226682000E-10
<b>A5</b>	8.0702103000E-13	<b>A5U</b>	-4.8472145000E-15
<b>A6</b>	-30279.722	<b>A6U</b>	-2.9905826000E+04
<b>A7</b>	-3.2270046000E-01	<b>A7U</b>	6.6305671000E+00
<b>ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ CO<sub>2</sub></b>			
298 < T <= 1000 [K]		1,000 < T < 5000 [K]	
<b>A1</b>	2.4007797000E+00	<b>A1</b>	4.4608041000E+00
<b>A2</b>	8.7350957000E-03	<b>A2</b>	3.0981719000E-03
<b>A3</b>	-6.6070878000E-06	<b>A3</b>	-1.2392571000E-06
<b>A4</b>	2.0021861000E-09	<b>A4</b>	2.2741325000E-10
<b>A5</b>	6.3274039000E-16	<b>A5</b>	-1.5525954000E-14
<b>A6</b>	-48377.527	<b>A6</b>	-4.8961442000E+04
<b>A7</b>	9.6951457000E+00	<b>A7</b>	-9.8635982000E-01
<b>ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ SO<sub>2</sub></b>			
298 < T <= 1000 [K]		1,000 < T < 5000 [K]	
<b>A1</b>	3.2665338000E+00	<b>A1</b>	5.2451364000E+00
<b>A2</b>	5.3237902000E-03	<b>A2</b>	1.9704204000E-03
<b>A3</b>	6.8437552000E-07	<b>A3</b>	-8.0375769000E-07
<b>A4</b>	-5.2810047000E-09	<b>A4</b>	1.5149969000E-10
<b>A5</b>	2.5590454000E-12	<b>A5</b>	-1.0558004000E-14
<b>A6</b>	-36908.148	<b>A6</b>	-3.7558227000E+04
<b>A7</b>	9.6513476000E+00	<b>A7</b>	-1.0873524000E+00

$$s(T(h), p) = \frac{\tilde{S}_{GAS/AIR}}{M_{GAS/AIR}} \quad (4.10)$$

Οι συντελεστές  $A_i$  λαμβάνονται από τον Πίνακα 4.1.

#### 4.2.2 Θερμοδυναμική και παραδοχές της καύσης

Η αντίδραση της καύσης πραγματοποιείται στον κόμβο του θαλάμου καύσης και θεωρούμε πως διέπεται από τη γενική εξίσωση :



Στην είσοδο του θαλάμου καύσης δίνεται η παροχή μάζας των ροών αέρα (ή καυσαερίου στον αναθερμαντήρα) και καυσίμου και οι συστάσεις αυτών. Οι παροχές μάζας δίνονται όπως υπολογίστηκαν στο Κεφάλαιο 3, ενώ οι συστάσεις δίνονται από τον χρήστη στην έξοδο του κόμβου του περιβάλλοντος και υπολογίζονται στις εισόδους του θαλάμου καύσης διασχίζοντας τον γράφο της μάζας. Η σύσταση των καυσαερίων προσδιορίζεται με τις ακόλουθες εξισώσεις.

$$x = \frac{x_H / M_H}{x_C / M_C} \quad (4.12)$$

$$y = \frac{x_O / M_O}{x_C / M_C} \quad (4.13)$$

$$z = \frac{x_N / M_N}{x_C / M_C} \quad (4.14)$$

$$s = \frac{x_S / M_S}{x_C / M_C} \quad (4.15)$$

Όπου  $x_i$  είναι οι στοιχειομετρικές περιεκτικότητες του καυσίμου. Για παράδειγμα το φυσικό αέριο έχει σύσταση  $x_C=0.75$  και  $x_H=0.25$ .

$$M_{Fuel} = \sum_{i=C...S} x_i \cdot M_i \quad (4.16)$$

$$\frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}} = \left( m \cdot \frac{M_{air}}{M_{fuel}} \right) \longrightarrow m = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}} \cdot \frac{M_{fuel}}{M_{air}} \quad (4.17)$$

Από την αντίδραση της καύσης (4.11) προκύπτει :

$$w = \frac{x}{2} + \left( \left[ \frac{x_{H_2O}}{x_{O_2}} \right]_{AIR} \cdot m \right) \quad (4.18)$$

$$n = \frac{z}{2} + \left( \left[ \frac{x_{N_2}}{x_{O_2}} \right]_{AIR} \cdot m \right) \quad (4.19)$$

$$c = 1 + \left( \left[ \frac{x_{CO_2}}{x_{O_2}} \right]_{AIR} \cdot m \right) \quad (4.20)$$

$$o = \frac{1}{2} \cdot (y + (2 \cdot m) - w - (2 \cdot s) - 2 \cdot c) \quad (4.21)$$

Άρα η σύσταση υπολογίζεται ως εξής :

$$N_{Gas} = w + n + o + c + s$$

$$x_{N_2} = \frac{n}{N_{Gas}} \quad (4.22)$$

$$x_{O_2} = \frac{o}{N_{Gas}} \quad (4.23)$$

$$x_{CO_2} = \frac{c}{N_{Gas}} \quad (4.24)$$

$$x_{H_2O} = \frac{w}{N_{Gas}} \quad (4.25)$$

$$x_{SO_2} = \frac{s}{N_{Gas}} \quad (4.26)$$

Στη συνέχεια η πληροφορία της σύστασης καυσαερίων διαδίδεται στο σύνολο του γράφου της μάζας για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων, όπως παρουσιάστηκε στην Ενότητα 4.2.1.2.

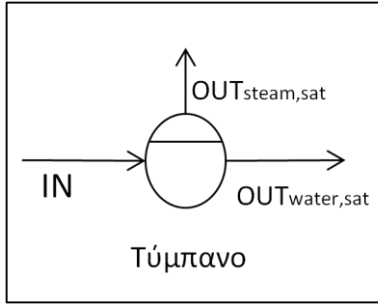
### 4.3 Θερμοδυναμικοί Περιορισμοί και Θερμοδυναμικές Παραδοχές

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα σύνολα των αλγεβρικών περιορισμών και όρων της αντικειμενικής συνάρτησης που σχετίζονται με κάθε κόμβο του διαγράμματος μοντελοποίησης. Η πληροφορία αυτή αποτελεί μια βάση γνώσης, το οποίο σημαίνει ότι συνήθως παραμένει αναλλοίωτη μεταξύ διαφόρων προβλημάτων βελτιστοποίησης που αντιμετωπίζονται από τη μέθοδο. Η υλοποίηση δηλαδή των μαθηματικών περιορισμών και αλγεβρικών όρων, κατέχει μια μόνιμη θέση στον κώδικα C++, ενώ ο μηχανισμός της κληρονομικότητας (inheritance) της γλώσσας C++ επιτρέπει στον χρήστη της μεθόδου να τους τροποποιήσει ή να τους μεταβάλει, όταν αυτό απαιτείται.

Το μαθηματικό μοντέλο κτίζεται με την χρήση αυτών των συνόλων αλγεβρικών περιορισμών και όρων αντικειμενικής συνάρτησης καθώς επίσης και με την χρήση της δομής δεδομένων που αντιστοιχεί στην τοπολογική δομή του διαγράμματος μοντελοποίησης του εκάστοτε προβλήματος.

Με τη χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης GRG2 είναι φανερό ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ισοτικών μη γραμμικών περιορισμών σε ένα μεγάλο πρόβλημα, τόσο περισσότερο δυσκολεύει η επίτευξη λύσης, και ως προς την ικανότητα εύρεσης εφικτού σημείου (feasible point) του  $n$ -διάστατου διανυσματικού χώρου των ανεξαρτήτων μεταβλητών (δηλαδή τέτοιο ώστε να ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς) και ως προς την ικανότητα εύρεσης τοπικού βέλτιστου με ικανοποιητική ακρίβεια. Η αύξηση της αξιοπιστίας της μεθόδου επιτεύχθηκε με την κατάλληλη επιλογή των ανεξαρτήτων μεταβλητών του προβλήματος τέτοιων, ώστε η τυχαία επιλογή τους ως αρχικό διάνυσμα για τη μέθοδο βελτιστοποίησης, να μην συναρτάται έντονα από την φυσική διαίσθηση του χρήστη (η GRG2 απαιτεί από τον χρήστη να προτείνει ένα “λογικό” αρχικό σημείο προκειμένου να αυξηθούν οι πιθανότητες σύγκλισης). Ωστόσο η ελάττωση του αριθμού των ισοτικών περιορισμών του μαθηματικού μοντέλου, χωρίς καταστρατήγηση των βασικών αρχών διατήρησης μάζας και ενέργειας, είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει στη δυνατότητα επίλυσης μεγάλων προβλημάτων. Αυτό το πνεύμα αντανακλάται στη συνέχεια αυτής της παραγράφου.

### 4.3.1 Τύμπανο



Ο κόμβος τύμπανο είναι στην ουσία ένας διαχωριστής ροής υγρού-ατμού, στον οποίο πρέπει να επιβληθούν, δύο ισοτικοί περιορισμοί: ο πρώτος “στη μία έξοδο πρέπει να ρέει κορεσμένος ατμός” και δεύτερος: “στην άλλη έξοδο πρέπει να ρέει κορεσμένο νερό”. Ας σημειωθεί ότι η αντικατάσταση ενός ισοτικού περιορισμού  $\varphi(x)=0$  με δύο ανισοτικούς  $\varphi(x)\leq 0$  και  $\varphi(x)\geq 0$  δεν συμβάλλει στην αύξηση της αξιοπιστίας της μεθόδου.

Έτσι, προκειμένου να μειωθούν οι δύο ισοτικοί περιορισμοί σε έναν, το μαθηματικό μοντέλο έχει ως εξής: Η μοναδική ανεξάρτητη μεταβλητή του προβλήματος που σχετίζεται με τον κόμβο *DRUM* είναι ο λόγος  $a$  της παροχής κορεσμένου ατμού προς την παροχή υγρού ατμού στο τύμπανο

$$a = \frac{m_{OUT,steam,sat}}{m_{IN}} = \frac{m_{OUT,steam,sat}}{m_{OUT,steam,sat} + m_{OUT,water,sat}} \quad (4.27)$$

Η μεταβλητή αυτή εμπεριέχεται στο αντικείμενο του κόμβου *DRUM*. Ειδικά για τον κόμβο *DRUM* ο λόγος διαχωρισμού παροχής μάζας  $a$  διαφέρει από τον λόγο  $\beta$  που είναι ο λόγος διαχωρισμού παροχής ενθαλπίας. Στην περίπτωση του κόμβου *DRUM* είναι  $a \neq \beta$  (ενώ για παράδειγμα στον κόμβο *SPLITTER* είναι  $a = \beta$ ). Ο λόγος  $\beta$  χρειάζεται για τον υπολογισμό των παροχών ενθαλπίας και είναι εξαρτημένη μεταβλητή διότι:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{H_{OUT,steam,sat}}{H_{IN}} = \frac{m_{OUT,steam,sat} h_{steam,sat}}{m_{OUT,steam,sat} h_{steam,sat} + m_{OUT,water,sat} h_{water,sat}} \\ &= \frac{a h_{steam,sat}}{a h_{steam,sat} + (1-a) h_{water,sat}} \end{aligned} \quad (4.28)$$

είναι δηλαδή συνάρτηση της ανεξάρτητης μεταβλητής  $a$ .

Από τις σχέσεις:

$$h_{steam,sat} = h_{steam,sat}(P_{DRUM}) \quad (4.29)$$

$$h_{water,sat} = h_{water,sat}(P_{DRUM}) \quad (4.30)$$

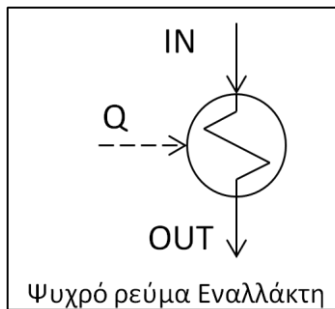
φαίνεται ότι το  $\beta$  εξαρτάται και από την πίεση του τυμπάνου  $P_{DRUM}$ , η οποία είναι συνάρτηση άλλων (αποκλειστικά) ανεξαρτήτων μεταβλητών και κυρίως των μεταβλητών τύπου  $\gamma$ .

Ο λόγος  $a$  πρέπει να ισούται με την ξηρότητα του ατμού  $x$  στην είσοδο του τυμπάνου δηλαδή για το τύμπανο ισχύει ο εξής περιορισμός.

$$\dot{m} \left[ h_{IN} - ((1-a) \cdot h_{steam,sat}) - (a \cdot h_{water,sat}) \right] = 0 \quad (4.31)$$

Ο περιορισμός εξασφαλίζει ότι στον κόμβο “τύμπανο” εισέρχεται υγρός ατμός. Ο λόγος  $a$  θα αποτελεί ανεξάρτητη μεταβλητή του προβλήματος (και μάλιστα τη μοναδική που σχετίζεται με τον κόμβο “τύμπανο”).

### 4.3.2 Ψυχρό ρεύμα εναλλάκτη



Σε κάθε ψυχρό ρεύμα εναλλάκτη αντιστοιχεί ένα ή κανένα αντίστοιχο θερμό ρεύμα, και αντίστροφα. Περίπτωση ενός μόνο ρεύματος, χωρίς το αντίστοιχό του είναι, π.χ. ο συμπυκνωτής, εάν στην ανάλυση, μας ενδιαφέρει μόνο η απορριπτόμενη θερμότητα, και όχι οι θερμοκρασίες του νερού ψύξης. Για κάθε εναλλάκτη υπάρχει δυνατότητα προσπέλασης, μέσω της δομής δεδομένων, των διαφόρων μεταβλητών, π.χ. θερμοκρασίας ( $T$ ) ή πίεσης ( $p$ ), στην είσοδο ( $IN$ ) ή στην έξοδο ( $OUT$ ) του ρεύματος αυτού, καθώς και στην είσοδο ( $IN'$ ) ή στην έξοδο ( $OUT'$ ) του αντίστοιχου ρεύματοςαντιρροής. Αυτό γίνεται μέσω της δομής δεδομένων, όπως ήδη προαναφέρθηκε. Τα δύο ρεύματα εναλλάκτη ενδέχεται να συνδέονται απευθείας με μία ροή θερμότητας είτε μέσω ενός κόμβου τύπου *ENERGY\_LOSS*. Στην πρώτη περίπτωση θεωρείται ότι ο εναλλάκτης δεν παρουσιάζει απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον, ενώ στη δεύτερη περίπτωση ένα ποσοστό της μεταφερόμενης θερμότητας από το θερμό στο ψυχρό ρεύμα διαχέεται στον περιβάλλοντα χώρο.

Για τα ψυχρά ρεύματα εναλλακτών του κύκλου Rankine (πλην τουεξατμιστή), ισχύει ο εξής ανισοτικός περιορισμός:

$$Q \cdot (T_{IN} + \Delta T - T_{OUT'}) \leq 0 \quad (4.32)$$

όπου η σταθερά  $\Delta T$  είναι η ελάχιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της εξόδου του θερμού ρεύματος του εναλλάκτη και της εισόδου του ψυχρού ρεύματος και  $Q$  η παροχή θερμότητας στο ρεύμα εναλλάκτη που δεν επιτρέπεται να λάβει αρνητικές τιμές. Στα σύνολα των αλγεβρικών περιορισμών των θερμών ρευμάτων, υπάρχει αντίστοιχη ανισότητα. Έτσι σε

κάθε εναλλάκτη του διαγράμματος ροής του ενεργειακού συστήματος αντιστοιχούν δύο περιορισμοί αυτού του τύπου. Το νόημα της ανισότητας (4.32) είναι : εάν υπάρχει συναλλαγή θερμότητας στον εναλλάκτη ( $Q>0$ ) η ελάχιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασιακή διαφορά είναι η  $\Delta T$ , διαφορετικά αν  $Q=0$  η θερμοκρασιακή διαφορά μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή. Η τελευταία περίπτωση μπορεί να εμφανιστεί σαν αποτέλεσμα βελτιστοποίησης και έτσι παρόλο που στην ανάλυση θεωρήθηκε η ύπαρξη του εναλλάκτη, στη βέλτιστη λύση προκύπτει ότι ο εναλλάκτης αυτός δεν υπάρχει. Άλλη ανισότητα είναι η:

$$Q \log\left(\frac{P_{OUT}}{(1-k)P_{IN}}\right) \leq 0 \quad (4.33)$$

όπου η σταθερά  $k$  είναι η ελάχιστη αναμενόμενη ποσοστιαία πτώση πίεσης στον εναλλάκτη. Η σημασία του πολλαπλασιαστή  $Q$  είναι η ίδια με αυτή της ανισότητας (4.32). Αριθμητικοί πειραματισμοί έδειξαν ότι η χρήση της λογαριθμικής συνάρτησης συμβάλλει στην αύξηση της αξιοπιστίας της βελτιστοποίησης. Μια ένδειξη για την ορθότητα αυτής της επιλογής είναι η εξής: Στο διάγραμμα Mollier, η “απόσταση” μετρούμενη σε εκατοστά, μεταξύ δύο ισοθερμοκρασιακών καμπύλων σε κάθε περιοχή του διαγράμματος, είναι περίπου “ανάλογη” με την διαφορά θερμοκρασίας των δύο ισοθερμοκρασιών καμπύλων. Κάτι παρόμοιο συμβαίνει με της ισόθλιπτες καμπύλες του διαγράμματος, αλλά σε αυτή την περίπτωση, η “απόσταση” μετρούμενη σε εκατοστά, μεταξύ δύο ισόθλιπτων καμπυλών είναι περίπου “ανάλογη” με την διαφορά του λογαρίθμου των πιέσεων των δύο ισόθλιπτων καμπυλών (δηλ. τον λογάριθμο του λόγου των αντιστοίχων πιέσεων).

Στην περίπτωση κατά την οποία ο τύπος του εναλλάκτη είναι *RANKINE\_PREHEATER*, θεωρείται μια επιπλέον ανισότητα:

$$H_{OUT} - m_{OUT} h_{water,sat}(P_{OUT}) \leq 0 \quad (4.34)$$

Η ανισότητα εκφράζει ότι στην έξοδο του προθερμαντήρα η ειδική ενθαλπία είναι μικρότερη από την ειδική ενθαλπία του κορεσμένου νερού που αντιστοιχεί στην πίεση εξόδου του εναλλάκτη, δηλαδή το νερό δεν ατμοποιείται μέσα στον προθερμαντήρα. Ας σημειωθεί ότι στην ανισότητα (4.34) αποφεύγεται η χρήση της ειδικής ενθαλπίας εξόδου

$$h_{OUT} = \frac{H_{OUT}}{m_{OUT}} \quad (4.35)$$

διότι στην περίπτωση που ο εναλλάκτης προκύψει εκφυλισμένος με  $m_{OUT}=0$ , η  $h_{OUT}$  δεν ορίζεται.



### 4.3.3 Ψυχρό ρεύμα εναλλάκτη (Εξατμιστής)



Για κόμβο του εξατμιστή στη δομή δεδομένων, θεωρείται ότι οι πιέσεις εισόδου (IN) και εξόδου (OUT) ταυτίζονται, δηλαδή είναι συνώνυμες μεταβλητές. Η παροχή του νερού εισόδου εξέρχεται ως κορεσμένος ατμός ή ως υγρός ατμός. Αυτός ο περιορισμός μοντελοποιείται :

$$\dot{H}_{OUT} - m_{OUT} h_{steam,sat}(p_{OUT}) \leq 0 \quad (4.36)$$

Αν θεωρηθεί πως στη είσοδο του εξατμιστή εισέρχεται κορεσμένο νερό τότε λαμβάνεται και η ακόλουθη ανισότητα :

$$Q(T_{Isat} + \Delta T - T_{OUT'}) \leq 0 \quad (4.37)$$

$$T \cong T_{Isat}(P_{EVAPORATOR}) \quad (4.38)$$

Η Εξ.(4.38) υπολογίζεται από ρουτίνα του αντικειμένου NEPO.

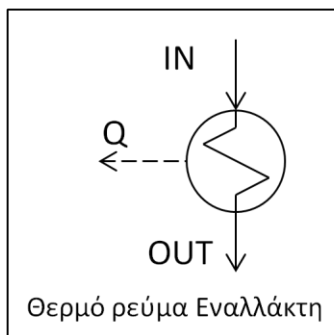
### 4.3.4 Ψυχρό ρεύμα εναλλάκτη (Οικονομητήρας)



Για κόμβο του οικονομητήρα στη δομή δεδομένων, θεωρείται ότι οι πιέσεις εισόδου (IN) και εξόδου (OUT) ταυτίζονται, δηλαδή είναι συνώνυμες μεταβλητές. Η παροχή του νερού εισόδου θερμαίνεται έως την κατάσταση κορεσμένου νερού. Αυτός ο περιορισμός μοντελοποιείται :

$$\dot{H}_{OUT} - m_{OUT} h_{water,sat}(p_{OUT}) \leq 0 \quad (4.39)$$

### 4.3.5 Θερμό ρεύμα εναλλάκτη



Σε όλα τα ρεύματα εναλλάκτη στα οποία ρέει θερμό καυσαέριο και θερμαίνουν οποιαδήποτε ψυχρό ρεύμα εναλλάκτη ισχύουν οι εξής ανισότητες:

$$Q(-T_{IN} + \Delta T + T_{OUT'}) \leq 0 \quad (4.40)$$

και

$$Q \log\left(\frac{P_{OUT}}{(1-k)p_{IN}}\right) \leq 0 \quad (4.41)$$

όπου ο δείκτης OUT' αντιστοιχεί στην έξοδο του αντίστοιχου ψυχρού ρεύματος και ο k είναι μια σταθερά, η τιμή της οποίας εξαρτάται από τον τύπο του αντίστοιχου ψυχρού ρεύματος και εκφράζει την ελάχιστη αναμενόμενη πτώση πίεσης των καυσαερίων στον εναλλάκτη.

Στην περίπτωση κατά την οποία προκύπτει από τη δομή δεδομένων του διαγράμματος μοντελοποίησης ότι η ακμή (ροή) εξόδου του εναλλάκτη ενώνεται με τον κόμβο του περιβάλλοντος, πρέπει να θεωρηθεί επίσης και η συνθήκη ότι η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία δρόσου, η οποία εξαρτάται από τη γραμμομοριακή περιεκτικότητα των καυσαερίων σε υδρατμούς. Ωστόσο σε αυτή την περίπτωση θεωρείται ο πιο συντηρητικός περιορισμός:

$$100 - T_{OUT} \leq 0 \quad (4.42)$$

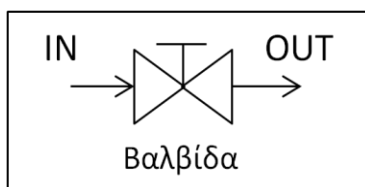
δηλαδή η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων να είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία βρασμού του νερού σε ατμοσφαιρική πίεση.

Τέλος στην περίπτωση που το θερμό ρεύμα αποβάλλει θερμότητα σε κάποια ροή που φέρει ψυκτικό μέσο στο περιβάλλον και αδιαφορούμε για τη θερμοκρασία και τις ιδιότητές της, τότε ο περιορισμός (4.40) αντικαθίσταται από :

$$T_{MIN} - T_{OUT} \leq 0 \quad (4.43)$$

όπου  $T_{MIN}$  ορίζεται η ελάχιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία στη έξοδο του εναλλάκτη.

#### 4.3.6 Βαλβίδα



Ο απαεριοτής προσομοιώνεται με μία βαλβίδα. Η πίεση στην είσοδο του απαεριοτή θεωρείται ίση με την ατμοσφαιρική:

$$P_{IN} = 0,101327 \text{ MPa} \quad (4.44)$$

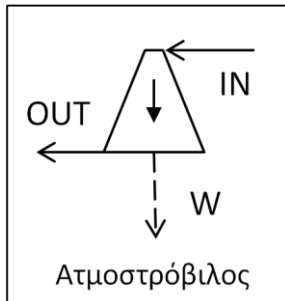
και η ποσοστιαία πτώση πίεσης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από ένα κατώτατο όριο ποσοστιαίας πτώσης πίεσης στον απαεριοτή που στην συνθήκη που ακολουθεί συμβολίζεται με k:

$$\log\left(\frac{P_{OUT}}{(1-k)P_{IN}}\right) \leq 0 \quad (4.45)$$

Επίσης η ελάχιστη θερμοκρασία απαεριοτή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από  $90^{\circ}\text{C}$  :

$$T_{IN} \geq 90^{\circ}\text{C} \quad (4.46)$$

### 4.3.7 Ατμοστρόβιλος



Για τον ατμοστρόβιλο καθορίζεται ένας ανώτατος ισεντροπικός βαθμός απόδοσης  $\eta_{MAX}$  που εξαρτάται από τη διαθέσιμη τεχνολογία. Αυτή η συνθήκη εκφράζεται από τον ανισοτικό περιορισμό :

$$H_{IN} - H_{OUT} \leq \eta_{MAX} (H_{IN} - m_{IN} h(p_{OUT}, s_{IN})) \quad (4.47)$$

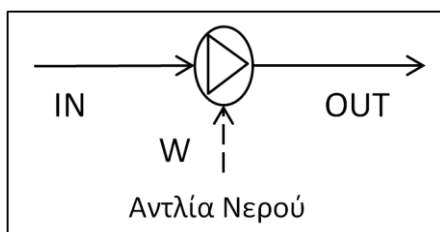
Σε αντίθεση με τον εναλλακτικό αντίστοιχο ισοτικό περιορισμό, επιτρέπει περισσότερους βαθμούς ελευθερίας στο πρόβλημα βελτιστοποίησης, και άρα συμβάλλει στην αύξηση της αξιοπιστίας. Επίσης μεγαλώνει την εφικτή περιοχή του προβλήματος (feasible region) χωρίς να καταστρατηγούνται οι φυσικές αρχές.

Άλλοι δύο ανισοτικοί περιορισμοί που σχετίζονται με τον κόμβο ατμοστρόβιλος είναι οι:

$$X_{OUT} > X_{OUT,MIN} \quad (4.48)$$

$$T_{IN} > T_{IN,MAX} \quad (4.49)$$

### 4.3.8 Αντλία νερού



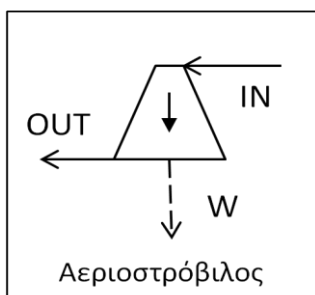
Ο μοναδικός περιορισμός που σχετίζεται με την αντλία είναι η ανισότητα:

$$m_{IN} v_{water} (p_{OUT} - p_{IN}) \leq \eta_{MAX} W \quad (4.50)$$

όπου  $\eta_{MAX}$  είναι ο μέγιστος (τεχνολογικά) δυνατός βαθμός απόδοσης αντλίας.

### 4.3.9 Αεριοστρόβιλος

Στον αεριοστρόβιλο επιβάλλεται μία ανώτατη τιμή για τον ισεντροπικό βαθμό εκτόνωσης  $\eta_i$ , όπως ορίζεται στη συνέχεια :



$$n_i = \frac{W}{W_{\text{ισεντροπικής Μεταβολής}}} = \quad (4.51)$$

$$\frac{\dot{m} \cdot C_p (T_{IN} - T_{OUT})}{\dot{m} \cdot C_p (T_{IN} - T_{OUT'})} = \frac{(T_{IN} - T_{OUT})}{(T_{IN} - T_{OUT'})}$$

$$\frac{T_{IN}}{T_{OUT'}} = \left( \frac{p_{IN}}{p_{OUT}} \right)^{\gamma-1/\gamma} = r_p^{\gamma-1/\gamma} \quad (4.52)$$

$$\frac{T_{OUT}}{T_{IN}} = r_T \quad (4.53)$$

Συνεπώς ορίζεται ο ακόλουθος περιορισμός ισεντροπικού βαθμού απόδοσης αεριοστροβίλου

$$1 - r_T - \eta_{I,MAX} \left( 1 - r_p^{1-\gamma/\gamma} \right) \leq 0 \quad (4.54)$$

Το  $\gamma$  αποτελεί θερμοδυναμική ιδιότητα των ροών IN και OUT στον κόμβο του αεριοστροβίλου και υπολογίζεται από τις Εξ.(4.54)-(4.57). Για κάθε συστατικό η ειδική θερμοχωρητικότητα υπολογίζεται από την πολυωνυμική έκφραση[NASA Report TM-4513,B.J. Mc Brideetal., 1993]:

$$\frac{\tilde{c}_p}{\tilde{R}} = A_1 + A_2 \cdot T + A_3 \cdot T^2 + A_4 \cdot T^3 + A_5 \cdot T^4 \quad (4.55)$$

όπου

$\tilde{c}_p$  γραμμομοριακή ενθαλπία σε kJ/kmolK

$\tilde{R}$  γενική σταθερά των αερίων σε kJ/kmolK

T απόλυτη θερμοκρασία σε K.

Επίσης όπου  $T = (T_{IN} + T_{OUT})/2$ , ενώ οι συντελεστές  $A_i$  για κάθε συστατικό του αέρα-καυσαερίου δίνονται στον Πίνακα 4.1. Συνεπώς για τον αέρα-καυσαέριο :

$$\tilde{c}_p = \sum_{i=N_2,SO_2} x_i \cdot \tilde{c}_{pi} \quad (4.56)$$

$$c_p = \frac{\tilde{c}_p}{M_{GAS/AIR}} \quad (4.57)$$

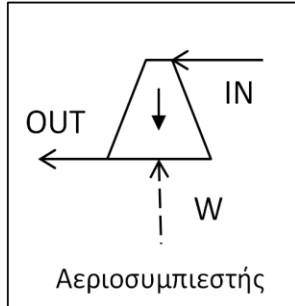
$$\gamma = \frac{c_p}{c_p - R_{GAS/AIR}} \quad (4.58)$$

Στην περίπτωση του αεριοστροβίλου τίθεται επίσης ένα μέγιστο θερμοκρασίας εισόδου καυσαερίων :

$$T_{IN} \leq T_{IN,MAX} \quad (4.59)$$

### 4.3.10 Συμπίεστης αέρα

Στον συμπίεστη επιβάλλεται μία ανώτατη τιμή για τον ισεντροπικό βαθμό συμπίεσης  $\eta_C$ , όπως ορίζεται στη συνέχεια :



$$\eta_C = \frac{W_{\text{ισεντροπικής Μεταβολής}}}{W} = \quad (4.60)$$

$$\frac{\dot{m} \cdot C_p (T_{OUT'} - T_{IN})}{\dot{m} \cdot C_p (T_{OUT} - T_{IN})} = \frac{(T_{OUT'} - T_{IN})}{(T_{OUT} - T_{IN})}$$

$$\frac{T_{OUT'}}{T_{IN}} = \left( \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \right)^{\gamma-1/\gamma} = r_p^{\gamma-1/\gamma} \quad (4.61)$$

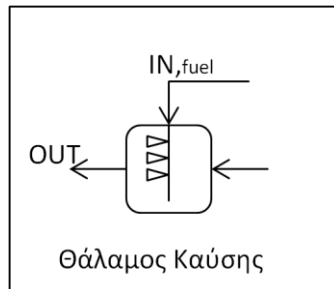
$$\frac{T_{OUT}}{T_{IN}} = r_T \quad (4.62)$$

Συνεπώς ορίζεται ο ακόλουθος περιορισμός ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συμπίεστη :

$$\left( r_p^{\gamma-1/\gamma} - 1 \right) - \eta_{C \text{ MAX}} (r_T - 1) \leq 0 \quad (4.63)$$

Το  $\gamma$  αποτελεί θερμοδυναμική ιδιότητα των ροών IN και OUT στον κόμβο του συμπίεστη και υπολογίζεται από τις Εξ. (4.54)–(4.57).

### 4.3.11 Θάλαμος καύσης



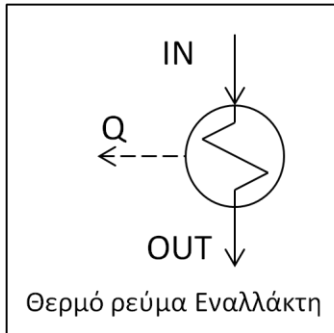
Ο λόγος αέρα καύσης στον καυστήρα πρέπει να έχει τιμή μεγαλύτερη από μία ελάχιστη τιμή η οποία επιτρέπει να πραγματοποιείται σχεδόν τέλεια καύση και με αμελητέα παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα. Παρατηρείται ότι σε διατάξεις συμπίεστη-στροβίλου η τιμή κυμαίνεται περί το~3.

$$\frac{[O_2]}{O_{\text{στοιχειομετρικό}}} \geq \lambda_{\text{MIN}} \quad (4.64)$$

Επίσης η ποσοστιαία πτώση πίεσης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από ένα κατώτερο όριο  $k$  που επιβάλλει η τεχνολογία καυστήρων.

$$\log \left( \frac{P_{OUT}}{(1-k)P_{IN}} \right) \leq 0 \quad (4.65)$$

#### 4.3.12 Συμπυκνωτής

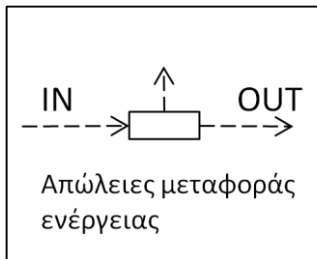


Με δεδομένη τη σταθερή θερμοκρασία που επικρατεί στο θερμό ρεύμα του συμπυκνωτή, ένας μόνο ανισοτικός περιορισμός σχετίζεται με τον συμπυκνωτή.

$$\left( T_{IN'} + \frac{Q}{c_p m_c} \right) + \Delta T \leq T_{sat}(P_{IN}) \quad (4.66)$$

όπου  $T_{IN'}$  είναι η (θεωρούμενη σταθερά) θερμοκρασία εισόδου του νερού ψύξης στον εναλλάκτη του συμπυκνωτή,  $T_{sat}(P_{IN})$  είναι η θερμοκρασία συμπύκνωσης στην πίεση του συμπυκνωτή,  $c_p$  η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού ψύξης και  $m_c$  είναι η παροχή μάζας του νερού ψύξης που παριστάνεται στο διάγραμμα μοντελοποίησης με μία επιπλέον ροή που προστίθεται σε αυτό.

#### 4.3.13 Απώλειες μεταφοράς ενέργειας



Στην περίπτωση που θέλουμε να εισάγουμε απώλειες μεταφοράς ενέργειας στο ενεργειακό σύστημα σε οποιοδήποτε σημείο, τότε προστίθεται ο απλός περιορισμός:

$$\dot{H}_{OUT} \leq l \cdot \dot{H}_{IN} \quad (4.67)$$

όπου  $l$  ο συντελεστής απωλειών ενέργειας. Όμοιος περιορισμός συναντάται και στον κόμβο Απώλεια θερμότητας αγωγού.

#### 4.3.14 Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται διαφορετική σε κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης. Μια τυπική περίπτωση που μελετάται στην εργασία αυτή είναι η μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης του ενεργειακού συστήματος αν σε αυτό παρέχεται σταθερή παροχή καυσίμου.

$$\eta_{TOTAL} = \frac{\dot{H}_{\text{χρησιμο}}}{\dot{H}_{\text{fuel}}} \quad (4.68)$$

### 4.4 Σταθερές Τιμές Περιορισμών

Όπως είδαμε στην Ενότητα 4.3, οι περιορισμοί χαρακτηρίζονται από παραμέτρους που σχετίζονται με τη φύση του κάθε ενεργειακού συστήματος και εξασφαλίζουν την εφαρμογή θερμοδυναμικής λογικής. Αυτές οι παράμετροι είναι οι τιμές  $\Delta T$  στα ρεύματα, των εναλλακτών,

οι συντελεστές πτώσης πίεσης  $k$ , η μέγιστη θερμοκρασία στην είσοδο στροβίλου και ατμοστροβίλου  $T_{MAX}$ , η ξυρότητα στην είσοδο του ατμοστροβίλου, κ.α. Οι παράμετροι αυτές διαφέρουν από σύστημα σε σύστημα και από κόμβο σε κόμβο και ορίζονται εξωτερικά πριν την έναρξη της κτίσης της δομής δεδομένων του μοντελοποιημένου συστήματος.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

#### ΚΑΙ

### ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

#### 5.1 Εισαγωγή

Στα κεφάλαια που προηγήθηκαν περιγράφεται η επιλογή ανεξάρτητων μεταβλητών τέτοιων ώστε να παραστεί ικανή η κατασκευή περιορισμών και της αντικειμενική συνάρτησης συναρτήσει αυτών. Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο οι πληροφορίες που παρέχονται από τη θερμοδυναμική ανάλυση εισάγονται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, ο οποίος δημιουργεί ένα εφικτό θερμοδυναμικά σύστημα παράγοντας διάνυσμα ανεξάρτητων μεταβλητών που μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν την εκάστοτε αντικειμενική συνάρτηση.

#### 5.2 Η δομή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται ανήκει στις άμεσες μεθόδους βελτιστοποίησης, οι οποίες αναζητούν το βέλτιστο σημείο μέσα στο πεδίο που ορίζουν οι περιορισμοί κάνοντας άμεση χρήση της αντικειμενικής συνάρτησης και των συναρτήσεων των περιορισμών.

Αρχικά, αναπτύχθηκε η μέθοδος του ελαττωμένου διανύσματος κλίσης (reduced gradient method) για προβλήματα με γραμμικούς προβληματισμούς. Κατόπιν, επεκτάθηκε και σε προβλήματα με μη γραμμικούς περιορισμούς, οπότε ονομάστηκε *μέθοδος του γενικευμένου ελαττωμένου διανύσματος κλίσης* (generalized reduced gradient method, GRG).

Η ιδέα ξεκινά από την παρατήρηση ότι, εάν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει  $n$  μεταβλητές  $\mathbf{x}$  και  $m$  ισοτικών περιορισμούς,  $m < n$ , το σύστημα των  $m$  εξισώσεων μπορεί, τουλάχιστον θεωρητικά, να λυθεί ως προς  $m$  μεταβλητές, οπότε οι πραγματικά ανεξάρτητες μεταβλητές είναι  $n-m$ . Έτσι, η διάσταση (δηλ. ο αριθμός των μεταβλητών) του προβλήματος βελτιστοποίησης μικραίνει και η λύση διευκολύνεται.

Στη μέθοδο GRG, το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται αρχικά ως εξής:

$$\text{Minf}(\mathbf{x}) \tag{5.1}$$

με περιορισμούς

$$h_j(\mathbf{x})=0, \quad j=1,2,\dots,m \quad (5.1\alpha)$$

$$g_k(\mathbf{x})\leq 0, \quad k=1,2,\dots,p \quad (5.1\beta)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad i=1,2,\dots,n \quad (5.1\gamma)$$

όπου  $x_i^L$  και  $x_i^U$  είναι το κάτω και άνω όριο τιμών της  $x_i$ . Προσθέτοντας μια μη αρνητική βοηθητική μεταβλητή (slack variable) η οποία λέγεται και *μεταβλητή απόκλισης* στον καθένα ανισοτικό περιορισμό, το πρόβλημα διατυπώνεται με τη μορφή

$$\min f(\mathbf{x}) \quad (5.2)$$

με περιορισμούς

$$h_j(\mathbf{x})=0, \quad j=1,2,\dots,m \quad (5.2\alpha)$$

$$g_k(\mathbf{x})+x_{n+k}=0, \quad k=1,2,\dots,p \quad (5.2\beta)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad i=1,2,\dots,n \quad (5.2\gamma)$$

$$x_{n+k} \geq 0 \quad k=1,2,\dots,p \quad (5.2\delta)$$

Το νέο πρόβλημα έχει  $n+p$  μεταβλητές και μπορεί να γραφεί με τη γενική μορφή

$$\min f(\mathbf{x}) \quad (5.3)$$

με περιορισμούς

$$\varphi_j(\mathbf{x}) = 0, \quad j=1,2,\dots,m+p \quad (5.3\alpha)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad i=1,2,\dots,n+p \quad (5.3\beta)$$

Για τις βοηθητικές μεταβλητές ( $x_i, i=n+1, n+2, \dots, n+p$ ), το κάτω όριο είναι 0 και ως άνω όριο παίρνεται ένας πολύ μεγάλος αριθμός.

Από τις  $n+p$  μεταβλητές, οι  $m+p$  μπορούν να υπολογισθούν με λύση του συστήματος των ισοτικών περιορισμών, Εξ. (5.3α). Προς τον σκοπό αυτόν, το σύνολο των μεταβλητών  $\mathbf{x}$  χωρίζεται σε δύο υποσύνολα :

$$(\mathbf{x}) = (\mathbf{y}, \mathbf{z}) \quad (5.4)$$

$$(\mathbf{y}) = y_1, y_2, \dots, y_{n-m} \quad (5.4\alpha)$$

$$(\mathbf{z}) = z_1, z_2, \dots, z_{m+p} \quad (5.4\beta)$$

όπου

$\mathbf{y}$  ανεξάρτητες μεταβλητές

$\mathbf{z}$  εξαρτημένες μεταβλητές, δηλ. εξαρτώνται από τις ανεξάρτητες μεταβλητές έτσι, ώστε να ικανοποιούνται οι ισοτικοί περιορισμοί.

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές (independent variables) λέγονται και *μεταβλητές απόφασης* (decision variables). Οι εξηρητημένες μεταβλητές (dependent variables) λέγονται και *μεταβλητές κατάστασης* (state variables).

Για το πρόβλημα (5.3), ορίζεται το *γενικευμένο ελαττωμένο διάνυσμα κλίσης* (generalized reduced gradient),  $G_R$  :

$$G_R = \frac{df(x)}{dy} \quad (5.5)$$

Είναι γνωστό ότι αναγκαία συνθήκη ελαχίστου μιας συνάρτησης χωρίς περιορισμούς είναι ο μηδενισμός των παραγώγων (δηλ. του διανύσματος κλίσης). Με όμοιο τρόπο, μια συνάρτηση με περιορισμούς γίνεται ελάχιστη εκεί όπου μηδενίζεται το ελαττωμένο διάνυσμα κλίσης.

Από την άλλη πλευρά, το διάνυσμα  $G_R$  δείχνει την κατεύθυνση προς την οποία βρίσκεται το βέλτιστο σημείο. Η κίνηση από σημείο,  $x^{(k)}$ , σε σημείο  $x^{(k+1)}$ , προς την κατεύθυνση αυτή γίνεται με μία από τις μεθόδους χωρίς περιορισμούς (π.χ. Newton, Fletcher-Reeves, Davidon-Fletcher-Powell).

### 5.2.1 Περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού των τιμών των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης

Αρχικά εξωτερικά του αλγορίθμου βελτιστοποίησης δημιουργείται η δομή δεδομένων και οι βοηθητικές δομές των γράφων μάζας και ενέργειας και των αλυσίδων πιέσεων. Ακολούθως εντοπίζονται και υπολογίζεται ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών  $\alpha, \beta, \gamma$  μέσα από τις δομές αυτές, όπως επίσης εντοπίζονται οι δηλωθείσες ανεξάρτητες μεταβλητές  $\delta, \epsilon$ . Οι διευθύνσεις των ανεξάρτητων μεταβλητών αποθηκεύονται σε ένα διάνυσμα, το οποίο θα αποτελέσει είσοδο στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Ανάλογα με τον τύπο των εξαρτημάτων που περιέχονται στο διάνυσμα δεικτών των εξαρτημάτων του αντικειμένου ΣΥΣΤΗΜΑ εντοπίζεται και αποθηκεύεται σε διάνυσμα το σύνολο των περιορισμών που διέπουν το σύστημα.

Δευτερογενώς πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου GRG2 ορίζονται τα όρια των ανεξαρτήτων μεταβλητών  $\alpha, \beta, \gamma \in (0,1)$  ενώ τα όρια των  $\delta, \epsilon$  ορίζονται εντός φυσικά λογικού διαστήματος από τον χρήστη. Οι περιορισμοί που περιγράφηκαν στην Ενότητα 4.3 μετασχηματίζονται ώστε να λάβουν τη μορφή  $g_k(x) \leq 0$ . Τέλος απαιτείται ο προσδιορισμός ενός

διανύσματος αρχικών τιμών των ανεξαρτήτων μεταβλητών. Οι τιμές που αποδίδονται στο διάνυσμα αυτό είναι τυχαίες τιμές εντός του πεδίου ορισμού της εκάστοτε ανεξάρτητης μεταβλητής.

Κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης δίνεται ως είσοδος το διάνυσμα των ανεξάρτητων μεταβλητών και το σύστημα επιλύεται με στόχο τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών συναρτήσει των ανεξάρτητων μεταβλητών, όπως περιγράφεται στα Κεφάλαια 3 και 4.

### 5.2.2 Ποιότητα λύσης

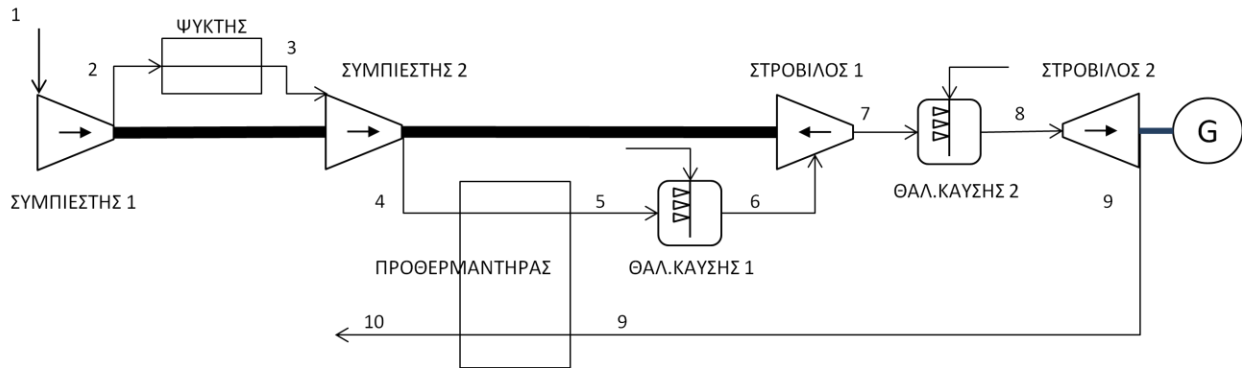
Με τον τερματισμό του αλγορίθμου βελτιστοποίησης εξετάζεται η ποιότητα της λύσης που βρέθηκε. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης μας ενημερώνει με τις ακόλουθες ενδείξεις.

- Ένδειξη 0 : Ικανοποιούνται οι συνθήκες Kuhn-Tucker. Η ποιότητα αυτή αποτελεί την πιο αξιόπιστη ένδειξη πως έχει εντοπιστεί το βέλτιστο σημείο.
- Ένδειξη 1: Ελάχιστη μεταβολή στην αντικειμενική συνάρτηση μετά από συνεχόμενες επαναλήψεις. Μεγάλη πιθανότητα να αποτελεί βέλτιστο σημείο
- Ένδειξη 2: Όλα τα διορθωτικά μέτρα αποτυγχάνουν να βρουν καλύτερο σημείο. Απαιτείται έλεγχος περιορισμών και ορίων για πιθανή ασυμβατότητα
- Ένδειξη 3 : Έλεγχος περιορισμών και ορίων για πιθανή ασυμβατότητα. Προτείνεται εκκίνηση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης με διαφορετικές αρχικές τιμές ανεξαρτήτων μεταβλητών.
- Ένδειξη 4 : Η αντικειμενική συνάρτηση δεν έχει όριο. Παρατηρείται μεγάλη αλλαγή στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μετά από διαδοχικές επαναλήψεις του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Εάν η αντικειμενική συνάρτηση εξ ορισμού φράσσεται τότε πρέπει να ελεγχθούν τα όρια και οι περιορισμοί για τυχόν πρόβλημα συνέπειας.
- Ένδειξη 5: Δεν βρέθηκε εφικτή λύση. Εάν το πρόβλημα είναι εφικτό έχει πραγματοποιηθεί σφάλμα στα όρια και τον ορισμό των τιμών κάποιων παραμέτρων. Απαιτείται έναρξη με διαφορετικές αρχικές τιμές.
- Ένδειξη 6: Το πρόβλημα βελτιστοποίησης εκφυλίζεται σε πρόβλημα αριθμητικής επίλυσης. Η λύση μπορεί να είναι η βέλτιστη με μικρή πιθανότητα. Προτείνεται εκκίνηση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης με διαφορετικές αρχικές τιμές ανεξαρτήτων

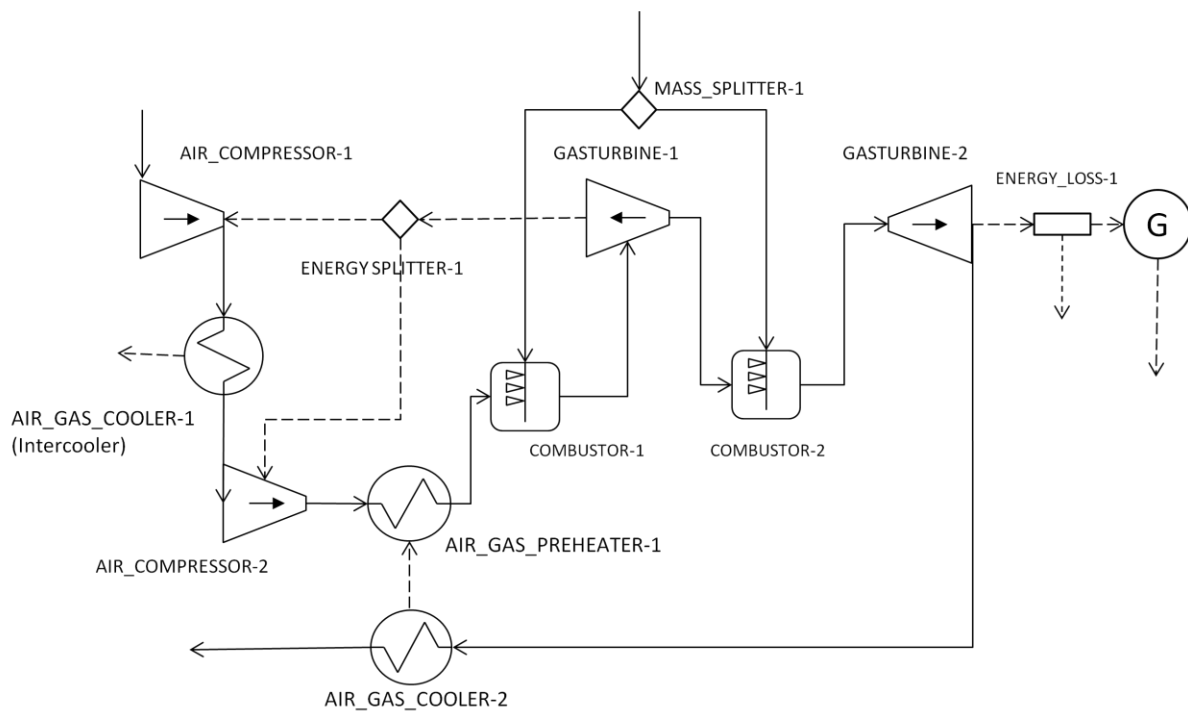
μεταβλητών και έλεγχος των περιορισμών και των ορίων για τυχόν πρόβλημα συνέπειας.

Ένδειξη -1 : Σοβαρό σφάλμα στον αλγόριθμο της βελτιστοποίησης. Η είσοδος δίνεται με λάθος τρόπο και δεν είναι αναγνώσιμη από τον αλγόριθμο GRG2.

### 5.3 Εφαρμογή Α': Σύστημα Αεριοστροβίλου με Αναγεννητική Προθέρμανση του Αέρα και Αναθέρμανση του Καυσαερίου



Σχ. 5.1 Διάγραμμα ροής συστήματος αεριοστροβίλου με αναγεννητική προθέρμανση του αέρα και αναθέρμανση του καυσαερίου.



Σχ. 5.2 Διάγραμμα μοντελοποίησης του συστήματος του Σχ. 5.1.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύεται είναι το ακόλουθο. Στον διαχωριστή μάζας με όνομα MASS\_SPLITTER-1 παρέχεται σταθερή ροή μάζας καυσίμου ίση με 3 kg/s, θερμογόνου ικανότητας 50000kJ/kg με στοιχειομετρική σύσταση C:0.75, H: 0.25, O: 0, N: 0, S: 0. Ο αέρας που παρέχεται στον συμπιεστή 1 έχει σύσταση κ.ό. N<sub>2</sub>: 0.7782, O<sub>2</sub>: 0.2068, CO<sub>2</sub>:

0.0003, H<sub>2</sub>O: 0.0147, SO<sub>2</sub>:0, έχει ειδική ενθαλπία 303 kJ/kg στους 25°C, ενώ η παροχή μάζας αποτελεί προϊόν της βελτιστοποίησης. Αντικειμενική συνάρτηση είναι η μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος, που ορίζεται ως εξής:

$$\eta_{TOTAL} = \frac{\dot{W}_{Generator}}{\dot{H}_{fuel}} \quad (5.6)$$

Ισοδύναμα λέμε ότι μεγιστοποιείται η ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να παράξει το σύστημα με σταθερή παροχή καυσίμου. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι παράμετροι των σχέσεων των περιορισμών.

Πίνακας 5.1 Τιμές παραμέτρων θερμοδυναμικών περιορισμών.

Πιέσεις στα σημεία 1 και 10	P <sub>1</sub> =P <sub>10</sub> =P <sub>0</sub> =1.025 bar
Πτώση πίεσης προθερμαντήρα(Καυσαέριο)	0.02%
Πτώση πίεσης προθερμαντήρα(Αέρας)	0.3%
Πτώση πίεσης ψυγείου	0.02%
Πτώση πίεσης θαλάμου καύσης	0.5%
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	91%
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή	89%
Ελάχιστος λόγος αέρα καύσης	1.3
Μέγιστη θερμοκρασία στην είσοδο του στροβίλου	2000 K
Ελάχιστη θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων	100 °C
Ελάχιστη θερμοκρασία στην έξοδο του ψυγείου	T <sub>0</sub> =298.15°C
ΔT Προθερμαντήρα(Θερμό ρεύμα)	T <sub>9</sub> -T <sub>5</sub> ≥15
ΔT Προθερμαντήρα(Ψυχρό ρεύμα)	T <sub>10</sub> -T <sub>4</sub> ≥20
Βαθμός απόδοσης γεννήτριας	98%
Βαθμός απόδοσης θαλάμων καύσης	100%

Τέλος πρέπει να οριστούν τα όρια των πιέσεων και των παροχών μάζας και ενθαλπίας που χαρακτηρίζουν τις ανεξάρτητες μεταβλητές  $\delta$  και  $\epsilon$ .

Πίνακας 5.2 Όρια ανεξάρτητων μεταβλητών τύπου  $\delta$ ,  $\epsilon$  και πιέσεων.

Μέγιστη παροχή αέρα στο συμπιεστή 1	100 kg/s
Ελάχιστη παροχή αέρα στο συμπιεστή 1	20 kg/s
Μέγιστη πίεση κύκλου στο στρόβιλο	100 bar
Ελάχιστη πίεση κύκλου	1.025 bar

Κατά την επίλυση εξάγονται πίνακες που πιστοποιούν τη σωστή εφαρμογή της μεθόδου. Οι πίνακες αυτοί περιγράφονται στο Παράρτημα Α. Με το πέρας της βελτιστοποίησης εντοπίζεται λύση ποιότητας 0 δίνοντας τα αποτελέσματα που συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης του συστήματος.

Σημείο	$\dot{m}$ (kg/s)	P(bar)	h(kJ/kg)	T(K)	s (kJ/kgK)	$\dot{H}$ (Watt)
1	78.790	1.025	303	298.15	6.785	23873.37
2	78.790	7.405	560.214	546.950	6.846	44139.26
3	78.790	7.400	302.937	298.150	6.211	23868.41
4	78.790	54.109	562.147	548.781	6.273	44291.56
5	78.790	53.946	1260.097	1167.887	7.185	99283.04
6	80.625	53.677	2369.670	1958.496	8.204	191054.6
7	80.625	18.291	1865.003	1584.981	8.192	150365.9
8	81.790	18.199	2550.362	2000.000	8.862	208594.1
9	81.790	1.025	1408.629	1187.887	8.875	115211.8
10	81.790	1.025	736.279	658.090	8.034	60220.26
f1	1.835	-	50000	-	-	91750
f2	1.165	-	50000	-	-	58250



Η σύσταση των καυσαερίων δίνεται στον Πίνακα 5.4 :

Πίνακας 5.4 Σύσταση καυσαερίου του βελτιστοποιημένου συστήματος του Σχ. 5.1.

Σημείο	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
6-7	0.75275	0.11184	0.04069	0.09502	0.00000
8-10	0.84935	0.00000	0.09371	0.16263	0.00000

Οι τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών  $\alpha$ ,  $\beta$  εντοπίζονται σε αντικείμενα τύπου Διαχωριστή και λαμβάνουν τις βέλτιστες τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5. Οι τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών  $\gamma$  σχετίζονται με τη δομή των αλυσίδων πίεσεων και οι τιμές τους προκύπτουν με ειδική επεξεργασία από τον Πίνακα 5.3. Τέλος οι τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών  $\delta$  και  $\epsilon$  παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5 Βέλτιστες τιμές ανεξάρτητων μεταβλητών.

Ανεξάρτητες Μεταβλητές Τύπου $\alpha$		
MASS_SPLITTER-1	$\dot{m}_{f1} / (\dot{m}_{f1} + \dot{m}_{f2})$	0.61182
Ανεξάρτητες Μεταβλητές Τύπου $\beta$		
GAS_COOLER-1	$\dot{H}_3 / \dot{H}_2$	0.54075
GAS_COOLER-2	$1 - (\dot{H}_{10} / \dot{H}_9)$	0.47731
GASTURBINE-1	$\dot{H}_7 / \dot{H}_6$	0.78703
GASTURBINE-2	$1 - (\dot{H}_9 / \dot{H}_8)$	0.44767
ENERGY_SPLITTER-1	$(\dot{H}_2 - \dot{H}_1) / (\dot{H}_6 - \dot{H}_7)$	0.49807
MASS_SPLITTER-1	$\dot{H}_{f1} / (\dot{H}_{f1} + \dot{H}_{f2})$	0.61182
Ανεξάρτητες Μεταβλητές Τύπου $\delta$ , $\epsilon$		
Παροχή αέρα στο εξάρτημα AIR_COMPRESSOR-1		78.790

Οι αντιδράσεις στους θαλάμους καύσης πραγματοποιούνται με λόγους αέρα καύσης  $\lambda_1=2.5$  και  $\lambda_2=2.51$

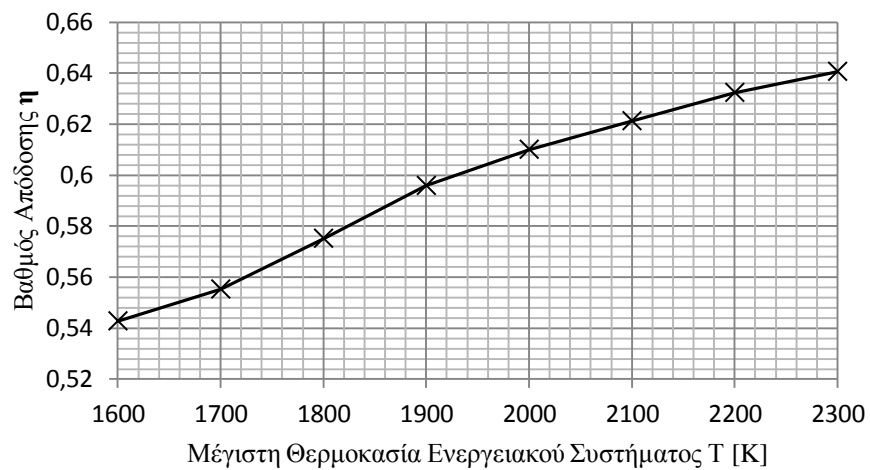
Η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι :

$$\eta_{TOTAL} = \frac{\dot{W}_{generator}}{\dot{H}_{fuel}} = \frac{93382.3 \cdot 0.98}{150000} = 0.6101 \quad (5.7)$$

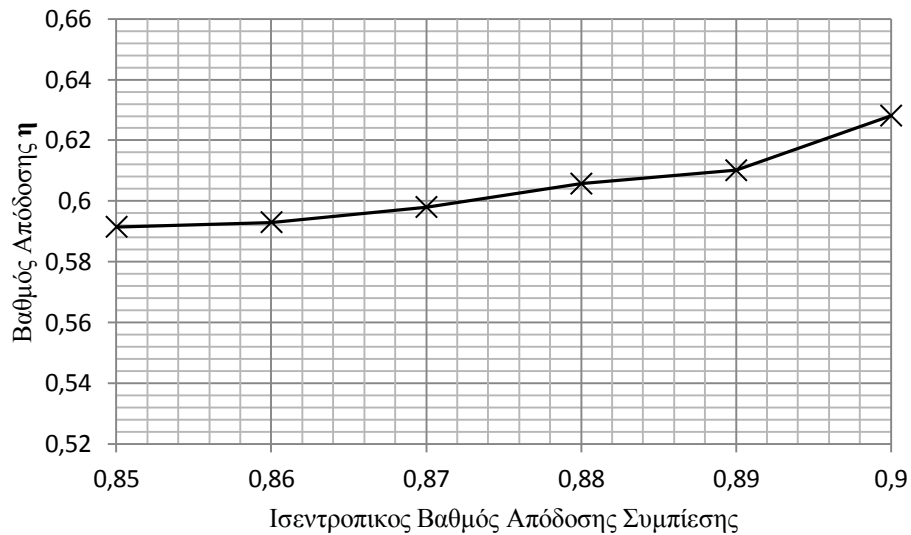
Στη συνέχεια μελετάται η επίδραση που έχει στη βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, η μεταβολή των τιμών των ακόλουθων παραμέτρων:

- Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου [K] (1600-2300)
- Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπίεσης (0.85-0.90)
- Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης εκτόνωσης (0.87-0.92).

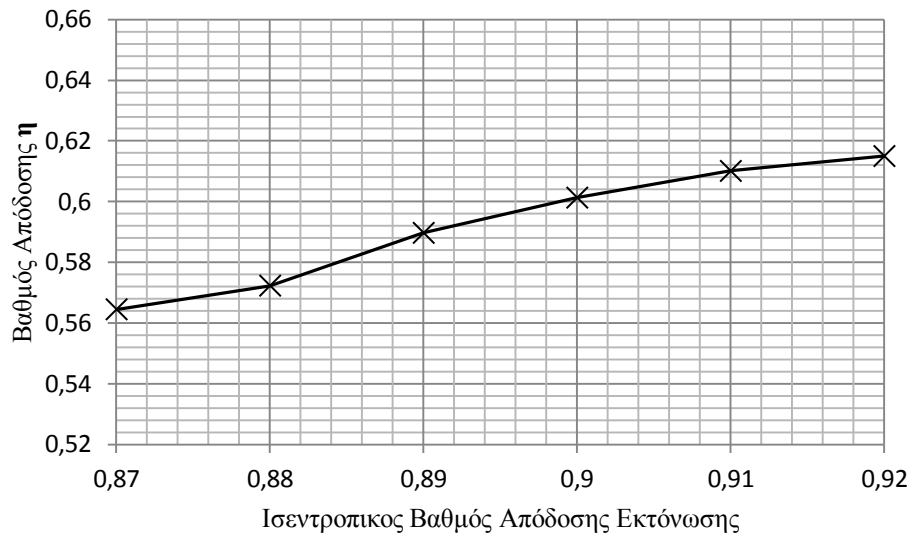
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχ. 5.3 – 5.5.



Σχ. 5.3 Διάγραμμα Αντικειμενικής συνάρτησης – Μέγιστης θερμοκρασίας κύκλου



Σχ. 5.4 Διάγραμμα Αντικειμενικής συνάρτησης – Ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συμπίεσης.



Σχ. 5.5 Διάγραμμα Αντικειμενικής συνάρτησης – Ισεντροπικού βαθμού απόδοσης εκτόνωσης.

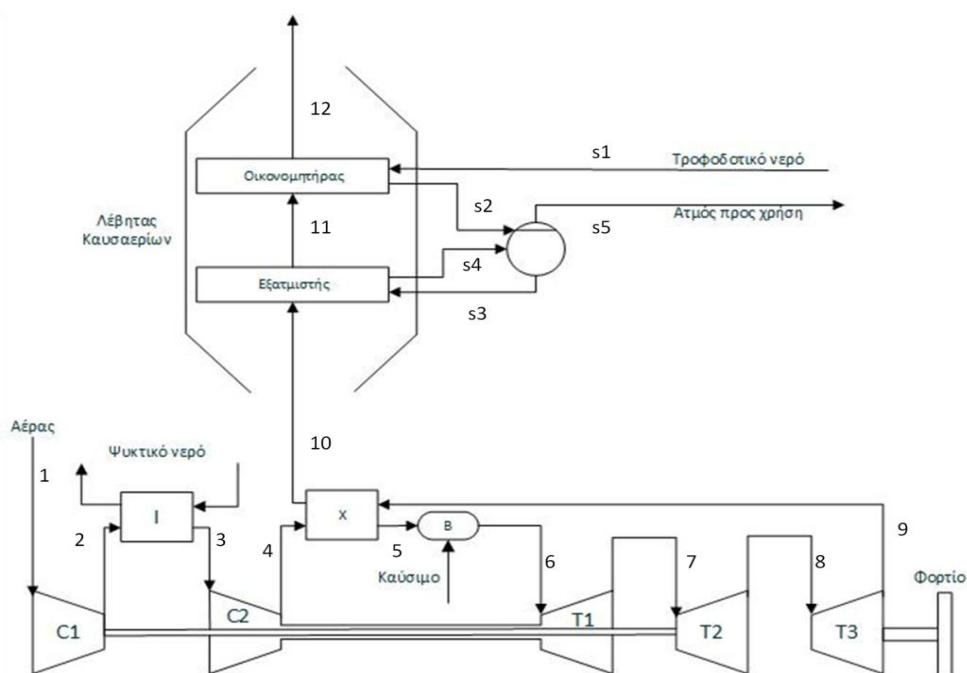
Συμπερασματικά σημειώνεται πως το πρόβλημα βελτιστοποίησης της Εφαρμογής Α επιλύθηκε επιτυχώς δίνοντας λύσεις ποιότητας 1 ή 0. Στις λύσεις που βρέθηκαν κατά την παραμετρική μελέτη επιτεύχθηκαν οι μέγιστοι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης συμπίεσης και εκτόνωσης και η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία.

## 5.4 Εφαρμογή Β': Ενεργειακό Σύστημα Συμπαραγωγής με Αεριοστρόβιλο

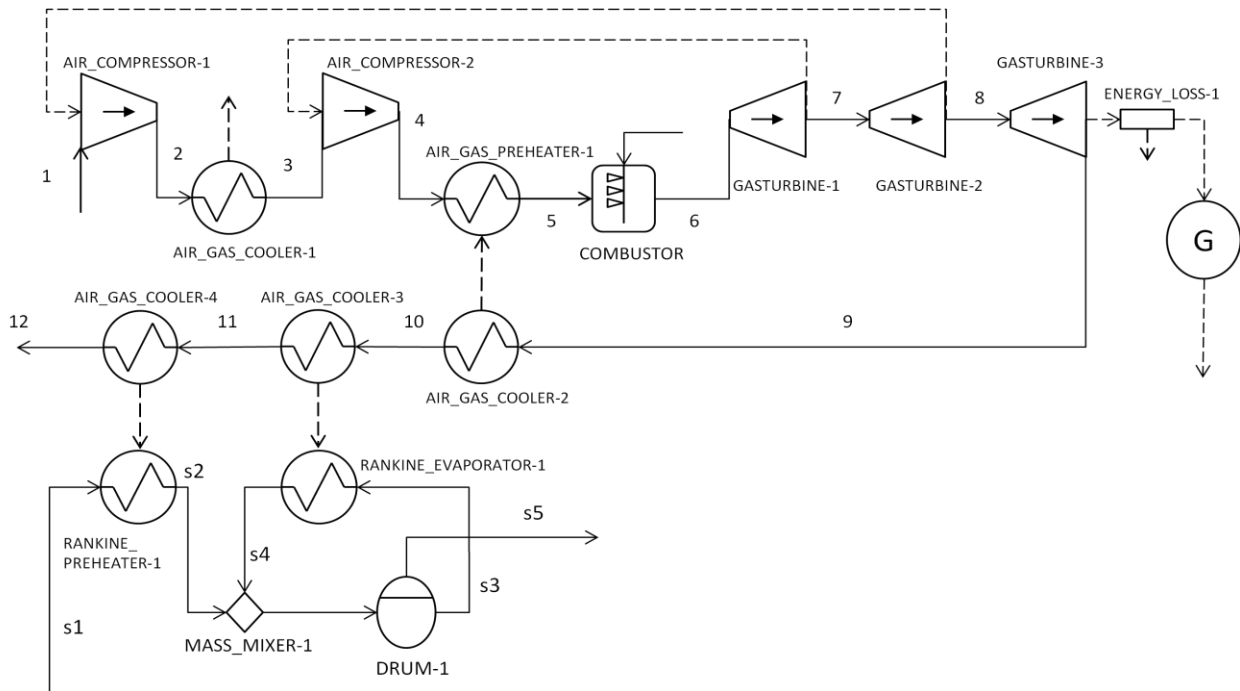
Το σύστημα συμπαραγωγής που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3 χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού και κορεσμένου ατμού. Το σύστημα έχει ως βάση μονάδα αεριοστρόβιλου με ενδιάμεση ψύξη και αναγεννητική προθέρμανση, ο οποίος έχει αεριογόνο διπλού τυμπάνου και στρόβιλο ισχύος. Τα καυσαέρια στην έξοδό τους από τη μονάδα αεριοστρόβιλου χρησιμοποιούνται σε λέβητα καυσαερίων για την παραγωγή κορεσμένου ατμού.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύεται είναι το ακόλουθο. Παρέχεται σταθερή ροή μάζας καυσίμου ίση με 1.5kg/s και θερμογόνου ικανότητας 47000kJ/kg με στοιχειομετρική σύσταση κ. ο. C:0.75,H: 0.25,O: 0, N: 0,S: 0. Ο αέρας που παρέχεται στο συμπιεστή C1 έχει σύσταση N<sub>2</sub>: 0.7782, O<sub>2</sub>: 0.2068, CO<sub>2</sub>: 0.0003, H<sub>2</sub>O: 0.0147, SO<sub>2</sub>:0, έχει ειδική ενθαλπία 303 kJ/kg στους 25 °C, ενώ η παροχή μάζας αποτελεί προϊόν της βελτιστοποίησης. Ταυτόχρονα ο οικονομητήρας τροφοδοτείται με σταθερή παροχή νερού ίση με 4kg/s που χαρακτηρίζεται από T=50°C (h=211 kJ/kg) και P=15bar. Αντικειμενική συνάρτηση είναι η μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος, που ορίζεται ως εξής:

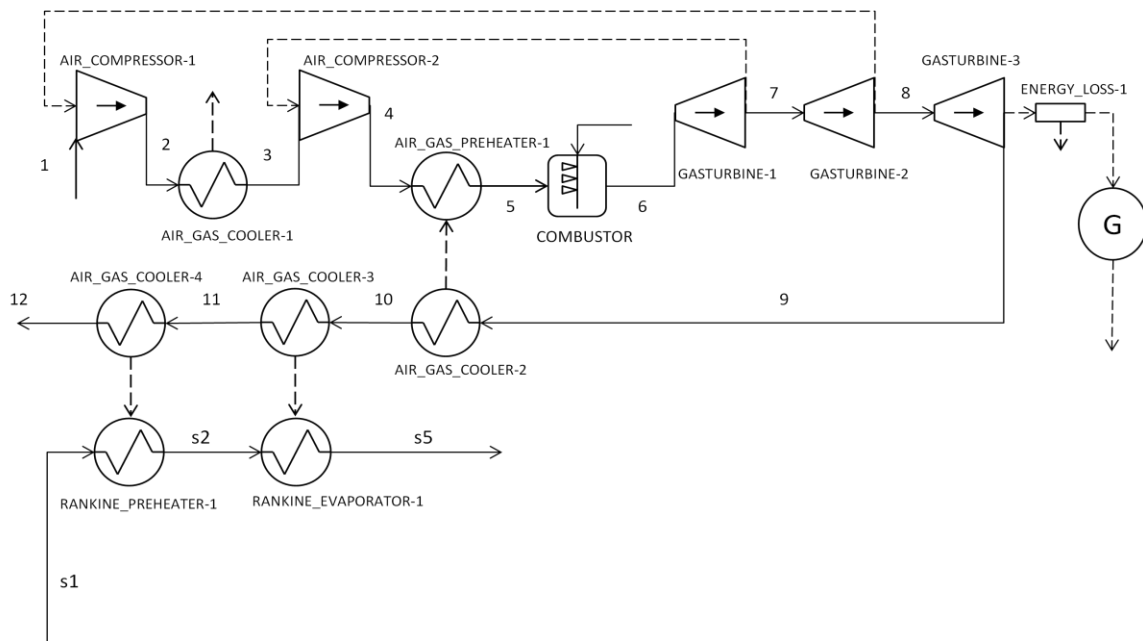
$$\eta_{TOTAL} = \frac{\dot{W}_{generator} + \dot{H}_{steam}}{\dot{H}_{fuel}} \quad (5.8)$$



Σχ. 5.6 Διάγραμμα ροής συστήματος συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο.



Σχ. 5.7 Διάγραμμα μοντελοποίησης του συστήματος του Σχ. 5.6.



Σχ. 5.8 Ισοδύναμο διάγραμμα μοντελοποίησης του συστήματος του Σχ. 5.6.

Πίνακας 5.6 Τιμές παραμέτρων θερμοδυναμικών περιορισμών.

Πιέσεις στα σημεία 1 και 2	$P_1=P_2=P_0=1.025 \text{ bar}$
Πτώση πίεσης ψυγείου	0.02%
Πτώση πίεσης προθερμαντήρα (Καυσαέριο)	0.02%
Πτώση πίεσης προθερμαντήρα (Αέρας)	0.3%
Πτώση πίεσης οικονομητήρα (Καυσαέριο)	0.02%
Πτώση πίεσης οικονομητήρα (Νερό-Ατμός)	0%
Πτώση πίεσης εξατμιστή (Καυσαέριο)	0.02%
Πτώση πίεσης εξατμιστή (Νερό-Ατμός)	0%
Πτώση πίεσης θαλάμου καύσης	0.5%
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλων	91%
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστών	89%
Ελάχιστος λόγος αέρα καύσης	1.3
Μέγιστη θερμοκρασία στην είσοδο του στροβίλου	1800 K
Ελάχιστη θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων	100°C
Ελάχιστη θερμοκρασία στην έξοδο του ψυγείου	$T_3 = T_0=298.15^\circ\text{C}$
$\Delta T$ Προθερμαντήρα	$T_9-T_5 \geq 20$
$\Delta T$ Εξατμιστή (Θερμό ρεύμα)	$T_{10}-T_{s5} \geq 40$
Βαθμός απόδοσης γεννήτριας	98%
Βαθμός απόδοσης θαλάμου καύσης	100%

Πίνακας 5.7 Όρια ανεξάρτητων μεταβλητών και πιέσεων.

Μέγιστη Παροχή Μάζας Αέρα	100 kg/s
Ελάχιστη Παροχή Μάζας Αέρα	20 kg/s
Μέγιστη Πίεση (στροβίλου)	100 bar
Ελάχιστη Πίεση	1.025 bar

Το υποσύστημα του ενεργειακού συστήματος του Σχ. 5.6 που αποτελείται από το ψυχρό ρεύμα του εξατμιστή (RANKINE\_EVAPORATOR-1), το τύμπανο (DRUM-1) και το μείκτη μάζας (MASS\_MIXER-1) που φαίνεται στο Σχ. 5.7 επιλέγεται να μοντελοποιηθεί μόνο με τη χρήση ενός εξαρτήματος τύπου εξατμιστής (RANKINE\_EVAPORATOR-1) όπως φαίνεται στο Σχ. 5.9. Το διάγραμμα μοντελοποίησης του Σχ. 5.9 είναι ισοδύναμο με αυτό του Σχ. 5.8, καθώς για την επίλυση και βελτιστοποίηση του συστήματος μας ενδιαφέρει μόνο το φαινόμενο της διαφοράς ενέργειας και όχι φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας. Ο θερμοδυναμικός περιορισμός στο εξάρτημα RANKINE\_EVAPORATOR της Εξ. (4.36) εξασφαλίζει ότι στην έξοδο του εξαρτήματος στο περιβάλλον ρέει κορεσμένο νερό, περιορισμός δηλαδή ισοδύναμος με αυτόν που συναντάται στο εξάρτημα του τυμπάνου (DRUM).

Οι τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών  $\alpha$ ,  $\beta$  εντοπίζονται σε αντικείμενα τύπου Διαχωριστή και λαμβάνουν τις βέλτιστες τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.10. Οι τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών  $\gamma$  σχετίζονται με τη δομή των αλυσίδων πιέσεων και οι τιμές τους προκύπτουν με ειδική επεξεργασία από τον Πίνακα 5.8. Τέλος οι τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών  $\delta$  και  $\epsilon$  παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.10.

Με το πέρας της βελτιστοποίησης εντοπίζεται λύση ποιότητας 0 δίνοντας τα αποτελέσματα που συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5.8.

Πίνακας 5.8 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συστήματος συμπαραγωγής.

Σημείο	$\dot{m}$ (kg/s)	P(bar)	h(kJ/kg)	T(K)	s(kJ/kgK)	$\dot{H}$ (Watt)
1	68.994	1.025	303	298.15	6.785	20905.182
2	68.994	2.021	375.743	369.379	6.808	25924.013
3	68.994	2.020	302.937	298.150	6.588	20900.835
4	68.994	11.167	516.476	505.339	6.642	35633.745
5	68.994	11.082	1171.017	1092.565	7.556	80793.147
6	70.494	11.027	2146.181	1800.000	8.520	151292.88
7	70.494	6.998	1937.186	1644.070	8.513	136559.99
8	70.494	5.938	1865.991	1590.470	8.511	131541.17
9	70.494	1.027	1249.505	1112.565	8.501	88082.605
10	70.494	1.027	608.892	571.886	7.642	42923.233
11	70.494	1.027	498.455	471.506	7.420	35138.087
12	70.494	1.025	462.496	438.362	7.339	32603.193
s1	4	15.000	211.000	323.249	0.704	844
s2	4	15.000	844.717	471.454	2.315	3378.868
s5	4	15.000	2791.01	471.445	6.443	11164.04
f1	1.5	-	47000	-	-	70500

Η σύνθεση των καυσαερίων δίνεται στον Πίνακα 5.9 :

Πίνακας 5.9 Σύσταση καυσαερίων του συστήματος συμπαραγωγής.

Σημείο	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
6-12	0.75478	0.11755	0.03810	0.08987	0.00000



Πίνακας 5.10 Βέλτιστες τιμές ανεξάρτητων μεταβλητών

Ανεξάρτητες Μεταβλητές Τύπου α		
-		
Ανεξάρτητες Μεταβλητές Τύπου β		
GAS_COOLER-1	$\dot{H}_3/ \dot{H}_2$	0.8062
GAS_COOLER-2	$1-(\dot{H}_{10}/ \dot{H}_9)$	0.5217
GAS_COOLER-3	$\dot{H}_{11}/ \dot{H}_{10}$	0.8186
GAS_COOLER-4	$\dot{H}_{12}/ \dot{H}_{11}$	0.9279
GASTURBINE-1	$\dot{H}_7/ \dot{H}_6$	0.9026
GASTURBINE-2	$\dot{H}_8/ \dot{H}_7$	0.96325
GASTURBINE-3	$\dot{H}_9/ \dot{H}_8$	0.66962
Ανεξάρτητες Μεταβλητές Τύπου δ, ε		
Παροχή αέρα στο εξάρτημα AIR_COMPRESSOR-1		68.994

Οι αντιδράσεις στους θαλάμους καύσης πραγματοποιούνται με λόγους αέρα καύσης  $\lambda=2.6788$ .

Η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι:

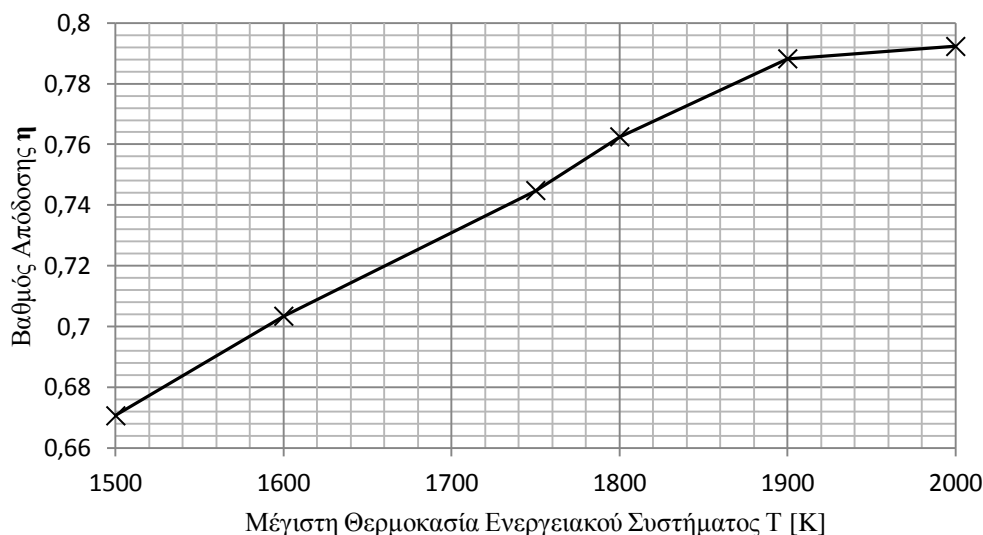
$$\eta_{TOTAL} = \frac{W_{motor} + \dot{H}_{steam}}{\dot{H}_{fuel}} = \frac{(43458 \cdot 0.98) + 11164}{70500} = 0.7625 \quad (5.9)$$

Στη συνέχεια μελετάται η επίδραση που έχει στη βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, η μεταβολή των τιμών των ακόλουθων παραμέτρων:

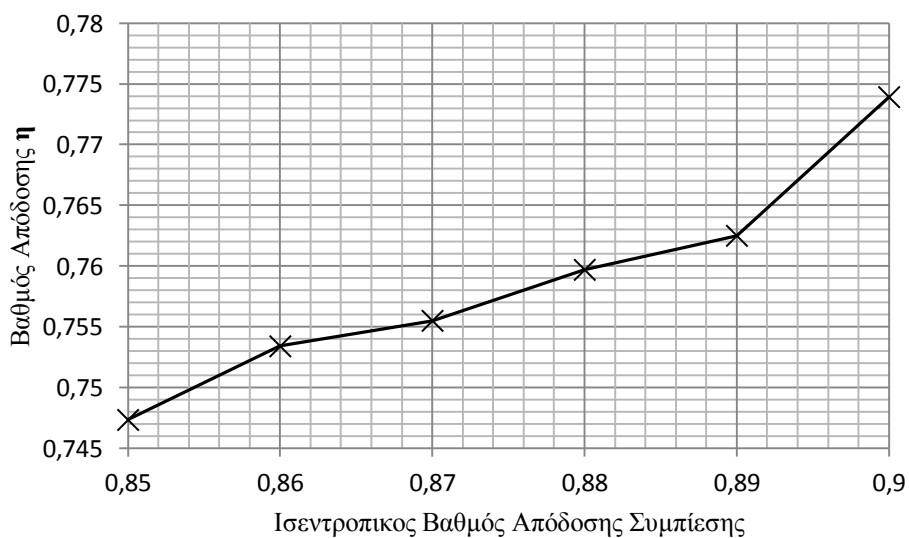
- Μέγιστη θερμοκρασίας κύκλου [K] (1500-2000)
- Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπίεσης (0.85-0.90)
- Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης εκτόνωσης(0.87-0.92)
- Πίεση νερού στο s1 [bar] (15-25).

Τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται στα Σχ. 5.9 - 5.12.

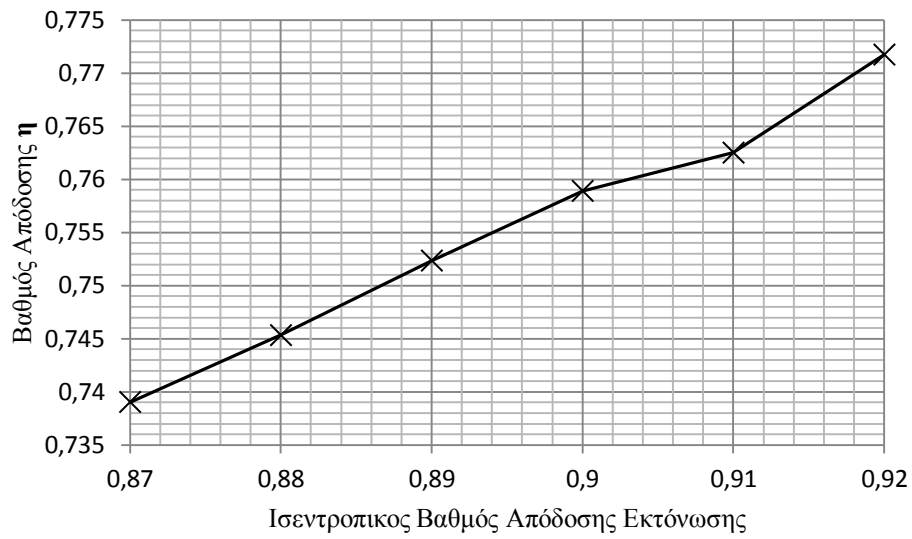
Συμπερασματικά σημειώνεται πως το πρόβλημα βελτιστοποίησης της Εφαρμογής Β επιλύθηκε επιτυχώς δίνοντας λύσεις ποιότητας 1 ή 0. Στις λύσεις που βρέθηκαν κατά την παραμετρική μελέτη επιτεύχθηκαν οι μέγιστοι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης συμπίεσης και εκτόνωσης και η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία, κάτι αναμενόμενο εφόσον αντικειμενική συνάρτηση είναι η μεγιστοποίηση του ενεργειακού βαθμού απόδοσης. Διευκρινίζεται ότι με τη συγκεκριμένη μέθοδο, τα μεγέθη αυτά αντιμετωπίζονται ως εξηρητημένες μεταβλητές με ανώτατα όρια εκείνα που δίνονται στον Πίνακα 5.6.



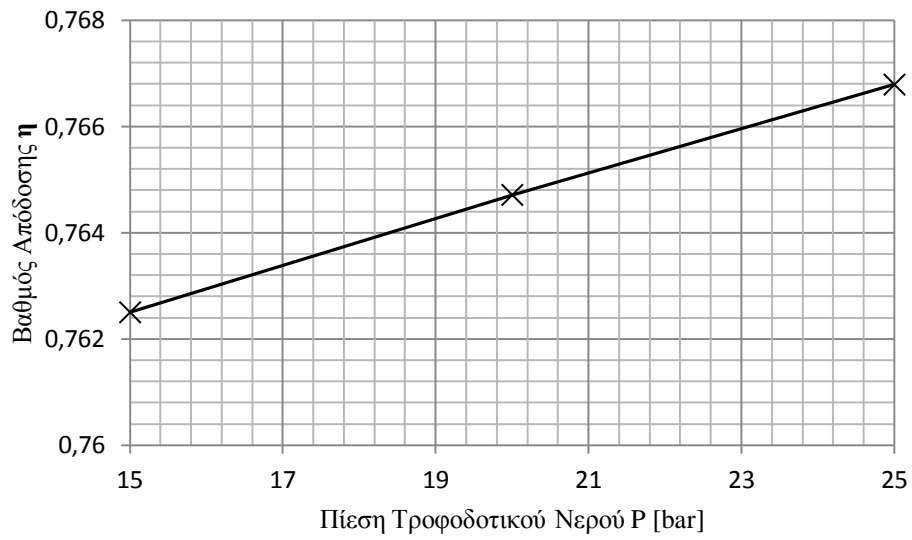
Σχ. 5.9 Διάγραμμα Αντικειμενικής συνάρτησης – Μέγιστης θερμοκρασίας κύκλου.



Σχ. 5.10 Διάγραμμα Αντικειμενικής συνάρτησης – Ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συμπίεσης.



Σχ. 5.11 Διάγραμμα Αντικειμενικής συνάρτησης – Ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συμπίεσης.



Σχ. 5.12 Διάγραμμα Αντικειμενικής συνάρτησης – Ισεντροπικού βαθμού απόδοσης εκτόνωσης.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

#### ΚΑΙ

### ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

#### 6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε μια μέθοδος για τη μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση δύο ενεργειακών συστημάτων. Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε θεωρία γράφων, η οποία, παρόλο που συνεισφέρει πολύ στην ανάλυση των ενεργειακών συστημάτων, δε γνωρίζει ευρεία εφαρμογή. Η τοπολογία εισάγεται με τη μορφή δομής δεδομένων και γι' αυτό με εύκολο τρόπο μπορεί να διαμορφωθεί για να περιγράψει μεγάλο εύρος ενεργειακών συστημάτων. Ταυτόχρονα το μαθηματικό μοντέλο προσαρμόζεται αυτόματα στη νέα τοπολογία με αλλαγές στην εκάστοτε αντικειμενική συνάρτηση. Η δομή του μοντέλου είναι τέτοια ώστε μπορούν να εισαχθούν μοντέλα νέων εξαρτημάτων που δεν προβλέπονται στην Ενότητα 2.2.2, συνοδευόμενα από τους αντίστοιχους θερμοδυναμικούς περιορισμούς. Επιπλέον στη μέθοδο αυτήδεν λαμβάνεται υπόψη η σύσταση του εγχειριδίου του λογισμικού βελτιστοποίησης GRG2, σύμφωνα με την οποία οφείλει ο χρήστης να εισάγει λογικές φυσικές τιμές των μεταβλητών προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία της μεθόδου. Η απαλλαγή από αυτήν την απαίτηση είναι αναγκαία, δεδομένου ότι ο αλγόριθμος τοπικής βελτιστοποίησης θα πρέπει να είναι ικανός να επιλύσει με αυτόματο τρόπο προβλήματα βελτιστοποίησης ενεργειακών συστημάτων διαφορετικής δομής, χωρίς να απαιτεί διαδραστική ανάδραση από τον χρήστη και αυτή είναι μια αναγκαία ιδιότητα για μεθοδολογίες σύνθεσης ενεργειακών συστημάτων όπου η δομή του βέλτιστου συστήματος είναι επίσης άγνωστη [Grekas DN, PhD Thesis]. Το γεγονός αυτό επιτυγχάνεται με την εξασφάλιση του ισολογισμού μάζας και ενέργειας στη μαθηματική μοντελοποίηση (Κεφάλαιο 3) και την εισαγωγή θερμοδυναμικών περιορισμών που διασφαλίζουν την εφικτότητα λειτουργίας του βελτιστοποιημένου προβλήματος από θερμοδυναμική άποψη.

## 6.2 Προοπτικές Μελλοντικής Έρευνας

Η διπλωματική αυτή θίγει μόνο την ενεργειακή βελτιστοποίηση του εκάστοτε ενεργειακού συστήματος αλλά δομεί το μαθηματικό μοντέλο με τρόπο ώστε με προσαρμογές στην αντικειμενική συνάρτηση και τους θερμοδυναμικούς περιορισμούς να καθίσταται ικανή τόσο η οικονομική όσο και η εξεργειακή βελτιστοποίηση του συστήματος.

Η μέθοδος μοντελοποίησης που εφαρμόζεται παρέχει προοπτική για έρευνα αναφορικά με τη βελτιστοποίηση της σύνθεσης ενός ενεργειακού συστήματος όπως προτείνεται από τη δημοσίευση “Automatic Synthesis of Mathematical Models using graph theory for optimization of thermal energy systems” – Denis N. Grekas, Christos A. Frangopoulos.

Τέλος, προτείνεται η εφαρμογή της μεθόδου σε μεγαλύτερα και πολυπλοκότερα προβλήματα ώστε να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματα και ενδεχομένως τα όποια μειονεκτήματά της.

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική Βιβλιογραφία

- [1] Γρέκας Δ., Φραγκόπουλος Χ. Α., A heuristic algorithm for drawing flow diagrams of energy systems using graph theory. In International conference on efficiency, cost, optimisation, simulation, and environment aspects of energy and process systems, ECOS 2000, July 5-7, Enschede, The Netherlands, Part 3; 2000, pp. 1743-54.
- [2] Γρέκας Δ., Φραγκόπουλος Χ. Α., A heuristic algorithm for drawing of flow diagram. Adv.Eng Software 2001; 32:239-53.
- [3] Γρέκας Δ., An artificial intelligence method for the techno economically optimal synthesis of energy systems. PhD Thesis, National Technical University of Athens, December 2004 (in Greek).
- [4] Ρακόπουλος Κ. Δ., Αρχές Βιομηχανικών Αεριοστρόβιλων, Αθήνα 2009, εκδόσεις Fountas.
- [5] Φραγκόπουλος Χ. Α. Comparison of thermoeconomic and thermodynamic optimal designs of a combined-cycle plant. International Conference on the Analysis of Thermal and Energy systems. June 3-6, Athens Greece; 1991, pp. 305-18.
- [6] Φραγκόπουλος Χ. Α., Ανάλυση και Βελτιστοποίηση Ενεργειακών Συστημάτων, Ε.Μ.Π. Αθήνα 2010.
- [7] Φραγκόπουλος Χ. Α., Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου, Ε.Μ.Π. Αθήνα 2009.

### Ξένα Βιβλιογραφία

- [8] IAPWS, Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, Lucerne, Switzerland August 2007.
- [9] Alex Burcat, Thermochemical Data for Combustion Calculations, Chapter 8 of Combustion Chemistry, W.C. Gardiner, ed., Springer-Verlag, New York, 1984.
- [10] A. Burcat and B. McBride, 1994 Ideal Gas Thermodynamic Data for Combustion and Air- Pollution Use, Technion Report TAE 697, 1993.
- [11] Balakrishnan VK. Graph theory. New York: Shaum's Outline Series; 1997.
- [12] Balakrishnan VK. Introduction discrete mathematics. New York: Dover ;1991
- [13] B.J. McBride, S. Gordon and M.A. Reno, Coefficients for Calculating Thermodynamic and Transport Properties of Individual Species, NASA Report TM-4513, by B.J. McBride 1993

- [14] Chattrand G, Oellerman O. Applied and algorithmic graph theory. New York:McGraw-Hill; 1993.
- [15] Deo N. Graph theory and applications to engineering and computer science. New Jersey: Prentice-Hall; 1974.
- [16] Floudas CA, Ciric AR, Grossmann IE. Automatic synthesis of optimum heat exchanger network configuration.AmInstChemEng 1986; 32:276.
- [17] Gopal M, Nagrath IJ. Systems modeling and analysis.Tata McGraw-Hill; 1982.
- [18] Horowitz E. Computer algorithms. SartajSahni, New Delhi: Galgotia Publication Ltd.; 1995.
- [19] Horowitz E, Sahni S, Rajasekaram S, Computer algorithm/C++. Computer Science Press; 1997.
- [20] Kruse R, Leung B, Tondo C. Data structures and program design in C. New Jersey: Prentice- Hall; 1991.
- [21] Narismhan S. Optimisation approach for evolutionary synthesis of heat exchanger networks. Trans InstChemEng 2001;79 (Part A):143.
- [22] Press WH, Teukolsky SA, Vetterling WT, Flannery BP. Numerical recipes in C. Cambridge: Cambridge University Press; 1992.
- [23] West DB. Introduction to graph theory. Upper Saddle River (NJ): Prentice-Hall;1996
- [24] Sedgewick R. Algorithms in C++. New York: Addison Wesley; 1992.
- [25] Shivakumar K, Narasimhan S. A robust and efficient NLP formulation using graph theoretic principles for synthesis of heat exchanger networks.ComputChemEng 2002; 26:1517-32.
- [26] Stephanopoulos G, Henning G, Leone H. MODEL. LA: a modeling language for process engineering. I. The formal framework. ComputChemEng 1990;14(8):813.
- [27] Stephanopoulos G, Henning G, Leone H. MODEL. LA: a modeling language for process engineering. II. Multifaceted modeling of processing systems. ComputChemEng 2002; 26:1517-32.
- [28] Yee TF, Grossman IE, Kravanja Z. Simultaneous optimization models for heat integration I. Area and energy targeting and modeling of multi-stream exchangers. ComputChem 1990; 14:1151.



## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α:**

### **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΧΕΙΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΕΞΟΔΟΥ**

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί ο τρόπος με τον οποίο εισάγονται οι πληροφορίες για την τοπολογία του εκάστοτε ενεργειακού συστήματος στο λογισμικό της βελτιστοποίησης και πως αυτές μεταφράζονται και αποθηκεύονται στη δομή δεδομένων. Επίσης θα παρουσιαστούν τα εξαγόμενα από το λογισμικό αρχεία τα οποία αφορούν στο αν αναγνώστηκαν σωστά τα αρχεία εισόδου από το λογισμικό και στα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης. Το παρόν παράρτημα αναφέρεται στην παρούσα μορφή του αλγοριθμικού πακέτου προς παράδοση. Για καλύτερη κατανόηση επιλέγεται ως παράδειγμα αναφοράς η εφαρμογή B.

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για τη μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση του ενεργειακού συστήματος χωρίζεται σε δύο βασικά τμήματα. Το πρώτο τμήμα αφορά στην αποθήκευση της τοπολογίας του συστήματος στη δομή δεδομένων του γράφου μάζας και ενέργειας και τη δημιουργία της βοηθητικής δομής των αλυσίδων. Το δεύτερο τμήμα αποτελεί την μαθηματική επίλυση όπως αυτή περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3 και καταλήγει στον υπολογισμό των τιμών των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης.

#### **A.1 Τα Αρχεία Εισόδου**

Τα αρχεία εισόδου είναι απαραίτητα για την δήλωση της τοπολογίας του συστήματος και αποτελούν βάση για την υλοποίηση του πρώτου τμήματος.

Τα αρχεία εισόδου είναι τρία. Κατά τη δημιουργία του αντικειμένου του ενεργειακού συστήματος `system` δηλώνονται τα ονόματα τους με το ακόλουθο `Format`.

```
System syst("System3.1.txt", "System3.1_Critical_Flows.txt", "System3.1_Compositions.txt");
```

Τα ονόματα που θα χρησιμοποιηθούν υπόκεινται στην ευχέρεια του χρήστη αλλά η σειρά με την οποία θα δηλωθούν είναι συγκεκριμένη και για το λόγο αυτό στην ακόλουθη ανάλυση θα τα ονομάσουμε πρώτο, δεύτερο και τρίτο αρχείο αντίστοιχα.

### **A.1.1 Περιγραφή του αρχείου εισόδου *System #.txt***

Το πρώτο αρχείο εισόδου *System #.txt* περιλαμβάνει όλη την πληροφορία η οποία είναι απαραίτητη για να προσδιοριστεί η τοπολογία του ενεργειακού συστήματος και να αποθηκευτεί κατάλληλα στη δομή δεδομένων. Η δομή αυτού του αρχείου παρουσιάζεται στο Σχ. Α.1.

Για τη δημιουργία του αρχείου αυτού είναι απαραίτητη η ανάλυση του εκάστοτε ενεργειακού συστήματος ώστε να διαμορφωθεί το διάγραμμα μοντελοποίησης, δηλαδή να προσδιοριστούν τα εξαρτήματα που το αποτελούν και ο τρόπος με τον οποίο είναι συνδεδεμένα, είτε με ροές ενέργειας είτε με ροές μάζας. Για την μοντελοποίηση χρησιμοποιούνται τα στοιχειώδη εξαρτήματα που φαίνονται στον Πίνακα 2.2. Στο πρώτο αρχείο ο χρήστης αποτυπώνει την τοπολογία του διαγράμματος μοντελοποίησης χρησιμοποιώντας τις λέξεις κλειδιά του Πίνακα 2.2 οι οποίες περιγράφουν κάθε ένα από τα στοιχειώδη εξαρτήματα του Πίνακα 2.2. Τις λέξεις κλειδιά ακολουθεί ο ειδικός χαρακτήρας “-“ ο οποίος διαχωρίζει τον τύπο του εξαρτήματος από την ταυτότητα του, τον αριθμό του. Κάθε γραμμή του πρώτου αρχείου δηλώνει μια υπαρκτή ροή ενέργειας ή μάζας του διαγράμματος μοντελοποίησης. Κατά τη δήλωση μιας ροής κατά αυτό τον τρόπο γίνονται αυτόματα οι ακόλουθες ενέργειες από το λογισμικό :

- Εξετάζεται η ύπαρξη στη δομή κάποιου εκ των δύο εξαρτημάτων που χαρακτηρίζουν τη ροή. Σε περίπτωση που κάποιο εκ των δύο δεν έχει δημιουργηθεί προγενέστερα, δημιουργείται αντικείμενο τύπου KOMBOΣ στο οποίο αποδίδονται οι ιδιότητες που περιγράφονται στην Ενότητα 2.2.2 ανάλογα με το δοθέν όνομα από το χρήστη και αποθηκεύονται στη δομή δεδομένων.
- Δημιουργείται αντικείμενο κλάσης AKMH που αντιστοιχεί στη ροή η οποία ενώνει τα δύο αντικείμενα της κλάσης KOMBOΣ. Αφού δημιουργηθεί το αντικείμενο κλάσης AKMH αυτόματα προσδίδονται σε αυτό οι ιδιότητες που περιγράφονται στην Ενότητα 2.2.1 με βάση τα εξαρτήματα τα οποία συνδέει.

Παρατηρήσεις :

- Η ροή εξέρχεται από το πρώτο εξάρτημα κάθε γραμμής και εισέρχεται στο δεύτερο εξάρτημα της γραμμής.
- Τα αντικείμενα των κόμβων του περιβάλλοντος που αναφέρονται στην Ενότητα 2.2.2 δημιουργούνται αυτόματα με τη δημιουργία της κλάσης ΣΥΣΤΗΜΑ. Το αντικείμενο της κλάσης AKMH που συνδέει τον μείκτη του περιβάλλοντος με τον διαχωριστή του περιβάλλοντος δημιουργείται επίσης αυτόματα.

- Τα αντικείμενα των ροών που προέρχονται και καταλήγουν στο περιβάλλον δημιουργούνται αυτόματα μετά το πέρας της ανάγνωσης του πρώτου αρχείου.
- Αφού η τοπολογία του συστήματος αποθηκευτεί στη δομή δεδομένων αυτόματα προσδιορίζονται οι τύποι των ροών που αφορούν τους γράφους ενέργειας και μάζας.
- Σε περίπτωση που το σύστημα περιλαμβάνει εξάρτημα τύπου Τύμπανο DRUM, η ροή που περιέχει το κορεσμένο νερό πρέπει να δηλώνεται πριν από τη ροή που περιέχει τον κορεσμένο ατμό.

AIR_COMPRESSOR-1	GAS_COOLER-1
GAS_COOLER-1	AIR_COMPRESSOR-2
AIR_COMPRESSOR-2	GAS_PREHEATER-1
GAS_PREHEATER-1	COMBUSTOR-1
COMBUSTOR-1	GASTURBINE-1
GASTURBINE-1	GASTURBINE-2
GASTURBINE-1	AIR_COMPRESSOR-2
GASTURBINE-2	GASTURBINE-3
GASTURBINE-2	AIR_COMPRESSOR-1
GASTURBINE-3	GAS_COOLER-2
GASTURBINE-3	GENERATOR-1
GAS_COOLER-2	GAS_PREHEATER-1
GAS_COOLER-2	GAS_COOLER-3
GAS_COOLER-3	RANKINE_EVAPORATOR-1
GAS_COOLER-3	GAS_COOLER-4
GAS_COOLER-4	RANKINE_PREHEATER-1
RANKINE_PREHEATER-1	RANKINE_EVAPORATOR-1

Σχ. Α.1 Το αρχείο εισόδου *System #.txt*.

### **A.1.2 Περιγραφή του αρχείου εισόδου *System#\_Critical\_Flows.txt***

Το αρχείο εισόδου *System#\_Critical\_Flows.txt* περιλαμβάνει δηλώσεις ροών μάζας και ενέργειας των οποίων η παροχή μάζας, ειδική ενθαλπία και παροχή ενθαλπίας είτε είναι γνωστές σταθερές του συστήματος προς βελτιστοποίηση ή είτε πρέπει να προσδιοριστούν ως ανεξάρτητες παράμετροι βελτιστοποίησης όπως υπαγορεύεται στην Ενότητα 3.3.2. Τέτοιες σταθερές μπορεί να είναι η ειδική ενθαλπία του αέρα και του νερού που εισέρχεται στο σύστημα. Στο πρόβλημα βελτιστοποίησης του προβλήματος Β σταθερές αποτελούν επίσης η ενθαλπία και η παροχή μάζας του καυσίμου στο εξάρτημα COMBUSTOR-1. Στην περίπτωση

που θέλουμε να δηλώσουμε ροή μάζας πρέπει να προσδιορισθεί η τιμή της παροχής μάζας και της ειδικής ενθαλπίας της ροής αυτής είτε ως σταθερές είτε ως μεταβλητές. Στην περίπτωση που θέλουμε να δηλώσουμε ροή ενέργειας πρέπει να προσδιορισθεί μόνο η τιμή της παροχής ενθαλπίας της ροής αυτής είτε ως σταθερά, είτε ως μεταβλητή. Κάθε γραμμή του δεύτερου αρχείου αποτελείται από πέντε στοιχεία. Το πρώτο στοιχείο εκφράζει το είδος της τιμής της ροής που θέλουμε να προσδιορίσουμε. Στην περίπτωση ροής μάζας λαμβάνει τις δύο λέξεις κλειδιά MASS [kg/s] και ENERGY [kJ/kg] αντίστοιχα. Στην περίπτωση ροής μάζας λαμβάνει την λέξη ENERGY [kJ/s]. Τα στοιχεία δύο και τρία χαρακτηρίζουν την ροή του συστήματος μοντελοποίησης με τρόπο όμοιο με το πρώτο αρχείο. Σε περίπτωση δήλωσης ροής μάζας το τέταρτο στοιχείο περιλαμβάνει την τιμή της ροής μάζας σε kg/s ή της ειδικής ενθαλπίας σε kJ/kg. Σε περίπτωση δήλωσης ροής ενέργειας το τέταρτο στοιχείο περιλαμβάνει την τιμή της παροχής ενθαλπίας σε kJ/s. Το πέμπτο στοιχείο λαμβάνει τις λέξεις κλειδιά CONST και PARAM. Με CONST δηλώνονται οι τιμές των ροών οι οποίες δε μεταβάλλονται κατά τη βελτιστοποίηση ενώ με τη λέξη κλειδί PARAM δηλώνονται οι ροές των οποίων η αντίστοιχη τιμή χρήζει βελτιστοποίησης. Οι ροές PARAM επιλέγονται όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 3.3.2 και η τιμή της ροής μάζας ή ενθαλπίας που λαμβάνουν ως είσοδο στο τέταρτο στοιχείο αποτελεί αρχική τιμή κατά την έναρξη του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Η δομή αυτού του αρχείου παρουσιάζεται στο Σχ. Α.2.

ENERGY	ENVIRONMENT_SPLITTER-1	RANKINE_PREHEATER-1	211	CONST
ENERGY	ENVIRONMENT_SPLITTER-1	COMBUSTOR-1	47000	CONST
ENERGY	ENVIRONMENT_SPLITTER-1	AIR_COMPRESSOR-1	303	CONST
MASS	ENVIRONMENT_SPLITTER-1	RANKINE_PREHEATER-1	4	CONST
MASS	ENVIRONMENT_SPLITTER-1	COMBUSTOR-1	1.5	CONST
MASS	ENVIRONMENT_SPLITTER-1	AIR_COMPRESSOR-1	30	PARAM

Σχ. Α.2 Το αρχείο εισόδου *System#\_Critical\_Flows.txt*.

Με έναρξη της ροής μάζας που δηλώνονται στο δεύτερο αρχείο το λογισμικό διατρέχει το γράφο της μάζας του μοντελοποιημένου συστήματος και δημιουργεί την αντίστοιχη δομή αλυσίδων πιέσεων όπως αυτή περιγράφηκε στην Ενότητα 3.4.

### A.1.3 Περιγραφή του αρχείου εισόδου *System#\_Compositions.txt*

Το αρχείο εισόδου *System#\_Compositions.txt* περιέχει τη σύσταση του αέρα κ.ο. και τη στοιχειομετρική σύσταση του καυσίμου που εισέρχονται στο ενεργειακό σύστημα. Η δομή του αρχείου αυτού για το ενεργειακό σύστημα της Εφαρμογής Β φαίνεται στο Σχ. Α.3.

FUEL	FUEL	0.75	0.25	0	0	0
AIR	AIR	0.7782	0.2068	0.0003	0.0147	0

Σχ. Α.3 Το αρχείο εισόδου *System#\_Compositions.txt*.

Οι λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιούνται είναι AIR για τις ροές αέρα και FUEL για τις ροές καυσίμου. Κατά τη δήλωση της ροής καυσίμου λαμβάνουμε ως συστατικά του καυσίμου τα : C H O N S. Για παράδειγμα στο Σχ. Α.3 φαίνεται η στοιχειομετρική σύσταση του φυσικού αερίου CH<sub>4</sub>. Κατά τη δήλωση της ροής αέρα λαμβάνουμε ως συστατικά του καυσίμου τα : N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>. Με την χρήση του αρχείου αυτού υπολογίζονται θερμοδυναμικές ιδιότητες του αέρα και προσδιορίζεται η σύσταση των καυσαερίων όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 4.2.2.

### A.1.4 Αρχείο εισόδου τύπου **HEADER**

Το αρχείο αυτό έχει όνομα constants.h και είναι ενσωματωμένο στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε. Το αρχείο αυτό χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των εξαρτημάτων από τα οποία αποτελείται το σύστημα (Ενότητα 4.4). Στα Σχ. Α.4, Α.5 φαίνονται τμήματα του αρχείου HEADER που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή Β.

```
//-----ENVIRONMENT-----
const double Pair=1.025;      //[Bar]
const double Pwater=15;      //[Bar]
//-----GAS_COOLER-----
//DEFAULT CONSTANTS//
const double GAS_COOLER_k=0.02/100;
const double GAS_COOLER_DT=15;
const double GAS_COOLER_Tout_envi=100+273.15;
const double GAS_COOLER_Tout_min=298.15;
double GAS_COOLER_k_SPEC[20]={-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1};
double GAS_COOLER_DT_SPEC[20]={-1,-1,-1,40,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1};
double GAS_COOLER_Tout_envi_SPEC[20]={-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1};
double GAS_COOLER_Tout_min_SPEC[20]={-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1};
//-----GAS_TURBINE-----
```

```
//DEFAULT CONSTANTS//
const double GAS_TURBINE_n_max=0.91;
const double GAS_TURBINE_T_in_max=1800; //[K]
double GAS_TURBINE_n_max_SPEC[20]={-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1};
double GAS_TURBINE_T_in_max_SPEC[20]={-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1};
```

Σχ. A.4 Το αρχείο εισόδου *constants.h*.

Για καλύτερη κατανόηση του αρχείου αυτού αναλύεται η παρακάτω γραμμή κώδικα.

```
double GAS_COOLER_DT_SPEC[20]={-1,-1,-1,40,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1};
```

Το κάθε στοιχείο του διανύσματος αντιστοιχεί στον αριθμό του αντίστοιχου εξαρτήματος ενώ σημειώνεται ότι το πρώτο στοιχείο αντιστοιχεί στο 0. Στην προκειμένη περίπτωση το εξάρτημα GAS\_COOLER-3 έχει τιμή  $\Delta T = 40$ . Στο αρχείο αυτό περιλαμβάνεται και η δήλωση των ορίων των μεταβλητών (Πίνακας 5.5, Πίνακας 5.6) σε περίπτωση που αυτές χρησιμοποιούνται από το πρόβλημα βελτιστοποίησης όπως αυτό έχει σχεδιαστεί Σχ. A.5. Στην περίπτωση της εφαρμογής B έχει νόημα να προσδιοριστούν οι τιμές των Air\_mass\_MAX, Air\_mass\_MIN, Pressure\_MAX και Pressure\_MIN. Οι τιμές των λοιπών ορίων δεν επηρεάζουν το πρόβλημα βελτιστοποίησης της εφαρμογής B.

```
//-----VARIABLE MARGINS-----
//-----
const double Spec_Enthalpy_MAX=5000; //[kJ/kg]
const double Spec_Enthalpy_MIN=20; //[kJ/kg]
const double Air_mass_MAX=100;    //[Kg/s]
const double Air_mass_MIN=20;    //[Kg/s]
const double Water_mass_MAX=5;   //[Kg/s]
const double Water_mass_MIN=1;   //[Kg/s]
const double Fuel_mass_MAX=8;    //[Kg/s]
const double Fuel_mass_MIN=0.5;  //[Kg/s]

const double Pressure_MAX=100;   //[bar]
const double Pressure_MIN=0.005; //[bar]
//-----
```

Σχ. A.5 Το αρχείο εισόδου *constants.h*.

## **A.2 Τα Αρχεία Εξόδου**

Τα αρχεία εξόδου είναι αρχεία τύπου .txt, ο ρόλος τους είναι να πιστοποιήσουν στο χρήστη τη σωστή λειτουργία του προγράμματος και να του δώσουν επαρκή εποπτεία στα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης. Κατά τον τρόπο αυτό τα αρχεία εξόδου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Αυτές είναι :

- Τα αρχεία που αποτυπώνουν τη δομή του διαγράμματος μοντελοποίησης
- Τα αρχεία που περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης

Τα αρχεία εξόδου της εφαρμογής B παρουσιάζονται στα Σχήματα A.6-A.13

### **A.2.1 Τα αρχεία που αποτυπώνουν τη δομή του διαγράμματος μοντελοποίησης**

Τα αρχεία αυτά συναντώνται στο πρώτο τμήμα του αλγορίθμου που ευθύνεται για την αποθήκευση της τοπολογίας του συστήματος στη δομή δεδομένων του γράφου μάζας και ενέργειας και τη δημιουργία της βοηθητικής δομής των αλυσίδων.

#### **A.2.1.1 Το αρχείο *SYSTEM\_OUTPUT.txt***

Μετά την ανάγνωση, μετάφραση και υλοποίηση του πρώτου αρχείου εισόδου παράγεται αρχείο εξόδου το οποίο πιστοποιεί την σωστή υλοποίηση της τοπολογίας. Το αρχείο αυτό ονομάζεται SYSTEM\_OUTPUT και περιλαμβάνει λίστα με τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν, λίστα με όλες τις ροές που σχηματίζονται και τους τύπους τους. Τέλος το αρχείο αυτό περιλαμβάνει τους τύπους των ροών που αφορούν τους γράφους ενέργειας και μάζας (Ενότητα A2.1.1).

Το αρχείο SYSTEM\_OUTPUT.txt για το σύστημα της εφαρμογής B φαίνεται στο Σχ. A.6.

#### **A.2.1.2 Το αρχείο *PRESSURE\_CHAINS.txt***

Μετα τη δημιουργία της βοηθητικής δομής των αλυσίδων πιέσεων παράγεται αρχείο εξόδου PRESSURE\_CHAINS το οποίο περιγράφει τη δομή αυτή. Το αρχείο PRESSURE\_CHAINS.txt για το σύστημα της εφαρμογής B φαίνεται στο Σχ. A.7.

### **A.2.2 Τα αρχεία που περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης**

Τα αρχεία που περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης παράγονται κατά την διάρκεια της μαθηματική επίλυσης και του υπολογισμού των θερμοδυναμικών περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει των ανεξάρτητων μεταβλητών όπως περιγράφηκε στα Κεφάλαια 3 και 4. Η διαδικασία της μαθηματικής επίλυσης αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά βήματα :

1. Απόδοση τιμών στις ανεξάρτητες μεταβλητές
2. Υπολογισμός της τιμής της πίεσης σε όλες τις ροές μάζας
3. Επίλυση γραμμικού συστήματος διαμοιρασμού ενέργειας και υπολογισμός της παροχής ενέργειας σε όλες τις ροές
4. Επίλυση γραμμικού συστήματος διαμοιρασμού μάζας και υπολογισμός της παροχής μάζας σε όλες τις ροές μάζας
5. Υπολογισμός της σύστασης αέρα-καυσαερίου σε όλες τις ροές μάζας με χρήση των εξισώσεων καύσης
6. Υπολογισμός λοιπών θερμοδυναμικών ιδιοτήτων των ροών μάζας
7. Υπολογισμός των τιμών των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης

#### ***A.2.2.1 Τα αρχεία DENDRITES ENERGEIAS, DENDRITES MAZAS και LINEAR\_SYSTEM***

Μετά την υλοποίηση του βήματος 4 παράγονται αρχεία εξόδου DENDITES ENERGEIAS, DENDRITES MAZAS τα οποία περιέχουν τις τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών  $\alpha$  και  $\beta$  και αποτυπώνουν τον διαμοιρασμό της ενέργειας και της μάζας μεταξύ των Δενδριτών συναρτήσεων των ανεξάρτητων μεταβλητών  $\alpha$  και  $\beta$  όπως αυτός περιγράφεται στην Ενότητα 3.3. Επίσης στα αρχεία αυτά φαίνονται οι θέσεις των ποσοστών διαμοιρασμού  $P_{i,j}$  της Εξ. (3.7). Τέλος παράγεται αρχείο LINEAR\_SYSTEM το οποίο αποτυπώνει τα γραμμικά συστήματα ενέργειας και μάζας της Εξ. (3.12) προς επίλυση. Τα αρχεία αυτά φαίνονται στα Σχ. A.8-A.10

#### ***A.2.2.2 Το αρχείο COMPOSITIONS***

Μετά την υλοποίηση του βήματος 5 παράγεται αρχείο εξόδου COMPOSITIONS το οποίο περιέχει την πληροφορία σχετικά με τη σύσταση του καυσίμου, του αέρα και των καυσαερίων, Σχ. A.11.

#### ***A.2.2.3 Το αρχείο THERMODYNAMIC\_VALUES***

Μετά την υλοποίηση του βήματος 6 παράγεται αρχείο THERMODYNAMIC\_VALUES το οποίο περιέχει τις τιμές όλων των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων των ροών μάζας και τις τιμές της παροχής ενέργειας των ροών ενέργειας, Σχ. A.12.



#### ***A.2.2.4 Το αρχείο CONSTRAIN\_VALIDATION***

Μετά την υλοποίηση του βήματος 7 παράγεται το αρχείο CONSTRAIN\_VALIDATION το οποίο περιέχει το σύνολο των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν για την εύρεση των τιμών των θερμοδυναμικών περιορισμών που περιγράφηκαν στην Ενότητα 4.3 και της αντικειμενικής συνάρτησης του εκάστοτε συστήματος. Το αρχείο αυτό επιβεβαιώνει πως επιτεύχθηκαν οι μέγιστοι βαθμοί απόδοσης των συμπιεστών, στροβίλων, η μέγιστη θερμοκρασία κύκλου κ.α. Το αρχείο CONSTRAIN\_VALIDATION παρουσιάζεται στο Σχ. Α.13.



GAS_COOLER-3	->	GAS_COOLER-4	mass	gas	SS	mMM1
RANKINE_PREHEATER-1	->	RANKINE_EVAPORATOR-1	mass	water	MM	mSM1
RANKINE_EVAPORATOR-1	->	ENVIRONMENT_MIXER-1	mass	water	MM	mSM1
GAS_COOLER-4	->	ENVIRONMENT_MIXER-1	mass	gas	SM	mMM1
ENVIRONMENT_SPLITTER-1	->	AIR_COMPRESSOR-1	mass	air	SM	mSM
ENVIRONMENT_SPLITTER-1	->	COMBUSTOR-1	mass	fuel	SM	mSM
ENVIRONMENT_SPLITTER-1	->	RANKINE_PREHEATER-1	mass	water	SM	mSM
GASTURBINE-1	->	AIR_COMPRESSOR-2	energy	mechanical	SM	NONE
GASTURBINE-2	->	AIR_COMPRESSOR-1	energy	mechanical	SM	NONE
GASTURBINE-3	->	GENERATOR-1	energy	mechanical	SM	NONE
GAS_COOLER-2	->	GAS_PREHEATER-1	energy	thermal	SM	NONE
GAS_COOLER-3	->	RANKINE_EVAPORATOR-1	energy	thermal	SM	NONE
GAS_COOLER-4	->	RANKINE_PREHEATER-1	energy	thermal	SM	NONE
GAS_COOLER-1	->	ENVIRONMENT_MIXER-1	energy	thermal	SM	NONE
GENERATOR-1	->	ENVIRONMENT_MIXER-1	energy	electric	SM1	NONE
* MS FLOWS *						
ENVIRONMENT_MIXER-1	->	ENVIRONMENT_SPLITTER-1				
AIR_COMPRESSOR-1	->	GAS_COOLER-1				
COMBUSTOR-1	->	GASTURBINE-1				
* SM FLOWS *						
GAS_COOLER-1	->	AIR_COMPRESSOR-2				
GASTURBINE-1	->	AIR_COMPRESSOR-2				
GASTURBINE-2	->	AIR_COMPRESSOR-1				
GASTURBINE-3	->	GENERATOR-1				
GAS_COOLER-2	->	GAS_PREHEATER-1				
GAS_COOLER-3	->	RANKINE_EVAPORATOR-1				
GAS_COOLER-4	->	RANKINE_PREHEATER-1				
GAS_COOLER-1	->	ENVIRONMENT_MIXER-1				
GAS_COOLER-4	->	ENVIRONMENT_MIXER-1				
ENVIRONMENT_SPLITTER-1	->	AIR_COMPRESSOR-1				
ENVIRONMENT_SPLITTER-1	->	COMBUSTOR-1				
ENVIRONMENT_SPLITTER-1	->	RANKINE_PREHEATER-1				
* MM FLOWS *						
AIR_COMPRESSOR-2	->	GAS_PREHEATER-1				
GAS_PREHEATER-1	->	COMBUSTOR-1				
RANKINE_PREHEATER-1	->	RANKINE_EVAPORATOR-1				
RANKINE_EVAPORATOR-1	->	ENVIRONMENT_MIXER-1				
* SS FLOWS *						
GASTURBINE-1	->	GASTURBINE-2				
GASTURBINE-2	->	GASTURBINE-3				
GASTURBINE-3	->	GAS_COOLER-2				
GAS_COOLER-2	->	GAS_COOLER-3				
GAS_COOLER-3	->	GAS_COOLER-4				

Σχ. A.6 Το αρχείο εξόδου SYSTEM\_OUTPUT.txt

```

*****
*                               Pressure_Chains                               *
*****
+-----+-----+-----+
|                               CHAIN - 1 |
+-----+-----+-----+
| ENVIRONMENT_SPLITTER-1 - RANKINE_PREHEATER-1 |
| RANKINE_PREHEATER-1 - RANKINE_EVAPORATOR-1 |
| RANKINE_EVAPORATOR-1 - ENVIRONMENT_MIXER-1 |
+-----+-----+-----+
|                               CHAIN - 2 |
+-----+-----+-----+
|                               MAX P - MAX P |
| ENVIRONMENT_SPLITTER-1 - COMBUSTOR-1 |
|                               MIN P - MIN P |
+-----+-----+-----+
|                               CHAIN - 3 |
+-----+-----+-----+
|                               MAX P - MAX P |
| AIR_COMPRESSOR-1 - GAS_COOLER-1 |
| ENVIRONMENT_SPLITTER-1 - AIR_COMPRESSOR-1 |
+-----+-----+-----+
|                               CHAIN - 4 |
+-----+-----+-----+
| AIR_COMPRESSOR-1 - GAS_COOLER-1 |
| GAS_COOLER-1 - AIR_COMPRESSOR-2 |
|                               MIN P - MIN P |
+-----+-----+-----+
|                               CHAIN - 5 |
+-----+-----+-----+
|                               MAX P - MAX P |
| AIR_COMPRESSOR-2 - GAS_PREHEATER-1 |
| GAS_COOLER-1 - AIR_COMPRESSOR-2 |
+-----+-----+-----+
|                               CHAIN - 6 |
+-----+-----+-----+
| AIR_COMPRESSOR-2 - GAS_PREHEATER-1 |
| GAS_PREHEATER-1 - COMBUSTOR-1 |
| COMBUSTOR-1 - GASTURBINE-1 |
| GASTURBINE-1 - GASTURBINE-2 |
| GASTURBINE-2 - GASTURBINE-3 |
| GASTURBINE-3 - GAS_COOLER-2 |
| GAS_COOLER-2 - GAS_COOLER-3 |
| GAS_COOLER-3 - GAS_COOLER-4 |
| GAS_COOLER-4 - ENVIRONMENT_MIXER-1 |
+-----+-----+-----+

```

Σχ. Α.7 Το αρχείο εξόδου PRESSURE\_CHAINS.txt

SPLITTER		ENTHALPY FACTOR
ENVIRONMENT_SPLITTER-1		0.22662 0.76423 0.00915
GAS_COOLER-1		0.80624 0.19376
GASTURBINE-1		0.90262 0.09738
GASTURBINE-2		0.96325 0.03675
GASTURBINE-3		0.66962 0.33038
GAS_COOLER-2		0.51269 0.48731
GAS_COOLER-3		0.18137 0.81863
GAS_COOLER-4		0.07214 0.92786

MS		To SM		PERCENT	j	i
ENVIRONMENT_MIXER-1	ENVIRONMENT_SPLITTER-1	ENVIRONMENT_SPLITTER-1	AIR_COMPRESSOR-1	0.22662	0	1
		ENVIRONMENT_SPLITTER-1	COMBUSTOR-1	0.76423	0	2
		ENVIRONMENT_SPLITTER-1	RANKINE_PREHEATER-1	0.00915	0	0
AIR_COMPRESSOR-1	GAS_COOLER-1	GAS_COOLER-1	AIR_COMPRESSOR-2	0.80624	1	2
		GAS_COOLER-1	ENVIRONMENT_MIXER-1	0.19376	1	0
COMBUSTOR-1	GASTURBINE-1	GASTURBINE-1	AIR_COMPRESSOR-2	0.09738	2	2
		GASTURBINE-2	AIR_COMPRESSOR-1	0.03317	2	1
		GASTURBINE-3	GENERATOR-1	0.28725	2	0
		GAS_COOLER-2	GAS_PREHEATER-1	0.29849	2	2
		GAS_COOLER-3	RANKINE_EVAPORATOR-1	0.05146	2	0
		GAS_COOLER-4	RANKINE_PREHEATER-1	0.01675	2	0
		GAS_COOLER-4	ENVIRONMENT_MIXER-1	0.21550	2	0

MS		From SM		PERCENT	j	i
ENVIRONMENT_MIXER-1	ENVIRONMENT_SPLITTER-1	GASTURBINE-3	GENERATOR-1	0.28725	2	0
		GAS_COOLER-3	RANKINE_EVAPORATOR-1	0.05146	2	0
		GAS_COOLER-4	RANKINE_PREHEATER-1	0.01675	2	0
		GAS_COOLER-1	ENVIRONMENT_MIXER-1	0.19376	1	0
		GAS_COOLER-4	ENVIRONMENT_MIXER-1	0.21550	2	0
		ENVIRONMENT_SPLITTER-1	RANKINE_PREHEATER-1	0.00915	0	0
AIR_COMPRESSOR-1	GAS_COOLER-1	GASTURBINE-2	AIR_COMPRESSOR-1	0.03317	2	1
		ENVIRONMENT_SPLITTER-1	AIR_COMPRESSOR-1	0.22662	0	1
COMBUSTOR-1	GASTURBINE-1	GAS_COOLER-1	AIR_COMPRESSOR-2	0.80624	1	2
		GASTURBINE-1	AIR_COMPRESSOR-2	0.09738	2	2
		GAS_COOLER-2	GAS_PREHEATER-1	0.29849	2	2
		ENVIRONMENT_SPLITTER-1	COMBUSTOR-1	0.76423	0	2

Σχ. A.8 Το αρχείο εξόδου DENDRITES ENERGEIAS.txt

```

*****
*
*
*
*
*
*****

```

MSPLITTER	M FACTOR
ENVIRONMENT_SPLITTER-1	0.92617
	0.05370

```

*****

```

MASS_MS		TO MASS_SM		M_PERCENT	j	i
ENVIRONMENT_MIXER-1	ENVIRONMENT_SPLITTER-1	ENVIRONMENT_SPLITTER-1	AIR_COMPRESSOR-1	0.92617	0	0
		ENVIRONMENT_SPLITTER-1	COMBUSTOR-1	0.02014	0	0
		ENVIRONMENT_SPLITTER-1	RANKINE_PREHEATER-1	0.05370	0	0

```

*****

```

Mass_MS		From Mass_SM		M_PERCENT	j	i
ENVIRONMENT_MIXER-1	ENVIRONMENT_SPLITTER-1	ENVIRONMENT_SPLITTER-1	AIR_COMPRESSOR-1	0.92617	0	0
		ENVIRONMENT_SPLITTER-1	COMBUSTOR-1	0.02014	0	0
		ENVIRONMENT_SPLITTER-1	RANKINE_PREHEATER-1	0.05370	0	0

Σχ. Α.9 Το αρχείο εξόδου DENDRITES MAZAS.txt

```

*****
*
*      MATRISSES      *
*
*****

*      ENERGY MATRIX      *

+-----+-----+-----+
|0.00915|0.19376|0.57096|
+-----+-----+-----+
|0.22662|0.00000|0.03317|
+-----+-----+-----+
|0.76423|0.80624|0.39587|
+-----+-----+-----+

*LINEAR SYSTEM AX=B*

*      MATRIX A      *

+-----+-----+
|-1.00000| 0.03317|
+-----+-----+
| 0.80624|-0.60413|
+-----+-----+

*      MATRIX B      *

+-----+
| -20905.24718|
+-----+
| -70500.00000|
+-----+

*      SOLUTION X      *

+-----+
| 25924.10004|
+-----+
| 151293.37370|
+-----+

*MASS MA*

+-----+
|1.00000|
+-----+

*      mB      *

+-----+

*      X      *

+-----+

```

Σχ. Α.10 Το αρχείο εξόδου LINEAR\_SYSTEM.txt

```

*****
*                                     System Compositions                                     *
*****

```

COMP_FROM	COMP_TO	FLOW_TYPE	C	H	O	N	S
ENVIRONMENT_SPLITTER-1	-> COMBUSTOR-1	Fuel	0.75000	0.25000	0.00000	0.00000	0.00000

COMP_FROM	COMP_TO	FLOW_TYPE	N2	O2	CO2	H2O	SO2
AIR_COMPRESSOR-1	-> GAS_COOLER-1	Air	0.77820	0.20680	0.00030	0.01470	0.00000
GAS_COOLER-1	-> AIR_COMPRESSOR-2	Air	0.77820	0.20680	0.00030	0.01470	0.00000
AIR_COMPRESSOR-2	-> GAS_PREHEATER-1	Air	0.77820	0.20680	0.00030	0.01470	0.00000
GAS_PREHEATER-1	-> COMBUSTOR-1	Air	0.77820	0.20680	0.00030	0.01470	0.00000
COMBUSTOR-1	-> GASTURBINE-1	Gas	0.75478	0.11755	0.03810	0.08987	0.00000
GASTURBINE-1	-> GASTURBINE-2	Gas	0.75478	0.11755	0.03810	0.08987	0.00000
GASTURBINE-2	-> GASTURBINE-3	Gas	0.75478	0.11755	0.03810	0.08987	0.00000
GASTURBINE-3	-> GAS_COOLER-2	Gas	0.75478	0.11755	0.03810	0.08987	0.00000
GAS_COOLER-2	-> GAS_COOLER-3	Gas	0.75478	0.11755	0.03810	0.08987	0.00000
GAS_COOLER-3	-> GAS_COOLER-4	Gas	0.75478	0.11755	0.03810	0.08987	0.00000
GAS_COOLER-4	-> ENVIRONMENT_MIXER-1	Gas	0.75478	0.11755	0.03810	0.08987	0.00000
ENVIRONMENT_SPLITTER-1	-> AIR_COMPRESSOR-1	Air	0.77820	0.20680	0.00030	0.01470	0.00000

Σχ. A.11 Το αρχείο εξόδου COMPOSITIONS.txt

```

*****
*                                     System E,M,P,h,T,s values                                     *
*****

```

COMP_FROM	COMP_TO	FLOW_TYPE	FLOW_subtype	H (kJ/s)	m (Kg/s)	P (bar)	h (kJ/Kg)	T (K)	s (kJ/KgK)
ENVIRONMENT_MIXER-1	-> ENVIRONMENT_SPLITTER-1	mult	Env.	92249.247	74.494	0.000	0.000	0.000	0.000
AIR_COMPRESSOR-1	-> GAS_COOLER-1	mass	air	25924.100	68.994	2.021	375.743	369.379	6.808
GAS_COOLER-1	-> AIR_COMPRESSOR-2	mass	air	20900.919	68.994	2.020	302.937	298.150	6.588
AIR_COMPRESSOR-2	-> GAS_PREHEATER-1	mass	air	35633.875	68.994	11.167	516.476	505.339	6.642
GAS_PREHEATER-1	-> COMBUSTOR-1	mass	air	80793.374	68.994	11.082	1171.017	1092.565	7.556
COMBUSTOR-1	-> GASTURBINE-1	mass	gas	151293.374	70.494	11.027	2146.181	1800.000	8.520
GASTURBINE-1	-> GASTURBINE-2	mass	gas	136560.418	70.494	6.998	1937.186	1644.070	8.513
GASTURBINE-2	-> GASTURBINE-3	mass	gas	131541.565	70.494	5.938	1865.991	1590.470	8.511
GASTURBINE-3	-> GAS_COOLER-2	mass	gas	88082.855	70.494	1.027	1249.505	1112.565	8.501
GAS_COOLER-2	-> GAS_COOLER-3	mass	gas	42923.356	70.494	1.027	608.892	571.886	7.642
GAS_COOLER-3	-> GAS_COOLER-4	mass	gas	35138.182	70.494	1.027	498.455	471.506	7.420
RANKINE_PREHEATER-1	-> RANKINE_EVAPORATOR-1	mass	water	3378.868	4.000	15.000	844.717	471.454	2.315
RANKINE_EVAPORATOR-1	-> ENVIRONMENT_MIXER-1	mass	water	11164.042	4.000	15.000	2791.011	471.445	6.443
GAS_COOLER-4	-> ENVIRONMENT_MIXER-1	mass	gas	32603.314	70.494	1.025	462.496	438.362	7.339
ENVIRONMENT_SPLITTER-1	-> AIR_COMPRESSOR-1	mass	air	20905.247	68.994	1.025	303.000	298.212	6.785
ENVIRONMENT_SPLITTER-1	-> COMBUSTOR-1	mass	fuel	70500.000	1.500	0.088	47000.000	0.000	0.000
ENVIRONMENT_SPLITTER-1	-> RANKINE_PREHEATER-1	mass	water	844.000	4.000	15.000	211.000	323.249	0.704
GASTURBINE-1	-> AIR_COMPRESSOR-2	energy	mechanical	14732.956	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
GASTURBINE-2	-> AIR_COMPRESSOR-1	energy	mechanical	5018.853	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
GASTURBINE-3	-> GENERATOR-1	energy	mechanical	43458.710	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
GAS_COOLER-2	-> GAS_PREHEATER-1	energy	thermal	45159.499	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
GAS_COOLER-3	-> RANKINE_EVAPORATOR-1	energy	thermal	7785.174	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
GAS_COOLER-4	-> RANKINE_PREHEATER-1	energy	thermal	2534.868	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
GAS_COOLER-1	-> ENVIRONMENT_MIXER-1	energy	thermal	5023.181	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
GENERATOR-1	-> ENVIRONMENT_MIXER-1	energy	electric	43458.710	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Σχ. A.12 Το αρχείο εξόδου THERMODYNAMIC\_VALUES.txt



```

-----AIR_COMPRESSOR-1-----
---Isentropic Rate of Efficiency---
Pressure Ratio(Pout/Pin): 1.97202
Temperature Ratio(Tout/Tin): 1.23865
Gamma: 1.39592
Isentropic Rate of Efficiency MAX: 0.89
Isentropic Rate of Efficiency SUCCEEDED: 0.89
((rp^kappa)-1)- (nmax *(rt-1))=((1.97202^0.283626)-1)-(0.89*(1.23865-1))=3.52733e-15
-----GAS_COOLER-1-----
---Pressure Loss---
Pressure in: 2.02132 Bar
Pressure out: 2.0201 Bar
k Value Succeeded: 0.000600027
Qout*log(Pout/((1-kvalue)*Pin))=5023.18*log(2.0201/((1-0.0002)*2.02132))=-2.01021
---Air/Gas minimum temperature---
Temperature Out: 298.15 K
Temperature Min: 298.15 K
Tmin-Tout=298.15-298.15=2.67164e-12
-----AIR_COMPRESSOR-2-----
---Isentropic Rate of Efficiency---
Pressure Ratio(Pout/Pin): 5.52816
Temperature Ratio(Tout/Tin): 1.69492
Gamma: 1.39197
Isentropic Rate of Efficiency MAX: 0.89
Isentropic Rate of Efficiency SUCCEEDED: 0.89
((rp^kappa)-1)- (nmax *(rt-1))=((5.52816^0.281594)-1)-(0.89*(1.69492-1))=1.11219e-14
-----GAS_PREHEATER-1-----
---Temperature Difference---
Temperature in: 505.339 K
Temperature of Hot Flow: 571.886 K
Minimum Difference: 0
Qin*(Tin+DTmax-Thotflow)=45159.5*(505.339+0-571.886)=-3.00523e+06
---Pressure Loss---
Pressure in: 11.1675 Bar
Pressure out: 11.082 Bar
k Value Succeeded: 0.00765046
Qin*log(Pout/((1-kvalue)*Pin))=45159.5*log(11.082/((1-0.003)*11.1675))=-211.137
-----COMBUSTOR-1-----
---Pressure Loss---
Pressure in: 11.082 Bar
Pressure out: 11.0266 Bar
k Value Succeeded 0.005
log(Pout/((1-kvalue)*Pin))=log(11.0266/((1-0.005)*11.082))=-1.11022e-16
---Lamda Min---
Lamda Succeeded 2.67876
lambdamin-lambda=2.5-2.67876=-0.178758
-----GASTURBINE-1-----
---Isentropic Rate of Efficiency---
Pressure Ratio(Pin/Pout): 1.57558
Temperature Ratio(Tout/Tin): 0.913372
Gamma: 1.28212
Isentropic Rate of Efficiency MAX: 0.91
Isentropic Rate of Efficiency SUCCEEDED: 0.91
1-rt- (nmax*(1-rp^k))=1-0.913372- (0.91*(1-1.57558^0.220042))=-1.89922e-15
---Maximum Cycle Temperature---
Temperature IN: 1800 K
Temperature MAX: 1800 K
Tin-Tmax=1800-1800=-4.09273e-12
-----GASTURBINE-2-----
---Isentropic Rate of Efficiency---
Pressure Ratio(Pin/Pout): 1.17857
Temperature Ratio(Tout/Tin): 0.967398
Gamma: 1.28544
Isentropic Rate of Efficiency MAX: 0.91
Isentropic Rate of Efficiency SUCCEEDED: 0.91
1-rt- (nmax*(1-rp^k))=1-0.967398- (0.91*(1-1.17857^0.222055))=1.43884e-15
---Maximum Cycle Temperature---
Temperature IN: 1644.07 K
Temperature MAX: 1800 K
Tin-Tmax=1644.07-1800=-155.93
-----GASTURBINE-3-----
---Isentropic Rate of Efficiency---
Pressure Ratio(Pin/Pout): 5.78165
Temperature Ratio(Tout/Tin): 0.69952
Gamma: 1.29601
Isentropic Rate of Efficiency MAX: 0.91
Isentropic Rate of Efficiency SUCCEEDED: 0.91
1-rt- (nmax*(1-rp^k))=1-0.69952- (0.91*(1-5.78165^0.228401))=-1.10716e-15
---Maximum Cycle Temperature---

```

```

Temperature IN: 1590.47 K
Temperature MAX: 1800 K
Tin-Tmax=1590.47-1800=-209.53
-----GAS_COOLER-2-----
---Pressure Loss---
Pressure in: 1.02706 Bar
Pressure out: 1.02685 Bar
k Value Succeeded: 0.0002
  Qout*log(Pout/((1-kvalue)*Pin))=45159.5*log(1.02685/((1-0.0002)*1.02706))=-1.00274e-11
---Temperature Difference---
Temperature in: 1112.57 K
Temperature of Cold Flow: 1092.57 K
Minimum Difference: 20
  Qout*(-Tin+DTmax+Tcoldflow)=45159.5*(-1112.57+20+1092.57)=-1.23217e-07
-----GAS_COOLER-3-----
---Pressure Loss---
Pressure in: 1.02685 Bar
Pressure out: 1.02665 Bar
k Value Succeeded: 0.0002
  Qout*log(Pout/((1-kvalue)*Pin))=7785.17*log(1.02665/((1-0.0002)*1.02685))=0
---Temperature Difference---
Temperature in: 571.886 K
Temperature of Cold Flow: 471.445 K
Minimum Difference: 0
  Qout*(-Tin+DTmax+Tcoldflow)=7785.17*(-571.886+0+471.445)=-781950
-----RANKINE_EVAPORATOR-1-----
---Saturated Steam flows out of Evaporator---
Enthalpy of Saturated Steam(Pressure2791.01): 2791.01 kJ/kg
Hout-(Mout*hsteamsat)=11164-(4*2791.01)=-6.91216e-11
---Temperature Difference---
Temperature in: 471.454 K
Temperature of Hot Flow: 471.506 K
Minimum Difference: 0
  Qin*(Tsat+DTmax-Thotflow)=7785.17*(198.295+0-471.506)=-2.12699e+06
-----GAS_COOLER-4-----
---Pressure Loss---
Pressure in: 1.02665 Bar
Pressure out: 1.025 Bar
k Value Succeeded: 0.00160463
  Qout*log(Pout/((1-kvalue)*Pin))=2534.87*log(1.025/((1-0.0002)*1.02665))=-3.56376
---Gas Temperature to Environment ---
Temperature Out: 438.362 K
Temperature Min: 363 K
Tmin_envi-Tout=363-438.362=-75.362
---Temperature Difference---
Temperature in: 471.506 K
Temperature of Cold Flow: 471.454 K
Minimum Difference: 0
  Qout*(-Tin+DTmax+Tcoldflow)=2534.87*(-471.506+0+471.454)=-131.704
-----RANKINE_PREHEATER-1-----
---Temperature Difference---
Temperature in: 323.249 K
Temperature of Hot Flow: 438.362 K
Minimum Difference: 0
  Qin*(Tin+DTmax-Thotflow)=2534.87*(323.249+0-438.362)=-291796
---Pressure Loss---
Pressure in: 15 Bar
Pressure out: 15 Bar
k Value Succeeded: 0
  Qin*log(Pout/((1-kvalue)*Pin))=2534.87*log(15/((1-0)*15))=0
---Enthalpy Out lower than saturated water enthalpy---
Saturated water enthalpy (Pressure=15): 844.717 kJ/kg
Hout-(Mout*hwatersat)=3378.87-(4*844.717)=-2.36469e-11
---Fuel Enthalpy---
Fuel Energy :70500 kJ
---Generator Energy---
Generator Energy :43458.7 kJ
---Water Enthalpy---
Water Enthalpy :11164 kJ
---Efficiency Rate---
Hout/Hin=54622.8/70500=0.774791

```

Σχ. Α.13 Το αρχείο εξόδου CONSTRAINS\_VALIDATION.txt