

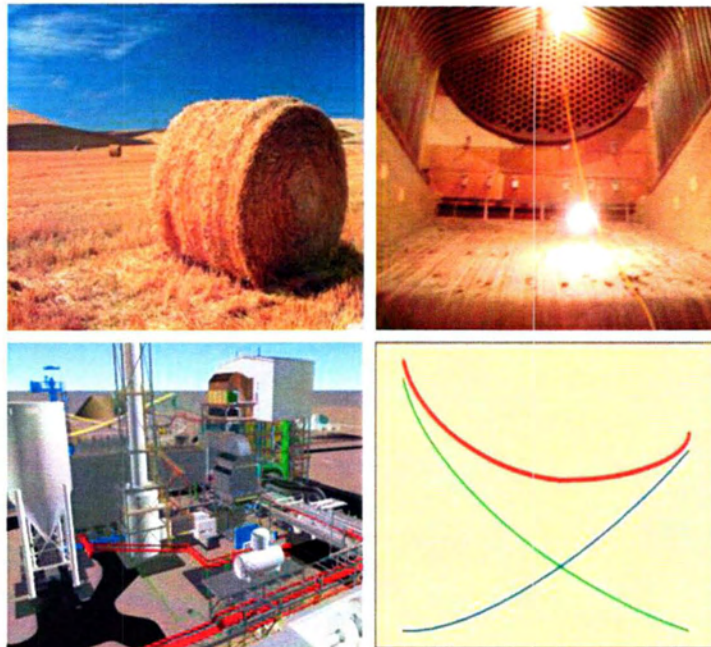
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Τεχνο-οικονομική ανάλυση εγκαταστάσεων αξιοποίησης βιομάζας
μέσω θερμικών μεθόδων**

υπό

ΜΠΕΛΛΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

2014



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 12884/1
Ημερ. Εισ.: 08-09-2014
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜ
2014
ΜΠΕ

© Μπέλλης Γεώργιος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Σταμάτης Αναστάσιος
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Λυμπερόπουλος Γεώργιος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Στο τέρμα μιας διαδρομής, η επίτευξη ενός στόχου αποτελεί καμπή για ένα νέο ξεκίνημα. Τότε είναι που κοιτάς πίσω και βλέπεις τη συνολική πορεία. Είναι η ώρα του αναστοχασμού, της αξιολόγησης, της κεφαλαιοποίησης της εμπειρίας. Τότε είναι που συνειδητοποιείς ποιοι άνθρωποι στάθηκαν δίπλα σου, ποιοι καθόρισαν τη διαδρομή, την καθοδήγησαν, την επηρέασαν, την υποστήριξαν και την έκαναν ένα ενδιαφέρον ταξίδι.

Αυτή η διπλωματική εργασία δε θα υπήρχε σήμερα, αν ο καθηγητής μας, ο κ. Τάσος Σταμάτης, δε μας είχε μπολιάσει με την αγάπη που τον διακρίνει για το αντικείμενο του. Του οφείλω την έμπνευση που μοιράστηκε μαζί μας και που χρειάστηκε για να ολοκληρωθεί το τεύχος που βρίσκεται στα χέρια σας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τους συνεπιβλέποντες. Τον κ. Νίκο Ανδρίτσο και τον κ. Γιώργο Λυμπερόπουλο, καθώς και όλους τους καθηγητές μας που μας έδωσαν το γνωστικό και επιστημονικό υπόβαθρο που χρειάστηκε για να ολοκληρωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου Βασίλη, Γιώργο και Βίκυ και κυρίως τον πατέρα μου για την υποστήριξη και την ανεκτικότητα του.

Μπέλλης Γιώργος

Τεχνο-οικονομική ανάλυση εγκαταστάσεων αξιοποίησης βιομάζας μέσω θερμικών μεθόδων

Μπέλλης Γεώργιος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2014

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Σταμάτης Αναστάσιος, Αναπληρωτής Καθηγητής
Εφαρμοσμένης θερμοδυναμικής – θερμικών σταθμών

Περίληψη

Εκτός του κεφαλαίου της εισαγωγής, η εργασία ξεκινάει παρουσιάζοντας στο 2^ο κεφάλαιο τα χαρακτηριστικά των ειδών βιομάζας που μπορούν να αξιοποιούνται μέσω θερμικών μεθόδων. Παρατίθενται αναλυτικά δεδομένα για τα πιο συνηθισμένα είδη και γίνεται ανάλυση των χαρακτηριστικών τους και της επιρροής αυτών στον τρόπο λειτουργίας των εγκαταστάσεων αξιοποίησης βιομάζας μέσω θερμικών μεθόδων.

Στη συνέχεια, στο 3^ο πλέον κεφάλαιο, περιγράφονται οι τρεις βασικές θερμικές μέθοδοι αξιοποίησης βιομάζας. Παρουσιάζονται στοιχεία σχετικά με τη λειτουργία τους και δίδεται το πλαίσιο μιας λεπτομερέστερης ανάλυσης των εγκαταστάσεων άμεσης καύσης και αεριοποίησης.

Στο 4^ο κεφάλαιο συντελείται μια διαδικασία μοντελοποίησης των κυριότερων μηχανολογικών στοιχείων που απαρτίζουν τις προαναφερθέντες εγκαταστάσεις. Επίσης, παρουσιάζεται μοντέλο που εξυπηρετεί την παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών της βιομάζας. Γίνονται τέλος παραδοχές σε σχέση με τα είδη βιομάζας που αξιοποιούν οι μοντελοποιημένες εγκαταστάσεις, διακρίνοντας τις περιπτώσεις αξιοποίησης δύο διαφορετικών ειδών, υπό την ονομασία "σενάριο Α" και "σενάριο Β".

Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η μεθόδευση της μοντελοποίησης λειτουργίας των εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, από βιομάζα, μέσω θερμικών μεθόδων. Η μοντελοποίηση επιτυγχάνεται με το σχηματισμό συστημάτων εξισώσεων, στα οποία εφαρμόζονται οι αντίστοιχες παραδοχές και συμμετέχουν οι κατάλληλες αναλυτικές εξισώσεις που διατυπώθηκαν.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται όλα τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται αφενός για τη σύνδεση των λειτουργικών χαρακτηριστικών των μοντελοποιημένων εγκαταστάσεων, με στοιχεία κόστους και αφετέρου για την επίτευξη της διαδικασίας της βελτιστοποίησης των εγκαταστάσεων αυτών.

Τα επόμενα βήματα περιγράφονται στο 6^ο κεφάλαιο. Εκεί παρουσιάζονται οι κατάλληλες παραδοχές, έτσι ώστε οι μοντελοποιημένες εγκαταστάσεις να μορφοποιηθούν ως προβλήματα βελτιστοποίησης. Έπειτα, με την επίλυση των προβλημάτων, παρατίθενται στα επόμενα κεφάλαια τα αποτελέσματα.

Ο βέλτιστος σχεδιασμός των εγκαταστάσεων που τελείται με την πρόοδο των παραπάνω βημάτων ανήκει στην περιοχή της υπολογιστικής μελέτης ενός έργου και οι εκτιμήσεις που προκύπτουν χαρακτηρίζονται από σφάλμα της τάξης του $\pm 30\%$, όπως παρουσιάζεται στο 5^ο κεφάλαιο. Στόχος της εργασίας τελικά δεν είναι η ακριβής κοστολόγηση των εγκαταστάσεων που σχεδιάζονται, αλλά:

1. Η ανάδειξη της επιρροής των χαρακτηριστικών της βιομάζας σε κάθε είδος εγκατάστασης.
2. Η ανάδειξη και σύγκριση των κύριων λειτουργικών και κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των συγκεκριμένων εγκαταστάσεων.
3. Η εκτίμηση δεδομένων που σχετίζονται με την τάξη μεγέθους και το κόστος.

Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας είναι ο ηλεκτρονικός υπολογιστής και τα προγράμματα EES (Engineering Equation Solver), Microsoft Word, Excell, Visio και Powerpoint.

Πίνακας Περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.1. Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΣΗΜΕΡΙΝΟ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟ	14
1.2 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	15
1.3. ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΧΡΗΣΗΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	18
1.4. ΠΟΛΙΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΠΟΦΥΓΗ ΧΡΗΣΗΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	21
1.5. Η ΒΙΟΜΑΖΑ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΑΛΛΕΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	23
1.6 ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΠΡΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ.....	24
2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	25
2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΙΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ	25
2.1.1 Περιεκτικότητα σε υγρασία	25
2.1.2 Χαρακτηριστικά τέφρας	27
2.1.3 Σύσταση βιομάζας σε ξηρή βάση, χωρίς τέφρα	38
2.1.4 Θερμογόνος αξία	39
2.1.5 Αναλογία πτητικών συστατικών – σταθερού άνθρακα.....	41
2.1.6 Χύδην πυκνότητα	42
2.1.7 Τα χαρακτηριστικά των κύριων τμημάτων των φυτών	42
2.1.8 Ζητήματα ασφάλειας.....	43
2.2 ΠΡΟΣΦΕΡΟΜΕΝΑ ΕΙΔΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΠΡΟΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ	44
2.2.1 Κατηγοριοποίηση ειδών.....	44
2.2.2 Αγροβιομάζα.....	44
2.2.3 Ενεργειακές καλλιέργειες.....	46
2.2.4 Δασική βιομάζα	49
2.2.5 Βιομάζα βιομηχανικής προέλευσης.....	51
2.2.6 Αστική βιομάζα.....	56
2.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	57
2.3.1 Ξήρανση	57
2.3.2 Βελτίωση χαρακτηριστικών τέφρας.....	57
2.3.3 Μείωση πυκνότητας.....	58
3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	61
3.2 ΑΜΕΣΗ ΚΑΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	61
3.2.1 Οι μηχανισμοί που συντελούν στην καύση της βιομάζας.....	61
3.2.2 Αντιδραστήρες άμεσης καύσης.....	62
3.1.3 Εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος με άμεση καύση.....	67
3.3 ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	73
3.4 ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	74
3.4.1 Η διεργασία της αεριοποίησης	74
3.4.2 Είδη αντιδραστήρων αεριοποίησης.....	74

3.4.3 Εφαρμογές αεριοποίησης βιομάζας	76
4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ	78
4.1 ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΑΜΕΣΗΣ ΚΑΥΣΗΣ	78
4.2 ΑΝΤΛΙΑ	83
4.3 ΒΙΟΜΑΖΑ	86
4.4 ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ	89
4.5 ΜΗΧΑΝΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ	105
4.6 ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ	106
4.7 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ	107
4.8 ΔΙΑΘΕΡΜΙΚΟ ΕΛΑΙΟ	114
5. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ	116
5.1 ΧΡΟΝΙΚΗ ΑΞΙΑ ΧΡΗΜΑΤΟΣ	116
5.2 ΧΡΟΝΙΚΗ ΑΝΑΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΟΣΤΟΥΣ	118
5.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ	119
5.3.1 Στάδια εκτίμησης κόστους κατά τη διαδικασία σχεδιασμού και υλοποίησης έργων	119
5.3.2 Εκτιμήσεις τάξης μεγέθους	121
5.3.3 Υπολογιστική μελέτη εγκαταστάσεων	121
5.3.4 Εκτίμηση κόστους μηχανολογικών στοιχείων στην παρούσα εργασία	122
5.3.5 Υπολογισμός συνολικού κόστους εγκατάστασης	126
5.3.6 Στοιχεία λειτουργικού κόστους	126
5.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	128
5.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	129
6. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΚΑΥΣΗΣ –ΚΥΚΛΟΥ RANKINE ΜΕ ΟΡΓΑΝΙΚΟ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΡΕΥΣΤΟ	131
6.1 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΜΕΣΗΣ ΚΑΥΣΗΣ – ΔΙΑΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΛΑΙΟΥ	131
6.1.1 Μοντελοποίηση εγκατάστασης άμεσης καύσης	131
6.1.2 Μορφοποίηση του προβλήματος βελτιστοποίησης	132
6.2 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE ΜΕ ΟΡΓΑΝΙΚΟ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΡΕΥΣΤΟ	137
6.2.1 Μοντελοποίηση εγκατάστασης κύκλου Rankine	137
6.2.2 Μορφοποίηση του προβλήματος βελτιστοποίησης	139
6.3 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΕ	145
7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ – ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ	148
7.1 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ	148
7.1.1 Μοντελοποίηση εγκατάστασης αεριοποίησης	148
7.1.2 Μορφοποίηση του προβλήματος βελτιστοποίησης	149
7.2 ΜΗΧΑΝΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ	150
7.3 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΕ	151

8. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΦΑΛΜΑ! ΔΕΝ ΕΧΕΙ ΟΡΙΣΤΕΙ ΣΕΛΙΔΟΔΕΙΚΤΗΣ.

9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ 153

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 153

9.1.1 Αποτελέσματα μοντελοποίησης κύκλου Rankine οργανικού ρευστού 153

9.1.2 Αποτελέσματα μοντελοποίησης εγκατάστασης άμεσης καύσης 154

9.1.3 Αποτελέσματα εσωτερικού βαθμού απόδοσης συνολικής εγκατάστασης άμεσης καύσης – οργανικού κύκλου Rankine 173

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 176

9.2.1 Υπολογιστικός κώδικας EES εγκατάστασης άμεσης καύσης 176

9.2.2 Υπολογιστικός κώδικας EES εγκατάστασης οργανικού κύκλου Rankine 180

9.2.3 Υπολογιστικός κώδικας EES εγκατάστασης αεριοποίησης 182

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3 184

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 185

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Εκτιμήσεις έτους 2010 για έκλυση CO ₂ από τους μεγαλύτερους ρυπαντές	22
Πίνακας 2 Ανακεφαλαίωση χαρακτηριστικών των συστατικών τέφρας.....	37
Πίνακας 3 Χαρακτηριστικά διαφόρων τμημάτων των φυτών.....	43
Πίνακας 4 Ταξινόμηση ειδών βιομάζας.....	44
Πίνακας 5 Διαθεσιμότητα ειδών αγροβιομάζας	46
Πίνακας 6 Χαρακτηριστικά ειδών αγροβιομάζας	46
Πίνακας 7 Χαρακτηριστικά ειδών πολυετών καλλιεργειών.....	47
Πίνακας 8 Χαρακτηριστικά ειδών SRC	48
Πίνακας 9 Χαρακτηριστικά δασικής βιομάζας.....	51
Πίνακας 10 Χαρακτηριστικά υπολειμματικής βιομάζας μεταποίησης αγροτικών προϊόντων.....	55
Πίνακας 11 Χαρακτηριστικά αντλιών	84
Πίνακας 12 Παραδοχές για σενάριο Α και Β αξιοποιούμενων ειδών βιομάζας.....	89
Πίνακας 13 Τιμές συντελεστών επικαθίσεων για διάφορες περιπτώσεις.....	98
Πίνακας 14 Συστοιχίες αυλών στη σειρά ... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
Πίνακας 15 Διαστασιολόγηση αυλών συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας	103
Πίνακας 16 Μέγιστη επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας συναρτήσει της θερμοκρασίας για χάλυβες που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή εναλλακτών.....	104
Πίνακας 17 Μέγιστος αριθμός αυλών σε εναλλάκτη συναρτήσει της διαμέτρου κελύφους.....	104
Πίνακας 18 Τυπικοί συντελεστές μεταφοράς για αλλαγή φάσης του εργαζόμενου ρευστού στον κύκλο Rankine	105
Πίνακας 19 Τυπικοί συντελεστές μεταφοράς για περιπτώσεις ροών χωρίς αλλαγή φάσης	105
Πίνακας 20 Ιδιότητες ενός συνηθισμένου διαθερμικού ελαίου.....	115
Πίνακας 21 Τιμές μεταβλητών που εξυπηρετούν τη διερεύνηση υπό το πρίσμα της χρονικής αξίας χρήματος	118
Πίνακας 22 Δείκτες αναπροσαρμογής κόστους.....	119
Πίνακας 23 Συντελεστές συναρτήσεων κόστους.....	123
Πίνακας 24 Συντελεστές πίεσης συναρτήσεων κόστους.....	125
Πίνακας 25 Συντελεστές κόστους για το υλικό κατασκευής εναλλακτών	126

Πίνακας 26 Συντελεστές κόστους για υλικό και εργασίες εγκατάστασης μηχανολογικών στοιχείων.....	126
Πίνακας 27 Δεδομένα για ετήσιο χρόνο λειτουργίας εγκαταστάσεων συναρτήσει σεναρίων Α και Β αξιοποιούμενης βιομάζας.....	127
Πίνακας 28 Στοιχεία λειτουργικού κόστους εγκαταστάσεων	128
Πίνακας 29 Κατάλογος βασικών λειτουργικών στοιχείων.....	132
Πίνακας 30 Κατάλογος με ροές ρευστών και θερμότητας	132
Πίνακας 31 Κατάλογος βασικών λειτουργικών στοιχείων.....	138
Πίνακας 32 Κατάλογος ροής ρευστών και ενέργειας.....	139
Πίνακας 33 Ρευστά λειτουργίας που αντικαθιστούν το υπο απαγόρευση R-113.....	143
Πίνακας 34 Κατάλογος βασικών λειτουργικών στοιχείων.....	148
Πίνακας 35 Κατάλογος ροής ρευμάτων	149

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1 Ανασκόπηση πηγών ενέργειας	16
Σχήμα 2 Ισοζύγιο άνθρακα του έτους αναφοράς 1990.....	18
Σχήμα 3 Δραστική αύξηση CO ₂ στην ατμόσφαιρα σε σύγκριση με χιλιάδες χρόνια. 19	
Σχήμα 4 Επιταχυνόμενη κατανάλωση ορυκτών καυσίμων	20
Σχήμα 5 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου	20
Σχήμα 6 Σταθερή άνοδος θερμοκρασίας ωκεάνιων υδάτων	21
Σχήμα 7 Ανασκόπηση θερμοχημικών μεθόδων	25
Σχήμα 8 Κατανομή μεγέθους παραγόμενων σωματιδίων τέφρας για διάφορα είδη βιομάζας.....	30
Σχήμα 9 Σχηματισμός επικαθίσεων σε επιφάνειες εναλλαγής (fouling).....	31
Σχήμα 10 Σχηματισμός επικαθίσεων στα τοιχώματα θαλάμου καύσης (slagging).....	32
Σχήμα 11 Στάδια τήξης τέφρας.....	34
Σχήμα 12 Σχηματική αναπαράσταση βιομάζας σε ξηρή βάση χωρίς τέφρα	38
Σχήμα 13 Ίδια ποσότητα ξύλου με διαφορετικές τιμές πυκνότητας	42
Σχήμα 14 Διάφορα είδη αγροβιομάζας, υπαίθρια καύση	45
Σχήμα 15 Καλλιέργεια καλαμιού, αγριαγκινάρας και μίσχανθου	47
Σχήμα 16 Καλλιέργεια σόργου και κενάφ	48
Σχήμα 17 Καλλιέργεια SRC	49
Σχήμα 18 Εργασίες σε δασικές εκμεταλλεύσεις.....	50
Σχήμα 19 Τεμαχισμένο ξύλο (chip).....	50
Σχήμα 20 Δασικά προϊόντα	51
Σχήμα 21 Παραπροϊόντα μεταποίησης ξυλείας.....	53
Σχήμα 22 Πυρήνες ελιάς, ροδάκινου και καλαμποκιού	54
Σχήμα 23 Φλοιοί ρυζιού, κελύφη καρυδιού και αμυγδάλου	55
Σχήμα 24 Βιομάζα ζωικής προέλευσης. MBM αριστερά, κελύφη γαρίδας δεξιά.....	56
Σχήμα 25 Δεματοποιημένη βιομάζα σε μορφή μπάλας.....	59
Σχήμα 26 Πέλλετ και μπρικέτα.....	59
Σχήμα 27 Σχεδιάγραμμα διαδικασίας άμεσης καύσης	61
Σχήμα 28 Οριζόντια σχάρα.....	63
Σχήμα 29 Κλιμακωτή και κεκλιμένη σχάρα	63
Σχήμα 30 Προωθούμενη σχάρα.....	63
Σχήμα 31 Αντιδραστήρας ρευστοστερεάς κλίνης	65

Σχήμα 32 Αντιδραστήρας ρευστοστερεάς κλίνης ανακυκλοφορίας	65
Σχήμα 33 Καυστήρας σωματιδίων	66
Σχήμα 34 Θάλαμος καύσης και επιφάνειες εναλλαγής	67
Σχήμα 35 Υποτυπώδες διάγραμμα ροής για εγκατάσταση καύσης.....	67
Σχήμα 36 Πρότυπο διάγραμμα ροής για εγκατάσταση καύσης	68
Σχήμα 37 Ποιοτικό διάγραμμα T-s με σημεία λειτουργίας κύκλου Rankine υγρού ρευστού	69
Σχήμα 38 Ποιοτικό διάγραμμα T-s με σημεία λειτουργίας κύκλου Rankine στεγνού ρευστού	70
Σχήμα 39 Αξιοποιήσιμη θερμοκρασιακή διαφορά	70
Σχήμα 40 Ανάκτηση θερμότητας στον κύκλο Rankine στεγνού ρευστού	71
Σχήμα 41 Πρότυπο διάγραμμα ροής εγκατάστασης οργανικού Rankine.....	72
Σχήμα 42 Σχεδιάγραμμα πυρόλυσης	73
Σχήμα 43 Σχεδιάγραμμα αεριοποίησης	74
Σχήμα 44 Σχεδιάγραμμα αεριοποίησης ανωροής	75
Σχήμα 45 Σχεδιάγραμμα αντιδραστήρα ανωροής	76
Σχήμα 46 Συμβολισμός αντλιών στα διαγράμματα ροής	85
Σχήμα 47 Συμβολισμός βιομάζας στα διαγράμματα ροής	87
Σχήμα 48 Απλός αυλοφόρος εναλλάκτης	90
Σχήμα 49 Εναλλαγή θερμότητας με ομοροή και αντιροή	91
Σχήμα 50 Εναλλαγή θερμότητας με αλλαγή φάσης	91
Σχήμα 51 Εναλλαγή θερμότητας με θερμική ακτινοβολία.....	92
Σχήμα 52 Εναλλάκτης αυλών κελύφους.....	92
Σχήμα 53 Τριγωνική και τετραγωνική διάταξη αυλών.....	93
Σχήμα 54 Ανακλαστήρες ροής στο κέλυφος	93
Σχήμα 55 Εναλλαγή θερμότητας με 2 περάσματα αυλών	94
Σχήμα 56 Συμβολισμός εναλλακτών στα διαγράμματα ροής.....	95
Σχήμα 57 Σχήμα επίδειξης παραμέτρων υπολογισμών στο κέλυφος	101
Σχήμα 58 Τυπικό ενεργειακό ισοζύγιο σε Μ.Ε.Κ.	105
Σχήμα 59 Συμβολισμός στροβίλου στα διαγράμματα ροής	106
Σχήμα 60 Εισαγωγικό σχήμα στον υπολογισμό χρηματοροών	116
Σχήμα 61 Χρονική μεταφορά χρηματικής αξίας συναρτήσσει επιτοκίου	117
Σχήμα 62 Χρονική μεταφορά χρηματικής αξίας συναρτήσσει επιτοκίου	117
Σχήμα 63 Πρότυπη χρηματοροή που χρησιμοποιείται στις μοντελοποιήσεις.....	117

Σχήμα 64 Συντελεστής διόρθωσης μήκους αυλών	124
Σχήμα 65 Συντελεστής διόρθωσης διαμέτρου αυλών	124
Σχήμα 66 Διάγραμμα ροής για μοντελοποίηση εγκατάστασης άμεσης καύσης	131
Σχήμα 67 Διάγραμμα ροής για τη μοντελοποίηση εγκατάστασης οργανικού κύκλου Rankine	138
Σχήμα 68 Σύγκριση οργανικών ρευστών λειτουργίας για κύκλο Rankine.....	141
Σχήμα 69 Σύγκριση βαθμού απόδοσης κύκλου Rankine για διαφορετικά ρευστά λειτουργίας.....	142
Σχήμα 70 Διάγραμμα καθορισμού υψηλής πίεσης λειτουργίας για κύκλο Rankine.	144
Σχήμα 71 Πρότυπο διάγραμμα ροής εγκατάστασης αεριοποίησης.....	148

1. Εισαγωγή

1.1. Η σημασία της ενέργειας στο σημερινό πολιτισμό

Ο άνθρωπος είχε ανέκαθεν την ανάγκη κάποιας πηγής ενέργειας, πέραν της σωματικής του. Εδώ και χιλιάδες χρόνια, κατέφευγε στην ξυλεία που έβρισκε τριγύρω στο φυσικό του περιβάλλον. Τα ξύλα αποτελούσαν βέβαια και ένα από τα κύρια υλικά στις κατασκευές του. Στα προϊστορικά χρόνια, μέσω της φωτιάς που τροφοδοτούνταν με τα ξύλα αυτά, άλλοτε εξυπηρετούσε την προετοιμασία της τροφής του και άλλοτε την προστασία του από το ψύχος. Εξυπηρετούσε επίσης τη βασική του ανάγκη για συντροφιά, μιας που η συγκέντρωση γύρω από τη φωτιά ήταν μια σημαντική δραστηριότητα του ελεύθερου του χρόνου.

Παρόλο που με την έλευση χιλιάδων χρόνων, οι δομές των ανθρωπίνων κοινωνιών εξελιχθήκαν σημαντικά, δημιουργώντας τα πρώτα αστικά κέντρα, ο άνθρωπος συνεχίζει να αρκείται στην ξυλεία ως κύρια πηγή ενέργειας. Με αυτή εξακολουθεί να καλύπτει βασικές του ανάγκες με τον τρόπο που συνήθιζε, τείνει όμως τώρα να υποκαταστήσει τη χρήση της σωματικής του δύναμης, δαμάζοντας την ενέργεια του ανέμου και του νερού.

Το 18^ο αιώνα, η διάδοση της εφεύρεσης της ατμομηχανής, αλλάζει ριζικά τη ζωή του ανθρώπου. Πλέον, μια πληθώρα επίπονων χειρονακτικών εργασιών αντικαθίσταται από τη «δύναμη» του ατμού, καθιστώντας την παραγωγή αγαθών ευκολότερη. Μάζες ανθρώπων προσελκύονται στα μεγάλα αστικά κέντρα, με παράλληλο αποτέλεσμα την κατακόρυφη αύξηση παραγωγής μηχανολογικού εξοπλισμού, που καλύπτει το κενό της ολοένα και μεγαλύτερης έλλειψης εργατών στην ύπαιθρο. Η εφαρμογή της ατμοκίνησης στη ναυσιπλοΐα και η διάδοση του σιδηρόδρομου, συμβάλλουν επίσης στην κατεύθυνση αυτή, υποστηρίζοντας τη διοχέτευση προϊόντων από και προς τα μεγάλα κέντρα παραγωγής σε όλο τον κόσμο. Με αυτό τον τρόπο, εκτινάσσεται παράλληλα η απαίτηση σε ενέργεια, που τροφοδοτεί αυτό το ραγδαία αναπτυσσόμενο και ενεργοβόρο μοντέλο εξέλιξης της ανθρωπότητας.

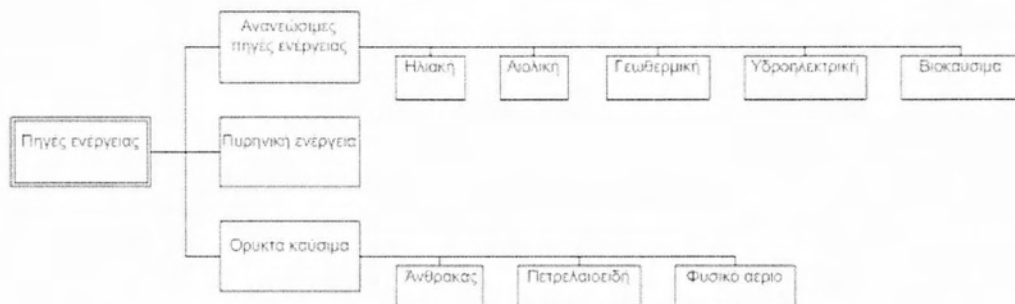
Γρήγορα ο άνθρωπος καταφεύγει στην εκμετάλλευση του ορυκτού άνθρακα σε μεγάλη κλίμακα, ικανοποιώντας την απαίτηση της ενέργειας που παρουσιάζόταν σε τέτοια ένταση και πυκνότητα, ώστε η ξυλεία δε μπορούσε πλέον να εξυπηρετήσει. Η εφεύρεση της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι

μπορεί να μεταδοθεί σε μεγάλες αποστάσεις, ενισχύει το μοντέλο εξέλιξης της βιομηχανίας που επικρατεί, καθώς τα κέντρα παραγωγής είχαν ήδη δημιουργηθεί κοντά σε ανθρακωρυχεία, έχοντας εκτοπίσει την ξυλεία ως πηγή ενέργειας. Σύντομα, εκτός των ανθρακωρυχείων, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και οι πηγές των υπολοίπων ορυκτών καυσίμων με τη διάδοση και εξέλιξη των μηχανών εσωτερικής καύσης. Η χρήση της ξυλείας εκτοπίζεται περαιτέρω, όταν μέσω της τεχνολογικής εξέλιξης, διαπιστώνεται σε ευρεία κλίμακα πως και η οικιακή πλέον αξιοποίηση των ορυκτών καυσίμων και της ηλεκτρικής ενέργειας, πλεονεκτούν συγκριτικά με την ξυλεία, σε σχέση με το κόστος χρήσης και την παρεχόμενη άνεση.

Από την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης, με τη διάδοση της ατμομηχανής τον 18^ο αιώνα, μέχρι σήμερα, έχει αποδειχθεί περίτρανα πως η βιομηχανοποίηση των μέσων παραγωγής, έχει εξυπηρετήσει τον άνθρωπο. Σταδιακά έχουν αυξηθεί οι ανέσεις, η ασφάλεια, η ποιότητα και τελικά η διάρκεια ζωής των ανθρώπων. Παράλληλα αυξάνει συνεχώς η κατανάλωση ενέργειας, που συνδέεται άρρηκτα με την αναπτυσσόμενη βιομηχανία. Χάρη στην πληθώρα των ενεργειακών πηγών που έχουν κατακτηθεί και αξιοποιούνται προς όφελος της ανθρωπότητας, έχουν διευκολυνθεί σε μεγάλο βαθμό χειρονακτικές εργασίες που κάποτε θεωρούνταν επίπονες και επικίνδυνες. Η αγροτική παραγωγή, η κλωστοϋφαντουργία, οι μετακινήσεις, οι φορτοεκφορτώσεις εμπορευμάτων και οι κατασκευές, είναι μερικά από τα πιο εύστοχα παραδείγματα που θα μπορούσαν να αναφερθούν, σε σχέση με την άνεση που προσφέρει στη ζωή του ανθρώπου η εκμετάλλευση της ενέργειας. Οι συγκεκριμένοι κλάδοι της οικονομίας, έγιναν σταδιακά πολύ πιο παραγωγικοί, απασχολώντας μάλιστα λιγότερο εργατικό δυναμικό. Έτσι δόθηκε παράλληλα η ευκαιρία στις ανθρώπινες κοινωνίες, να υποστηρίξουν μαζικά, τομείς όπως η τέχνη, τα συστήματα υγείας, η εκπαίδευση και η επιστημονική έρευνα. Ως τίμημα όμως για το αυξανόμενο βιοτικό του επίπεδο, ο άνθρωπος πληρώνει την επίσης αυξανόμενη απαίτηση σε ενέργεια.

1.2 Πηγές ενέργειας

Οι κυριότερες πηγές ενέργειας που αξιοποιούνται σήμερα προς όφελος του ανθρώπου μπορούν να αποτυπωθούν στο σχήμα 1.



Σχήμα 1 Ανασκόπηση πηγών ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές είναι κατά κύριο λόγο μορφές ενέργειας, που προέρχονται από την εκμετάλλευση φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια της γης. Τα φυσικά αυτά φαινόμενα, όπως ο άνεμος ή οι υδατοπτώσεις, προκύπτουν ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας με το γήινο περιβάλλον. Πλεονέκτημα τους έναντι των συμβατικών πηγών, είναι η δυνατότητα τους να ανανεώνονται συνεχώς μέσω της ενέργειας του ήλιου και το γεγονός ότι μπορούν να ωφελήσουν τον άνθρωπο χωρίς να καταστρέφεται παράλληλα το φυσικό περιβάλλον. Αντίστοιχα το μειονέκτημα τους είναι το αυξημένο κόστος που παρουσιάζεται, καθώς αποτελούν συνήθως ήπιες και αποκεντρωμένες πηγές ενέργειας.

Η πυρηνική ενέργεια παρουσιάστηκε στα μέσα του προηγούμενου αιώνα και αποτέλεσε σύντομα τον κορμό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις περισσότερες αναπτυγμένες χώρες. Πλεονεκτήματα της είναι η απεριόριστη ισχύς που μπορεί να παράγεται, το χαμηλό κόστος και η μηδενική ρύπανση του ατμοσφαιρικού αέρα. Το κύριο μειονέκτημα της είναι τα ραδιενεργά υλικά που συνδέονται με αυτή τη μορφή ενέργειας και αποτελούν μεγάλο κίνδυνο για τον άνθρωπο και το υπόλοιπο φυσικό περιβάλλον, είτε κατά την απόρριψη τους ως απόβλητα, είτε στην περίπτωση ενός ατυχήματος.

Τα ορυκτά καύσιμα διαδραματίζουν τόσο σημαντικό ρόλο για τον άνθρωπο, ώστε η ανεξάρτησή του από αυτά να φαντάζει ακατόρθωτη. Αυτό όμως προκύπτει στις μέρες μας ως αναγκαιότητα. Οι γιγαντιαίες ποσότητες ορυκτών καυσίμων που έχουν αξιοποιηθεί τους τελευταίους δυο αιώνες, αποδεικνύεται ότι έχουν επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα. Παρά το χαμηλό κόστος της ενέργειας που προσφέρουν και την απεριόριστη ισχύ που μπορούν να αποδίδουν οι εγκαταστάσεις που τα αξιοποιούν, αυτά συντελούν στην απορρύθμιση του φυσικού περιβάλλοντος, διαταράσσοντας τον κύκλο του άνθρακα. Ο κύκλος αυτός είναι και ο φυσικός μηχανισμός ανανέωσης τους και λειτουργεί με ρυθμό πολύ βραδύτερο από αυτόν

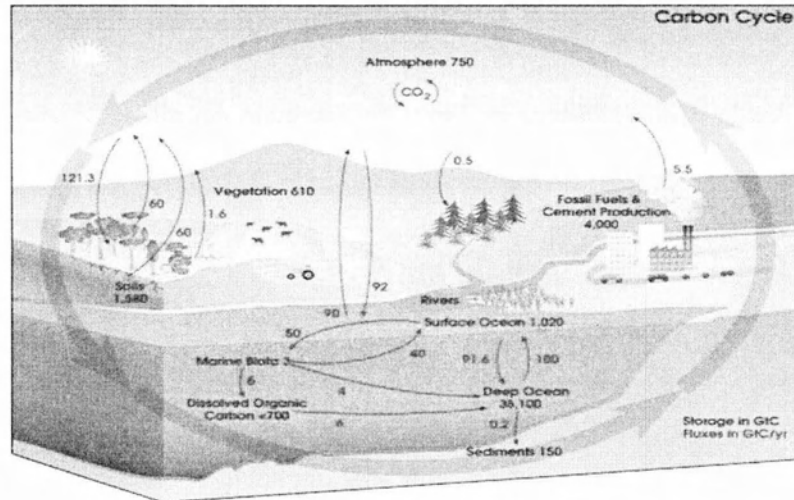
που ο άνθρωπος απαιτεί. Αποτέλεσμα των προηγούμενων είναι η υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων από άλλες πηγές ενέργειας να γίνεται αργά ή γρήγορα υποχρεωτική.

Ο κύκλος του άνθρακα: Μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας που καταφθάνει διαρκώς στην επιφάνεια της γης, συντελείται από τους φυτικούς οργανισμούς η διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Κατά τη διαδικασία αυτή, στους χλωροπλάστες των κυττάρων των φυτικών οργανισμών, διοξείδιο του άνθρακα ενώνεται με μόρια νερού, παράγοντας υδατάνθρακες και οξυγόνο, με το ηλιακό φως να πυροδοτεί τις αντιδράσεις αυτές, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση: $n \cdot \text{CO}_2 + n \cdot \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{φως}} \text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}_n + n \cdot \text{O}_2$

Οι υδατάνθρακες αυτοί, είναι είτε μεγάλου μοριακού βάρους, δηλαδή πολυμερικές ενώσεις όπως η κυτταρίνη και η λιγνίνη που αποτελούν τα δυο κυριότερα δομικά συστατικά των φυτικών οργανισμών, είτε μικρότερα μόρια υδατανθράκων, δηλαδή σάκχαρα με εύρος μοριακού βάρους, το σύνολο των οποίων αποτελούν την ημικυτταρίνη.

Συνεπώς, μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης, ένας φυτικός οργανισμός δεσμεύει τον άνθρακα από μόρια διοξειδίου του άνθρακα, απελευθερώνοντας μόρια οξυγόνου.

Οι ζώντες φυτικοί οργανισμοί που δεσμεύουν τον άνθρακα, βρίσκονται είτε στην επιφάνεια της γης, αλληλεπιδρώντας με το διοξείδιο του άνθρακα που βρίσκεται στον ατμοσφαιρικό αέρα, είτε μέσα στη θάλασσα, αλληλεπιδρώντας με εκείνο που βρίσκεται ως διαλυμένο αέριο μέσα στον ωκεανό, το οποίο αποτελεί και το μεγαλύτερο απόθεμα στον πλανήτη. Με αυτόν τον τρόπο, ο άνθρακας δεσμεύεται αντίστοιχα στη στεριά και τον ωκεανό. Καθώς οι φυτικοί οργανισμοί είναι η βάση της διατροφικής αλυσίδας, μεταβιβάζουν το μεγαλύτερο ποσοστό άνθρακα που δεσμεύουν, στους υπόλοιπους ζωντανούς οργανισμούς, στους οποίους βρίσκεται τελικά δεσμευμένο ένα μέρος του άνθρακα, σε στεριά και ωκεανό. Τέλος, εκτός του ποσοστού άνθρακα που δεσμεύεται στους ζώντες οργανισμούς, ένα μεγάλο μέρος άνθρακα που προέρχεται από νεκρωμένους οργανισμούς, εισχωρεί στο υπέδαφος ή κατακάθεται στον πάτο του ωκεανού και με το πέρασ του χρόνου, μέσω επιχωματώσεων στη στεριά και ιζηματοποιήσεων στον ωκεανό, δημιουργούνται τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία ο άνθρωπος εκμεταλλεύεται προς όφελος του. Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται παραστατικά οι διαδικασίες που περιγράφηκαν.



Σχήμα 2 Ισοζύγιο άνθρακα του έτους αναφοράς 1990

Σε αυτό το σχήμα αναπαρίσταται το ισοζύγιο του κύκλου άνθρακα, όπως προέκυψε για τη χρονολογία 1990. Με μαύρο χρώμα εμφανίζονται τα αντίστοιχα αποθέματα σε γιγατόνους άνθρακα και με μωβ οι αντίστοιχες ροές σε γιγατόνους άνθρακα ανά έτος. Το ισοζύγιο άνθρακα της συγκεκριμένης χρονιάς, τέθηκε από πολλές χώρες ως σημείο αναφοράς, σε σχέση με τους στόχους που μετέπειτα προτάθηκαν, για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

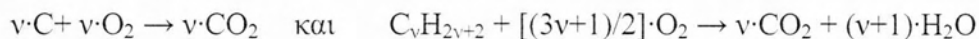
1.3. Οι επιπτώσεις χρήσης ορυκτών καυσίμων

Η μετάβαση από τη χρήση της ξυλείας ως πηγή ενέργειας, στα ορυκτά καύσιμα, συνέβη το 18^ο αιώνα κατά τη βιομηχανική επανάσταση. Καταγεγραμμένες μεμονωμένες περιπτώσεις χρήσης ορυκτών καυσίμων, υπάρχουν εδώ και χιλιάδες χρόνια, αλλά περιοριζόταν είτε σε μικρή κλίμακα, είτε κάτω από την πίεση ορισμένων συνθηκών, όπως την έλλειψη ξυλείας ή σε περιόδους μεγάλης κακοκαιρίας. Στις μέρες μας, η εξάρτηση του ανθρώπου από τα ορυκτά καύσιμα είναι τόσο μεγάλη, με αποτέλεσμα να γίνεται λόγος για το ενεργειακό πρόβλημα, ενώ η ευημερία των ανθρώπων φαντάζει εύθραυστη μπροστά σε φαινόμενα αυξήσεων στις τιμές των καυσίμων, τα οποία συμμετέχουν ως παράγοντας μεγάλης σημασίας σε κάθε κλάδο της οικονομίας.

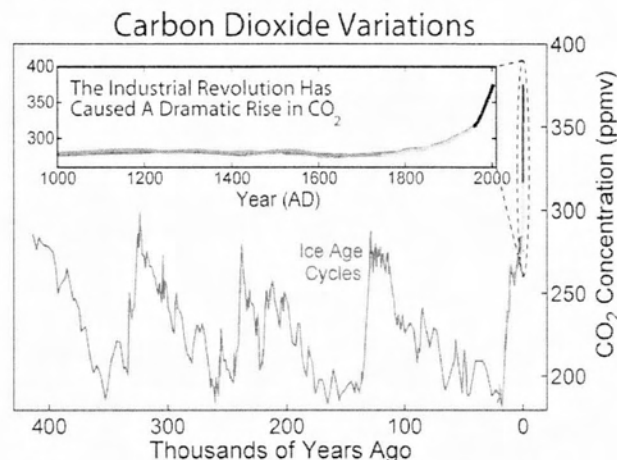
Το σημαντικότερο όλων βέβαια, σε σχέση με τη μακροχρόνια και μαζική χρήση ορυκτών καυσίμων, είναι ότι παρουσιάζονται σοβαρές οικολογικές επιπτώσεις, μέσω του φαινομένου του θερμοκηπίου, που ως αποτέλεσμα αυτού είναι η

υπερθέρμανση του πλανήτη και η δραστική μεταβολή των κλιματολογικών συνθηκών.

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου: Έχει αποδειχθεί, πως εδώ και εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια στην επιφάνεια της γης υπάρχει μια περιοδική και ισορροπημένη συμπεριφορά του κύκλου του άνθρακα. Πρόσφατα ο άνθρωπος μέσω των δραστηριοτήτων του έχει διαταράξει αυτή την ισορροπία σε μεγάλο βαθμό. Η εντατική κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων, τα οποία βρίσκονται στο υπέδαφος της γης εδώ και εκατομμύρια χρόνια, έχει ως αποτέλεσμα τη δραστική αύξηση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Τα καύσιμα αυτά, είτε είναι ο άνθρακας, είτε διαφόρων ειδών υδρογονάνθρακες, κατά την καύση τους παράγουν διοξείδιο του άνθρακα με τον τρόπο που παρουσιάζεται στις ακόλουθες χημικές αντιδράσεις:

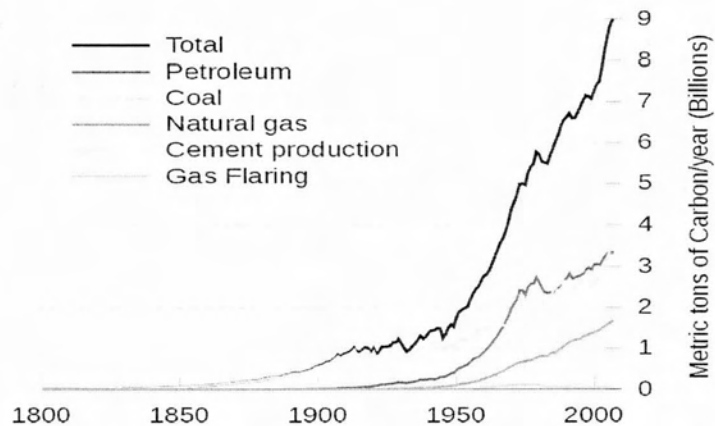


Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται η δραστική αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα στη γήινη ατμόσφαιρα κατά τις τελευταίες δεκαετίες.



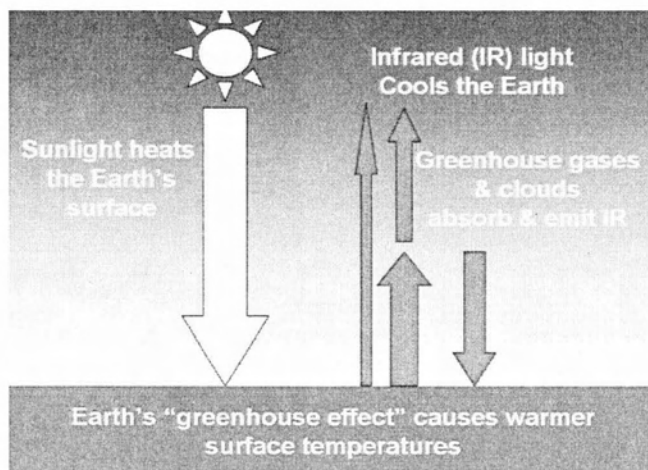
Σχήμα 3 Δραστική αύξηση CO₂ στην ατμόσφαιρα σε σύγκριση με χιλιάδες χρόνια

Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται ενδεικτικά η εξέλιξη των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, που προκαλείται από τη χρήση των ορυκτών καυσίμων ανά είδος τους δύο τελευταίους αιώνες.



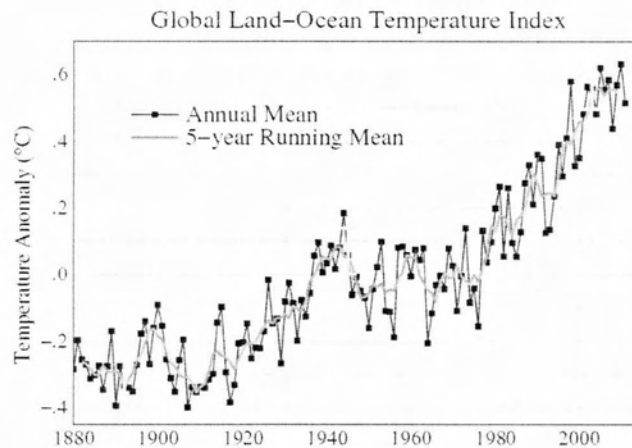
Σχήμα 4 Επιταχυνόμενη κατανάλωση ορυκτών καυσίμων

Η συσσώρευση ολοένα και περισσότερου διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, εντείνει το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Το φαινόμενο αυτό, που αναλύεται στη συνέχεια, προκαλεί την άνοδο στη θερμοκρασία της επιφάνειας της γης και κατά συνέπεια την ανεξέλεγκτη μεταβολή των κλιματολογικών συνθηκών. Η επιφάνεια της γης, δεχόμενη την ηλιακή ακτινοβολία, αντανακλά προς το διάστημα ένα μεγάλο ποσοστό της ενέργειας της, κυρίως με τη μορφή θερμικής ακτινοβολίας. Τα αέρια της ατμόσφαιρας αλληλεπιδρούν με την απορριπτόμενη ακτινοβολία, επανακτινοβολώντας ένα μέρος της πίσω στην επιφάνεια της γης. Το διοξείδιο του άνθρακα έχει την ιδιότητα να αλληλεπιδρά σε μεγαλύτερο βαθμό με τη θερμική ακτινοβολία από τα άλλα αέρια της ατμόσφαιρας. Συνεπώς, η αυξημένη ποσότητα του εντείνει το φαινόμενο που περιγράφηκε, γνωστό και ως φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο συμβάλλει στην ολοένα και μεγαλύτερη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από την επιφάνεια της γης, συντελώντας στην αυξανόμενη θερμοκρασία της, όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 5.



Σχήμα 5 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

Ενώ στο σχήμα 6 που ακολουθεί παρουσιάζεται η σταδιακή άνοδος της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας που έχει καταγραφεί τις τελευταίες δεκαετίες στη στεριά και τους ωκεανούς.



Σχήμα 6 Σταθερή άνοδος θερμοκρασίας ωκεάνιων υδάτων

Τα τελευταία χρόνια παρατηρούνται παγκοσμίως ακραία καιρικά φαινόμενα με ολοένα και μεγαλύτερη συχνότητα σε σχέση με παλιότερα. Αν και οι επιπτώσεις του φαινομένου του θερμοκηπίου τίθενται ακόμα και στις μέρες μας υπό αμφισβήτηση, λαμβάνονται ήδη δραστικά μέτρα και πολιτικές αποφάσεις με στόχο την ελάττωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

1.4. Πολιτικοί στόχοι σε παγκόσμιο επίπεδο προς την αποφυγή χρήσης ορυκτών καυσίμων

Μετά την πετρελαϊκή κρίση της περιόδου 1973-1974, ελήφθησαν οι πρώτες πολιτικές αποφάσεις σε σχέση με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς ορισμένες βιομηχανικές χώρες έθεσαν ως στόχο μια σχετική ανεξαρτητοποίηση της οικονομίας τους από το πετρέλαιο. Μερικές δεκαετίες αργότερα, ανάλογες πολιτικές αποφάσεις γενικεύονται και εντείνονται σε παγκόσμιο επίπεδο, με επιπλέον κίνητρο την ανάσχεση της κλιματικής αλλαγής. Την αναγκαιότητα των προηγούμενων, επισημαίνουν ολοένα και περισσότερο οι επανειλημμένες προειδοποιήσεις της επιστημονικής κοινότητας, σχετικά με την αύξηση της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, τη σταδιακή άνοδο της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης και των επιταχυνόμενων ακραίων καιρικών φαινομένων.

Ο πίνακας 1 παρουσιάζει εκτιμήσεις του έτους 2010, σε σχέση με την έκλυση διοξειδίου του άνθρακα, των τριών μεγαλύτερων χωρών – ρυπαντών. Παρατηρείται πως αυτή τη στιγμή, είναι οι υπεύθυνοι για περισσότερη από τη μισή ποσότητα

διοξειδίου του άνθρακα που επιβαρύνει την ατμόσφαιρα κάθε χρόνο, ενώ εκπροσωπούν μόνο το 1/3 του παγκόσμιου πληθυσμού.

Εκτιμήσεις του έτους 2010 σχετικά με την έκλυση CO ₂	ποσότητα εκλυόμενου CO ₂ (χιλιάδες τόνοι ανά χρόνο)	Ποσοστιαία έκλυση CO ₂
Παγκόσμια έκλυση CO ₂	29.888.121	100 %
Κίνα	7.031.916	23.53 %
Ηνωμένες πολιτείες	5.461.014	18.27 %
Ευρωπαϊκή Ένωση (27)	4.177.817	13.98 %
Άθροισμα εκλυόμενου CO ₂ των 3 μεγαλύτερων ρυπαντών	16.671.594	55.78 %

Πίνακας 1 Εκτιμήσεις έτους 2010 για έκλυση CO₂ από τους μεγαλύτερους ρυπαντές

Στις 11 Δεκεμβρίου 1997, λαμβάνει χώρα μια σημαντική εξέλιξη, η υπογραφή του πρωτοκόλλου του Κιότο. Είναι ουσιαστικά η πρώτη διεθνής συμφωνία που σχετίζεται με τη μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων που συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και κυρίως του διοξειδίου του άνθρακα, σε αποδεκτά επίπεδα ως προς τη σταθερότητα του οικοσυστήματος. Η συμφωνία τέθηκε σε εφαρμογή στις 16 Φεβρουαρίου 2005 και ως περιεχόμενο της, είναι δεσμεύσεις που έγιναν εκ μέρους των συμμετεχόντων κρατών σε σχέση με τις εκπομπές αερίων ρύπων. Ως σημείο αναφοράς της πλειοψηφίας των συμμετεχόντων, ορίστηκαν τα δεδομένα της χρονολογίας 1990, όπως παρουσιάζονται στο σχέδιο 1.2.

Κίνα και Ηνωμένες Πολιτείες: Τα κριτήρια που ορίστηκαν στο πρωτόκολλο του Κιότο, αφήνουν μεγάλα περιθώρια στις δεσμεύσεις που αναλαμβάνουν οι αναπτυσσόμενες χώρες, όπως και η Κίνα. Επιπρόσθετα, οι Ηνωμένες Πολιτείες εναντιώθηκαν σε οποιασδήποτε δέσμευση ως προς τη μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, μένοντας εκτός συμφωνίας. Συνεπώς, οι δυο μεγαλύτεροι ρυπαντές όπως παρουσιάζεται παραπάνω, δεν ανέλαβαν συγκεκριμένες δεσμεύσεις για τη μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Παρ' όλα αυτά και οι δυο χώρες έχουν κάνει σημαντική πρόοδο προς τη μείωση των ρύπων, θέτοντας σταδιακά ολοένα και μεγαλύτερους στόχους σε αυτή την κατεύθυνση. Πολύ πρόσφατα (Ιούνιος 2014) ανακοινώθηκαν ελπιδοφόροι στόχοι από τις Η.Π.Α. που αποβλέπουν στη μείωση των εκπομπών κατά 30% έως το έτος 2030, στόχος αντίστοιχος με την πολιτική που ακολουθούν τα τελευταία έτη οι χώρες της Ε.Ε. όπως παρουσιάζεται στη επόμενη παράγραφο.

Ευρωπαϊκή Ένωση: Σε αντίθεση με τους δυο μεγαλύτερους ρυπαντές, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει αναλάβει εδώ και αρκετά έτη συγκεκριμένες δεσμεύσεις σε πολλά επίπεδα, σε σχέση με τη μείωση εκπομπών αερίων ρύπων και την προστασία του περιβάλλοντος. Στις 17 Ιουνίου 2010 τίθεται σε ισχύ η πολιτική «Ευρώπη 20 20», οι βασικοί άξονες της οποίας είναι έως το τέλος του έτους 2020:

1. Να υπάρξει μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 20% σε σχέση με το έτος 1990.
2. Τουλάχιστον το 20% της συνολικής παραγωγής ενέργειας να γίνεται από ανανεώσιμες πηγές.

1.5. Η βιομάζα σε σύγκριση με τις άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η βιομάζα είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που προκύπτει κυρίως από την ανάπτυξη των φυτικών οργανισμών μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης. Ως βιομάζα ορίζουμε το ξύλο και άλλα δασικά προϊόντα, υπολείμματα καλλιεργειών, κτηνοτροφικά και λοιπά οργανικά απόβλητα.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της βιομάζας ως καύσιμο είναι ότι μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας με μηδαμινό ισοζύγιο έκλυσης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Το γεγονός αυτό έγκειται στο ότι το διοξείδιο του άνθρακα που εκλύεται κατά την ενεργειακή αξιοποίηση της, έχει ήδη απορροφηθεί εκ των προτέρων κατά το σχηματισμό της μάζας της μέσω της φωτοσύνθεσης.

Επιπρόσθετα, η βιομάζα ως πηγή ενέργειας διατίθεται παντού και μπορεί να παραχθεί σε τοπικό ή και οικιακό επίπεδο, ενώ η αξιοποίηση της ως παράλληλη δραστηριότητα στην αγροτική και κτηνοτροφική παραγωγή να προσδώσουν μεγαλύτερη προστιθέμενη αξία στα παραγόμενα προϊόντα και αύξηση της απασχόλησης.

Ακόμα η βιομάζα μπορεί να αποθηκεύεται και να αποτελεί ρυθμιστικό παράγοντα κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος όταν συνδυάζεται με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική, που εξαρτώνται από τις κλιματολογικές συνθήκες και παρουσιάζουν διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου.

1.6 Αξιοποίηση βιομάζας προς παραγωγή ισχύος με θερμοχημικές μεθόδους

Η βιομάζα μπορεί να αξιοποιηθεί με μεθόδους που βασίζονται σε αυξημένες θερμοκρασίες λειτουργίας, οι οποίες μπορούν παράλληλα να συνδυάζονται με υψηλή πίεση και την ύπαρξη παραγόντων κατάλυσης.

Οι μέθοδοι αυτές ονομάζονται θερμοχημικές και μπορούν να αναφέρονται ή και ως θερμικές όταν η βασική παράμετρος λειτουργίας τους είναι μόνο η αυξημένη θερμοκρασία. Κατά τις θερμικές μεθόδους η εφαρμογή αυξημένης θερμοκρασίας συντελεί είτε στην πλήρη καύση είτε στη χημική μετατροπή της βιομάζας σε ρευστά καύσιμα, με στόχο την παροχή θερμικής ισχύος ή την τροφοδοσία θερμικών κύκλων εξωτερικής ή εσωτερικής καύσης προς παραγωγή μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος.

Οι αμιγώς θερμικές μέθοδοι αποτελούν ένα υποσύνολο των θερμοχημικών μεθόδων. Οι θερμικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως για την άμεση παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Σε τέτοιες περιπτώσεις η σύσταση των ενώσεων που προκύπτουν ως προϊόντα χημικής μετατροπής της βιομάζας είναι μικρής σημασίας, είναι όμως ζητούμενη η υψηλή θερμογόνος αξία τους. Οι τρεις κατηγορίες θερμικών μεθόδων είναι η άμεση καύση, η πυρόλυση και η αεριοποίηση της βιομάζας.

Η λειτουργία των υπόλοιπων θερμοχημικών μεθόδων μπορεί να βασιστεί σε ένα πιο σύνθετο περιβάλλον, με παραμέτρους όπως η πίεση ή η ύπαρξη παραγόντων κατάλυσης να διαδραματίζουν το ίδιο σημαντικό ρόλο με τη θερμοκρασία. Ορισμένες φορές μάλιστα η εφαρμογή τους εστιάζεται μόνο στη χημική μετατροπή της βιομάζας και όχι στην παραγωγή θερμικής ή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση το ζητούμενο είναι η παραγωγή μιας γκάμας χημικών ενώσεων με συγκεκριμένη χημική σύσταση, που μπορούν να αποτελέσουν την πρώτη ύλη για τη σύνθεση καυσίμων και άλλων βασικών πετροχημικών ουσιών, έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία. Στις θερμοχημικές μεθόδους που προαναφέρθηκαν προστίθενται οι υδροθερμικές μέθοδοι και η θερμοχημική υδρόλυση της κυτταρίνης.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται επιγραμματικά οι θερμοχημικές μέθοδοι μετατροπής της βιομάζας, ενώ ο τρόπος λειτουργίας τους αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 7 Ανασκόπηση θερμοχημικών μεθόδων

2. Χαρακτηριστικά βιομάζας

2.1 Χαρακτηριστικά βιομάζας και η επίδραση τους στις θερμικές μεθόδους

2.1.1 Περιεκτικότητα σε υγρασία

Οποιαδήποτε ποσότητα βιομάζας συνοδεύεται συνήθως με δεδομένη την παράμετρο της περιεκτικότητας της σε υγρασία. Το μέγεθος αυτό εκφράζεται ως ποσοστό επί της συνολικής μάζας του καυσίμου. Σε αυτό το σημείο γίνεται ο διαχωρισμός της υγρασίας που περιέχει μια ποσότητα βιομάζας σε εξωγενή και ενδογενή. Η περιεκτικότητα σε υγρασία αναφέρεται στην εξωγενή ποσότητα.

Η τιμή της εξωγενούς ποσότητας υγρασίας διαμορφώνεται από παράγοντες όπως η χρονική περίοδος της συγκομιδής της βιομάζας, οι καιρικές συνθήκες την περίοδο εκείνη, το είδος και ο βαθμός επεξεργασίας που έχει υποστεί. Η ποσότητα της υγρασίας αυτής συναντάται διάσπαρτη στους ιστούς της βιομάζας με τη μορφή του νερού και η απομάκρυνση της υπόκειται σε περιπτώσεις φυσικών διεργασιών.

Σε αντίθεση με την εξωγενή, η ενδογενής ποσότητα υγρασίας δε μπορεί να μεταβληθεί, παρά μόνο με τη χημική μετατροπή των ιστών της βιομάζας. Πρόκειται για ποσότητα νερού που προκύπτει εν δυνάμει, έπειτα από την ένωση των στοιχείων υδρογόνου και οξυγόνου που συμμετέχουν στις υδατανθρακικές ενώσεις που συνθέτουν τη βιομάζα. Η τιμή της ενδογενούς ποσότητας υγρασίας εξαρτάται κυρίως από το είδος της βιομάζας και σε μικρό βαθμό από εξωγενείς παράγοντες.

Η συνήθης μέθοδος καθορισμού της περιεκτικότητας μιας ποσότητας βιομάζας σε υγρασία (εξωγενή) είναι μέσω της θέρμανσης της σε εργαστηριακό κλίβανο. Με τη διατήρηση της ποσότητας στους 105 °C για 2 ώρες επιτυγχάνεται η αποδέσμευση της υγρασίας που βρίσκεται κατανεμημένη στους ιστούς της βιομάζας.

Στη βιβλιογραφία αποτυπώνεται ότι η περιεκτικότητα της βιομάζας σε υγρασία δε θα πρέπει να ξεπερνά το 50% όσο αφορά την αξιοποίηση της μέσω θερμικών μεθόδων. Διαφορετικά εναλλακτικές μέθοδοι, όπως οι βιολογικές ή οι χημικές, θα ήταν καταλληλότερες για την αξιοποίηση της. Παρ' όλα αυτά η βέλτιστη τιμή μπορεί να διαφέρει αρκετά σε κάθε περίπτωση. Για οποιαδήποτε ποσότητα βιομάζας η κατάλληλη περιεκτικότητα σε υγρασία καθορίζεται μέσω μιας διαδικασίας διερεύνησης ποικίλων παραμέτρων. Αυτές αναλύονται στη συνέχεια και σχετίζονται με τον τρόπο λειτουργίας της εγκατάστασης αξιοποίησης του καυσίμου και την αποφυγή υποβάθμισης της ποιότητας του.

Η αυξημένη περιεκτικότητα σε υγρασία, μπορεί να μειώσει σημαντικά την απόδοση των εγκαταστάσεων, ανάλογα με τον τρόπο που λειτουργούν. Αφενός η ποσότητα του νερού αυξάνεται εις βάρος της ποσότητας της καύσιμης ύλης, μειώνοντας τη θερμογόνο αξία του καυσίμου και αφετέρου ένα μέρος της θερμότητας που παράγεται κατά την αξιοποίηση του καυσίμου, απορροφάται τελικά ως ενθαλπία εξάτμισης του. Όπως θα αναλυθεί σε επόμενα κεφάλαια, στις περιπτώσεις της πυρόλυσης και αεριοποίησης τα παραπάνω φαινόμενα εμφανίζονται έντονα, οπότε και επιλέγονται ποσότητες βιομάζας με χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία. Ενώ όσο αφορά την άμεση καύση της, αυξημένες τιμές υγρασίας δεν αποτελούν συνήθως μειονέκτημα, ειδικά όταν αξιοποιείται η ενθαλπία συμπύκνωσης του νερού στα καυσαέρια.

Η ποιοτική υποβάθμιση που μπορεί να υποστεί μια ποσότητα βιομάζας είναι φαινόμενο που σχετίζεται με την περιεκτικότητα της σε υγρασία και δρα κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης της. Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, ένα μεγάλο μέρος των συστατικών της βιομάζας είναι ομάδες υδατανθρακικών ενώσεων και σακχάρων. Κάτω από ορισμένες συνθήκες, υπό τη διατήρηση της βιομάζας σε υψηλά επίπεδα υγρασίας, τα συστατικά αυτά υπόκεινται σε ζύμωση από μικροοργανισμούς, με ταυτόχρονη έκλυση διοξειδίου του άνθρακα και ποσοτήτων μεθανίου. Οι συνέπειες του φαινομένου είναι πολλαπλές. Αφενός συντελείται η απώλεια μέρους της μάζας του καυσίμου, με ρυθμό 1 – 2% μηνιαίως. Αφετέρου μειώνεται η περιεκτικότητα, στη συνολική ποσότητα της βιομάζας, των συστατικών που αναφέρθηκαν, τα οποία

αποδεικνύονται ιδιαίτερα χρήσιμα κατά τη διαδικασία της πυρόλυσης ή της αεριοποίησης. Αποτέλεσμα είναι επίσης η ταυτόχρονη αύξηση της αναλογίας της ποσότητας της βιομάζας που απομένει, σε τέφρα. Οι δύο τελευταίες συνέπειες είναι αυτές που συμβάλλουν και στην υποβάθμιση της ποιότητας του καυσίμου σε σχέση με την αξιοποίηση του μέσω θερμικών μεθόδων. [1], [2]

2.1.2 Χαρακτηριστικά τέφρας

Μια ομάδα κρίσιμων χαρακτηριστικών για κάθε ποσότητα βιομάζας είναι εκείνα που συνδέονται με την ύπαρξη της τέφρας. Η τέφρα είναι ένα μείγμα ανόργανων συστατικών, τα οποία βρίσκονται κατά κύριο λόγο εγκλωβισμένα στους ιστούς της και απελευθερώνονται κατά τη χημική διάσπαση της με τη μορφή σωματιδίων. Μικρό ποσοστό της τέφρας στη βιομάζα μπορεί να προέρχεται από το εξωτερικό περιβάλλον και να αποτελείται από ξένες ύλες, όπως λάσπη και σκόνη που έχουν κατακαθίσει στις επιφάνειες του καυσίμου. Η ύπαρξη της τέφρας δυσχεραίνει την αξιοποίηση της βιομάζας μέσω θερμικών μεθόδων, με τους τρόπους που αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

Περιεκτικότητα: Η περιεκτικότητα μιας ποσότητας βιομάζας σε τέφρα καθορίζεται έπειτα από την καύση ενός δείγματος σε συνθήκες εργαστηρίου, βάσει του ευρωπαϊκού προτύπου EN14775. Η μέγιστη θερμοκρασία καύσης δεν πρέπει να ξεπερνά τους 550 °C όταν η διαδικασία αυτή εκτελείται για βιομάζα, σε αντίθεση με το όριο των 780 °C που τίθεται για τα ανθρακούχα καύσιμα. Η αιτία είναι η ύπαρξη κρίσιμων συστατικών στην τέφρα της βιομάζας που εξατμίζονται πάνω από το συγκεκριμένο θερμοκρασιακό όριο.

Η τιμή της περιεκτικότητας μιας ποσότητας βιομάζας σε τέφρα, εκφράζεται, όπως και στην περίπτωση της υγρασίας, σε αναλογία κατά βάρος, επί της συνολικής μάζας του καυσίμου. Η περιεκτικότητα της βιομάζας σε τέφρα δυσχεραίνει την αξιοποίηση της μέσω θερμικών μεθόδων, με σχέση αναλογική ως προς την αυξανόμενη ποσότητα της. Όπως θα φανεί στη συνέχεια, η ξυλώδης βιομάζα περιέχει συνήθως κάτω από 1% τέφρα, ποσοστό που κυμαίνεται σε 5 με 12% για την αγροβιομάζα, ενώ υπάρχουν και περιπτώσεις καυσίμων που εμφανίζουν περιεκτικότητα έως και 25%.

Σύσταση: Οι πιο κρίσιμες παράμετροι σε σχέση με την αξιοποίηση βιομάζας με θερμικές μεθόδους πηγάζουν από τη σύσταση της τέφρας. Τα σχετικά ευρωπαϊκά πρότυπα διαχωρίζουν τα συστατικά της τέφρας σε δύο κατηγορίες. Στη μία ανήκουν

τα μείζονα (major elements), η συγκέντρωση των οποίων υπολογίζεται στη μάζα της τέφρας βάσει του προτύπου EN15290. Στην άλλη τα ελάσσονα (minor elements), η συγκέντρωση των οποίων υπολογίζεται αντίστοιχα βάσει του προτύπου EN15297.

Τα μείζονα στοιχεία περιέχονται στη μάζα της τέφρας σε υψηλές συγκεντρώσεις και είναι το αργίλιο, το ασβέστιο, ο σίδηρος, το μαγνήσιο, ο φώσφορος, το κάλιο, το πυρίτιο, το νάτριο και το τιτάνιο (Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na, Ti). Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, τα μείζονα στοιχεία σχετίζονται με τις ιδιότητες τήξης της τέφρας που επηρεάζουν τη λειτουργία των εγκαταστάσεων που αξιοποιούν βιομάζα μέσω θερμικών μεθόδων. Σε γενικές γραμμές τα αλκαλικά στοιχεία κάλιο και νάτριο, αλλά και φώσφορος, υποβαθμίζουν την αξία της βιομάζας, ενώ τα στοιχεία ασβέστιο, μαγνήσιο και υπό προϋποθέσεις το πυρίτιο την αναβαθμίζουν.

Τα ελάσσονα στοιχεία περιέχονται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις στη μάζα της τέφρας και είναι το κάδμιο, το κοβάλτιο, το χρώμιο, ο χαλκός, ο υδράργυρος, το μαγγάνιο, το μολυβδαίνιο, το νικέλιο, ο μόλυβδος, το αντιμόνιο, το βανάδιο και ο ψευδάργυρος (Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, V, Zn). Τα ελάσσονα στοιχεία σχετίζονται με τις ρυπογόνες εκπομπές των εγκαταστάσεων καθώς ανήκουν στην κατηγορία των βαρέων μετάλλων, ενώ το κάδμιο, ο μόλυβδος και ο ψευδάργυρος, επηρεάζουν ταυτόχρονα και τις κρίσιμες ιδιότητες της τέφρας.

Δύο συστατικά με παρουσία στην τέφρα της βιομάζας και έντονη επίδραση στα χαρακτηριστικά της, είναι το χλώριο και το θείο (Cl, S). Τα στοιχεία αυτά δεν εμφανίζονται στα συστατικά της τέφρας βάσει των προτύπων που αναφέρθηκαν, καθώς ένα μέρος τους εξατμίζεται στην περιοχή της τυποποιημένης θερμοκρασίας. Η ύπαρξη τους υποβαθμίζει τα χαρακτηριστικά της τέφρας αναλογικά με την αύξηση της συγκέντρωσης τους.

Η τέφρα της ξυλώδους βιομάζας παρουσιάζει καλύτερες ιδιότητες σε σχέση με αυτή της αγροβιομάζας, καθώς η δεύτερη περιέχει κάλιο, νάτριο και χλώριο σε μεγαλύτερες αναλογίες.

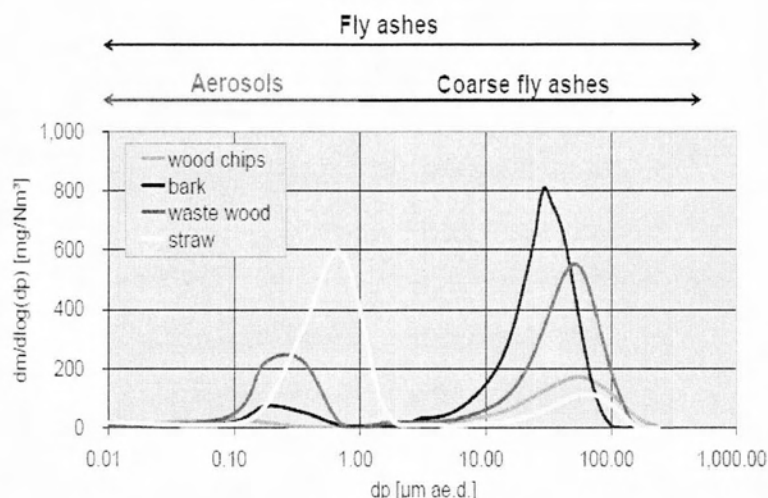
Δημιουργία σωματιδίων: Κατά τη διαδικασία της διάσπασης των ιστών της βιομάζας στο εσωτερικό των αντιδραστήρων που λειτουργούν μέσω θερμικών μεθόδων, απελευθερώνεται η περιεχόμενη τέφρα με τη μορφή σωματιδίων. Οι μηχανισμοί που δρουν πίσω από το φαινόμενο έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή σωματιδίων με εύρος διαστάσεων. Αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε

νανοσωματίδια (aerosols), διαμέτρου 100nm έως 1μm και σωματίδια μεγαλύτερων διαστάσεων (coarse particles) 1μm έως 250 μm.

Τα νανοσωματίδια δημιουργούνται από τις πτητικές ενώσεις της τέφρας και παρασέρνονται στο σύνολο τους από τα καυσαέρια. Οι πτητικές ενώσεις της τέφρας είναι ενώσεις που βρίσκονται συνήθως στην αέρια φάση, στις τυπικές θερμοκρασίες από τις οποίες χαρακτηρίζονται τα αέρια, που παράγονται στις θερμικές μεθόδους, από τη διάσπαση της βιομάζας. Οι ενώσεις αυτές σχηματίζονται από το κάλιο, το νάτριο και τον φώσφορο που περιέχει η τέφρα ως μείζονα στοιχεία. Από την κατηγορία των ελαστώνων στοιχείων ο μόλυβδος, ο ψευδάργυρος και το κάδμιο είναι αυτά που συμμετέχουν κατά κύριο λόγο στη δημιουργία πτητικών ενώσεων. Τέλος τα στοιχεία χλώριο και θείο συγκαταλέγονται στις έντονα πτητικές ενώσεις της τέφρας. Τα νανοσωματίδια που δημιουργούν οι πτητικές ενώσεις είναι σε μεγάλο βαθμό μη αντιμετωπίσιμα όσο αφορά τις εκπομπές ρύπων των εγκαταστάσεων, ενώ δημιουργούν σε αυτές και σημαντικά λειτουργικά προβλήματα.

Τα σωματίδια μεγαλύτερων διαστάσεων δημιουργούνται από τα υπόλοιπα συστατικά της τέφρας. Ένα μεγάλο ποσοστό τους παραμένει στο εσωτερικό των αντιδραστήρων, ενώ αυτό που διαφεύγει με τα καυσαέρια μπορεί να συγκρατηθεί σχετικά εύκολα, αποτελώντας ρυπογόνο παράγοντα σε μικρότερο βαθμό.

Η ξυλώδης βιομάζα τείνει να παράγει λιγότερα νανοσωματίδια από την αγροβιομάζα λόγω μικρότερης περιεκτικότητας πτητικών συστατικών στη μάζα της τέφρας. Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται η κατανομή της διαμέτρου σε μm των σωματιδίων τέφρας, εκφρασμένη σε mg/Nm^3 καυσαερίων, που εμφανίζεται κατά την καύση τεσσάρων ειδών βιομάζας. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζεται το ξύλο, με μαύρο ο φλοιός ξύλου, με μπλε τα απόβλητα ξύλου και με κίτρινο ένα συνηθισμένο είδος αγροβιομάζας. Είναι εμφανές ότι τα νανοσωματίδια που παράγονται από την αγροβιομάζα είναι πολλαπλάσια από αυτά των άλλων ειδών. Αυτό προκαλείται από την αυξημένη περιεκτικότητα της αγροβιομάζας στα αλκάλια κάλιο και νάτριο, και σε υψηλές συγκεντρώσεις χλωρίου, όπως θα φανεί σε επόμενο εδάφιο.



Σχήμα 8 Κατανομή μεγέθους παραγόμενων σωματιδίων τέφρας για διάφορα είδη βιομάζας

Δημιουργία επικαθίσεων: Όπως θα παρουσιαστεί σε επόμενα κεφάλαια, οι εγκαταστάσεις αξιοποίησης βιομάζας μέσω θερμικών μεθόδων περιλαμβάνουν λειτουργικά στοιχεία με επιφάνειες, που έρχονται σε επαφή με τα σωματίδια τέφρας, που δημιουργούνται κατά τη διάσπαση της βιομάζας. Στις επιφάνειες αυτές συντελείται συνήθως εναλλαγή θερμότητας. Τα σωματίδια τείνουν να αποθέτονται πάνω στις επιφάνειες, δημιουργώντας πολλαπλά προβλήματα. Οι αποθέσεις των σωματιδίων τέφρας ονομάζονται επικαθίσεις και διαχωρίζονται σε δύο είδη. Αυτές που σχηματίζονται σε επιφάνειες όπου εναλλάσσεται θερμότητα μέσω συναγωγής (fouling) και εκείνες που σχηματίζονται σε επιφάνειες όπου εναλλάσσεται θερμότητα μέσω ακτινοβολίας (slagging).

Οι επικαθίσεις στις επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας μέσω συναγωγής (fouling) δημιουργούνται από τα νανοσωματίδια της τέφρας. Στις επιφάνειες αυτές επικρατούν χαμηλότερες θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα οι ανόργανες πτητικές ενώσεις της τέφρας να συμπυκνώνονται πάνω τους, δημιουργώντας στρώσεις που προσθέτουν θερμική αντίσταση κατά την εναλλαγή θερμότητας. Έχουν αναπτυχθεί ποικίλες μέθοδοι για την αφαίρεση αυτών των στρωμάτων επικαθίσεων υπό την αδιάκοπη λειτουργία των εγκαταστάσεων. Σε γενικές γραμμές οι επικαθίσεις αυτού του είδους δεν παρουσιάζουν μεγάλη σκληρότητα, διευκολύνοντας την απομάκρυνση τους από τις επιφάνειες εναλλαγής. Στην ακόλουθη φωτογραφία παρουσιάζεται ο σχηματισμός αυτού του τύπου επικαθίσεων σε αυλούς βιομηχανικού λέβητα.



Σχήμα 9 Σχηματισμός επικαθίσεων σε επιφάνειες εναλλαγής με συναγωγή (fouling)

Οι επικαθίσεις στις επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας μέσω ακτινοβολίας (slagging) δημιουργούνται από τα σωματίδια τέφρας μεγαλύτερων διαστάσεων. Οι επιφάνειες αυτές χαρακτηρίζονται από υψηλότερες θερμοκρασίες και όπως θα αναλυθεί σε επόμενα κεφάλαια, βρίσκονται στο εσωτερικό των αντιδραστήρων και προηγούνται των επιφανειών συναγωγής ως προς τη διαδρομή που ακολουθούν τα καυσαέρια που παράγονται από τη διάσπαση της βιομάζας. Σε αυτές τις επιφάνειες δύνανται να σχηματίζουν αποθέσεις τηγμένα ή μερικώς τηγμένα σωματίδια τέφρας, σχηματίζοντας στρώσεις ενός παχύρρευστου τήγματος που προσθέτει θερμική αντίσταση κατά την εναλλαγή θερμότητας. Οι αποθέσεις αυτές δε δημιουργούνται πάντα. Η πιθανότητα ύπαρξης του φαινομένου και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του εξαρτώνται από τη συμπεριφορά τήξης της τέφρας που περιέχει το αξιοποιούμενο είδος βιομάζας. Οι αντιδραστήρες σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε το τήγμα να ρέει σε δοχεία που προβλέπονται για την περισυλλογή του και να μη συσσωρεύεται στα τοιχώματά τους. Για το λόγο αυτό είναι σημαντική η μειωμένη τιμή του ιξώδους του τήγματος, με σημείο αναφοράς τα 250 centipoise για πολλούς κατασκευαστές. Λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας στις επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας μέσω ακτινοβολίας, δεν παρατηρούνται σε αυτές συμπυκνώσεις ανόργανων πτητικών ενώσεων της τέφρας. Στη φωτογραφία που ακολουθεί παρουσιάζεται το φαινόμενο του συγκεκριμένου τύπου επικαθίσεων στο εσωτερικό ενός θαλάμου καύσης βιομάζας.



Σχήμα 10 Σχηματισμός επικαθίσεων στα τοιχώματα θαλάμου καύσης (slagging)

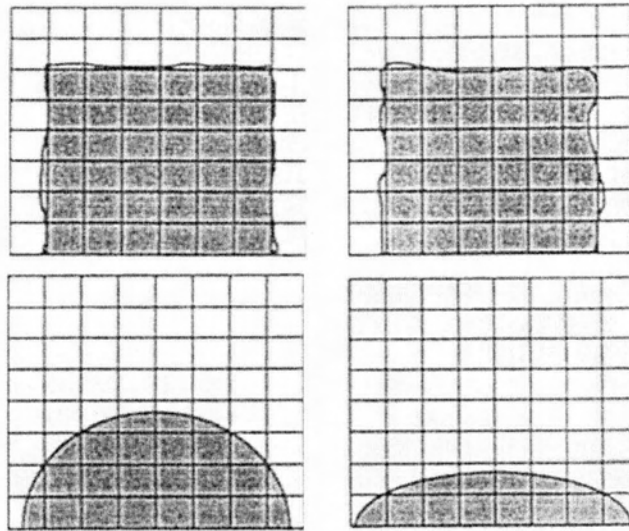
Παρά τη διαφορετική δράση των μηχανισμών των δύο ειδών επικαθίσεων τα αποτελέσματα είναι παρόμοια. Η προσθήκη θερμικών αντιστάσεων στα διαφορετικά είδη επιφανειών εναλλαγής μπορεί να δημιουργήσει επιπλοκές στη λειτουργία των εγκαταστάσεων. Το μέγιστο ζήτημα είναι η αποφυγή συμπαγών αποθέσεων (hard deposits) στις επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας μέσω συναγωγής. Οι συμπαγείς αποθέσεις σχηματίζονται όταν τηγμένα σωματίδια τέφρας φτάνουν στο σημείο να έρχονται σε επαφή με τέτοιες επιφάνειες χαμηλότερης θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα να στερεοποιούνται στιγμιαία και να συσσωρεύονται ταχέως πάνω σε αυτές. Σε αυτό το σημείο η διακοπή λειτουργίας της εγκατάστασης είναι αναπόφευκτη, ενώ μπορεί να προξηνηθούν και σημαντικές βλάβες. Το φαινόμενο παρατηρείται όταν οι αποθέσεις στις επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας μέσω ακτινοβολίας αποκτήσουν μεγάλο πάχος. Η θερμική αντίσταση που προστίθεται με αυτό τον τρόπο αποτρέπει την επαρκή ψύξη των καυσαερίων που φέρουν τα σωματίδια τέφρας, πριν αυτά αλληλεπιδράσουν με επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας μέσω συναγωγής, με αποτέλεσμα την ύπαρξη τηγμένων σωματιδίων. Για την αποφυγή δημιουργίας συμπαγών αποθέσεων απαιτείται κατάλληλος σχεδιασμός των εγκαταστάσεων που αξιοποιούν βιομάζα μέσω θερμικών μεθόδων. Συνήθως η λειτουργία τους εξειδικεύεται στη χρήση συγκεκριμένων ειδών βιομάζας ως καύσιμα.

Συμπεριφορά τήξης: Οι δυσκολίες που προκύπτουν από την ύπαρξη τέφρας στη βιομάζα σχετίζονται άμεσα με τη συμπεριφορά τήξης της. Η συμπεριφορά τήξης της τέφρας εξαρτάται από τη σύσταση της. Η τέφρα αποτελείται από ποικιλία συστατικών που σχηματίζουν ευτηκτικά μείγματα, με κάθε διαφορετικό μείγμα να παρουσιάζει διαφορετική θερμοκρασία τήξης. Ο συνδυασμός αυτών των μειγμάτων

προκαλεί την τήξη της τέφρας σε θερμοκρασιακό εύρος και όχι σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Η θερμοκρασία τήξης κάθε ευτηκτικού μείγματος επηρεάζεται από τη συγκέντρωση των συστατικών στη μάζα της τέφρας. Καθώς λοιπόν η σύσταση της τέφρας παρουσιάζει μεγάλη ποικιλομορφία, η συμπεριφορά τήξης διαφέρει αρκετά, όχι μόνο από ένα είδος βιομάζας σε άλλο, αλλά και μεταξύ όμοιων ειδών βιομάζας.

Σε σχέση με τα συστατικά της τέφρας αναφέρεται ότι οι αυξημένες συγκεντρώσεις των αλκαλικών στοιχείων καλίου, νατρίου και φωσφόρου είναι υπεύθυνες για τη μείωση των τιμών των χαρακτηριστικών θερμοκρασιών τήξης, ενώ τα στοιχεία ασβέστιο, μαγνήσιο και υπό προϋποθέσεις το πυρίτιο, προκαλούν το αντίθετο αποτέλεσμα και χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών της βιομάζας.

Ποικίλες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τήξης της τέφρας για κάθε είδος βιομάζας, ενώ οι σχετικές ευρωπαϊκές τεχνικές προδιαγραφές CEN/TS 15370-1 περιγράφουν τη μέθοδο των χαρακτηριστικών θερμοκρασιών. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στη διάκριση των κρίσιμων σταδίων κατά την τήξη της τέφρας και μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε είδος βιομάζας. Η μέθοδος περιλαμβάνει την προετοιμασία μιας ποσότητας τέφρας, που συμπιέζεται, ώστε να λάβει κυβική γεωμετρία (σχήμα 11). Το δοκίμιο που παρασκευάζεται, υπόκειται σε εύρος θερμοκρασιών, ώστε να διακριθούν οι τιμές των κρίσιμων θερμοκρασιακών σημείων που περιγράφονται στη συνέχεια. Στην πρώτη χαρακτηριστική θερμοκρασία IT εμφανίζεται η αρχική παραμόρφωση (Initial deformation Temperature) όπου το δοκίμιο έχει υποστεί τήξη κατά 15%. Σε αυτό το σημείο οι ακμές του κύβου αρχίζουν να στρογγυλεύουν. Περεταίρω αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί τήξη της τέφρας σε μεγαλύτερο ποσοστό. Η επόμενη χαρακτηριστική θερμοκρασία HT σημειώνεται όταν το δοκίμιο της τέφρας λάβει ημισφαιρική γεωμετρία και ονομάζεται θερμοκρασία ημισφαιρίου (Hemisphere Temperature). Σε αυτό το σημείο το δοκίμιο έχει υποστεί τήξη σε μεγάλο βαθμό, διατηρώντας αυξημένο ιξώδες. Η ανώτερη χαρακτηριστική θερμοκρασία FT είναι η θερμοκρασία ροής (Flow Temperature) όπου το ιξώδες του τηγμένου δοκιμίου έχει μειωθεί τόσο ώστε να ρέει πάνω στη δοκιμαστική επιφάνεια. Τα παραπάνω παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα με τη σειρά που περιγράφηκαν.



Σχήμα 11 Στάδια τήξης τέφρας

Η επίδραση των χαρακτηριστικών θερμοκρασιών στον κύβο της τέφρας είναι αντίστοιχη και στο σωματιδιακό επίπεδο. Θερμοκρασίες πάνω από την ΙΤ αφενός προσδίδουν στα σωματίδια τέφρας κολλώδη υφή, καθώς μεγαλύτερο μέρος της μάζας τους έχει υποστεί τήξη και αφετέρου προκαλούν σύγκλιση της γεωμετρίας τους προς τη σφαιρική, μειώνοντας την αεροδυναμική τους αντίσταση σε σχέση με τα καυσαέρια. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η επιτάχυνση των επικαθίσεων. Η θερμοκρασία των καυσαερίων που εισέρχονται σε επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας μέσω συναγωγής, θα πρέπει να είναι χαμηλότερες της ΙΤ ώστε να αποφευχθούν συμπαγείς επικαθίσεις.

Η συμπεριφορά τήξης της τέφρας είναι καθοριστικής σημασίας για τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων που λειτουργούν μέσω θερμικών μεθόδων. Οι μειωμένες τιμές των χαρακτηριστικών θερμοκρασιών που παρουσιάζονται σε κάποια είδη βιομάζας, επιβάλλουν περιοριστικές τιμές στη μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία πραγματοποίησης των θερμικών διεργασιών. Οι θερμοκρασιακοί περιορισμοί που τίθενται και προκύπτουν από τη συμπεριφορά τήξης της τέφρας σε κάθε είδος βιομάζας, προκαλούν αύξηση του αρχικού κόστους των εγκαταστάσεων, με τρόπους που αναδεικνύονται σε επόμενα κεφάλαια και μειωμένη απόδοση κατά τη λειτουργία τους.

Εκπομπές ρύπων: Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων που αξιοποιούν ως καύσιμο τη βιομάζα, διαφοροποιούνται σε σχέση με εκείνα των εγκαταστάσεων συμβατικών καυσίμων. Το γεγονός αυτό επιφέρει και αλλαγές σε σχέση με τα δεδομένα εκπομπών ρύπων.

Οι εκπομπές των ρυπογόνων αερίων μονοξειδίου του άνθρακα και οξείδια του αζώτου (CO , NO_x) επηρεάζονται κυρίως μέσω των θερμοκρασιακών περιορισμών που τίθενται κατά την πραγματοποίηση των θερμικών διεργασιών που συνδέονται με τη αξιοποίηση βιομάζας. Όπως αναφέρθηκε, οι περιορισμοί αυτοί συνδέονται με τα χαρακτηριστικά της τέφρας. Ο πρώτος ρύπος τείνει να αυξάνεται στη συγκέντρωση των καυσαερίων, ενώ ο δεύτερος μειώνεται.

Η συγκέντρωση χλωρίου και θείου στη μάζα των συμβατικών καυσίμων αλλά και της βιομάζας, έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή χλωριούχων και θειικών ενώσεων αντίστοιχα (Cl , SO_x). Λόγω της μεγάλης ποικιλομορφίας της σύστασης της βιομάζας οι εκπομπές των συγκεκριμένων ρύπων παρουσιάζουν μεγάλο εύρος. Σε γενικές γραμμές η αγροβιομάζα περιέχει αυτά τα στοιχεία σε πολλαπλάσια συγκέντρωση σε σχέση με την ξυλώδη, με την πρώτη να εμφανίζεται χειρότερη και τη δεύτερη καλύτερη ως προς τις εκπομπές αυτών των ρύπων, σε σύγκριση με τυπικές τιμές εκπομπών για συμβατικά καύσιμα.

Οι εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων συναρτώνται με την ύπαρξη πτητικών συστατικών στη μάζα της τέφρας, όπως αναλύεται σε προηγούμενη παράγραφο. Σημαντικό ρόλο παίζει και το είδος της θερμικής μεθόδου που εφαρμόζεται, με τη συμβατική μέθοδο της άμεσης καύσης να παρουσιάζει μεγαλύτερες εκπομπές του συγκεκριμένου ρύπου. Και εδώ η αξιοποίηση της αγροβιομάζας εμφανίζεται πιο ρυπογόνος σε σχέση με την ξυλώδη, λόγω μεγαλύτερης περιεκτικότητας της πρώτης σε συστατικά που προκαλούν τη δημιουργία αιωρούμενων σωματιδίων, αλλά και σε σύγκριση με συμβατικά καύσιμα, τα οποία εμφανίζουν τιμές εκπομπών μεταξύ των δύο ειδών βιομάζας.

Οι εκπομπές βαρέων μετάλλων τείνουν να είναι μικρότερες κατά την αξιοποίηση της βιομάζας έναντι των ανθρακούχων καυσίμων. Και πάλι η αγροβιομάζα εμφανίζει χειρότερα χαρακτηριστικά σε σχέση με την ξυλώδη ως προς αυτό το χαρακτηριστικό, καθώς τείνει να περιέχει πολλαπλάσια ποσότητα τέφρας, άρα και βαρέων μετάλλων.

Όσο αφορά τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, η βιομάζα εμφανίζει θετικά χαρακτηριστικά σε αντίθεση με τα συμβατικά καύσιμα που δημιουργούν μόνο αρνητικό αντίκτυπο. Όπως αναφέρεται σε προηγούμενο κεφάλαιο, η αξιοποίηση της βιομάζας αφενός συνοδεύεται με ουδέτερο ισοζύγιο εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, αφετέρου εξυπηρετεί στον περιορισμό εκπομπών μεθανίου που συντελείται στη φύση από νεκρωμένες ποσότητες ζωικής και φυτικής ύλης. Παρ' όλα αυτά ο

όγκος των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα εξαρτάται από την αποτελεσματικότητα κατά τη λειτουργία των εγκαταστάσεων που αξιοποιούν βιομάζα. Τα χαρακτηριστικά της τέφρας που περιέχεται στη βιομάζα επηρεάζουν τον όγκο εκπομπών του συγκεκριμένου ρύπου, μέσω της διαμόρφωσης των λειτουργικών χαρακτηριστικών των εγκαταστάσεων.

Οξειδωτική δράση: Τα συστατικά της τέφρας που προκαλούν την έντονη οξειδωτική της δράση είναι κυρίως το χλώριο, αλλά και το θείο. Αν και παρουσιάζονται σε μικρή περιεκτικότητα στη μάζα της τέφρας που προέρχεται από βιομάζα, αποτελούν κίνδυνο, καθώς μπορούν να βλάψουν τις επιφάνειες των λειτουργικών στοιχείων των εγκαταστάσεων. Η ύπαρξη του θείου μπορεί να δράσει ανασταλτικά ως προς την οξειδωτική δράση του χλωρίου, που είναι εντονότερη και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται και ως πρόσθετο για τη μείωση του οξειδωτικού χαρακτήρα της τέφρας συνολικά. Στην περιοχή των 650 °C τα πτητικά σωματίδια που περιέχουν μεγάλο μέρος του χλωρίου, στερεοποιούνται, σε βαθμό που ελαττώνει την οξειδωτική τους δράση. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε ανάλογες πρακτικές σχεδιασμού εγκαταστάσεων με έντονη παρουσία χλωρίου όπως είναι οι μονάδες καύσεις απορριμμάτων. Συνέπεια αυτού είναι το αυξημένο αρχικό κόστος και η μείωση της απόδοσης των εγκαταστάσεων.

Ιδιαίτερα προβληματική εμφανίζεται η περίπτωση της αξιοποίησης βιομάζας παράλληλα με άλλα καύσιμα, όπως κάποια είδη πλαστικού με μεγάλη περιεκτικότητα σε χλώριο. Η οξειδωτική δράση της τέφρας εντείνεται και σε περιπτώσεις δημιουργίας συμπυκνώματος νερού στις μεταλλικές επιφάνειες των λειτουργικών στοιχείων που αλληλεπιδρούν με αυτή.

Ασφαλής διάθεση: Κατά την αξιοποίηση βιομάζας μέσω θερμικών μεθόδων ένα μικρό μόνο ποσοστό τέφρας διαφεύγει στο περιβάλλον με τη μορφή νανοσωματιδίων. Η μεγαλύτερη μάζα της είτε παραμένει στο εσωτερικό των αντιδραστήρων θερμικών μεθόδων είτε συλλέγεται από συσκευές αντιρρύπανσης. Ακόμα και σε εγκαταστάσεις αξιοποίησης βιομάζας μεσαίας ισχύος μπορούν να συγκεντρώνονται ποσότητες χιλιάδων τόνων τέφρας ετησίως. Επομένως η διάθεση της τέφρας μπορεί να αποδειχθεί μετρήσιμος παράγοντας κόστους.

Μια εξασφαλισμένη επιλογή είναι η απόθεση της τέφρας σε χωματερές. Εκτός αυτού συνήθως πρακτική είναι είτε η χρήση της τέφρας για τον εμπλουτισμό του εδάφους γεωργικών εκτάσεων είτε ως πρώτη ύλη κατά την παραγωγή οικοδομικών υλικών. Σε σχέση με την πρώτη χρήση είναι σημαντικό αφενός η τέφρα να περιέχει

αυξημένη συγκέντρωση καλίου και φωσφόρου, στοιχεία που αποτελούν θρεπτικά συστατικά για τα φυτά και αφετέρου χαμηλή συγκέντρωση σε βαρέα μέταλλα. Τέλος, η συμβατότητα των συστατικών της τέφρας για τη χρήση της ως πρώτη ύλη στην παραγωγή οικοδομικών υλικών, καθορίζεται από ισχύουσες προδιαγραφές για τα υλικά αυτά.

Σύνοψη: Το επίπεδο ανάλυσης των χαρακτηριστικών της τέφρας έγινε στην παρούσα εργασία σε τέτοιο βαθμό, ώστε να αναδειχθεί ο συσχετισμός των χαρακτηριστικών λειτουργίας των εγκαταστάσεων που περιγράφονται σε επόμενο κεφάλαιο, με το είδος της βιομάζας που αξιοποιούν μέσω θερμικών μεθόδων. Τα χαρακτηριστικά της τέφρας εξαρτώνται από τη σύσταση της, με το κάθε συστατικό να επιδρά με διαφορετικό τρόπο. Στον πίνακα 2 συνοψίζονται τα δεδομένα, που αφορούν τα κυριότερα στοιχεία, που περιέχονται στην τέφρα της βιομάζας.

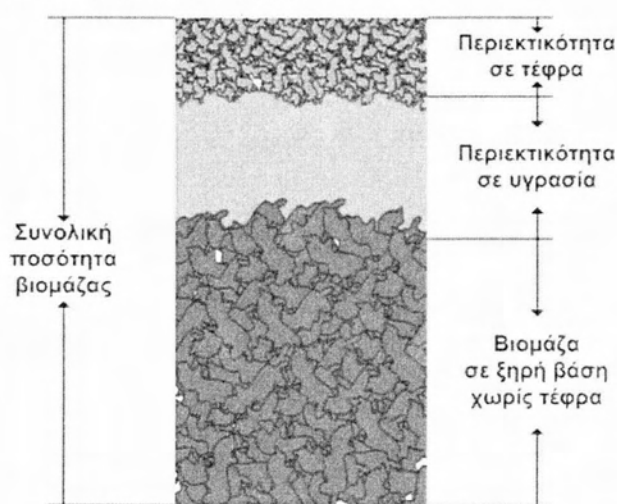
Κρίσιμα συστατικά τέφρας	Χαρακτηριστικά
Cl	έντονη οξειδωτική δράση, εκπομπές HCl, αύξηση νανοσωματιδίων, δημιουργία πτητικών συστατικών – αύξηση επικαθίσεων, αυξημένη συγκέντρωση στην αγροβιομάζα
S	οξειδωτική δράση, αναστολή οξειδωτικής δράσης Cl, εκπομπές SO _x , δημιουργία πτητικών συστατικών – αύξηση επικαθίσεων, αύξηση νανοσωματιδίων
K	δραστική μείωση σημείου τήξης της τέφρας, αύξηση νανοσωματιδίων, δημιουργία πτητικών συστατικών – αύξηση επικαθίσεων, εδαφοβελτιωτικό συστατικό, αυξημένη συγκέντρωση σε αγροβιομάζα
Na	μείωση σημείου τήξης της τέφρας, αύξηση νανοσωματιδίων, δημιουργία πτητικών συστατικών – αύξηση επικαθίσεων, αυξημένη συγκέντρωση σε αγροβιομάζα
Mg, Ca	αύξηση σημείου τήξης της τέφρας, χρήση ως πρόσθετα για βελτίωση χαρακτηριστικών τέφρας, αυξημένη συγκέντρωση σε ξυλώδη βιομάζα
Si	αύξηση σημείου τήξης της τέφρας υπό χαμηλή συγκέντρωση αργιλίου, ενδεχόμενη εξωγενής προέλευση από χώμα και σκόνη, αυξημένη συγκέντρωση σε αγροβιομάζα
P	δραστική μείωση σημείου τήξης της τέφρας, αύξηση νανοσωματιδίων, δημιουργία πτητικών συστατικών – αύξηση επικαθίσεων, εδαφοβελτιωτικό συστατικό
Cd, Pb, Zn	δραστική μείωση σημείου τήξης της τέφρας, αύξηση νανοσωματιδίων, δημιουργία πτητικών συστατικών – αύξηση επικαθίσεων, εκπομπές βαρέων μετάλλων
Co, Cr, Cu, Hg, Mn, V, Ni, Sb, Mo	μείωση σημείου τήξης της τέφρας, αύξηση νανοσωματιδίων, δημιουργία πτητικών συστατικών – αύξηση επικαθίσεων, εκπομπές βαρέων μετάλλων

Πίνακας 2 Ανακεφαλαίωση χαρακτηριστικών των συστατικών τέφρας

[5], [1], [2], [3], [10], [12]

2.1.3 Σύσταση βιομάζας σε ξηρή βάση, χωρίς τέφρα

Η μελέτη των χαρακτηριστικών της βιομάζας που αναλύονται στη συνέχεια, προϋποθέτει την αναγωγή της σε μάζα ξηρής βάσης, χωρίς τέφρα. Η μάζα αυτή αποτελείται από τους οργανικούς ιστούς της βιομάζας, από τους οποίους εξαιρείται η μάζα της εξωγενούς ποσότητας υγρασίας και το σύνολο των ανόργανων συστατικών, όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 12 Σχηματική αναπαράσταση βιομάζας σε ξηρή βάση χωρίς τέφρα

Η αναγωγή κάθε ποσότητας βιομάζας σε ξηρή βάση, χωρίς τέφρα, εξυπηρετεί στη σύγκριση των χαρακτηριστικών μεταξύ των διαφόρων ειδών, αλλά και στην εκτίμηση βασικών παραμέτρων όπως θα φανεί σε επόμενα κεφάλαια. Η μάζα αυτή παρουσιάζει κοινή δομή, όσο αφορά τη φυτική βιομάζα, μεταξύ των διαφορετικών ειδών. Αποτελείται κυρίως από τρεις ομάδες χημικών ενώσεων, την κυτταρίνη, την ημικυτταρίνη και τη λιγνίνη. Πρόκειται για πολυσακχαρικές ενώσεις, δηλαδή πολυμερή οργανικών ενώσεων, τα μονομερή στοιχεία των οποίων είναι κυρίως σάκχαρα. Η βιομάζα ζωικής προέλευσης παρουσιάζει διαφορετική δομή και αποτελείται κυρίως από ενώσεις πρωτεϊνικής φύσης και λιπαρά οξέα.

Η κυτταρίνη είναι ομάδα πολυμερικών ενώσεων γλυκόζης. Οι χημικές ενώσεις που συνθέτουν τη μάζα της κυτταρίνης, λαμβάνουν τη μορφή μοριακών ινών, ενώ το μοριακό τους βάρος είναι μεγάλο. Η στοιχειομετρική αναλογία των συστατικών των μορίων κυτταρίνης μπορεί να περιγραφεί μέσω του εμπειρικού τύπου $CH_6O_{0.83}$.

Η ημικυτταρίνη είναι ένα μείγμα πολυσακχαρικών ενώσεων σχηματισμένων από διαφορετικά είδη σακχάρων. Τα μόρια της ημικυτταρίνης χαρακτηρίζονται από μικρότερο μοριακό βάρος σε σχέση με αυτά της κυτταρίνης και διαφέρουν επίσης σε

μορφολογία, καθώς τα πρώτα εμφανίζουν διακλαδώσεις. Η στοιχειομετρική αναλογία των συστατικών των μορίων ημικυτταρίνης είναι παρόμοια με αυτή της κυτταρίνης και μπορεί να περιγραφεί μέσω του εμπειρικού τύπου $CH_{1.64}O_{0.78}$.

Η λιγνίνη αποτελεί ομάδα άμορφων χημικών ενώσεων μεγάλου μοριακού βάρους. Ο ρόλος της στους ιστούς που συνθέτουν τη βιομάζα είναι κυρίως δομικός και λιγότερο λειτουργικός, καθώς εξυπηρετεί τη συγκράτηση των πολυσακχαρικών ενώσεων της κυτταρίνης και ημικυτταρίνης, προσδίδοντας μεγαλύτερη σκληρότητα στα είδη βιομάζας στα οποία εμφανίζεται σε μεγαλύτερη αναλογία. Η στοιχειομετρική αναλογία των συστατικών της λιγνίνης μπορεί να περιγραφεί μέσω του εμπειρικού τύπου $C_2H_2O_2N_2$.

Η αναλογία των τριών ομάδων χημικών ενώσεων στην ποσότητα της βιομάζας είναι μεγάλης σημασίας. Αφενός η λιγνίνη παρουσιάζει μεγαλύτερη θερμογόνο αξία, όπως παρουσιάζεται σε επόμενο εδάφιο, αφετέρου η αυξημένη περιεκτικότητα της βιομάζας σε κυτταρίνη και ημικυτταρίνη διευκολύνουν τόσο τις θερμικές, όσο και τις υπόλοιπες μεθόδους. Συνηθισμένες τιμές περιεκτικότητας σε λιγνίνη της μάζας σε ξηρή βάση και χωρίς τέφρα κυμαίνονται στο εύρος 20 – 40%, με το υπόλοιπο μέρος να καλύπτεται από ημικυτταρίνη και κυτταρίνη, με την τελευταία να εμφανίζει συνήθως τις μεγαλύτερες αναλογίες.

Ο τρόπος ανάπτυξης των ιστών της φυτικής βιομάζας επιδρά στα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την υγρασία και τα ανόργανα στοιχεία που περιέχει. Όλα τα είδη φυτών μπορούν να διακριθούν βάσει της ταχύτητας ανάπτυξης τους. Τα είδη που αναπτύσσονται ταχύτερα, αποδίδοντας περισσότερη βιομάζα ετησίως ανά μονάδα επιφάνειας του εδάφους που καταλαμβάνουν, ονομάζονται ταχυαυξή. Αυτά τα είδη φυτών είναι που επιλέγονται και για τις ενεργειακές καλλιέργειες όπως παρουσιάζεται σε επόμενο εδάφιο. Το κοινό χαρακτηριστικό των ταχυαυξών ειδών είναι ότι τείνουν να εμφανίζουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε τέφρα και αλκάλια, σε σχέση με τα μη ταχυαυξή είδη φυτών. [1], [3]

2.1.4 Θερμογόνος αξία

Η θερμογόνος αξία μιας ποσότητας βιομάζας είναι η ενέργεια που εκλύεται κατά την πλήρη καύση της. Η συνηθισμένη μονάδα μέτρησης αυτής της παραμέτρου είναι σε MJ/kg καυσίμου. Ορισμένες θερμικές μέθοδοι συντελούν στη χημική μετατροπή της βιομάζας σε μείγμα αερίων καυσίμων, με θερμογόνο αξία μετρήσιμη

σε MJ/Nm^3 , δηλαδή ανά κυβικό μέτρο αερίων σε πρότυπες συνθήκες. Η θερμογόνος αξία της βιομάζας προέρχεται από τις χημικές ενώσεις της μάζας της, εκφρασμένης σε ξηρή βάση, χωρίς τέφρα. Προφανώς η μείωση αυτής της μάζας μέσω της αυξημένης περιεκτικότητας σε υγρασία και τέφρα, επιφέρουν μείωση στην τιμή της θερμογόνου αξίας. Η παράμετρος μπορεί να εκφραστεί σε ανώτερη και κατώτερη θερμογόνο αξία, με τους αντίστοιχους συμβολισμούς HHV και LHV .

Η τιμή της HHV εκφράζει τη συνολική ενέργεια που απελευθερώνεται από την καύση ενός κιλού βιομάζας, συμπεριλαμβανόμενης της τιμής της ενθαλπίας εξάτμισης των υδρατμών που περιέχονται στο καύσιμο. Η τιμή της LHV εκφράζει αντίστοιχα το ίδιο μέγεθος, εξαιρουμένης της τιμής της ενθαλπίας εξάτμισης των υδρατμών, όντας προφανώς μικρότερη από την πρώτη. Συνηθισμένες τιμές HHV στη συνολική μάζα των διαφόρων ειδών βιομάζας κυμαίνονται μεταξύ $10 - 20 MJ/kg$, με την περιεκτικότητα της υγρασίας και τέφρας στη μάζα του καυσίμου να καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα.

Ο υπολογισμός της θερμογόνου αξίας μιας ποσότητας βιομάζας μπορεί να γίνει με ποικίλες μεθόδους. Αφενός πειραματικές μετρήσεις αποδίδουν με ακρίβεια την πραγματική τιμή της. Αφετέρου τα γραμμικά μοντέλα υπολογισμού που περιγράφονται στη συνέχεια, τα οποία λαμβάνουν υπόψη δεδομένα που σχετίζονται με τη σύσταση του καυσίμου, μπορούν να έχουν παρόμοιο αποτέλεσμα. Τα ακόλουθα μοντέλα που περιγράφονται υπολογίζουν την τιμή της HHV βάσει δεδομένων για τη σύσταση της μάζας του καυσίμου σε ξηρή βάση, χωρίς τέφρα.

Ένα από τα γραμμικά μοντέλα υπολογισμού της θερμογόνου αξίας μιας ποσότητας βιομάζας, βασίζεται στα αναλυτικά δεδομένα της περιεκτικότητας της στα βασικά στοιχεία της, δηλαδή του άνθρακα, του υδρογόνου, του οξυγόνου και του αζώτου.

Ένα απλούστερο γραμμικό μοντέλο μπορεί να βασίζεται στη σύσταση του καυσίμου όσο αφορά την περιεκτικότητά του σε λιγνίνη. Όπως περιγράφεται σε προηγούμενο εδάφιο, η κυτταρίνη και η ημικυτταρίνη χαρακτηρίζονται από παρόμοια χημική δομή. Συνεπώς η τιμή της θερμογόνου αξίας των δύο ομάδων χημικών ενώσεων είναι επίσης παρόμοια και περίπου ίση με $18.6 MJ/kg$. Η λιγνίνη εμφανίζει ανώτερη θερμική αξία, που κυμαίνεται στο εύρος $23.26 - 26.58 MJ/kg$. Η σύσταση

της βιομάζας σε λιγνίνη επηρεάζει λοιπόν την τιμή της θερμογόνου αξίας και αυτό μπορεί να εκφραστεί με το περιγραφόμενο γραμμικό μοντέλο.

Ακόμα ένα γραμμικό μοντέλο υπολογισμού της θερμικής αξίας μιας ποσότητας βιομάζας προκύπτει λαμβάνοντας ως δεδομένη την περιεκτικότητα του καυσίμου σε σταθερό άνθρακα, παράμετρος που περιγράφεται στο επόμενο εδάφιο.

Η θερμογόνος αξία κάθε ποσότητας βιομάζας προκύπτει από την καύση των οργανικών ενώσεων που περιέχονται στη μάζα του καυσίμου και περιγράφονται σε προηγούμενο εδάφιο. Η μάζα των ανόργανων συστατικών επίσης οξειδώνεται, με αμελητέα όμως αποτελέσματα για τα συνηθισμένα είδη βιομάζας. Εξαιρείται επομένως κατά τον υπολογισμό της τιμής της θερμογόνου αξίας η μικρή αυτή ποσότητα ενέργειας που προκύπτει. [8], [2], [1], [6], [29]

2.1.5 Αναλογία πτητικών συστατικών – σταθερού άνθρακα

Κάθε ποσότητα βιομάζας παρουσιάζει μια αναλογία πτητικών και σταθερών συστατικών. Τα πτητικά συστατικά του καυσίμου είναι αυτά που προκύπτουν υπό την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών και βρίσκονται σε αέρια φάση, χωρίς να έχει συντελεστεί καύση. Τα μη πτητικά συστατικά παραμένουν σε στερεά φάση έπειτα από την εξάτμιση των πτητικών και είναι ανθρακούχες ενώσεις που λαμβάνουν τη μορφή σωματιδίων, η μάζα των οποίων ονομάζεται απανθράκωμα (char).

Η μέτρηση της αναλογίας των πτητικών συστατικών σε μια ποσότητα βιομάζας γίνεται μέσω της υποβολής της σε υψηλές θερμοκρασίες για ορισμένο χρονικό διάστημα, ελλείψει οξυγόνου. Οι θερμοκρασίες αυτές φτάνουν τους 950 °C όταν πρόκειται για ανθρακούχα καύσιμα, ενώ όσο αφορά τη βιομάζα οι μετρήσεις γίνονται σε μέγιστη θερμοκρασία εύρους 400 – 700°C. Το χρονικό διάστημα είναι της τάξης 5 – 10 min, με το σχεδιασμό του πειράματος έτσι ώστε η θερμοκρασία να αυξάνεται γραμμικά με τη χρονική εξέλιξη. Με αυτό τον τρόπο προκύπτουν συμπεράσματα και σε σχέση με την ταχύτητα δημιουργίας των πτητικών συστατικών.

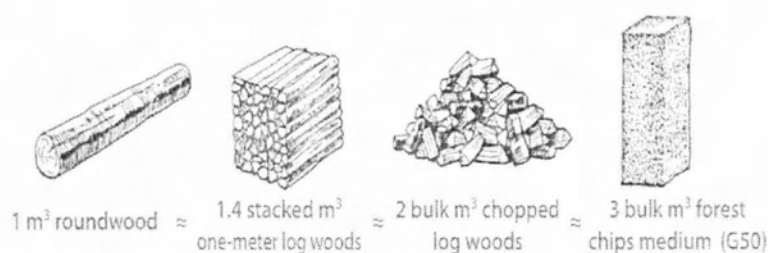
Συνηθισμένες αναλογίες πτητικών συστατικών – σταθερού άνθρακα σε μάζα καυσίμου εκφρασμένη σε ξηρή βάση χωρίς τέφρα είναι της τάξης 80% προς 20%, με τα ανθρακούχα καύσιμα να εμφανίζουν αντίστροφες αναλογίες, παρουσιάζοντας αρκετά μικρότερη περιεκτικότητα σε πτητικά συστατικά.

Η παράμετρος αυτή υποδεικνύει το βαθμό ευκολίας που παρουσιάζεται σε σχέση με την αξιοποίηση μιας ποσότητας βιομάζας μέσω των θερμικών μεθόδων πυρόλυσης και αεριοποίησης, οι οποίες αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο. [1]

2.1.6 Χύδην πυκνότητα

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της βιομάζας που επηρεάζει άμεσα το κόστος που σχετίζεται με την αξιοποίηση της, είναι αυτό της χύδην πυκνότητας που παρουσιάζει. Η παράμετρος ορίζεται ως η μάζα του καυσίμου διαιρεμένη με το μέσο όγκο που αυτό καταλαμβάνει, υπό τις συνηθισμένες συνθήκες στις οποίες στοιβάζεται. Ο όγκος κάθε ποσότητας βιομάζας επηρεάζει τη διαστασιολόγηση του εξοπλισμού που τη διαχειρίζεται, των αντίστοιχων αποθηκευτικών χώρων και του κόστους μεταφοράς της. Συνεπώς η επιρροή της χύδην πυκνότητας των ποσοτήτων βιομάζας στο κόστος αξιοποίησης της είναι εμφανής.

Η χύδην πυκνότητα παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα μεταξύ των ειδών βιομάζας. Επίσης εξαρτάται από τις μορφές στις οποίες βρίσκεται το καύσιμο (chip, pellet, μπάλες), όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 16. Η τιμή της πυκνότητας μπορεί να κυμαίνεται στα πλαίσια των $100 - 1000 \text{ kg/m}^3$.



Σχήμα 13 Ίδια ποσότητα ξύλου με διαφορετικές τιμές πυκνότητας

[1], [31]

2.1.7 Τα χαρακτηριστικά των κύριων τμημάτων των φυτών

Τα διαφορετικά μέρη των φυτών από τα οποία αποτελείται μια ποσότητα βιομάζας, μπορούν να παρουσιάζουν διαφορές ως προς τα χαρακτηριστικά τους. Στον πίνακα 3 εμφανίζονται τυπικές τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τα διαφορετικά μέρη διαφόρων ειδών φυτών.

Μέρος φυτού	% Περιεκτικότητα σε		Θερμογόνος αξία (MJ/kg)	Περιεκτικότητα σε αλκάλια και χλώριο
	λιγνίνη	τέφρα		
φύλλωμα	15 – 35	1 – 15	16 – 19	αυξημένη
βελόνες κωνοφόρων	38	3 – 7	19 – 21	αυξημένη
κλαδιά	20 – 35	3 – 15	16 – 20	μέτρια
κορμοί	20 – 33	0.4 – 1	18 – 21	χαμηλή
στελέχη ποών	15 – 35	3 – 15	16 – 19	μέτρια – αυξημένη
Φλοιός	30 – 35	3 – 20	12 – 18	πολύ αυξημένη

Πίνακας 3 Χαρακτηριστικά διαφόρων τμημάτων των φυτών

Οι φλοιοί των φυτών παρουσιάζουν αυξημένη περιεκτικότητα σε τέφρα και αλκάλια, σε αντίθεση με το κύριο μέρος της μάζας του. Όσο αυξάνεται η αναλογία του φλοιού στην ποσότητα της βιομάζας, τόσο πιο επιβαρυνμένη ως προς τα χαρακτηριστικά της τέφρας είναι ολόκληρη η ποσότητα του καυσίμου. Χαρακτηριστική είναι η αυξημένη περιεκτικότητα τέφρας των κλαδιών, τα οποία παρουσιάζουν μικρή μάζα ξύλου σε σχέση με την επιφάνεια τους, την οποία καταλαμβάνει ο φλοιός. Ανάλογη επιβάρυνση προσθέτει και η μάζα των φύλλων, σε μικρότερο όμως βαθμό. Βάσει των παραπάνω, είναι θεμιτή η απομάκρυνση του φλοιού και των φύλλων από ποσότητες βιομάζας που πρόκειται να αξιοποιηθούν μέσω θερμικών μεθόδων. [31], [32]

2.1.8 Ζητήματα ασφαλείας

Σε αυτό το σημείο περιγράφονται τα δύο κυριότερα ζητήματα ασφαλείας σε σχέση με την αξιοποίηση της βιομάζας, συνέπεια των οποίων είναι η αναγκαιότητα εφαρμογής πρακτικών αποφυγής των κινδύνων που πηγάζουν από αυτά, ιδίως κατά τα στάδια αποθήκευσης και διακίνησης ποσοτήτων βιομάζας.

Υπό ορισμένες προϋποθέσεις αναπτύσσονται ομάδες μικροοργανισμών στη μάζα του καυσίμου. Ενδέχεται οι οργανισμοί αυτοί να είναι παθογόνοι, με συνηθέστερες τις περιπτώσεις μυκήτων που μπορούν να αποδειχθούν επιβλαβείς για τον άνθρωπο. Το γεγονός αυτό αποτελεί πιθανό κίνδυνο για εργαζόμενους στον τομέα της αξιοποίησης βιομάζας.

Τίθεται επίσης το ζήτημα της αυτανάφλεξης ορισμένων ειδών βιομάζας. Η αυτανάφλεξη είναι ένα επικίνδυνο φαινόμενο που μπορεί να παρουσιαστεί κυρίως σε στοιβαγμένες ποσότητες τεμαχίων βιομάζας μικρών διαστάσεων, με ανομοιόμορφη κατανομή περιεκτικότητας σε υγρασία. Οι στοιβαγμένες ποσότητες αποτελούν μονωτικό στρώμα για τη θερμότητα που μπορεί να προκύψει από εξώθερμες αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην ποσότητα της βιομάζας. Παρουσιάζεται με αυτό τον τρόπο αυξημένη θερμοκρασία στον πυρήνα της στοίβας, επιταχύνοντας τις αντιδράσεις, έως το θερμοκρασιακό σημείο της αυτανάφλεξης. Το φαινόμενο αποτρέπεται είτε μέσω τεχνητού αερισμού των στοιβαγμένων ποσοτήτων είτε με αραυή κατανομή της βιομάζας σε μικρότερες στοίβες. [10]

2.2 Προσφερόμενα είδη βιομάζας προς αξιοποίηση με θερμικές μεθόδους

2.2.1 Κατηγοριοποίηση ειδών

Στον πίνακα 4 που ακολουθεί εμφανίζονται τα πιο συνηθισμένα είδη βιομάζας που συναντώνται στην ελληνική ύπαιθρο, κατηγοριοποιημένα ως προς τον παραγωγικό τομέα προέλευσης τους.

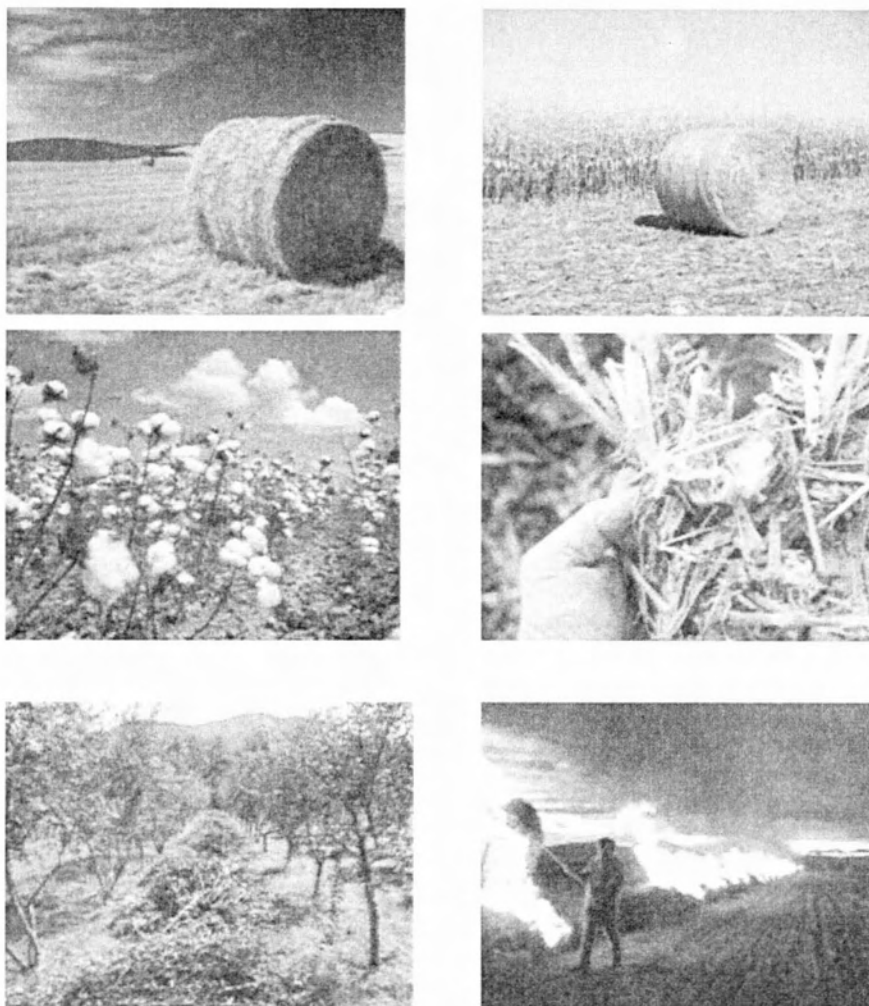
Τομέας προέλευσης	Τύπος βιομάζας	Συνηθέστερα είδη
Αγροβιομάζα (υπολείμματα καλλιεργειών)	ποώδης θαμνώδης	στελέχη δημητριακών (άχυρο)
		στελέχη καλαμποκιού
	ξύλωσης	κλαδιά δένδρωδών καλλιεργειών
Ενεργειακές καλλιέργειες	ποώδης θαμνώδης	αγριαγκινάρα
		καλάμι
		μίσχανθος
	ξύλωσης	λεύκα
		ευκάλυπτος
ψευδακακία		
Δασική βιομάζα (διαχείριση δασικών εκτάσεων)	Δασικά προϊόντα	συμπαγή κομμάτια ξύλου
		τεμαχισμένα απόβλητα (chip) με φλοιό και φύλλωμα
Βιομηχανία (προέλευση από παραπροϊόντα της μεταποίησης)	Μεταποίηση ξυλείας	πριονίδι
		απόβλητα κατεργασίας ξύλου
		φλοιός ξύλου (bark)
	Μεταποίηση αγροτικών προϊόντων	Πυρήνες καρπών
		Φλοιοί και μη βρώσιμα στελέχη οπωρολαχανικών και καρπών
Ζωικά απόβλητα		
Αστική βιομάζα	Βιομάζα καλλωπιστικών φυτών	κούρεμα γκαζόν
		κλαδονομές – περιποίηση καλλωπιστικών φυτών
	Κατάλληλα αστικά απόβλητα	οργανικά απορρίμματα
		απορριπτόμενη δομική ξυλεία

Πίνακας 4 Ταξινόμηση ειδών βιομάζας

2.2.2 Αγροβιομάζα

Σε αυτό το σύνολο συγκαταλέγονται οι ποσότητες βιομάζας που προκύπτουν ως υπολείμματα κατά την παραγωγή αγροτικών προϊόντων. Αυτές οι ποσότητες είτε συλλέγονται έτσι ώστε να απομακρυνθούν από τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις όταν αυτό απαιτείται από την ίδια την καλλιέργεια, είτε εγκαταλείπονται επί τόπου κατά τη συγκομιδή των αγροτικών προϊόντων. Ορισμένα είδη αγροβιομάζας όπως είναι τα στελέχη των σιτηρών και του καλαμποκιού επίσης συλλέγονται, καθώς μπορούν να αξιοποιηθούν ως ζωοτροφές. Συνεπώς η εφοδιαστική αλυσίδα σε σχέση με την

αγροβιομάζα είναι οργανωμένη σε κάποιο βαθμό στην ελληνική ύπαιθρο, αποδίδοντας χιλιάδες τόνους βιομάζας ετησίως, με δυναμική για παραγωγή πολλαπλάσιων ποσοτήτων. Παρ' όλα αυτά η διαδεδομένη αλλά και διωκόμενη πρακτική που ακολουθείται είναι η ελεύθερη καύση των υπολειμμάτων βιομάζας. Στις ακόλουθες φωτογραφίες παρουσιάζονται μερικά από τα πιο συνηθισμένα είδη καλλιεργειών που αποδίδουν τις μεγαλύτερες ποσότητες αγροβιομάζας στην ελληνική ύπαιθρο.



Σχήμα 14 Διάφορα είδη αγροβιομάζας, υπαίθρια καύση

Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται στοιχεία σε σχέση με τις διαθέσιμες ποσότητες συνηθισμένων ειδών αγροβιομάζας, συναρτήσει των καλλιεργούμενων εκτάσεων των αντίστοιχων αγροτικών προϊόντων στην ελληνική ύπαιθρο.

Είδος καλλιέργειας	Καλλιεργούμενη έκταση ($\times 10^3$ στρέμματα)	Παραγωγή βιομάζας ($\times 10^3$ ξηροί τόνοι ετησίως)	% ποσοστό άμεσα διαθέσιμης ποσότητας
Σιτάρι (σκληρό & μαλακό)	8570	1765	15

Ελιά	7495	1469	50
Βαμβάκι	4127	1463	60
Καλαμπόκι	2132	861	60
Κριθάρι	1449	238	15
Κλήματα	1334	456	80
Εσπεριδοειδή	401	190	80
Σύνολο:	25508	6442	3092
Άμεσα διαθέσιμη ποσότητα βιομάζας ($\times 10^3$ ξηροί τόνοι ετησίως):			

Πίνακας 5 Διαθεσιμότητα ειδών αγροβιομάζας

Η αξιοποίηση της αγροβιομάζας για την παραγωγή ενέργειας παρουσιάζει πολλαπλά οφέλη. Εκτός του περιβαλλοντικού που συνδέεται γενικά με την παραγωγή ενέργειας από βιομάζα, μερικά από αυτά είναι η αύξηση της προστιθέμενης αξίας των καλλιεργειών, η δημιουργία περισσότερων θέσεων εργασίας στην ύπαιθρο και η αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας με παράλληλη δυνατότητα αξιοποίησης της θερμότητας σε οικισμούς.

Σε γενικές γραμμές τα χαρακτηριστικά της πωόδους αγροβιομάζας προκαλούν δυσκολίες ως προς την αξιοποίηση της μέσω θερμικών μεθόδων. Αυτές σχετίζονται με την υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα, αλκάλια και χλώριο και την προβληματική συμπεριφορά καύσης ορισμένων ειδών. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των συνηθέστερων ειδών αγροβιομάζας.

Είδος βιομάζας	% περιεκτικότητα σε ξηρή βάση				%περ/τα υγρασίας	IT (°C)	FT (°C)	HHV (MJ/kg)
	τέφρα	πτητικά	λιγνίνη	χλώριο				
στελέχη σιτηρών	8.9	71.3	22.3	0.78	20-30	760	819	17.51
στελέχη βαμβακιού	17.3	65.4	15.4	0.49	10-20	1320	1410	15.83
στελέχη καλαμποκιού	5.6	75.2	13.1	0.61	20-30	1311	1373	17.65
κληματίδες αμπελώνων	2.2	78.2	23.9	0.04	20-60	1500	>1500	19.1
κλαδιά οπωροφόρων	1.65	75	25	0.04	20-60	1500	>1500	20

Πίνακας 6 Χαρακτηριστικά ειδών αγροβιομάζας

[11], [3], [6], [10]

2.2.3 Ενεργειακές καλλιέργειες

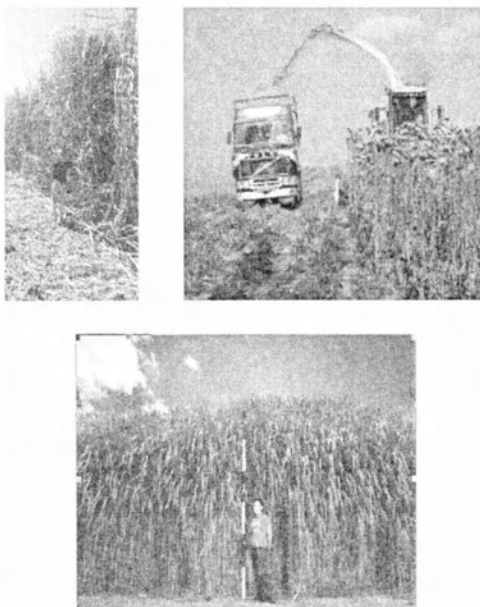
Οι ενεργειακές καλλιέργειες αφορούν την παραγωγή βιομάζας από ταχυσυπόφυτα φυτά που καλλιεργούνται για αυτό το σκοπό. Τα φυτά που επιλέγονται στις ενεργειακές καλλιέργειες ονομάζονται ταχυσυπόφυτα καθώς πρόκειται για είδη που αναπτύσσονται γρήγορα, αποδίδοντας υψηλή στρεμματική ποσότητα ξηρής μάζας

ετησίως. Τα είδη των ενεργειακών καλλιεργειών μπορούν να διαχωριστούν στις πολυετείς και τις μονοετείς, ενώ υπάρχει και η επιλογή της ανάπτυξης αλσιλίων με στόχο την παραγωγή ξυλώδους βιομάζας.

Οι πολυετείς καλλιέργειες παρουσιάζουν κύκλο ζωής της τάξης των 10 – 15 ετών και τα συνηθισμένα καλλιεργούμενα είδη είναι η αγριαγκινάρα, το καλάμι και ο μίσχανθος. Το πλεονέκτημα των καλλιεργειών αυτών είναι ότι ο απαιτούμενος χρόνος εργασίας και το αρχικό κόστος οργώματος και φύτευσης επιμερίζεται στο πλήθος των ετών που διαρκούν. Το μειονέκτημα αυτού του τύπου καλλιεργειών έγκειται στο γεγονός της μακροχρόνιας δέσμευσης της γης για συγκεκριμένη χρήση. Η επιλογή αυτού του τύπου καλλιέργειας μπορεί να γίνεται σε μη γόνιμα εδάφη που παρουσιάζουν χαμηλές αποδόσεις ή σε περιπτώσεις μη εντατικής αξιοποίησης της αγροτικής γης για οποιονδήποτε λόγο. Η βιομάζα που παράγεται από τέτοιου είδους καλλιέργειες παρουσιάζει αυξημένη περιεκτικότητα σε αλκάλια και χλώριο. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές που αντιπροσωπεύουν σε γενικές γραμμές αυτά τα είδη βιομάζας.

Είδος βιομάζας	% περιεκτικότητα σε ξηρή βάση			%περ/τα υγρασίας	HHV (MJ/kg)
	τέφρα	πτητικά	χλώριο		
άγρια αγκινάρα	6.7	77.7	0.47	12 – 15	17.9
μίσχανθος	2.8	66.8	0.22	12 – 15	18.5

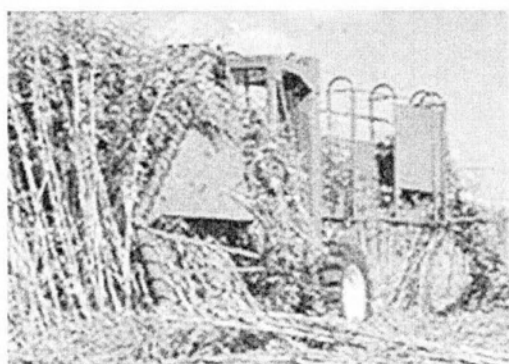
Πίνακας 7 Χαρακτηριστικά ειδών πολυετών καλλιεργειών



Σχήμα 15 Καλλιέργεια καλάμιου, αγριαγκινάρας και μίσχανθου

Οι ετήσιες ενεργειακές καλλιέργειες εμφανίζουν κύκλο ζωής διάρκειας λίγων μηνών ή μιας εποχής και αφορούν την καλλιέργεια φυτών όπως κενάφ και σόργο ή

συμβατικών φυτών όπως διαφόρων ειδών σιτηρά και καλαμπόκι. Παρά την απαίτηση των καλλιεργειών για όργωμα και φύτεμα σε κάθε σοδειά, η αντιμετώπιση τους με συμβατικές μεθόδους συμπιέζει το κόστος παραγωγής. Επιπλέον μπορεί να επιλεγεί η εκ περιτροπής καλλιέργεια διαφορετικών ειδών στις ίδιες εκτάσεις κατά τη διάρκεια του έτους. Αν και οι ετήσιες ενεργειακές καλλιέργειες μπορούν να αποτελέσουν πηγή στερεάς βιομάζας προς αξιοποίηση μέσω θερμικών μεθόδων, η καλλιέργεια τους αποσκοπεί κυρίως στην παραγωγή αμυλούχων δημητριακών για χρήση ως ζωοτροφές ή στην παραγωγή βιοαιθανόλης, όπως και στην παραγωγή ινών που αποτελούν την πρώτη ύλη σε ευρύ φάσμα βιομηχανικών προϊόντων. Τα χαρακτηριστικά των ειδών βιομάζας που ενδείκνυνται για ετήσιες καλλιέργειες είναι παρόμοια με αυτά που παρατίθενται σε προηγούμενο πίνακα για την αγροβιομάζα.



Σχήμα 16 Καλλιέργεια σόργου και κενάφ

Οι δασοπονικές καλλιέργειες βραχείας περιόδου (Short Rotation Coppice – SRC) πραγματοποιούνται μέσω της δημιουργίας ασιλιών πυκνής βλάστησης. Τα είδη φυτών που χρησιμοποιούνται είναι ταχυαυξή είδη δένδρων όπως η λεύκα, ο ευκάλυπτος, η ιτιά και η ψευδακακία. Ο κύκλος ζωής των ενεργειακών καλλιεργειών αυτού του είδους είναι βραχύς, συνήθως όμως μεγαλύτερος των μονοετών καλλιεργειών. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του είδους καλλιέργειας είναι η παραγωγή βιομάζας που προσεγγίζει τα χαρακτηριστικά της ξυλώδους, τα οποία είναι τα πιο επιθυμητά ως προς την αξιοποίηση μέσω θερμικών μεθόδων. Στη συνέχεια παρατίθενται δεδομένα για την ιτιά και τη λεύκα, που αντιπροσωπεύουν και τα υπόλοιπα είδη αυτής της κατηγορίας.

Είδος βιομάζας	% περιεκτικότητα σε ξηρή βάση			%περ/τα υγρασίας	HHV (MJ/kg)
	τέφρα	πτητικά	χλώριο		
ιτιά	2.0	71.3	0.03	20-30	19.38
λεύκα	2.7	84.8	0.01	20-30	19.02

Πίνακας 8 Χαρακτηριστικά ειδών SRC

Ενώ στις φωτογραφίες που ακολουθούν παρουσιάζεται ο τρόπος συγκομιδής και φύτευσης αυτών των καλλιιεργειών.



Σχήμα 17 Καλλιέργεια SRC

[1], [2], [10], [31], [26]

2.2.4 Δασική βιομάζα

Οι δασικές εκτάσεις μπορούν μέσω της σωστής διαχείρισης τους να αποτελούν μεγάλη πηγή βιομάζας με βιώσιμο τρόπο. Η επανομαζόμενη ως δασική βιομάζα είναι ξυλώδης καθώς προέρχεται από τα δένδρα και παρουσιάζει τα πλέον επιθυμητά χαρακτηριστικά ως προς την αξιοποίηση της μέσω θερμικών μεθόδων. Επιπρόσθετο πλεονέκτημα που συμβαδίζει με την αξιοποίηση του πόρου, είναι η δημιουργία θέσεων εργασίας στις πληθυσμιακά αραιωμένες περιοχές όπου εμφανίζονται συνήθως τα μεγαλύτερα δάση.

Τα προϊόντα που παράγονται αρχικά κατά την κοπή των δένδρων είναι οι κορμοί, τα κλαδιά που αποκόπτονται από τους κορμούς ώστε αυτοί να καταλαμβάνουν μικρότερο όγκο και λοιπά τεμάχια ξύλου ποικίλων διαστάσεων, όπως είναι οι κορυφές και οι βάσεις. Οι ομοιόμορφοι, ευθύγραμμοι κορμοί επαρκούς διαμέτρου και μήκους επιλέγονται ως πρώτη ύλη για τη βιομηχανία ξύλου. Τα υπόλοιπα συμπαγή κομμάτια προορίζονται απευθείας για καυσόξυλα. Τα περισσεύματα που λαμβάνουν τη μορφή λεπτότερων κλαδιών ή κορυφών δένδρων, χαρακτηρίζονται από υποπολλαπλάσια χύδην πυκνότητα σε σχέση με τα συμπαγή κομμάτια ξύλου. Έτσι συνηθίζεται ο τεμαχισμός τους σε μικρά κομμάτια (chip) επί τόπου από ειδικές συσκευές, ώστε να μειωθεί ο όγκος και να διευκολυνθεί η μεταφορά τους. Σημειώνεται εδώ ότι το τεμαχισμένο ξύλο αυτού του τύπου συμπεριλαμβάνει στη μάζα του ολόκληρη την ποσότητα του φλοιού και των φύλλων, με αποτέλεσμα να αποτελεί υποβαθμισμένη ποιότητα βιομάζας σε σχέση με το καθαρό ξύλο. Οι διαδικασίες που περιγράφονται παραπάνω, παρουσιάζονται στις ακόλουθες φωτογραφίες.



Σχήμα 18 Εργασίες σε δασικές εκμεταλλεύσεις

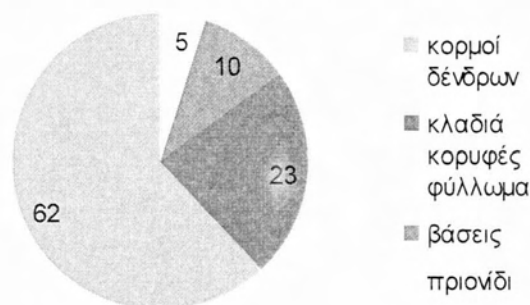
Ενώ στην επόμενη φωτογραφία εμφανίζεται μια ποσότητα τεμαχισμένου ξύλου.



Σχήμα 19 Τεμαχισμένο ξύλο (chip)

Στο σχήμα 20 παρουσιάζεται η στατιστική αναλογία υπό την οποία παράγονται τα περιγραφόμενα δασικά προϊόντα. Παρατηρείται ότι περίπου τα δύο τρίτα της μάζας κάθε δένδρου αποτελούνται από τον κορμό του, ο οποίος υπόκειται σε περεταιίρω μεταποίηση, ενώ περίπου το ένα τέταρτο αντιστοιχεί στη μάζα που δύναται να μετατραπεί σε καυσόξυλα και τεμαχισμένο ξύλο (chip) και προορίζεται για ενεργειακή αξιοποίηση. Μια πρακτική που αποσκοπεί στη βιωσιμότητα της εκμετάλλευσης δασικών εκτάσεων προβλέπει την απόθεση ενός ποσοστού της μάζας των δένδρων και πάλι στο έδαφος, προκειμένου να διατηρηθούν τα θρεπτικά συστατικά του, να διευκολυνθεί η ανάπτυξη νέων δένδρων και να διατηρηθεί η βιοποικιλότητα στην περιοχή. Πρακτικά, το ποσοστό αυτό προέρχεται από το πριονίδι που παράγεται από την κοπή του δένδρου και ένα μέρος των κλαδιών.

**% ποσοστά παραγόμενων προϊόντων
σε δασικές εκμεταλλεύσεις**



Σχήμα 20 Δασικά προϊόντα

Τα διαφορετικά είδη δασικής βιομάζας παρουσιάζουν μικρές διαφορές ως προς τα χαρακτηριστικά τους. Στον πίνακα 9 παρατίθενται στοιχεία για δύο αντιπροσωπευτικά είδη δασικής βιομάζας. Σε γενικές γραμμές τα κωνοφόρα δένδρα χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη θερμογόνο αξία, ενώ τα φυλλοβόλα παρουσιάζουν συνήθως καλύτερα χαρακτηριστικά σε σχέση με την τέφρα.

Είδος βιομάζας	% περιεκτικότητα σε ξηρή βάση			%περ/τα υγρασίας	IT (°C)	FT (°C)	HHV (MJ/kg)
	τέφρα	αλκάλια	χλώριο				
οξιά	0.5	0.22	0.006	30 – 50	1500	>1500	19.8
έλατο	0.4	0.13	0.005	30 – 50	1236	1280	21

Πίνακας 9 Χαρακτηριστικά δασικής βιομάζας

Οι ελληνικές δασικές εκτάσεις καλύπτουν περίπου 37500 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Αν υποθεθεί ότι μέσω ήπιας εκμετάλλευση η δυνατότητα ετήσιας παραγωγής ξυλείας από μια δασική έκταση είναι 100kg ανά στρέμμα, το μέγιστο δυναμικό αυτού του πόρου υπολογίζεται σε πάνω από 3.5 εκατομμύρια τόνους ξυλείας ανά έτος. Αυτή η ποσότητα είναι ικανή για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος 350 MW.

Με εξαίρεση το τεμαχισμένο ξύλο (chip), τα υπόλοιπα δασικά προϊόντα υπόκεινται σε περαιτέρω επεξεργασία. Η αντίστοιχη περιγραφή γίνεται στο επόμενο εδάφιο, στο οποίο παρατίθενται και αναλυτικά στοιχεία σε σχέση με τα χαρακτηριστικά των πιο συνηθισμένων ειδών βιομάζας που συναντώνται στις ελληνικές δασικές εκτάσεις.

[1], [2], [10], [31], [26]

2.2.5 Βιομάζα βιομηχανικής προέλευσης

Ορισμένα είδη βιομάζας προκύπτουν ως απόβλητα διεργασιών του τομέα της μεταποίησης δασικών και αγροτικών προϊόντων. Αυτά είτε αξιοποιούνται ως έχουν

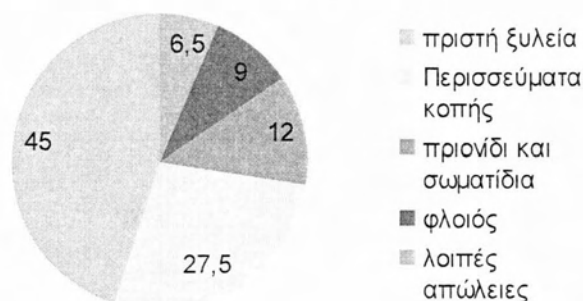
είτε υπόκεινται σε περεταίρω επεξεργασία προς παραγωγή στερεών καυσίμων με βελτιωμένα χαρακτηριστικά.

Μεταποίηση ξυλείας: Σε προηγούμενο εδάφιο περιγράφονται τα προϊόντα που προκύπτουν κατά την εκμετάλλευση δασικών εκτάσεων. Οι εκτελούμενες διεργασίες σε σχέση με την παραγωγή των προαναφερθέντων δασικών προϊόντων στην περιοχή της ξύλευσης, είναι υποτυπώδεις. Πέραν της κοπής των δένδρων, ο διαχωρισμός των κορμών από τα κλαδιά και τις κορυφές, όπως και ο τεμαχισμός των κομματιών ξύλου που μένουν ως υπολείμματα, αποσκοπεί στη μείωση του κόστους μεταφοράς από τις δύσβατες συνήθως περιοχές ξύλευσης, στις επιχειρήσεις μεταποίησης της ξυλείας. Στην επόμενη παράγραφο περιγράφονται οι συνήθειες διεργασίες που εκτελούνται κατά τη μεταποίηση της ξυλείας, με την παραγωγή των αντίστοιχων ειδών βιομάζας που προκύπτουν ως απόβλητα.

Το πρώτο στάδιο μεταποίησης της ξυλείας γίνεται στα πριστήρια. Εκεί οι κορμοί προετοιμάζονται έτσι ώστε να τεμαχιστούν σε επιθυμητή γεωμετρία, παράγοντας την πριστή ξυλεία, δηλαδή ξύλινα τεμάχια που λαμβάνουν συνήθως τη μορφή ράβδων ορθογωνικής διατομής. Η πριστή ξυλεία είναι το μοναδικό προϊόν των πριστηρίων που δεν προορίζεται για ενεργειακή αξιοποίηση. Παρ' όλα αυτά τα απόβλητα που προκύπτουν από τη διαδικασία παραγωγής της είναι εκείνα που προορίζονται σε μεγάλο ποσοστό για το σκοπό αυτό.

Τα απόβλητα καθαρού ξύλου των πριστηρίων είναι το πριονίδι και ένας όγκος κομματιών ξύλου που προκύπτει ως περίσσειμα εκ των σημείων κοπής. Επιπρόσθετα η κοπή των κλαδιών και η απομάκρυνση των φύλλων από τους κορμούς παράγει τις αντίστοιχες μάζες αποβλήτων. Ένας όγκος βιομάζας που επίσης προκύπτει ως απόβλητο στα πριστήρια, είναι αυτός των φλοιών του ξύλου. Η διεργασία της αποφλοιώσης μπορεί να πραγματοποιηθεί σε συμπαγή κομμάτια ξύλου και είναι ουσιώδης όσο αφορά την αξιοποίηση των πρώτων για παραγωγή ενέργειας μέσω θερμικών μεθόδων, λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας του φλοιού σε τέφρα και αλκάλια. Στο σχήμα 21 παρουσιάζεται η στατιστική αναλογία μάζας προϊόντος – αποβλήτων, που παρατηρείται κατά την παραγωγή πριστής ξυλείας.

% ποσοστά παραγόμενων
προϊόντων σε πριστήρια



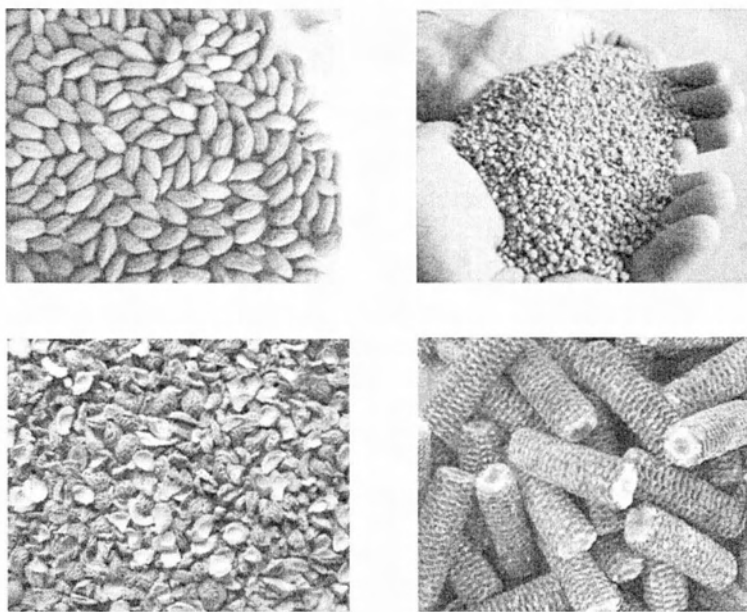
Σχήμα 21 Παραπροϊόντα μεταποίησης ξυλείας

Παρατηρείται ότι η μισή περίπου μάζα της αρχικής ποσότητας ξύλου που καταφθάνει στο πριστήριο μεταποιείται σε πριστή ξυλεία. Η υπόλοιπη ποσότητα που μένει ως υπόλειμμα, δύναται να αποτελέσει την ενεργειακά αξιοποιήσιμη βιομάζα. Εναλλακτικές χρήσεις των υπολειμμάτων μειώνουν τη διαθέσιμη ποσότητα. Τα πριονίδια και τα συμπαγή κομμάτια ξύλου αποτελούν την πρώτη ύλη για παραγωγή συνθετικής ξυλείας, ενώ η ποσότητα των φλοιών χρησιμοποιείται ως υπόβαθρο ανάπτυξης καλλωπιστικών φυτών (compost). Τα χαρακτηριστικά αυτών των ειδών βιομάζας παρατίθενται σε προηγούμενους πίνακες.

Μεταποίηση αγροτικών προϊόντων: Σε προηγούμενα εδάφια περιγράφονται περιπτώσεις στερεάς βιομάζας που προκύπτει επί τόπου σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις μέσω της διαδικασίας παραγωγής αγροτικών προϊόντων. Σε αυτό το σημείο διακρίνονται οι περιπτώσεις της επιπλέον ποσότητας βιομάζας που προκύπτει κατά τη μεταποίηση των αγροτικών προϊόντων. Η ποσότητα αυτή συλλέγεται με ευκολία, καθώς προκύπτει κατά τη μεταποίηση των ήδη συγκεντρωμένων αγροτικών προϊόντων. Τα διαφορετικά είδη βιομάζας με προέλευση αυτό τον τομέα εμφανίζουν μεγάλη ποικιλία, παρ' όλα αυτά μπορούν να ταξινομηθούν στις κατηγορίες που αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

Μια συνήθης κατηγορία βιομάζας που προκύπτει κατά τη μεταποίηση αγροτικών προϊόντων είναι οι πυρήνες διαφόρων ειδών καρπών. Οι πυρήνες ενδέχεται να αφαιρούνται αυτούσιοι από καρπούς που αποξηραίνονται, κομποστοποιούνται, συσκευάζονται ως έχουν ή τεμαχίζονται για την παραγωγή μεγάλης γκάμας τροφίμων. Παραδείγματα που συναντώνται σε ελληνικές επιχειρήσεις, σχετίζονται με τη μεταποίηση ελιάς, ροδάκινου, δαμάσκηνου και καλαμποκιού. Ο πυρήνας καλαμποκιού σε περιπτώσεις χρήσης μοντέρνου

εξοπλισμού διαχωρίζεται κατά τη διαδικασία της συγκομιδής. Σε άλλες περιπτώσεις οι πυρήνες συνθλίβονται μαζί με τους καρπούς προς παραγωγή ελαίων, ζωοτροφών και πολτών. Αντίστοιχο είναι και πάλι το παράδειγμα της ελιάς. Στην περίπτωση της παραγωγής ελαιόλαδου, η μάζα του πυρήνα της ελιάς ανακτάται και αποξηραίνεται λαμβάνοντας τη μορφή πριονιδιού, ενώ σε άλλες περιπτώσεις ενδέχεται η μάζα του πυρήνα να αποτελεί ποσοστό της μάζας του τελικού προϊόντος. Σε γενικές γραμμές οι πυρήνες ελαιωδών καρπών χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη θερμογόνο αξία σε σχέση με τους μη ελαιώδεις. Το παραγόμενο είδος βιομάζας που προκύπτει από τους πυρήνες των καρπών ονομάζεται συχνά πυρηνόξυλο, με συνηθέστερη προέλευση στην Ελλάδα αυτή των καρπών ελιάς. Αν και αρκετές επιχειρήσεις που παράγουν πυρηνόξυλο, έχουν προχωρήσει στην αξιοποίηση του καλύπτοντας μέρος των ενεργειακών τους αναγκών, η μάζα είναι πλεονάζουσα στις περισσότερες περιπτώσεις και διατίθεται ως καύσιμη ύλη στο εμπόριο.



Σχήμα 22 Πυρήνες ελιάς, ροδάκινου και καλαμποκιού

Μια ποσότητα βιομάζας που παράγεται επίσης κατά τη μεταποίηση αγροτικών προϊόντων, προέρχεται από ακατάλληλα ή μη βρώσιμα στελέχη της μάζας των ειδών που μεταποιούνται. Συνηθισμένες περιπτώσεις είναι φλοιοί, κουκούτσια, φύλλωμα, ακατάλληλα ή μη βρώσιμα στελέχη οπωρολαχανικών και είδη που απορρίπτονται κατά τη διαλογή. Σε κάποιες περιπτώσεις τέτοιου είδους απόβλητα μπορούν να αποτελέσουν ζωοτροφές ή την πρώτη ύλη για παραγωγή προϊόντων με μεγάλη προστιθέμενη αξία, όπως οι φλοιοί των εσπεριδοειδών χρησιμεύουν στην παραγωγή αιθέριων ελαίων. Μεταξύ των διαφορετικών μεταποιούμενων ειδών η

παραγόμενη βιομάζα παρουσιάζει μεγάλες διαφορές σε σχέση με τα χαρακτηριστικά της. Τα καταλληλότερα είδη τέτοιας προέλευσης για αξιοποίηση μέσω θερμικών μεθόδων, είναι αυτά με τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία. Συνηθισμένα παραδείγματα είναι οι φλοιοί ρυζιού και ξηρών καρπών όπως το αμύγδαλο, το καρύδι ή το φουντούκι.



Σχήμα 23 Φλοιοί ρυζιού, κέλυφη καρυδιού και αμυγδάλου

Στον πίνακα που ακολουθεί εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά των ειδών βιομάζας που προκύπτουν κατά τη μεταποίηση αγροτικών προϊόντων.

Είδος βιομάζας	% περιεκτικότητα σε ξηρή βάση			%περ/τα υγρασίας	HHV (MJ/kg)
	τέφρα	πτητικά	χλώριο		
πυρήνας καλαμποκιού	6.9	69.7	0.24	8-12	17.6
πυρήνας ελιάς	1.7	82	0.04	30 – 50	21.4
κέλυφος αμυγδάλου	3.29	76	<0.01	8-12	19.7
φλοιός ρυζιού	20	63.52	0.12	8-12	16.2

Πίνακας 10 Χαρακτηριστικά υπολειμματικής βιομάζας μεταποίησης αγροτικών προϊόντων

Μεταποίηση τροφίμων ζωικής προέλευσης: Μια ποικιλία ειδών βιομάζας ζωικής προέλευσης συγκαταλέγεται επίσης στα είδη που παράγονται ως υπολείμματα κατά τη μεταποίηση τροφίμων. Τέτοιου είδους υπολείμματα δύνανται να χρησιμοποιηθούν σχεδόν σε κάθε περίπτωση ως πρώτες ύλες για την παραγωγή άλλων προϊόντων. Βέβαια η στροφή μεγάλου μέρους του δυτικού κόσμου σε

υγιεινότερες διατροφικές συνήθειες και πρακτικές ευημερίας των εκτρεφόμενων ζώων μεταβάλλει τους συντελεστές προς την κατεύθυνση της απόρριψης ποσοτήτων λίπους, εντοσθίων και οστών από την παραγωγική διαδικασία. Τα συνηθισμένα είδη βιομάζας ζωικής προέλευσης που ενδείκνυνται για αξιοποίηση μέσω θερμικών μεθόδων είναι το ζωικό λίπος, κελύφη θαλάσσιων τροφίμων όπως οι γαρίδες, θρυμματισμένα οστά ψαρικών και σφαγίων και εναπομένουσες μάζες υποβαθμισμένων ειδών κρέατος, που αξιοποιούνται και ως ζωοτροφές και έχουν υποστεί ξήρανση ώστε να διατηρούνται αναλλοίωτες, όπως είναι το MBM (Meat and Bone Meal). Τα αναφερόμενα είδη βιομάζας παρουσιάζονται στις επόμενες φωτογραφίες.



Σχήμα 24 Βιομάζα ζωικής προέλευσης. MBM αριστερά, κελύφη γαρίδας δεξιά [1], [2], [10], [31], [26]

2.2.6 Αστική βιομάζα

Εντός των αστικών περιοχών προκύπτουν ποσότητες βιομάζας, με συνηθισμένες πηγές προέλευσης τις ποσότητες που προκύπτουν από την περιποίηση των χώρων πρασίνου, τα οικιακά οργανικά απορρίμματα και ξυλώδεις μάζες απορριμμάτων που προέρχονται από την ανέγερση ή ανακαίνιση οικοδομών και την απόρριψη επίπλων και άλλων. Σε γενικές γραμμές, τα είδη που παρουσιάζονται σε μείγματα στις ποσότητες της αστικής βιομάζας είναι κατά περίπτωση αυτά που περιγράφονται σε προηγούμενα εδάφια, δηλαδή στελέχη ποωδών φυτών, κλαδιά, φλοιοί και πυρήνες καρπών και συμπαγή κομμάτια ξύλου. Η αστική βιομάζα βέβαια παρουσιάζεται ως ιδιαίτερη περίπτωση λόγω της ανάμειξης όλων αυτών. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που προκύπτουν από την ενεργειακή αξιοποίηση της περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

Η διαθεσιμότητα αυτής της πηγής βιομάζας είναι μεγάλη και έγκειται στο γεγονός ότι η περισυλλογή της από τις αστικές περιοχές είναι αναγκαστική για

προφανείς λόγους. Η χρήση της προς παραγωγή ενέργειας προσδίδει προστιθέμενη αξία στις τοπικές οικονομίες, σε αντίθεση με τη συνήθη πρακτική της ταφής των απορριμμάτων που ακολουθείται ευρέως στην Ελλάδα.

Τα μειονεκτήματα της ενεργειακής αξιοποίησης αστικής βιομάζας πηγάζουν κυρίως από το γεγονός της έντονης μεταβλητότητας των παραμέτρων που τη χαρακτηρίζουν. Ακόμα, η πιθανή ανάμειξη με ακατάλληλα είδη απορριμμάτων, όπως πλαστικό με μεγάλη περιεκτικότητα σε χλώριο δύναται να αποτελέσει κίνδυνο σε ορισμένες περιπτώσεις.

2.3 Επεξεργασία βιομάζας

2.3.1 Ξήρανση

Η διαδικασία της ξήρανσης, δηλαδή της απομάκρυνσης ποσοτήτων νερού από τη βιομάζα, είναι μια διεργασία που συναντάται πολύ συχνά κατά την επεξεργασία στερεών βιοκαυσίμων. Η διεργασία είναι σημαντική ειδικά όσο αφορά τις θερμικές μεθόδους αξιοποίησης της βιομάζας. Υψηλές τιμές περιεκτικότητας του καυσίμου σε υγρασία μπορούν να μειώσουν την απόδοση των εγκαταστάσεων που το αξιοποιούν. Η ξήρανση προσθέτει επιπλέον κόστος στην ποσότητα της βιομάζας, οπότε τίθεται το ζήτημα της σκοπιμότητας της. Τα κριτήρια επιλογής της αναγκαιότητας της διεργασίας σχετίζονται αφενός με το είδος της αξιοποιούμενης βιομάζας και αφετέρου με τον τρόπο λειτουργίας της εγκατάστασης που την αξιοποιεί.

2.3.2 Βελτίωση χαρακτηριστικών τέφρας

Βάσει της ανάλυσης που γίνεται σε αυτό το κεφάλαιο σε σχέση με τα χαρακτηριστικά της τέφρας που περιέχεται στη βιομάζα, παρουσιάζονται σε αυτό το σημείο και οι αντίστοιχες μέθοδοι βελτίωσης τους.

Διαχωρισμός των τμημάτων των φυτών: Όπως αναλύθηκε, τα διαφορετικά μέρη των φυτών παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές ως προς τα χαρακτηριστικά τους σε σχέση με την τέφρα. Μια πρακτική που μπορεί να ακολουθηθεί είναι ο διαχωρισμός των διαφορετικών μερών. Με απλές διεργασίες μπορεί να απομακρυνθεί το φύλλωμα των φυτών που αποτελούν την ποσότητα της βιομάζας, το οποίο εμφανίζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε τέφρα και αλκάλια σε σχέση με την υπόλοιπη μάζα. Αντίστοιχα η απομάκρυνση του φλοιού, όταν καθίσταται δυνατή, μπορεί να εξυπηρετεί την αναβάθμιση της βιομάζας με παρόμοιο τρόπο.

Κοσκίνισμα: Ένα ποσοστό της μάζας της τέφρας των φυτών είναι εξωγενές, καθώς προέρχεται από ποσότητες σκόνης και χόματος που αποθέτονται στις επιφάνειες τους. Μέρος της ποσότητας αυτής μπορεί να απομακρυνθεί μέσω του κοσκινίσματος της βιομάζας. Επίσης με αυτό τον τρόπο δύνανται να απομακρυνθούν και τρίμματα φύλλων και φλοιού.

Προσθήκη ανόργανων συστατικών: Η συμπεριφορά τήξης της τέφρας θα μπορούσε να βελτιωθεί σε μια ποσότητα βιομάζας, μέσω της προσθήκης μαγνησίου ή ασβεστίου. Όπως αναλύθηκε στο αντίστοιχο εδάφιο, τα στοιχεία αυτά τείνουν να αυξάνουν τη θερμοκρασία τήξης της τέφρας. Η μέθοδος παράλληλα επιδρά στην αύξηση της περιεκτικότητας της βιομάζας σε ανόργανα συστατικά, επομένως η βελτίωση αυτή πρέπει να μελετάται προσεκτικά κατά περίπτωση.

Σύγκαιση (co-combustion): Η ταυτόχρονη καύση διαφορετικών ειδών βιομάζας μπορεί να συνεισφέρει στη δημιουργία των κατάλληλων μειγμάτων ανόργανων στοιχείων, βελτιώνοντας τη συμπεριφορά τήξης της τέφρας χωρίς την προσθήκη βελτιωτικών ουσιών.

Έκπλυση χλωρίου και θείου: Ένα ποσοστό του περιεχόμενου χλωρίου και θείου στην ποσότητα της βιομάζας βρίσκεται στη μορφή αλάτων και άλλων χημικών ενώσεων ευδιάλυτων στο νερό. Μια μέθοδος που θα μπορούσε να απομακρύνει ποσότητες αυτών των στοιχείων από τη μάζα του καυσίμου, είναι η ανάμειξη του με νερό. Εφόσον η διεργασία είναι οικονομικά βιώσιμη, θα μπορούσε η έκπλυση του χλωρίου και του θείου να μειώσει τόσο την όξινη συμπεριφορά των καυσαερίων, όσο και το σχηματισμό επικαθίσεων στις επιφάνειες εναλλαγής. Τα ευρωπαϊκά πρότυπα που προδιαγράφουν τις ιδιότητες των στερεών βιοκαυσίμων, περιλαμβάνουν και το πρότυπο EN15105 σε σχέση με τη διαλυτότητα στο νερό του χλωρίου και θείου που περιέχεται στη βιομάζα.

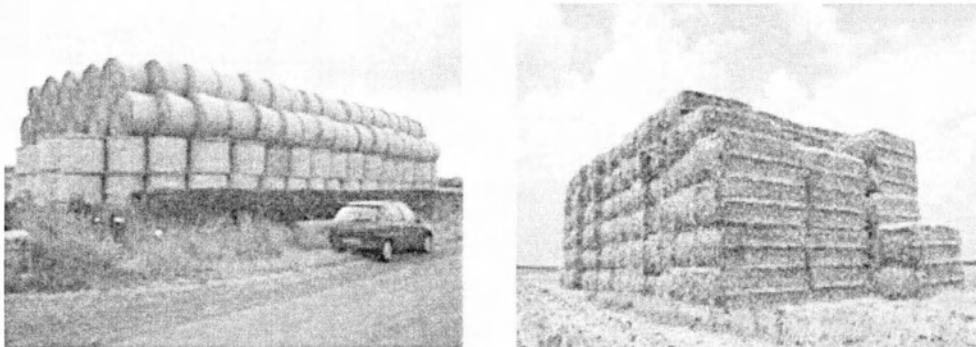
[4], [10], [13], [30]

2.3.3 Μείωση πυκνότητας

Όπως αναφέρεται σε προηγούμενο εδάφιο, η παράμετρος της χύδην πυκνότητας μιας ποσότητας βιομάζας, είναι καθοριστικής σημασίας σε σχέση με το κόστος διακίνησης και αποθήκευσης της. Παρουσιάζονται λοιπόν σε αυτό το σημείο οι συνήθεις μέθοδοι μείωσης της πυκνότητας της.

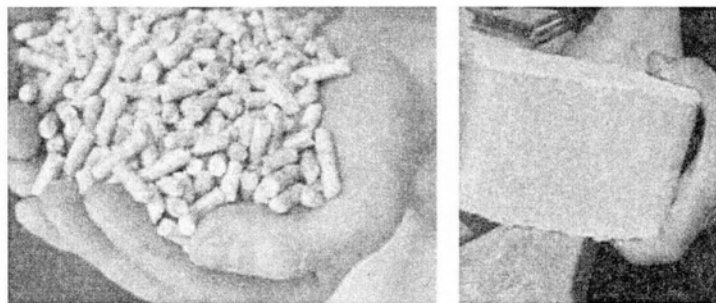
Συμπίεση σε μπάλες: Μια μέθοδος που χρησιμοποιείται κατά κόρον κατά το χειρισμό της αγροβιομάζας είναι η συμπίεση της σε μπάλες. Αυτός ο τρόπος μείωσης

της πυκνότητας βρίσκει εφαρμογή σε κομμάτια βιομάζας όπως είναι τα κλαδιά, οι κληματόβερρες και στελέχη μεγάλου μήκους ποωδών φυτών. Ουσιαστικά τα τεμάχια της βιομάζας αναδεύονται και συμπιέζονται ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα να δημιουργήσουν ένα στιβαρό πλέγμα που διατηρεί το σχήμα του. Η συμπίεση της βιομάζας σε μπάλες διευκολύνει αρκετά τη διαδικασία της μεταφοράς και φορτοεκφόρτωσης. Οι μπάλες μπορεί να είναι είτε κυλινδρικές, είτε ορθογωνικές, όπως παρουσιάζεται στις επόμενες φωτογραφίες. Οι μεγάλες κυλινδρικές μπάλες μπορεί να ζυγίζουν 300–500kg, ενώ οι μεγάλες ορθογωνικές 500–600kg. Ορθογωνικές μπάλες μικρών διαστάσεων μπορεί να ζυγίζουν 40–60kg. Η πυκνότητα της μπάλας ισούται με $100\text{--}110\text{kg/m}^3$.



Σχήμα 25 Δεματοποιημένη βιομάζα σε μορφή μπάλας

Πελλετοποίηση–Μπρικετοποίηση: Μια διαδικασία που θα μπορούσε να μειώσει δραστικά τη χύδην πυκνότητα μιας ποσότητας βιομάζας, είναι η συμπίεση της έως το σημείο συσσωμάτωσης. Τα προϊόντα που προκύπτουν από αυτή τη διαδικασία είναι είτε τα πέλλετ είτε οι μπρικέτες και χαρακτηρίζονται από τιμές χύδην πυκνότητας περίπου 1000kg/m^3 . Τα πέλλετ λαμβάνουν τη μορφή συμπαγών κυλινδρικών μεγέθους τάξης μερικών χιλιοστών, ενώ οι μπρικέτες εμφανίζονται σε ορθογωνικές ή κυλινδρικές γεωμετρίες μεγέθους τάξης μερικών δεκάδων εκατοστών, όπως παρουσιάζεται στις φωτογραφίες που ακολουθούν.



Σχήμα 26 Πέλλετ και μπρικέτα

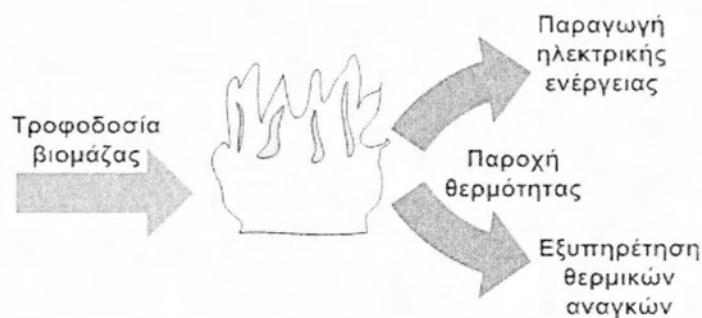
Η συμπίεση της βιομάζας σε αυτή τη μορφή απαιτεί αρχικά των τεμαχισμό της σε πολύ μικρές διαστάσεις. Έπειτα οι διεργασίες που ακολουθούν, παρουσιάζουν αυξημένη απαίτηση σε ηλεκτρική ενέργεια. Αποτέλεσμα είναι το αυξημένο κόστος της βιομάζας, το οποίο καθίσταται στις περισσότερες περιπτώσεις απαγορευτικό για χρήση καυσίμων αυτής της μορφής σε βιομηχανικές εφαρμογές. Η χρήση πέλλετ και μπρικετών ενδείκνυται για οικιακές ή εξειδικευμένες εφαρμογές. Ένα πλεονέκτημα που παρουσιάζουν τα καύσιμα αυτής της μορφής σε σχέση με την αξιοποίηση τους μέσω θερμικών μεθόδων, είναι η πολύ καλή συμπεριφορά καύσης τους.

[1], [2], [9], [10], [30], [31]

3. Βασικές θερμικές μέθοδοι αξιοποίησης βιομάζας

3.2 Άμεση καύση βιομάζας

Η μέθοδος της άμεσης καύσης βιομάζας έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή θερμικής ισχύος με τη μορφή θερμών καυσαερίων. Αυτή μπορεί να αξιοποιείται στη μορφή που είναι ή μέσω εναλλαγής θερμότητας να μεταφέρεται από άλλα ρευστά, καλύπτοντας τις θερμικές ανάγκες που παρουσιάζονται σε μια πληθώρα εφαρμογών, όπως επίσης και να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 27 Σχεδιάγραμμα διαδικασίας άμεσης καύσης

3.2.1 Οι μηχανισμοί που συντελούν στην καύση της βιομάζας

Κατά τη διαδικασία της άμεσης καύσης η βιομάζα εισέρχεται σε έναν αντιδραστήρα όπου πραγματοποιείται μια σειρά αντιδράσεων. Εκεί υπό τη στοιχειομετρική περίσσεια αέρα συντελείται η οξείδωση των οργανικών συστατικών της, προς παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και υδρατμών. Οι αντιδράσεις αυτές είναι στην πλειοψηφία τους εξώθερμες, με αποτέλεσμα να εκλύεται θερμότητα. Οι βασικοί μηχανισμοί της καύσης της βιομάζας είναι τρεις. Λόγω της θερμότητας που εκλύεται κατά την καύση, προκαλείται η εξάτμιση των πτητικών συστατικών της βιομάζας. Αυτά οξειδώνονται στην αέρια φάση στην οποία έχουν περιέλθει. Οι οργανικές ενώσεις που απομένουν υπόκεινται σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες με αποτέλεσμα να διασπώνται, παράγοντας ακόμα μια ποσότητα καύσιμων αερίων. Η εναπομένουσα ύλη οξειδώνεται έχοντας λάβει πλέον τη μορφή σκόνης και είναι κατά κύριο λόγο άνθρακας αναμειγμένος με την τέφρα της βιομάζας. Η τελευταία είτε παραμένει ως υπόλειμμα στο θάλαμο καύσης είτε διαφεύγει με τα καυσαέρια. Το ζητούμενο κατά την άμεση καύση είναι η έκλυση θερμότητας. Συνεπώς μία μακροσκοπική ανάλυση αρκεί προκειμένου να προκύψει το ενεργειακό ισοζύγιο και η ενθαλπία της συνολικής αντίδρασης. [7], [29]

3.2.2 Αντιδραστήρες άμεσης καύσης

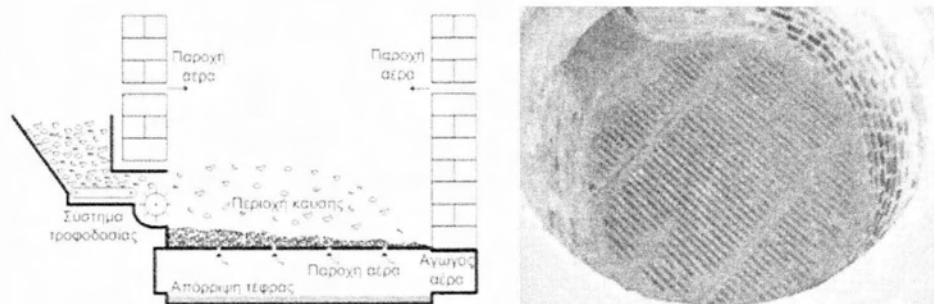
Οι αντιδραστήρες καύσης βιομάζας διακρίνονται στα είδη που περιγράφονται στη συνέχεια, με την καταλληλότητα του καθένα να καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του καυσίμου και την εφαρμογή που πρόκειται να καλυφτεί. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυριότεροι τύποι αντιδραστήρων που χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγή ισχύος από βιομάζα.

Οι αντιδραστήρες στερεάς κλίνης: είναι κατάλληλοι για καύση βιομάζας με υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα, ενώ δεν τίθεται περιορισμός στις διαστάσεις των τροφοδοτούμενων κομματιών του καυσίμου. Σε μικρές έως μεσαίου μεγέθους εφαρμογές εμφανίζουν το χαμηλότερο αρχικό κόστος. Μπορούν επίσης να λειτουργούν με μεγάλη μεταβλητότητα ισχύος. Μειονεκτήματα τους είναι ότι δεν ενδείκνυνται σε μεγάλο βαθμό για χρήση αναμειγμένων ειδών βιομάζας με διαφορετική συμπεριφορά καύσης, όπως και για πώδη είδη βιομάζας. Επιπρόσθετα απαιτούν μεγάλο λόγο αέρα-καυσίμου για τη λειτουργία τους, γεγονός που οδηγεί στην υποβάθμιση της αξίας καυσίμων με υψηλή τιμή θερμογόνου αξίας.

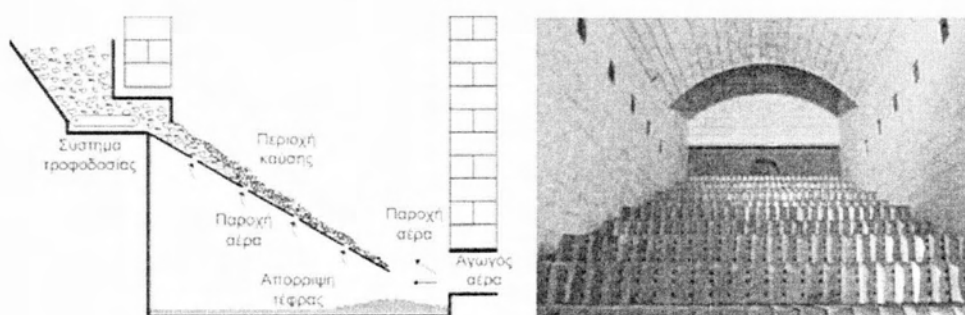
Στις περισσότερες περιπτώσεις βασίζουν τη λειτουργία τους στην ύπαρξη μιας σχάρας, δηλαδή μιας επιφάνειας με οπές. Η βιομάζα καταλαμβάνει την επιφάνεια αυτής της σχάρας με τη μορφή μιας φλεγόμενης στρώσης, η οποία τροφοδοτείται συνεχώς αναπληρώνοντας το καύσιμο που καίγεται. Οι οπές της σχάρας επιτρέπουν την τροφοδοσία αέρα στην περιοχή της καύσης, αλλά και την απομάκρυνση της εναπομένουσας τέφρας. Ο αέρας που τροφοδοτείται μέσω της σχάρας συντελεί στην έναρξη της καύσης και ονομάζεται πρωτογενής. Η καύση της βιομάζας ολοκληρώνεται σε επόμενα στάδια με την παροχή μιας ακόμα ποσότητας αέρα που ονομάζεται δευτερογενής.

Η μορφολογία της σχάρας μπορεί να ποικίλει. Μπορεί να είναι οριζόντια όπως στο σχήμα 28, κεκλιμένη όπως στο σχήμα 29 αριστερά, ή κλιμακωτή όπως στο σχήμα 29 δεξιά.

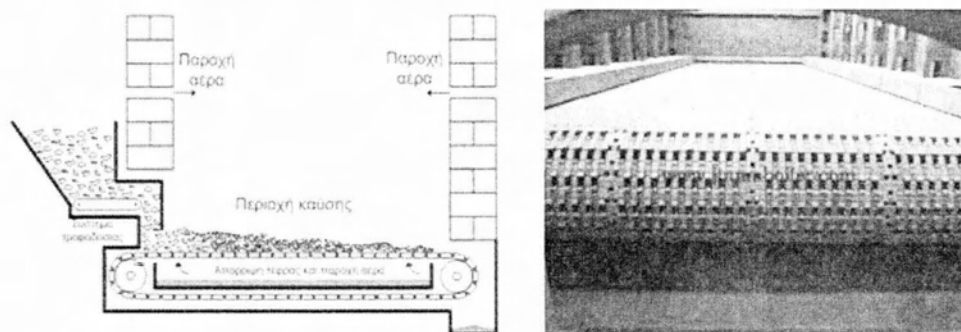
Η σχάρα μπορεί να είναι σταθερή, είτε να κινείται με διάφορους τρόπους. Ένας τρόπος κίνησης της σχάρας μπορεί να είναι η δόνηση. Μια συνηθισμένη μέθοδος είναι η πρόωση της σχάρας, η οποία σε αυτή την περίπτωση κατασκευάζεται ως κυλιόμενος μεταφορέας, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 30. Επίσης συναντάται συχνά η διαδοχική κίνηση των «σκαλοπατιών» στην περίπτωση της κλιμακωτής γεωμετρίας σχάρας που προαναφέρθηκε.



Σχήμα 28 Οριζόντια σχάρα



Σχήμα 29 Κλιμακωτή και κεκλιμένη σχάρα



Σχήμα 30 Προωθούμενη σχάρα

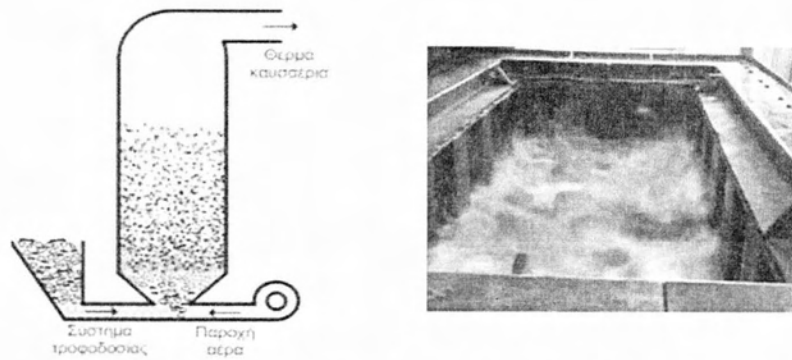
Οι αντιδραστήρες σταθερής σχάρας λόγω της απλότητας κατασκευής τους προορίζονται για εφαρμογές πολύ μικρής ισχύος, δηλαδή μερικών δεκάδων KW_{th} . Στις εγκαταστάσεις μεγαλύτερου μεγέθους χρησιμοποιούνται κατά κανόνα αντιδραστήρες κινούμενης σχάρας. Τα πλεονεκτήματα των τελευταίων πηγάζουν από το γεγονός ότι εξασφαλίζουν την ομαλότητα της ροής του καυσίμου και της απόρριψης της τέφρας.

Οι αντιδραστήρες ρευστοστερεάς κλίνης: προορίζονται για εφαρμογές μεγάλης ισχύος, της τάξης των $20MW_{th}$ και άνω, κατά τις οποίες παρουσιάζουν και το μικρότερο αρχικό κόστος σε σχέση με την ισχύ τους. Οι αντιδραστήρες ρευστοστερεάς κλίνης είναι κατάλληλοι για καύση βιομάζας με μεγάλη περιεκτικότητα σε υγρασία. Στο περιβάλλον που προσφέρεται στο εσωτερικό τους

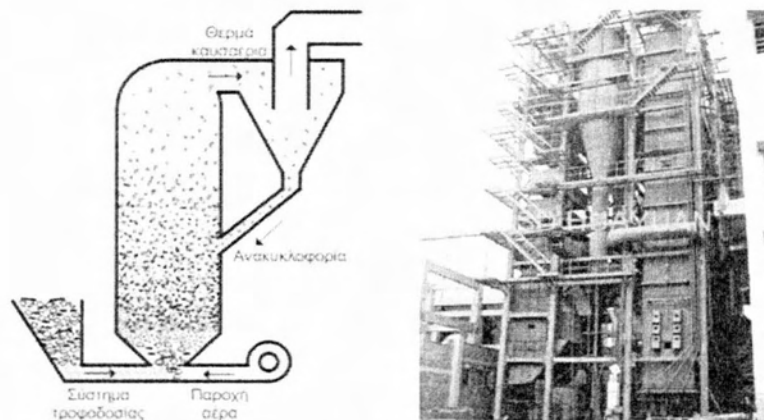
συντελείται πολύ καλή ανάμειξη και μπορούν επομένως να χρησιμοποιούνται μείγματα καυσίμων με διαφορετική συμπεριφορά καύσης και πρόσθετα που βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά της τέφρας. Μπορούν επίσης να λειτουργούν με μικρούς λόγους αέρα-καυσίμου γεγονός που αυξάνει την αποτελεσματικότητά τους όταν η τέφρα της αξιοποιούμενης βιομάζας εμφανίζει υψηλές θερμοκρασίες τήξης. Τα μειονεκτήματα των αντιδραστήρων ρευστοστερεάς κλίνης είναι τα ακόλουθα. Απαιτείται ο τεμαχισμός της τροφοδοτούμενης βιομάζας σε κομμάτια μικρών διαστάσεων. Επίσης οι αντιδραστήρες αυτοί εμφανίζουν μικρή μεταβλητότητα ισχύος, γεγονός που αντιμετωπίζεται με την παράλληλη λειτουργία περισσότερων από έναν, έτσι ώστε να προκύψει διαβαθμισμένη λειτουργία στο σύνολο της εγκατάστασης. Ακόμα, χρειάζεται αρκετός χρόνος για την εκκίνηση τους, ο οποίος μπορεί να φτάσει τις 15 ώρες για αντιδραστήρες μεγάλης ισχύος και κατά τον οποίο γίνεται χρήση συμβατικών καυσίμων, γεγονός που ανεβάζει το λειτουργικό κόστος των εγκαταστάσεων. Επιπρόσθετα ο τρόπος λειτουργίας τους επιβάλλει την απόρριψη ολόκληρης της μάζας της τέφρας μαζί με τα θερμά καυσαέρια, δημιουργώντας δυσκολίες κατά την εναλλαγή θερμότητας, ειδικά κατά την αξιοποίηση βιομάζας με υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα.

Οι απλοί αντιδραστήρες ρευστοστερεάς κλίνης είναι μεγάλα δοχεία που περιέχουν άμμο, συνήθως χαλαζία. Κατά τη λειτουργία τους παρέχεται αέρας υπό πίεση μέσω ακροφυσίων στο κάτω μέρος τους. Έτσι προκαλείται η δημιουργία κινούμενων θυλάκων αέρα στον όγκο της άμμου, ο οποίος αποκτά ροϊκή συμπεριφορά ρευστού με ύπαρξη φυσαλίδων. Μέσω της καύσης που συντελείται στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, επικρατεί υψηλή θερμοκρασία στους κόκκους της άμμου και στον όγκο της τροφοδοτούνται συνεχώς νέα κομμάτια βιομάζας. Αυτά αναδεύονται ταχέως με τον κοχλάζων όγκο της άμμου, με αποτέλεσμα να θερμαίνονται από αυτή και να οδηγούνται και αυτά στην πλήρη καύση. Το φαινόμενο εμφανίζεται παραστατικά μέσω του σχήματος 31 που ακολουθεί και παρουσιάζει τη λειτουργία του απλού αντιδραστήρα ρευστοστερεάς κλίνης.

Η αύξηση της ταχύτητας των αερίων στο εσωτερικό του αντιδραστήρα έχει ως αποτέλεσμα τη διαφυγή των σωματιδίων άμμου. Σε αυτή την περίπτωση η συγκράτηση των τελευταίων και η επανατροφοδοσία τους στον αντιδραστήρα μπορεί να εξυπηρετείται μέσω ενός κυκλώνα που τοποθετείται στην έξοδο των καυσαερίων του. Σε αυτή την περίπτωση γίνεται λόγος για αντιδραστήρα ρευστοστερεάς κλίνης ανακυκλοφορίας η λειτουργία του οποίου εμφανίζεται παραστατικά στο σχήμα 32.



Σχήμα 31 Αντιδραστήρας ρευστοστερεάς κλίνης



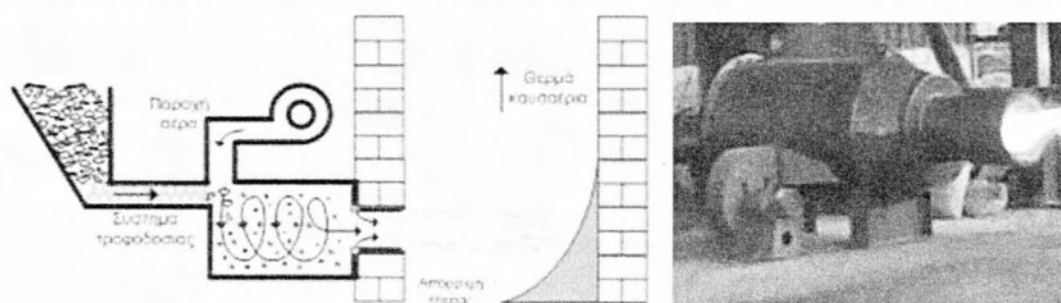
Σχήμα 32 Αντιδραστήρας ρευστοστερεάς κλίνης ανακυκλοφορίας

Τα πλεονεκτήματα του αντιδραστήρα ανακυκλοφορίας σε σύγκριση με τον απλό αντιδραστήρα ρευστοστερεάς κλίνης είναι ότι ο πρώτος παρουσιάζει μεγαλύτερη ομοιογένεια όσο αφορά την καύση και τις θερμοκρασίες που επικρατούν στο εσωτερικό του, προσφέροντας ένα καλύτερο περιβάλλον για ανάμειξη ειδών βιομάζας με διαφορετική συμπεριφορά καύσης. Επίσης μπορεί να επιτευχθεί καλύτερος έλεγχος της θερμοκρασίας, μέσω του ελέγχου της θερμοκρασίας της ανακυκλοφορούμενης άμμου. Τα μειονεκτήματα του αντίστοιχα είναι ότι παρουσιάζει αυξημένο αρχικό κόστος και απαιτείται τεμαχισμός των κομματιών της τροφοδοτούμενης βιομάζας σε μικρότερες διαστάσεις, της τάξης των 40mm, σε σύγκριση με την τροφοδοτούμενη βιομάζα στον απλό αντιδραστήρα, διαστάσεων της τάξης των 80mm.

Οι καυστήρες σωματιδίων βιομάζας: κατασκευάζονται σε ένα εύρος ισχύος μεταξύ 2-8MW_{th}. Εμφανίζουν πολύ καλά χαρακτηριστικά μετάδοσης θερμότητας και σημαντικό ρόλο σε αυτούς παίζει η μετάδοση θερμικής ισχύος μέσω ακτινοβολίας. Η λειτουργία τους μπορεί να γίνει με μικρούς λόγους αέρα-καυσίμου, επίσης μπορούν να λειτουργούν σε διαβαθμισμένη ισχύ μεγάλου εύρους, ενώ η χρονική τους

απόκριση σε μεταβολές ισχύος είναι ταχεία. Το μειονέκτημα τους έγκειται κυρίως στο γεγονός ότι η τροφοδοτούμενη βιομάζα πρέπει να είναι τεμαχισμένη σε πολύ μικρά κομμάτια, διαστάσεων της τάξης των 10mm. Επίσης η λειτουργία του αντιδραστήρα δε μπορεί να πραγματοποιηθεί αξιοποιώντας βιομάζα με μεγάλη περιεκτικότητα σε υγρασία. Τα τοιχώματα του αντιδραστήρα υπόκεινται σε υψηλή θερμική καταπόνηση, ενώ παρουσιάζεται η ανάγκη ύπαρξης συστήματος ελέγχου ταχείας απόκρισης, λόγω της ευαισθησίας του αντιδραστήρα στις μεταβολές των χαρακτηριστικών βιομάζας. Η τροφοδοσία του καυστήρα με βιομάζα υψηλής περιεκτικότητας σε τέφρα προκαλεί δυσκολίες στην εναλλαγή της θερμότητας, καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας της τέφρας παρασέρνεται μαζί με τα θερμά καυσαέρια. Τέλος, όπως και στην περίπτωση των αντιδραστήρων ρευστοστερεάς κλίνης, για την έναυση αυτού του τύπου αντιδραστήρα απαιτείται η χρήση συμβατικών καυσίμων, σε μικρότερη όμως ποσότητα.

Η αρχή λειτουργίας του καυστήρα σωματιδίων βιομάζας είναι παρόμοια με αυτή των καυστήρων ρευστών καυσίμων. Ένα ρεύμα αέρα παρασέρνει σωματίδια βιομάζας μικρών διαστάσεων μέσα στην περιοχή της φλόγας που δημιουργείται, με αποτέλεσμα αυτά να αντιδράσουν πολύ γρήγορα, όντας περικυκλωμένα από αέρια υψηλής θερμοκρασίας με παρουσία οξυγόνου. Η αντίδραση καθίσταται αποτελεσματική με τη δημιουργία μια ελικοειδούς ροής στο εσωτερικό του, γεγονός βάσει του οποίου ο αντιδραστήρας ονομάζεται και καυστήρας ελατηρίου (spring burner). Ο αέρας που παρασέρνει τα σωματίδια συντελεί στην έναυση τους αποτελώντας τον πρωτογενή αέρα καύσης, ενώ στην έξοδο των θερμών καυσαερίων γίνεται η παροχή του δευτερογενούς ρεύματος αέρα. Τα καυσαέρια εξέρχονται από τον αντιδραστήρα σε υψηλές θερμοκρασίες με τη μορφή ενός πίδακα φλόγας. Στο σχήμα 33 που ακολουθεί εμφανίζονται όσα περιγράφονται παραπάνω.

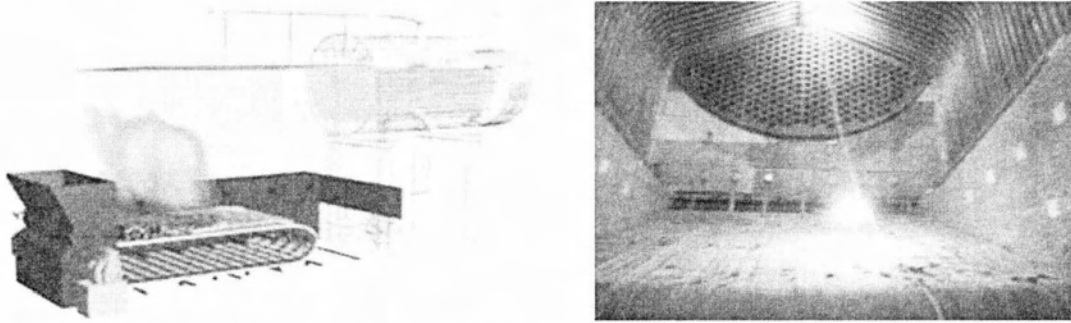


Σχήμα 33 Καυστήρας σωματιδίων

[17], [12], [5], [14]

3.1.3 Εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος με άμεση καύση

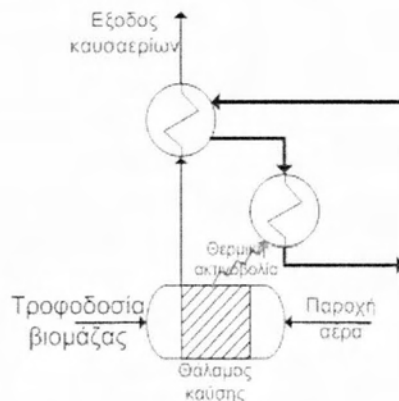
Ένα μέρος της θερμικής ισχύος που παράγεται από την καύση έχει τη μορφή θερμών καυσαερίων. Η θερμότητα αυτών παραλαμβάνεται από άλλα ρευστά μέσω εναλλακτών θερμότητας. Στη συνέχεια εμφανίζεται ένα παραστατικό σχέδιο θαλάμου καύσης και μια φωτογραφία του σημείου όπου τα καυσαέρια εισέρχονται στον εναλλάκτη.



Σχήμα 34 Θάλαμος καύσης και επιφάνειες εναλλαγής

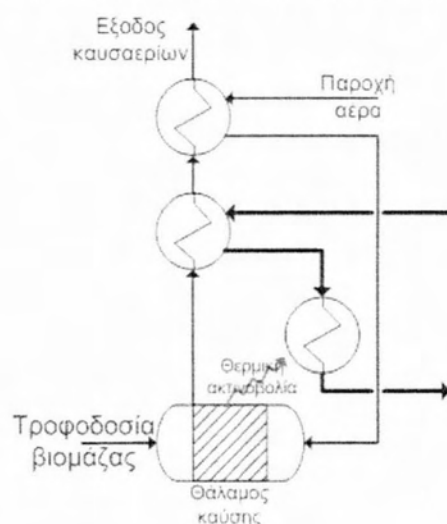
Ένα μέρος της θερμικής ισχύος μεταδίδεται στις επιφάνειες εναλλαγής μέσω θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την περιοχή της καύσης. Στη φωτογραφία του θαλάμου καύσης διακρίνονται σωληνώσεις που καλύπτουν μεγάλη επιφάνεια του και αποσκοπούν στη απορρόφηση της θερμότητας που μεταδίδεται μέσω της ακτινοβολίας.

Βάσει των παραπάνω, μπορεί να προκύψει το διάγραμμα ροής που περιγράφει παραστατικά τη λειτουργία της εγκατάστασης καύσης. Το διάγραμμα ροής παρουσιάζεται στο σχήμα 35, όπου εμφανίζεται ένας εναλλάκτης που δέχεται τη θερμική ακτινοβολία και ένας δεύτερος που παραλαμβάνει τη θερμική ενέργεια των καυσαερίων μέσω συναγωγής. Η συνολική θερμική ενέργεια που εναλλάσσεται, μεταδίδεται σε ένα υποθετικό ρευστό.



Σχήμα 35 Υποτυπώδες διάγραμμα ροής για εγκατάσταση καύσης

Σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες του ρευστού που παραλαμβάνει τη θερμότητα, ο σχεδιασμός της εγκατάστασης που εμφανίζεται στο σχήμα α αποδεικνύεται ανεπαρκής. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι τα καυσαέρια θα εγκαταλείπουν το δεύτερο εναλλάκτη σε υψηλότερη θερμοκρασία, καθώς και το ρευστό που παραλαμβάνει τη θερμότητα θα βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία. Με αυτό τον τρόπο γίνεται σπατάλη μεγάλου μέρους της ενέργειας του καυσίμου, που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί. Η λύση που προτείνεται είναι η προσθήκη ενός τρίτου εναλλάκτη που θα ανακτά μέρος της ενέργειας των καυσαερίων, προθερμαίνοντας τον αέρα που προορίζεται για καύση. Το προτεινόμενο διάγραμμα ροής της εγκατάστασης στη δεύτερη περίπτωση παρουσιάζεται στο 36.

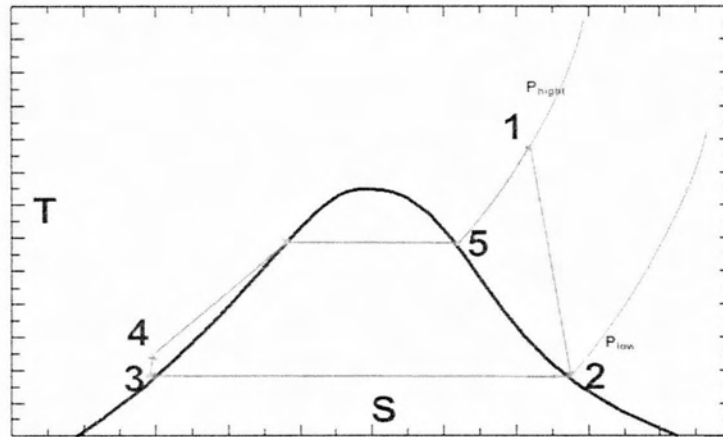


Σχήμα 36 Πρότυπο διάγραμμα ροής για εγκατάσταση καύσης

Η αξιοποίηση της θερμικής ισχύος που παράγεται στην εγκατάσταση καύσης, προς παραγωγή μηχανικής ή ηλεκτρικής ενέργειας, γίνεται μέσω ενός θερμικού κύκλου εξωτερικής καύσης. Η πιο συνηθισμένη περίπτωση για εγκαταστάσεις μικρής ισχύος είναι η χρήση κύκλου Rankine. Οι θερμικοί κύκλοι Rankine μπορούν να διακρίνονται σε δύο είδη, ανάλογα με τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του ρευστού λειτουργίας τους.

Κύκλοι Rankine με υγρό ρευστό λειτουργίας (wet working fluid):

Παραδοσιακά το ρευστό λειτουργίας αυτού του τύπου θερμικών κύκλων Rankine είναι το νερό. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ποιοτικό διάγραμμα θερμοκρασίας – εντροπίας ($T-s$) και τα σημεία λειτουργίας ενός τέτοιου θερμικού κύκλου, προκειμένου να εξηγηθεί ο όρος του υγρού ρευστού λειτουργίας.

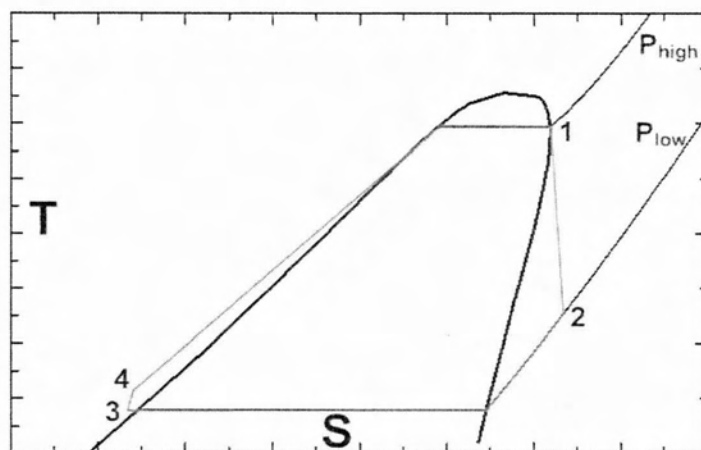


Σχήμα 37 Ποιοτικό διάγραμμα T-s με σημεία λειτουργίας κύκλου Rankine υγρού ρευστού

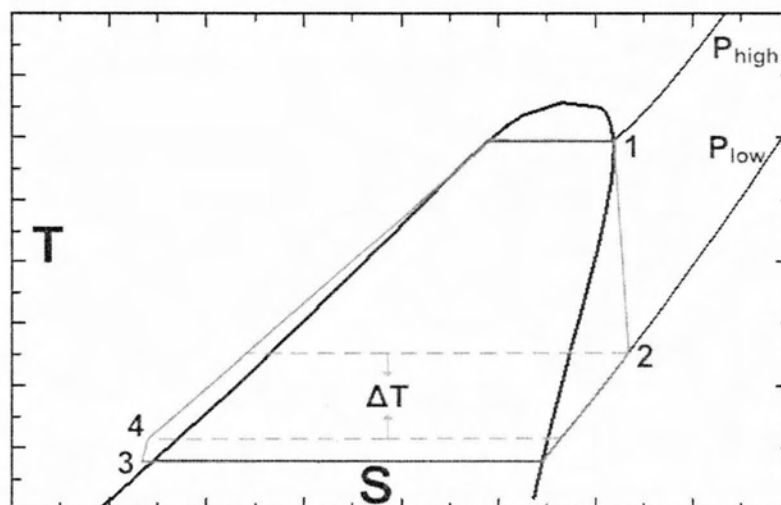
Θεωρείται ότι το αρχικό σημείο του θερμοδυναμικού κύκλου είναι το 1, που αντιστοιχεί σε ατμό υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Η διαδρομή 1 – 2 συμβολίζει την εκτόνωση του ρευστού μέσω στροβίλου. Στο σημείο 2 το ρευστό χαρακτηρίζεται από χαμηλή στατική πίεση, την P_{low} , ενώ η θερμοκρασία του είναι σχεδόν η θερμοκρασία κορεσμού. Σε πολλές περιπτώσεις το ρευστό εξέρχεται από το στρόβιλο όντας υγροποιημένο έως και κατά 10%, με το σημείο 2 να βρίσκεται από την εσωτερική μεριά της καμπύλης. Η διαδρομή 2 – 3 συμβολίζει τη συμπίκνωση του ρευστού λειτουργίας στο συμπυκνωτή του θερμοδυναμικού κύκλου. Στο σημείο 3 το ρευστό είναι πλήρως υγροποιημένο και χαρακτηρίζεται από χαμηλή στατική πίεση. Η διαδρομή 3 – 4 συμβολίζει την άντληση του ρευστού. Στο σημείο 4 η τιμή της στατικής πίεσης είναι η P_{high} . Η διαδρομή 4 – 5 συμβολίζει τη θέρμανση του ρευστού έως το σημείο πλήρους εξάτμισης. Η απόδοση θερμικής ισχύος στο ρευστό λειτουργίας κατά τη μετάβαση του από το σημείο 4 στο σημείο 5, γίνεται από εναλλάκτη που ονομάζεται βραστήρας. Η διαδρομή 5 – 1 που οδηγεί στην υπερθέρμανση του ατμοποιημένου πλέον νερού, γίνεται με πρόσδοση θερμότητας στο ρευστό λειτουργίας από εναλλάκτη που ονομάζεται υπερθερμαντήρας. Εδώ βρίσκεται και το κομβικό σημείο που διαφοροποιεί το σχεδιασμό των κύκλων Rankine υγρού ρευστού λειτουργίας, με αυτούς ξηρού ρευστού λειτουργίας. Η κλίση της καμπύλης των υγρών ρευστών λειτουργίας είναι τέτοια, ώστε η υπερθέρμανση να καθίσταται απαραίτητη. Σε περίπτωση που ο ατμός δεν υπερθερμαινόταν, θα ξεκινούσε η υγροποίηση του παράλληλα με την εκκίνηση της εκτόνωσης του.

Κύκλοι Rankine με ξηρό ρευστό λειτουργίας (dry working fluid): Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ποιοτικό διάγραμμα θερμοκρασίας – εντροπίας (T-s)

και τα σημεία λειτουργίας ενός τέτοιου θερμικού κύκλου, προκειμένου να εξηγηθεί ο όρος του ξηρού ρευστού λειτουργίας.

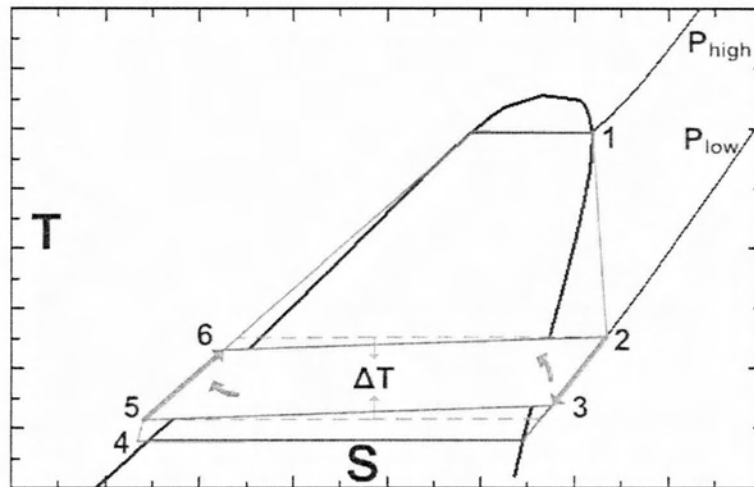


Σχήμα 38 Ποιοτικό διάγραμμα T-s με σημεία λειτουργίας κύκλου Rankine στεγνού ρευστού
 Ο θερμοδυναμικός κύκλος θεωρείται και πάλι πως ξεκινάει από το σημείο 1. Η διαφορά με το σχήμα 37 είναι εμφανής, καθώς εδώ το ρευστό λειτουργίας βρίσκεται σε κρίσιμο σημείο. Η κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης ποιότητας επιτρέπει την εκτόνωση του ρευστού χωρίς αυτό να υγροποιείται. Η διαδρομή 1 – 2 εκτελείται και πάλι μέσω ενός στροβίλου. Όταν το ρευστό βρεθεί στο σημείο λειτουργίας 2, η στατική πίεση που το χαρακτηρίζει είναι η χαμηλή πίεση λειτουργίας. Επόμενο στάδιο είναι η ψύξη μέχρι υγροποίησης του (διαδρομή 2 – 3), η άντληση του στην υψηλή πίεση λειτουργίας (διαδρομή 3 – 4) και έπειτα η θέρμανση του έως το σημείο λειτουργίας 1 (διαδρομή 4 – 1). Με τη βοήθεια του επόμενου διαγράμματος, επισημαίνεται ένα σημαντικό λειτουργικό χαρακτηριστικό των θερμοδυναμικών κύκλων Rankine αυτού του είδους.



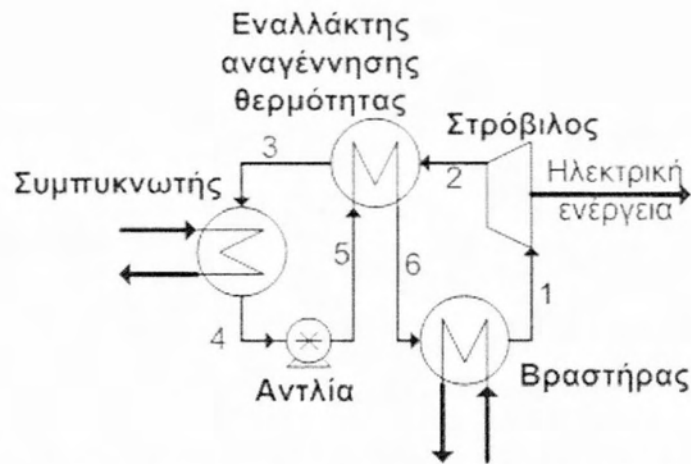
Σχήμα 39 Αξιοποιήσιμη θερμοκρασιακή διαφορά

Παρατηρείται ότι κατά την έξοδο του ρευστού λειτουργίας από το στρόβιλο, εμφανίζεται θερμοκρασιακή διαφορά σε σχέση με το υγροποιημένο ρευστό που χαρακτηρίζεται από υψηλή πίεση. Με την προσθήκη ενός εναλλάκτη, μέρος της ενέργειας που απολύει το ρευστό κατά τη διαδρομή 2 – 3, θα μπορούσε να ανακτηθεί από το θερμοδυναμικό κύκλο και να προσδοθεί και πάλι στο ρευστό λειτουργίας που διανύει τη διαδρομή 4 – 1. Βάσει των παραπάνω, τα σημεία λειτουργίας του θερμοδυναμικού κύκλου, μεταβάλλονται ως εξής.



Σχήμα 40 Ανάκτηση θερμότητας στον κύκλο Rankine στεγνού ρευστού

Πρότυπο διάγραμμα ροής κύκλου Rankine με ξηρό ρευστό: Ακολουθεί το διάγραμμα ροής της εγκατάστασης κύκλου Rankine ξηρού ρευστού, που προκύπτει βάσει όσων περιγράφονται παραπάνω. Σημειώνεται ότι τα ρευστά λειτουργίας που παρουσιάζουν τέτοιες ιδιότητες είναι οργανικές ενώσεις, η χρήση πολλών εκ των οποίων είναι διαδεδομένη, βρίσκοντας εφαρμογή ως ψυκτικά υγρά. Λόγω των οργανικών ρευστών λειτουργίας αυτού του τύπου κύκλων Rankine, οι τελευταίοι ονομάζονται συχνά ως οργανικοί κύκλοι Rankine (O.R.C.) ή κύκλοι Rankine οργανικών ρευστών λειτουργίας.



Σχήμα 41 Πρότυπο διάγραμμα ροής εγκατάστασης οργανικού Rankine

Στο παραπάνω διάγραμμα ροής αναγράφονται και τα σημεία λειτουργίας όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 40.

Μετάδοση θερμότητας από και προς θερμικούς κύκλους Rankine: Η απομάκρυνση της θερμότητας από το συμπυκνωτή γίνεται σε κάθε κύκλο Rankine, είτε υγρού είτε ξηρού ρευστού, σχεδόν πάντα με νερό. Η ψύξη του νερού που απάγει τη θερμότητα δε μελετάται στην παρούσα εργασία.

Όσο αφορά τη μετάδοση θερμότητας στο βραστήρα, στους συμβατικούς κύκλους Rankine αυτή συντελείται απευθείας μέσω της εγκατάστασης καύσης. Οι δύο ειδών επιφάνειες εναλλαγής που περιγράφονται σε προηγούμενο εδάφιο, όπου η θερμότητα μεταδίδεται μέσω θερμικής ακτινοβολίας και συναγωγής, αντιστοιχούν παράλληλα στον υπερθερμαντήρα και βραστήρα του κύκλου Rankine αντίστοιχα.

Οι οργανικοί κύκλοι Rankine σχεδιάζονται έτσι ώστε οι θερμοκρασίες λειτουργίας τους να παραμένουν σχετικά χαμηλές. Το γεγονός αυτό δίνει την ευελιξία χρήσης ενός διαθερμικού ρευστού που απάγει τη θερμότητα από την εγκατάσταση καύσης και την αποδίδει στο βραστήρα του οργανικού κύκλου Rankine. Συνεπώς η λειτουργία της εγκατάστασης καύσης ανεξαρτητοποιείται σε κάποιο βαθμό από τη λειτουργία της εγκατάστασης οργανικού κύκλου Rankine. Λεπτομέρειες σε σχέση με τα διαθερμικά ρευστά που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες εφαρμογές, δίδονται στο σχετικό εδάφιο του επόμενου κεφαλαίου.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα γρήσης οργανικών κύκλων Rankine:

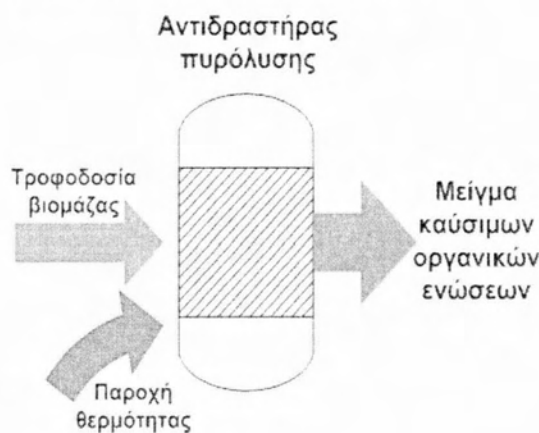
Η παγκοσμίως εκτεταμένη εφαρμογή των συμβατικών κύκλων Rankine νερού φανερώνει το μέγεθος της αξιοπιστίας της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Παρ' όλα αυτά, εγκαταστάσεις οργανικών κύκλων Rankine που λειτουργούν τις τελευταίες δεκαετίες, παρουσιάζουν ανάλογη αξιοπιστία. Σε σχέση με την αξιοποίηση βιομάζας,

οι συμβατικοί κύκλοι Rankine αντιμετωπίζουν δυσκολίες που έγκεινται στην ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών του καυσίμου. Διακυμάνσεις ισχύος στους διαφορετικούς εναλλάκτες της εγκατάστασης καύσης, που προκαλούνται από διαφοροποιημένα χαρακτηριστικά της συνεχώς τροφοδοτούμενης βιομάζας, μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στους συμβατικούς κύκλους Rankine. Οι οργανικοί κύκλοι δεν εμφανίζουν τέτοιου είδους προβλήματα, καθώς η χρήση του διαθερμικού έλαιου μεταξύ του θερμικού κύκλου και της εγκατάστασης καύσης, ομαλοποιεί τα φαινόμενα μεταβλητότητας ισχύος στα διαφορετικά μέρη της εγκατάστασης.

[24]

3.3 Πυρόλυση βιομάζας

Η πυρόλυση της βιομάζας είναι μια διεργασία που οδηγεί στη χημική διάσπαση της, με αποτέλεσμα της παραγωγή μείγματος καύσιμων οργανικών ενώσεων. Το μείγμα αποτελείται κυρίως από ελαιώδεις οργανικές ενώσεις, από ένα ποσοστό στερεού υπολείμματος πίσσας και απανθакώματος και ενός μικρού ποσοστού αερίων καυσίμων. Η διεργασία της πυρόλυσης είναι ενδόθερμη. Το επόμενο σχήμα εμφανίζει παραστατικά τη διαδικασία.



Σχήμα 42 Σχεδιάγραμμα πυρόλυσης

Η πυρόλυση συντελείται υπό εύρος θερμοκρασιών 350 – 500 °C. Σε αυτές τις θερμοκρασίες οι χημικοί δεσμοί των υδατανθρακικών ενώσεων από τις οποίες αποτελείται κυρίως η βιομάζα, διασπώνται, δημιουργώντας οργανικές ενώσεις μικρότερου μοριακού βάρους που λαμβάνουν κυρίως υγρή μορφή σε συνθήκες περιβάλλοντος. Όσο πιο αυξημένη είναι η θερμοκρασία, τόσο πιο μεγάλο ποσοστό βιομάζας υγροποιείται και με ταχύτερο ρυθμό. Οι εφαρμογές της πυρόλυσης συναντώνται κατά κύριο λόγο στη σύνθεση καυσίμων από βιομάζα και πολύ

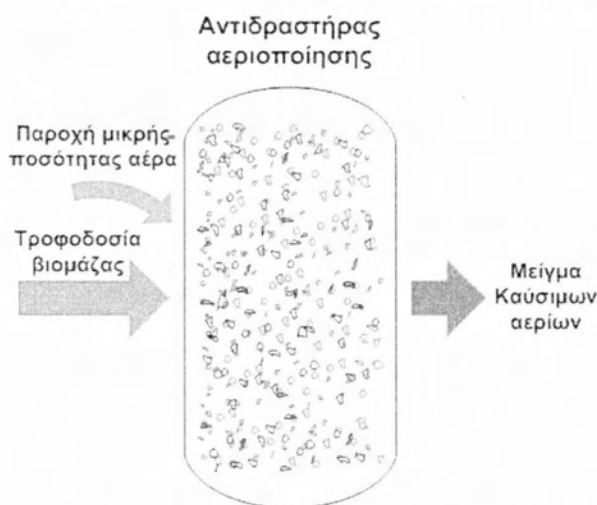
σπανιότερα στην απευθείας παραγωγή ενέργειας. Συνεπώς η διεργασία παρουσιάζεται επιγραμματικά στην παρούσα εργασία.

[2], [4], [10], [9]

3.4 Αεριοποίηση βιομάζας

3.4.1 Η διεργασία της αεριοποίησης

Η αεριοποίηση βιομάζας είναι μια εξώθερμη διεργασία, που έχει ως αποτέλεσμα τη χημική διάσπαση των οργανικών συστατικών της, προς παραγωγή μείγματος αερίων καυσίμων. Σε αυτό το σημείο περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας της διεργασίας. Η βιομάζα τροφοδοτείται στο εσωτερικό του αντιδραστήρα αεριοποίησης, όπου επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες. Παράλληλα παρέχεται αέρας, με αναλογία ως προς την παροχή καυσίμου, αρκετά μικρότερη της στοιχειομετρικής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να συντελείται καύση μόνο ενός μέρους της τροφοδοτούμενης βιομάζας. Η καύση ενός ποσοστού του καυσίμου προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Το αποτέλεσμα είναι, όπως και στην περίπτωση της πυρόλυσης, η χημική διάσπαση των οργανικών ενώσεων. Η διεργασία εμφανίζεται παραστατικά στο ακόλουθο σχεδιάγραμμα.



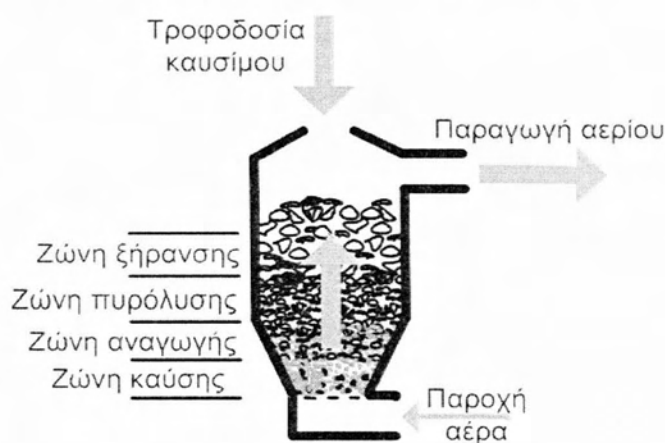
Σχήμα 43 Σχεδιάγραμμα αεριοποίησης

Στο εσωτερικό του αντιδραστήρα αεριοποίησης εμφανίζονται θερμοκρασιακές ζώνες, όπου στην καθεμία πραγματοποιούνται διαφορετικές διεργασίες. Περισσότερες λεπτομέρειες δίδονται στο επόμενο εδάφιο.

[43]

3.4.2 Είδη αντιδραστήρων αεριοποίησης

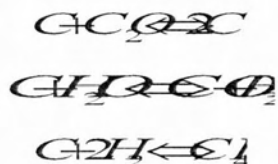
Αντιδραστήρες ανωροής (updraft): Σε αυτού του είδους τον αεριοποιητή παρατηρείται αντirroή του παρεχόμενου αέρα και του παρεχόμενου καυσίμου. Η ονομασία του ως αντιδραστήρας ανωροής προέρχεται από το γεγονός ότι το παραγόμενο αέριο κατευθύνεται από τη βάση του αντιδραστήρα προς τα πάνω. Παρατηρείται στο επόμενο σχήμα ότι οι διεργασίες που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, μπορούν να χωριστούν σε ζώνες.



Σχήμα 44 Σχεδιάγραμμα αεριοποίησης ανωροής

Στη ζώνη της καύσης επικρατούν θερμοκρασίες 1100–1500°C. Ο αέρας που περνά, αφενός οξυγονώνει διαρκώς τη ζώνη καύσης, αφετέρου παραλαμβάνει τη θερμότητα και τη μετατοπίζει στην ανώτερη ζώνη.

Στη ζώνη αναγωγής επικρατούν θερμοκρασίες της τάξης των 800°C μέσω της θερμότητας που μεταφέρει ο αέρας από τη ζώνη καύσης. Σε αυτό το σημείο υπάρχει απουσία οξυγόνου και λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας, παρατηρούνται οι ακόλουθες αμφίδρομες χημικές αντιδράσεις με αποτέλεσμα την παραγωγή αερίων καυσίμων:

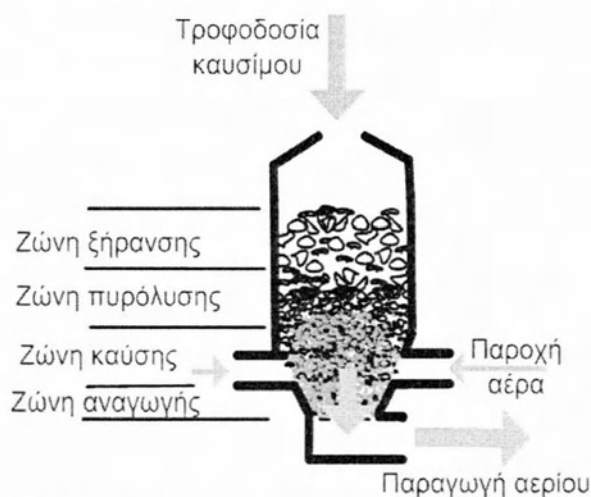


Τα θερμά αέρια διατρέχουν την ανώτερη ζώνη, προκαλώντας της πυρόλυση της βιομάζας λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας τους. Η βιομάζα που δεν πυρολύεται, κατευθύνεται προς τη ζώνη αναγωγής του άνθρακα.

Τέλος, η πρόσφατα τροφοδοτούμενη βιομάζα ξηραίνεται μέσω της απομένουσας θερμότητας των παραγόμενων αερίων, τα οποία εξέρχονται από τον αντιδραστήρα.

Πλεονέκτημα αυτού του τύπου αντιδραστήρα αεριοποίησης είναι ο μεγαλύτερος συντελεστής απόδοσης που παρουσιάζει σε σχέση με τους άλλους. Το βασικό μειονέκτημα του είναι η αυξημένη περιεκτικότητα των παραγόμενων αερίων σε σωματίδια πίσσας, τα οποία δημιουργούν σφωρεία προβλημάτων.

Αντιδραστήρες κατωροής (downdraft): Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται παραστατικά η λειτουργία αυτού του τύπου αντιδραστήρα.



Σχήμα 45 Σχεδιάγραμμα αντιδραστήρα ανωροής

Ο τρόπος λειτουργίας αυτού του αντιδραστήρα είναι παρόμοιος, με την ουσιαστική διαφοροποίηση της ροής γύρω από την περιοχή της καύσης.

Βασικό πλεονέκτημα αυτού του είδους αεριοποιητών είναι η χαμηλή περιεκτικότητα πίσσας των αερίων που παράγουν.

Άλλα ήδη αεριοποιητών: Οι αντιδραστήρες ρευστοστερεάς κλίνης μπορούν να είναι επίσης αντιδραστήρες αεριοποίησης, με την προϋπόθεση ότι η παρεχόμενη ποσότητα αέρα καύσης να είναι μικρότερη της στοιχειομετρικής.

[43], [12], [16], [17]

3.4.3 Εφαρμογές αεριοποίησης βιομάζας

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: Η εγκατάσταση αεριοποίησης μπορεί να συνδυάζεται με εγκαταστάσεις θερμικών κύκλων είτε εσωτερικής, είτε εξωτερικής καύσης με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η συνήθης εφαρμογή που συναντάται, είναι ο συνδυασμός εγκατάστασης αεριοποίησης με μηχανή εσωτερικής καύσης που αξιοποιεί το παραγόμενο αέριο. Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται πολύ καλός καθαρισμός του τελευταίου, έτσι ώστε να μην τροφοδοτούνται σωματίδια που

μπορούν να προξενίσουν βλάβες, στο εσωτερικό της Μ.Ε.Κ. Ο καθαρισμός του αερίου αεριοποίησης απαιτεί την ύπαρξη αρκετών διαφορετικών ειδών φίλτρων, προκειμένου να συγκρατηθούν αποτελεσματικά τα περισσότερα σωματίδια. Τα φίλτρα συμβάλουν σε μεγάλο ποσοστό στο αρχικό και λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης.

Άλλες εφαρμογές: Η αεριοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία συνθετικών καυσίμων, κυρίως μεθανίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις ο αντιδραστήρας κατωροής χρησιμοποιείται σε εγκαταστάσεις θέρμανσης. Η αεριοποίηση και αποθήκευση του αερίου για χρήση σε κατάλληλες στιγμές, μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να πλεονεκτεί έναντι των απλών εγκαταστάσεων καύσης.

[43], [17]

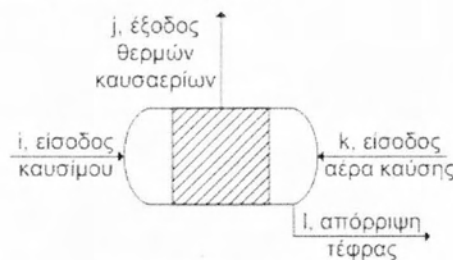
4. Μοντελοποίηση βασικών λειτουργικών στοιχείων εγκαταστάσεων

4.1 Αντιδραστήρας άμεσης καύσης

Περιγραφή: Ο αντιδραστήρας άμεσης καύσης μπορεί να είναι είτε στερεάς είτε ρευστοστερεάς κλίνης είτε καυστήρας σωματιδίων. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου γίνεται βάσει των χαρακτηριστικών της διαθέσιμης βιομάζας αλλά και των παραμέτρων λειτουργίας της υπόλοιπης εγκατάστασης όπως αυτά αναλύθηκαν στο 3^ο κεφάλαιο.

Σκοπιμότητα μοντελοποίησης: Η μοντελοποίηση του αντιδραστήρα καύσης αποτελεί τη σύνδεση μεταξύ των χαρακτηριστικών της βιομάζας και των παραμέτρων λειτουργίας της εγκατάστασης που την αξιοποιεί.

Συμβολισμός: Στην παρούσα εργασία το ακόλουθο σχήμα χρησιμοποιείται για το συμβολισμό του αντιδραστήρα καύσης.



Μοντελοποίηση: Το ρεύμα i είναι αυτό που μεταφέρει το καύσιμο στο εσωτερικό του αντιδραστήρα καύσης. Ορίζεται από μεταβλητές ο ρόλος των οποίων περιγράφεται αναλυτικά στο εδάφιο που αφορά τη μοντελοποίηση της βιομάζας. Αυτές που θα χρησιμοποιηθούν σε αυτό το σημείο είναι οι εξής: HHV , $W(i)$, $A(i)$, $Carb(i)$, $Oxyg(i)$, $Nitr(i)$, $Hydr(i)$, $T(i)$, $\dot{m}(i)$ και cp_A .

Το ρεύμα l αφορά την απόρριψη της τέφρας από τον αντιδραστήρα, όταν αυτό καθίσταται δυνατό, με $\dot{m}(l)$ την παροχή μάζας του. Η απόρριψη της μάζας αυτής συντελεί στη μείωση της τέφρας στα θερμά καυσαέρια που εξέρχονται από τον αντιδραστήρα. Ορίζεται η μεταβλητή:

$$A_{rej} = \% \text{ απορριπτόμενη τέφρα (4.1.1)}$$

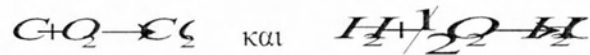
η οποία αποτελεί το λόγο της μάζας της απορριπτόμενης τέφρας σε σχέση με την ποσότητα της τέφρας που περιέχει το τροφοδοτούμενο καύσιμο. Δηλαδή:

$$A_{rej} = \frac{\dot{m}(l)}{\dot{m}(i)} \quad (4.1.2)$$

όπου $A(j)$ η κατά βάρος περιεκτικότητα σε τέφρα του ρεύματος j . Το ρεύμα j αφορά την έξοδο των θερμών καυσαερίων. Εφαρμόζοντας το ισοζύγιο μάζας για την τέφρα με όγκο ελέγχου τον αντιδραστήρα, ισχύει:

$$\sum_{j=1}^n A(j) = 0 \quad (4.1.3)$$

με $A(j)$ την κατά βάρος περιεκτικότητα του ρεύματος j σε τέφρα. Το ρεύμα k είναι ουδέτερο ως προς την τέφρα, καθώς αποτελεί την είσοδο του αέρα καύσης στον αντιδραστήρα. Τα χαρακτηριστικά του αναλύονται στο εδάφιο που αφορά τη μοντελοποίηση του ατμοσφαιρικού αέρα και χρησιμοποιούνται εδώ οι μεταβλητές $Oxyg(k)$, $Nitr(k)$, $W(k)$, με $\dot{m}(k)$ την παροχή μάζας του. Στη συνέχεια θα υπολογιστεί ο λόγος αέρα - καυσίμου βάσει των δεδομένων για την καύση της βιομάζας. Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται με μια μακροσκοπική εξέταση της καύσης είναι οι εξής:



Συμπληρώνοντας τα μοριακά βάρη των παραπάνω στοιχείων, προκύπτει η κατά βάρος αναλογία τους στις αντιδράσεις:



Διατυπώνοντας ένα ισοζύγιο μάζας για το στοιχειομετρικά απαιτούμενο οξυγόνο που πρέπει να φέρει το ρεύμα k , με τη βοήθεια των παραπάνω αντιδράσεων, προκύπτει:

$$\sum_{k=1}^n \dot{m}(k) \left(\frac{12}{32} Oxyg(k) + \frac{2}{18} Nitr(k) \right) = 0 \quad (4.1.4)$$

Ο λόγος λ , δηλαδή η αναλογία παρεχόμενου αέρα - στοιχειομετρικής ποσότητας αέρα, είναι ισοδύναμη με αυτή του παρεχόμενου οξυγόνου - στοιχειομετρικής ποσότητας οξυγόνου. Επομένως μπορεί να ισχύει:

$$\lambda = \frac{\dot{m}(k)}{\dot{m}(l)} \quad (4.1.5)$$

Ενώ η αναλογία αέρα - καυσίμου μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$A/F = \frac{\dot{m}(k)}{\dot{m}(l)} \quad (4.1.6)$$

Προκύπτει το ακόλουθο ισοζύγιο μάζας που υποδηλώνει ότι στα καυσαέρια θα υπάρχει οξυγόνο μόνο αν η καύση γίνει με περίσσεια αέρα:

$$\sum_{j=1}^n A(j) = 0 \quad (4.1.7)$$

Η ανώτερη σχέση αποτελεί και περιορισμό, καθώς η ποσότητα του οξυγόνου στο ρεύμα j δε μπορεί να είναι αρνητική. Προφανώς η διαθέσιμη ποσότητα οξυγόνου

πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση ή και μεγαλύτερη από την απαιτούμενη στοιχειομετρική. Στη συνέχεια διατυπώνονται και τα ισοζύγια μάζας για τα άλλα συστατικά των καυσαερίων μετά την αντίδραση της καύσης:

~~$$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 \quad (4.1.8)$$~~

~~$$\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} \quad (4.1.9)$$~~

~~και
$$\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_x \quad (4.1.10)$$~~

Και το συνολικό ισοζύγιο μάζας για τον αντιδραστήρα είναι:

~~$$\dot{m}_f + \dot{m}_a = \dot{m}_p + \dot{m}_e \quad (4.1.11)$$~~

Εισάγονται σε αυτό το σημείο οι μεταβλητές:

$$T(l) = \text{θερμοκρασία απόρριψης τέφρας} \quad (4.1.12)$$

$$\text{και } T(j) = \text{θερμοκρασία καυσαερίων} \quad (4.1.13)$$

Οι οποίες είναι απαραίτητες για το επόμενο βήμα που είναι η διατύπωση των ισοζυγίων ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τέφρα απορρίπτεται από τον αντιδραστήρα σε μια θερμοκρασία $T(l)$ μεγαλύτερη από εκείνη του περιβάλλοντος, αλλά είναι σίγουρα πολύ μικρότερη από την $T(j)$ των καυσαερίων. Παρόλα αυτά προκαλείται έτσι μια ελαφρά απώλεια θερμότητας. Η $T(j)$ αποδεικνύεται μια μεταβλητή απόφασης μεγάλης σημασίας για κάθε σύστημα άμεσης καύσης βιομάζας, καθώς σημαντική παράμετρος είναι η θερμοκρασία τήξης της περιεχόμενης τέφρας. Η θερμοκρασία των καυσαερίων δεν πρέπει συνήθως να ξεπερνά τη θερμοκρασία τήξης. Εισάγεται επίσης η μεταβλητή:

$$Th_{loss} = \text{απώλεια θερμότητας του αντιδραστήρα} \quad (4.1.14)$$

που εκφράζει την % απώλεια θερμικής ισχύος ως ποσοστό της συνολικής θερμικής ισχύος του αντιδραστήρα. Η τελευταία εκφράζεται με τη μεταβλητή:

$$\dot{Q}_{tot} = \text{θερμική ισχύς αντιδραστήρα} \quad (4.1.15)$$

Η ισχύς του αντιδραστήρα υπολογίζεται επίσης από την ακόλουθη σχέση:

~~$$\dot{Q}_{tot} = \dot{m}_f \cdot \text{HHV} \quad (4.1.16)$$~~

Ο πολλαπλασιασμός με το 1000 γίνεται διότι η τιμή της HHV εκφράζεται σε MJ/kg, ενώ της \dot{Q}_{tot} σε KW. Όταν η τιμή της ισχύος αποτελεί μεταβλητή απόφασης, μέσω της σχέσης 4.2.16 υπολογίζεται η παροχή καυσίμου στον αντιδραστήρα. Διατυπώνεται στη συνέχεια το συνολικό ισοζύγιο ενέργειας με όγκο ελέγχου αυτόν του αντιδραστήρα:

$$\text{[Redacted]} \quad (4.1.17)$$

Στην αγκύλη του δευτέρου μέλους εμφανίζονται οι απώλειες του αντιδραστήρα. Με \dot{Q}_{rad} συμβολίζεται η θερμική ισχύς που μεταδίδεται μέσω των επιφανειών του αντιδραστήρα και ο ρόλος της αναλύεται στη συνέχεια. Η ειδική ενθαλπία $h(j)$ υπολογίζεται μέσω της σχέσης (4.2.18) που διατυπώνεται στη συνέχεια. Σημειώνεται ότι η ειδική ενθαλπία $h(j)$ είναι αυτή που ισχύει για τη θερμοκρασία $T(j)$ που επικρατεί στην έξοδο των καυσαερίων από τον αντιδραστήρα καύσης. Όπως παρουσιάζεται στο 2^ο κεφάλαιο, η θερμοκρασία αυτή πρέπει να διατηρείται κάτω από μια τιμή που τίθεται ως περιορισμός ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τέφρας του αξιοποιούμενου είδους βιομάζας.

$$\text{[Redacted]} \quad (4.1.18)$$

Πρακτικά η ειδική ενθαλπία του μείγματος χημικών ουσιών που αποτελεί τα καυσαέρια, υπολογίζεται ως σταθμισμένος μέσος όρος της ενθαλπίας των επιμέρους χημικών ουσιών. Οι τελευταίες υπολογίζονται μέσω εγγενών συναρτήσεων του EES. Ομοίως μπορεί να διατυπωθεί η αντίστοιχη σχέση για τον υπολογισμό της $h(k)$ που αφορά το μείγμα των αερίων που αποτελούν τον ατμοσφαιρικό αέρα:

$$\text{[Redacted]} \quad (4.1.19)$$

Μετάδοση θερμότητας στις επιφάνειες του αντιδραστήρα: Τα θερμά καυσαέρια που εγκαταλείπουν τον αντιδραστήρα καύσης, μεταφέρουν ένα μεγάλο ποσοστό της ενθαλπίας του καυσίμου. Παρ' όλα αυτά ένα μέρος της θερμικής ενέργειας μεταδίδεται απευθείας στις επιφάνειες του πρώτου κυρίως μέσω θερμικής ακτινοβολίας και πολύ λιγότερο μέσω συναγωγής σε βαθμό που θεωρείται αμελητέος. Όπως ειπώθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, να μεν η θερμοκρασία καύσης πρέπει να είναι υψηλή ώστε να είναι πιο αποτελεσματική η μεταφορά θερμότητας, με αποτέλεσμα τη μείωση του αρχικού κόστους της εγκατάστασης, αλλά θα πρέπει ταυτόχρονα θερμοκρασία των καυσαερίων που εισέρχονται στους εναλλάκτες να διατηρείται κάτω από κάποια όρια. Το κλειδί στη δημιουργία αυτών των συνθηκών είναι η μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, η οποία συντελεί στην ψύξη των καυσαερίων πριν αυτά κατευθυνθούν προς τους εναλλάκτες.

Η εκτίμηση του μεγέθους της θερμικής ισχύος μέσω ακτινοβολίας μπορεί να γίνει μέσω της ακόλουθης σχέσης που χρησιμοποιείται στα προκαταρκτικά στάδια σχεδιασμού βιομηχανικών εγκαταστάσεων καύσης στερεάς κλίνης:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = A_{\text{rad}} \left(\frac{T_f^4}{1} - \frac{T_w^4}{\epsilon} \right) \quad (4.1.20)$$

Ο συντελεστής c_{rad} εκφράζεται σε μονάδες $KWm^2 \cdot K^4$, είναι ξεχωριστός για κάθε καύσιμο και προκύπτει κυρίως από τη συμπεριφορά καύσης. Η μεταβλητή A_{rad} εκφράζει την εσωτερική επιφάνεια του αντιδραστήρα που δέχεται τη θερμική ακτινοβολία των επιφανειών καύσης και των ακτινοβολούντων καυσαερίων και μετριέται σε m^2 . Με T_f και T_w αντίστοιχα εκφράζονται οι μέσες θερμοκρασίες της περιοχής καύσης και των τοιχωμάτων του αντιδραστήρα σε K . Βάσει των παραπάνω εισάγονται οι ακόλουθες σχέσεις:

$$c_{\text{rad}} = \text{τιμή συντελεστή} \quad (4.1.21)$$

$$A_{\text{rad}} = \frac{\dot{Q}_{\text{ot}}}{\Sigma \Theta \Phi} \quad (4.1.22)$$

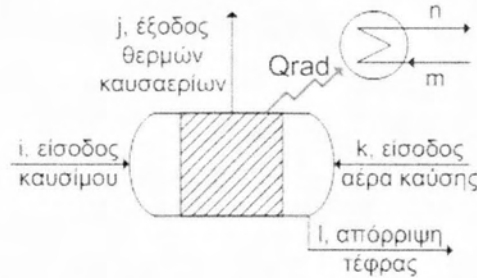
Με $\Sigma \Theta \Phi$ το συντελεστή θερμικής φόρτισης των επιφανειών του αντιδραστήρα. Η μεταβλητή αυτή μετριέται σε KW/m^2 και χρησιμοποιείται ως μέτρο σύγκρισης των λειτουργικών χαρακτηριστικών των αντιδραστήρων καύσης. Στην περίπτωση της βιομάζας μπορεί να λάβει την τιμή των $300 KWm^2$ που κυμαίνεται στα πλαίσια των τιμών που εμφανίζονται και για άλλα στερεά καύσιμα με παρόμοιες ιδιότητες, όπως οι φαιάνθρακες.

$$T_f = \text{τιμή θερμοκρασίας} \quad (4.1.23)$$

Σημειώνεται σε αυτό το σημείο ότι η τιμή της θερμοκρασίας της περιοχής της φλόγας ελέγχεται μέσω του λόγου αέρα – καυσίμου. Μεγαλύτεροι λόγοι συμβάλλουν στη μείωση της. Η επιλογή της θερμοκρασίας στην οποία γίνεται η καύση επηρεάζει αφενός τη μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία και αφετέρου τη θερμοκρασία εξαγωγής των καυσαερίων από τον αντιδραστήρα. Επομένως η τιμή της ορίζεται έτσι ώστε να ικανοποιείται ο θερμοκρασιακός περιορισμός των καυσαερίων που σχετίζεται με τη συμπεριφορά τήξης της τέφρας που αναλύεται σε προηγούμενα κεφάλαια.

$$T_w = \frac{T_m + T_n}{2} \quad (4.1.24)$$

Η τιμή της μέσης θερμοκρασίας του τοιχώματος του αντιδραστήρα λαμβάνει περίπου τη μέση τιμή της θερμοκρασίας των ρευστών που παραλαμβάνουν τη θερμότητα. Ορίζεται λοιπόν το ρεύμα m και n , τα οποία αποτελούν την είσοδο και έξοδο αντίστοιχα του ρευστού που παραλαμβάνει τη θερμότητα από τα τοιχώματα του αντιδραστήρα, όπως παρουσιάζεται παραστατικά στο ακόλουθο σχήμα:



Ο συμβολισμός και οι λεπτομέρειες σε σχέση με τις επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας μέσω ακτινοβολίας παρουσιάζονται σε επόμενο εδάφιο.

Τέλος προστίθεται και η μεταβλητή n_{rad} που εκφράζει το ποσοστό της θερμότητας που μεταδίδεται με ακτινοβολία κατά την εναλλαγή θερμότητας στις εγκαταστάσεις καύσης. Υπολογίζεται βάσει της σχέσης:

$$n_{rad} = \frac{\dot{Q}_{rad}}{\dot{Q}_{ot}} \quad (4.1.25)$$

Σημειώνεται ότι για αυξημένες θερμοκρασίες καύσης το ποσοστό της θερμικής ισχύος που μεταδίδεται μέσω της ακτινοβολίας μπορεί να είναι μέχρι και 50%.

[33], [34], [35]

4.2 Αντλία

Περιγραφή: Με τον όρο αντλία αναφερόμαστε σε κάθε συσκευή προώθησης ρευστών, υγρών ή αερίων χωρίς την αισθητή μεταβολή της πυκνότητάς τους. Η αντλία παρέχει στο ρευστό την απαραίτητη στατική πίεση, έτσι ώστε να εξισορροπείται αφενός η πτώση πίεσης που προκύπτει από τη ροή του και αφετέρου η μεταβολή της πίεσης που προκαλείται από τυχόν υψομετρική διαφορά των επιπέδων άντλησής του. Οι συσκευές που μεταβάλλουν σε μεγάλο βαθμό τη στατική πίεση των αερίων και συνεπώς την πυκνότητά τους, ονομάζονται συμπιεστές και αναλύονται σε επόμενο εδάφιο. Οι συσκευές άντλησης αερίων αποκαλούνται φυσητήρες. Οι αντλίες υγρών σε κλειστό κύκλωμα σωληνώσεων αποκαλούνται και κυκλοφορητές και είναι συνήθως μικρής ισχύος.

Υπάρχουν πολλοί τύποι αντλιών και βάσει του τρόπου λειτουργίας τους μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες. Στις αξονικές, τις φυγοκεντρικές και τις αντλίες θετικής εκτόπισης. Κάθε τύπος αντλίας, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του, επιλέγεται σε διαφορετικές εφαρμογές. Οι αξονικές αντλίες χαρακτηρίζονται από την ικανότητα άντλησης μεγάλης παροχής όγκου με μικρή αύξηση της στατικής πίεσης του ρευστού. Οι φυγοκεντρικές αντλίες επιλέγονται σε περιπτώσεις μέσης παροχής με υψηλότερους λόγους πίεσης από τις αξονικές. Οι αντλίες θετικής εκτόπισης παρουσιάζουν μεγάλους λόγους πίεσης και στην περίπτωση των αερίων χρησιμοποιούνται ως συμπιεστές. Η δυνατότητα παροχής όγκου των αντλιών θετικής εκτόπισης είναι μικρότερη σε σύγκριση με τις αντλίες άλλου τύπου.

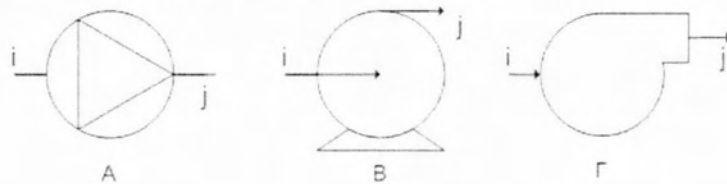
Εφόσον οι αντλίες αποδίδουν ισχύ στο συνεργαζόμενο ρευστό λειτουργίας, απαιτείται η τροφοδοσία ισχύος σε αυτές. Αυτή είναι είτε ηλεκτρική, είτε μηχανική που προκύπτει απευθείας από κάποιον κύκλο ισχύος, του οποίου τη λειτουργία εξυπηρετεί η αντλία. Ένα ποσοστό της ισχύος με το οποίο τροφοδοτείται η αντλία, μετατρέπεται σε θερμότητα μεταβάλλοντας την ενθαλπία του συνεργαζόμενου ρευστού. Έτσι λοιπόν ένα ακόμα χαρακτηριστικό των αντλιών είναι ο συντελεστής απόδοσης τους. Παρατίθεται στη συνέχεια πίνακας με στοιχεία λειτουργίας για διάφορους τύπους αντλιών.

Τύπος αντλίας	Μέγιστη πίεση σε kPa	Όριο δυναμικότητας σε m ³ /sec	Περιοχή απόδοσης αντλίας	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αξονική	200	10	50-85	Μέτριο κόστος, καλή απόδοση, χαμηλό κόστος συντήρησης	Χαμηλό μανομετρικό ύψος
Ακτινική	2000	10	40-80	Φθηνή, χαμηλό κόστος συντήρησης	Περιορισμένη απόδοση
Κοχλιωτή	2000	0.1	40-70	Μεγάλο μανομετρικό ύψος	υψηλό κόστος, μικρή δυναμικότητα, υψηλό κόστος συντήρησης
Παλινδρομική	15000	0.03	50-90	Πολύ μεγάλο μανομετρικό ύψος, καλή απόδοση	υψηλό κόστος, πολύ μικρή δυναμικότητα, υψηλό κόστος συντήρησης

Πίνακας 11 Χαρακτηριστικά αντλιών

Σκοπιμότητα μοντελοποίησης: Οι συσκευές άντλησης ρευστών συμβάλλουν με μικρό ποσοστό στο αρχικό κόστος μιας εγκατάστασης παραγωγής ισχύος. Παίζουν όμως καθοριστικό ρόλο σε σχέση με το λειτουργικό κόστος, επηρεάζοντας ταυτόχρονα τη συνολική ενεργειακή και οικονομική απόδοση της εγκατάστασης. Για αυτό το λόγο οι συσκευές άντλησης συμπεριλαμβάνονται στις μοντελοποιήσεις της παρούσας εργασίας.

Συμβολισμός: Στα διαγράμματα ροής με το σχήμα A συμβολίζονται οι αντλητικές συσκευές κάθε τύπου, ενώ οι φυγοκεντρικές αντλίες με το σχήμα B και οι φυσητήρες με το σχήμα Γ. Η είσοδος του ρευστού στην αντλητική συσκευή γίνεται μέσω του ρεύματος i και η έξοδος του μέσω του ρεύματος j .



Σχήμα 46 Συμβολισμός αντλιών στα διαγράμματα ροής

Μοντελοποίηση: Για τις συσκευές άντλησης ορίζονται αρχικά δύο συντελεστές απόδοσης. Ο ένας αφορά τη λειτουργία της αντλίας και ορίζεται μέσω της σχέσης:

$$n_{pump} = \% \text{ απόδοση ισχύος αντλίας (4.2.1)}$$

Ο δεύτερος συντελεστής απόδοσης καλύπτει την περίπτωση ύπαρξης κινητήρα στην αντλητική συσκευή και ορίζεται μέσω της σχέσης:

$$n_{eng} = \% \text{ απόδοση κινητήρα αντλίας (4.2.2)}$$

Ο πρώτος συντελεστής απόδοσης συμπληρώνεται βάσει των τιμών που δίδονται στον πίνακα 11 ενώ σχετικά με την απόδοση των κινητήρων, χρησιμοποιείται ένας συντελεστής απόδοσης 85% για τους ηλεκτροκινητήρες. Για την περίπτωση άλλου είδους κινητήρα, η τιμή εξετάζεται κατά περίπτωση, ενώ για μη ύπαρξη κινητήρα, η μεταβλητή λαμβάνει την τιμή 1. Η συνολική ισχύς της συσκευής άντλησης με κινητήρα ορίζεται με τη μεταβλητή \dot{W}_{total} , ενώ η ισχύς της αντλίας από τη \dot{W}_{pump} οι οποίες συνδέονται μέσω της σχέσης:

$$\dot{W}_{pump} = n_{eng} \dot{W}_{total} \quad (4.2.3)$$

Με την ειδική ενθαλπία του ρευστού να ορίζεται με $h(i)$ και $h(j)$ για ρεύμα εισόδου και εξόδου αντίστοιχα και \dot{m} την παροχή μάζας του, το ενεργειακό ισοζύγιο που μπορεί να εκφραστεί για τη συσκευή άντλησης είναι:

$$\dot{W}_{\text{pump}} = \dot{m} (h(j) - h(i)) \quad (4.2.4)$$

Οι τιμές των ειδικών ενθαλπιών μπορούν να υπολογιστούν από εγγενείς συναρτήσεις του EES. Η επόμενη σχέση συνδέει την πίεση που προσδίδεται στο ρευστό, με τα υπόλοιπα λειτουργικά χαρακτηριστικά της αντλητικής διάταξης:

$$\dot{W}_{\text{pump}} = \frac{\Delta P \dot{V}}{\eta_{\text{pump}}} \quad (4.2.5)$$

με τη μεταβλητή ΔP να εκφράζει τη μεταβολή της πίεσης του πριν και μετά τη συσκευή και ρ τη μέση πυκνότητα του. Η τιμή της πυκνότητας του ρευστού υπολογίζεται από εγγενή συνάρτηση του EES. Τέλος, διατυπώνεται το ακόλουθο ισοζύγιο μάζας για την αντλία:

$$\dot{m}(i) = \dot{m}(j) \quad (4.2.6)$$

Παραδοχές: Κατά τη μοντελοποίηση της αντλίας στην παρούσα εργασία, το ενδιαφέρον εστιάζεται στα λειτουργικά χαρακτηριστικά που συνδέονται με το αρχικό κόστος και το κόστος λειτουργίας της. Συμπεριλαμβάνεται η ισχύς της και η διαφορά πίεσης που προσδίδεται στο ρευστό, ενώ συμπληρώνεται εμπειρικά ένας μέσος βαθμός απόδοσης για τη λειτουργία της. Παραλείπονται παράμετροι όπως ο αριθμός στροφών ανά λεπτό ή τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της αντλίας, καθώς το ζητούμενο δεν είναι ο αναλυτικός σχεδιασμός της, αλλά μια εκτίμηση σε σχέση με τα χαρακτηριστικά λειτουργία της.

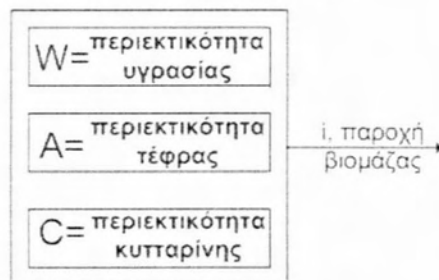
[34]

4.3 Βιομάζα

Περιγραφή: Με την έννοια βιομάζα περιγράφεται σε αυτό το σημείο το σύνολο των στερεών καυσίμων που θα χρησιμοποιηθούν στις μοντελοποιήσεις της παρούσας εργασίας. Τα χαρακτηριστικά των βιοκαυσίμων αυτών μπορούν να παραμετροποιηθούν με τη βοήθεια εξισώσεων και μεταβλητών που προκύπτουν σε αυτό το εδάφιο βάσει της ανάλυσης που γίνεται στο 2^ο κεφάλαιο.

Σκοπιμότητα μοντελοποίησης: Κατά το σχεδιασμό μιας εγκατάστασης που αξιοποιεί τη βιομάζα ως καύσιμο, τα πιο βασικά κριτήρια για την επιλογή του σωστού εξοπλισμού αλλά και των κατάλληλων παραμέτρων λειτουργίας του, προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά της διαθέσιμης βιομάζας. Στην παρούσα εργασία λαμβάνονται υπ' όψη τα κυριότερα χαρακτηριστικά της, έτσι ώστε να αναδειχτεί ο τρόπος με τον οποίο αυτά επηρεάζουν τη λειτουργία των εγκαταστάσεων που μοντελοποιούνται.

Συμβολισμός: Δεν υπάρχει συγκεκριμένο σύμβολο, καθιερωμένο για το συμβολισμό της βιομάζας σε διαγράμματα ροής. Θα χρησιμοποιηθεί λοιπόν το σχήμα που παρουσιάζεται στη συνέχεια, το οποίο αναγράφει ορισμένες από τις βασικές παραμέτρους που συνοδεύουν κάθε είδος βιομάζας.



Σχήμα 47 Συμβολισμός βιομάζας στα διαγράμματα ροής

Μοντελοποίηση: Ορίζονται αρχικά δύο από τις μεταβλητές που εξυπηρετούν την παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών του καυσίμου:

$$W(i) = \% \text{ περιεκτικότητα υγρασίας} \quad (4.3.1)$$

$$\text{και } A(i) = \% \text{ περιεκτικότητα τέφρας} \quad (4.3.2)$$

Αυτές όπως είναι προφανές εκφράζουν την περιεκτικότητα της βιομάζας σε υγρασία και τέφρα αντίστοιχα. Η τιμή της μεταβλητής W αναφέρεται μόνο στην ποσότητα της εξωγενούς και όχι της ενδογενούς υγρασίας της βιομάζας, όπως περιγράφεται στο 2^ο κεφάλαιο. Εισάγεται η μεταβλητή $comb$ η οποία συμβολίζει το ποσοστό της μάζας του καυσίμου που απομένει όταν εξαιρούνται από αυτό τα ποσοστά υγρασίας και τέφρας. Αυτό είναι και το ωφέλιμο κομμάτι που περιέχει τη χημική ενέργεια του καυσίμου. Βάσει των παραπάνω, ισχύει:

$$comb = 1 - W - A \quad (4.3.3)$$

Η επόμενη μεταβλητή που εξυπηρετεί την παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών του καυσίμου είναι η:

$$C = \% \text{ περιεκτικότητα κυτταρίνης} \quad (4.3.4)$$

Αυτή εκφράζει την % περιεκτικότητα κατά βάρος του ωφέλιμου μέρους της βιομάζας *comb* σε κυτταρίνη. Οι τιμές των μεταβλητών που αναφερθήκαν μέχρι στιγμής κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1 καθώς εκφράζουν % ποσοστό. Σημειώνεται ότι λόγω της παρόμοιας θερμικής συμπεριφοράς της κυτταρίνης και της ημικυτταρίνης, η μεταβλητή C συμπεριλαμβάνει και την τελευταία εκφράζοντας τη χάριν απλούστευσης ως ποσότητα κυτταρίνης στη μάζα *comb* του καυσίμου. Συνίσταται προσοχή διότι η μεταβλητή C δεν αναφέρεται σε ολόκληρη τη μάζα m_i του καυσίμου, σε αντίθεση με τις μεταβλητές A και W . Η πρώτη παραδείγματος χάριν παραμένει σταθερή όταν το καύσιμο υπόκειται σε μεταβολές όπως η ξήρανση. Η % περιεκτικότητα κυτταρίνης σε ολόκληρη τη μάζα m_i του καυσίμου, που αντιστοιχεί στο ρεύμα i , μπορεί να υπολογιστεί μέσω της σχέσης:

$$C_i = comb_i \quad (4.3.5)$$

Δεδομένων των ενθαλπιών καύσης κυτταρίνης και λιγνίνης που αναφέρονται στο αντίστοιχο εδάφιο του 2^{ου} κεφαλαίου, μπορεί μέσω ενός γραμμικού μοντέλου να υπολογιστεί κατά προσέγγιση η ανώτερη ενθαλπία καύσης της βιομάζας:

$$H_{U,biom} \text{ σε } MJ/kg \quad (4.3.6)$$

Η τιμή της ανώτερης ενθαλπίας καύσης εξαρτάται από το ποσοστό της ωφέλιμης μάζας με την έννοια ότι όσο αυτό μικραίνει, τόσο λιγότευει η καύσιμη ύλη.

Η αναλογία των συστατικών του ωφέλιμου μέρους της βιομάζας *comb* αποδεικνύεται σημαντική σε επόμενες μοντελοποιήσεις. Εφόσον εκφράζεται παραπάνω η αναλογία κυτταρίνης-λιγνίνης για το καύσιμο, μένει η περιγραφή των στοιχειομετρικών δεδομένων για την καθεμιά από τις δύο ομάδες χημικών ενώσεων, προκειμένου να προκύψουν οι ζητούμενες εκφράσεις. Σε αυτό εξυπηρετούν οι επόμενες σχέσεις που δίδονται στο 2^ο κεφάλαιο: $CH_{1.67}O_{0.83}$ και $C_2H_{1.9}ON_2$ που εκφράζουν τη στοιχειομετρική αναλογία των συστατικών στην κυτταρίνη και τη λιγνίνη αντίστοιχα.

Σε αυτό το σημείο εισάγονται οι μεταβλητές Carb, Oxyg, Nitr και Hydr μέσω των οποίων εκφράζεται το % ποσοστό κατά βάρος σε άνθρακα, οξυγόνο, άζωτο και υδρογόνο αντίστοιχα, του ωφέλιμου μέρους *comb* της βιομάζας. Έπειτα από περεταίρω επεξεργασία, προκύπτουν σχέσεις που δίδουν την αναλογία των στοιχείων στην ωφέλιμη μάζα καυσίμου, ως συνάρτηση της περιεκτικότητας της σε κυτταρίνη:

$$C = Carb \quad (4.3.7)$$

$$O_{291.306} \quad (4.3.8)$$

$$N_{100.507} \quad (4.3.9)$$

$$H_{300.302} \quad (4.3.10)$$

Τα ίδια ποσοστά υπολογίζονται για το σύνολο της μάζας του καυσίμου m_i με τον πολλαπλασιασμό τους επί τη μεταβλητή $comb$.

Δίδεται επίσης η προσεγγιστική τιμή της ειδικής θερμοχωρητικότητας της τέφρας:

$$c_{p\text{ τέφρας}} \quad (4.3.11)$$

Ενώ τίθεται ως παραδοχή ότι η θερμοκρασία της βιομάζας είναι πάντοτε:

$$T(i) = 29\text{K} \quad (4.3.12)$$

Παραδοχές για τα χαρακτηριστικά της βιομάζας στις μοντελοποιήσεις:

Βάσει της περιγραφής που έγινε στα προηγούμενα κεφάλαια για τα είδη της βιομάζας, τα χαρακτηριστικά τους και την επίδραση των τελευταίων στις θερμικές εγκαταστάσεις, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα γενικευμένες παραδοχές για την αξιοποιούμενη βιομάζα των μοντελοποιημένων εγκαταστάσεων. Ακολουθούνται δυο σενάρια αξιοποίησης βιομάζας με διαφορετικά χαρακτηριστικά καυσίμου για το κάθε σενάριο. Το σενάριο A αντιστοιχεί σε ξυλώδη, ενώ το B σε πώδη βιομάζα.

Παράμετρος	Μεταβλητή	Σενάριο A	Σενάριο B
Περιεκτικότητα σε υγρασία	W	20	15
Περιεκτικότητα σε τέφρα	A	1%	8%
Περιεκτικότητα σε λιγνίνη	L	25%	15%
Μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία φλόγας σε $^{\circ}\text{C}$	T_f	1350	1150
Μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία καυσαερίων σε $^{\circ}\text{C}$	T_{exh}	1050	850

Πίνακας 12 Παραδοχές για σενάριο A και B αξιοποιούμενων ειδών βιομάζας

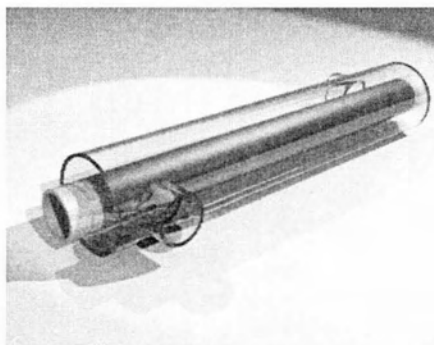
[8], [10], [1], [34]

4.4 Εναλλάκτης

Περιγραφή: Μια από τις κυριότερες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε κάθε εγκατάσταση παραγωγής ισχύος είναι η μεταφορά θερμότητας από ένα ρευστό σε άλλο. Η συσκευή που εξυπηρετεί τη διεργασία αυτή είναι ο εναλλάκτης θερμότητας. Το βασικό χαρακτηριστικό ενός εναλλάκτη είναι ότι προσφέρει θερμικά αγωγίμες

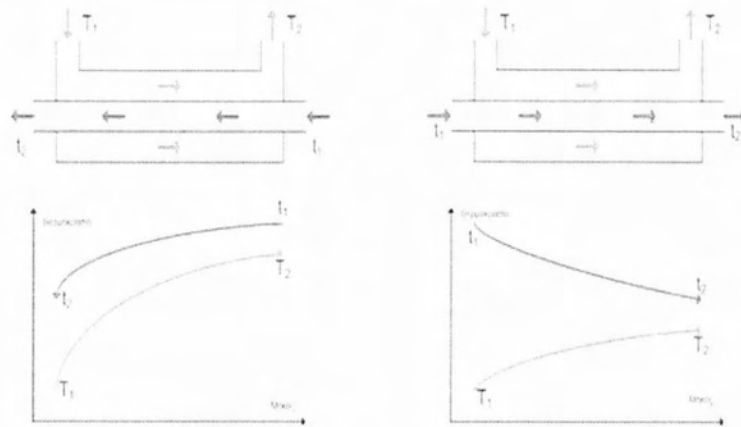
επιφάνειες που μεσολαβούν μεταξύ δύο ρευστών διαφορετικής θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα τη μετάδοση θερμότητας από το θερμότερο στο ψυχρότερο.

Οι περιπτώσεις εναλλαγής θερμότητας: Στη συνέχεια αναλύονται οι περιπτώσεις εναλλαγής θερμότητας που συμπεριλαμβάνονται στις μοντελοποιήσεις της παρούσας εργασίας. Το σκοπό της παρουσίασης θα εξυπηρετήσει ο εναλλάκτης διπλού σωλήνα, του σχήματος που ακολουθεί. Πρόκειται για την απλούστερη μορφή εναλλάκτη που αποτελείται από δύο ομόκεντρους αγωγούς μέσω των οποίων ρέουν τα ρευστά που εναλλάσσουν θερμότητα.



Σχήμα 48 Απλός αυλοφόρος εναλλάκτης

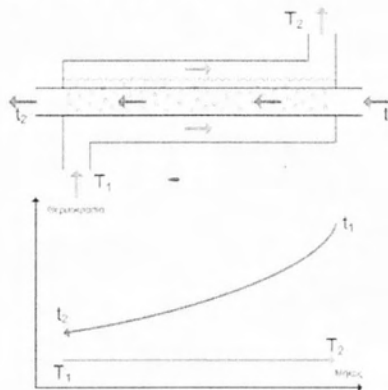
Στα παρακάτω σχήματα εμφανίζονται σε πλάγια όψη σωληνοειδείς εναλλάκτες με τα αντίστοιχα διαγράμματα θερμοκρασιακών προφίλ της ροής των συνεργαζόμενων ρευστών. Το ψυχρό ρεύμα, δηλαδή το ρευστό που πρόκειται να προσλάβει θερμότητα, εμφανίζεται με μπλε χρώμα και θερμοκρασία εισόδου και εξόδου από τον εναλλάκτη, T_1 και T_2 αντίστοιχα. Το θερμό ρεύμα, το ρευστό δηλαδή που προσδίδει μέρος της θερμότητας του, εμφανίζεται με κόκκινο χρώμα και θερμοκρασία εισόδου και εξόδου από τον εναλλάκτη t_1 και t_2 αντίστοιχα. Αριστερά στο επόμενο σχήμα πραγματοποιείται εναλλαγή θερμότητας με αντιρροή, κατά την οποία τα ρευστά ρέουν στον εναλλάκτη με αντίθετη φορά. Δεξιά στο επόμενο σχήμα η εναλλαγή γίνεται με ομορροή, όπου η φορά ροής των ρευστών είναι η ίδια.



Σχήμα 49 Εναλλαγή θερμότητας με ομορροή και αντιρροή

Είναι φανερό από τα σχήματα ότι μέσω της εναλλαγής θερμότητας με αντιρροή, το ψυχρό ρεύμα μπορεί να εξέρχεται από τον εναλλάκτη με θερμοκρασία υψηλότερη από αυτή που εξέρχεται το θερμό ρεύμα, σε αντίθεση με την περίπτωση της ομορροής, όπου αυτό δε μπορεί να συμβεί. Ως αποτέλεσμα αυτού, η εναλλαγή θερμότητας μέσω αντιρροής είναι αποτελεσματικότερη και προτιμάται σε σχέση με την ομορροή, πέραν ορισμένων περιπτώσεων.

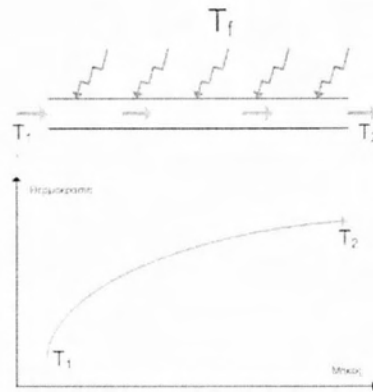
Ακολουθεί σχέδιο που παρουσιάζει την περίπτωση εναλλαγής θερμότητας με παράλληλη αλλαγή φάσης του ενός ρευστού.



Σχήμα 50 Εναλλαγή θερμότητας με αλλαγή φάσης

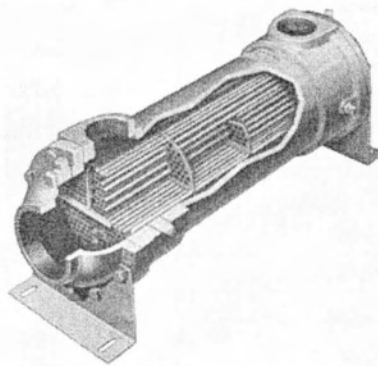
Το ψυχρό ρευστό στην προκειμένη περίπτωση είναι ένα κορεσμένο υγρό. Η λανθάνουσα θερμότητα που προσλαμβάνει μέσω της ψύξης του θερμού ρευστού προκαλεί την εξάτμιση του, ενώ αυτό παραμένει στην ίδια θερμοκρασία. Οι εναλλάκτες στους οποίους πραγματοποιείται η εξάτμιση ή η συμπύκνωση ενός ρευστού ονομάζονται βραστήρες και συμπυκνωτές αντίστοιχα.

Τέλος, παρουσιάζεται σχηματικά η περίπτωση της εναλλαγής θερμότητας όπου η θερμική ισχύς μεταδίδεται στην επιφάνεια εναλλαγής μέσω θερμικής ακτινοβολίας.



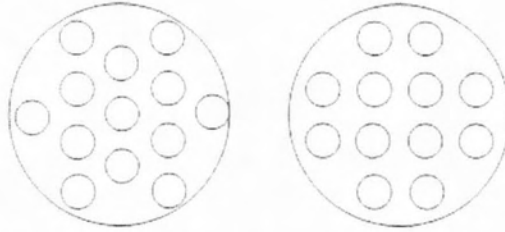
Σχήμα 51 Εναλλαγή θερμότητας με θερμική ακτινοβολία

Εναλλάκτης αυλών κελύφους: Οι τύποι εναλλακτών ποικίλλουν, αυτός όμως που χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις στις εγκαταστάσεις που μοντελοποιούνται στην παρούσα εργασία, είναι ο εναλλάκτης αυλών-κελύφους. Δε διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από το μοντέλο του εναλλάκτη διπλού σωλήνα. Αντί για δύο ομόκεντρους αγωγούς όμως, υπάρχουν πολλοί διαμήκεις αγωγοί στο εσωτερικό του που ονομάζονται αυλοί, στους οποίους ρέει το ένα ρευστό και ένα κέλυφος που τους περικλείει, που παίζει το ρόλο του εξωτερικού αγωγού, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχέδιο, μέσα στο οποίο ρέει το άλλο ρευστό.



Σχήμα 52 Εναλλάκτης αυλών κελύφους

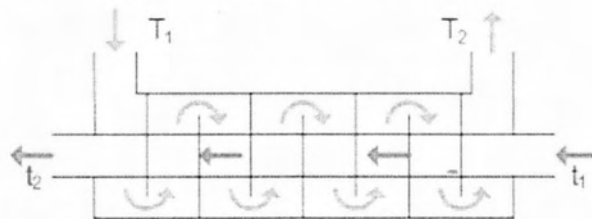
Οι αυλοί τοποθετούνται σε συγκεκριμένη διάταξη στο εσωτερικό του εναλλάκτη. Υπάρχουν δύο τύποι διάταξης των αυλών, αυτή του τριγωνικού και του τετραγωνικού βήματος, όπως παρουσιάζεται με τη σειρά στα ακόλουθα σχήματα:



Σχήμα 53 Τριγωνική και τετραγωνική διάταξη αυλών

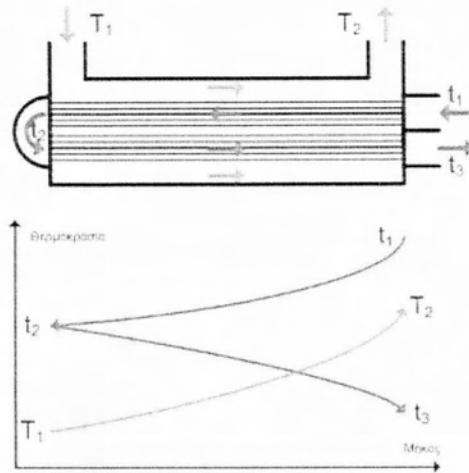
Αύξηση της ταχύτητας των ρευστών: Εκτός της μεγάλης επιφάνειας εναλλαγής, ένα χαρακτηριστικό που καθορίζει την αποτελεσματικότητα της εναλλαγής θερμότητας σε έναν εναλλάκτη, είναι ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας. Το σχετικό θεωρητικό υπόβαθρο αναλύεται στο επόμενο εδάφιο όπου βάσει των εξισώσεων γίνεται φανερό ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα κατά τη ροή των ρευστών στον εναλλάκτη, τόσο πιο αυξημένος είναι και ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας.

Στοχεύοντας στην αύξηση της ταχύτητας του ρευστού στο κέλυφος, τοποθετούνται πλάκες που ονομάζονται ανακλαστήρες και αναγκάζουν τη ροή να διανύει διαδρομή ζιγκ-ζάγκ. Με σταθερή ογκομετρική παροχή του ρευστού λοιπόν, η μεγαλύτερη απόσταση που διανύεται στον ίδιο χρόνο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας του, όπως δείχνει το σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 54 Ανακλαστήρες ροής στο κέλυφος

Η αύξηση της ταχύτητας του ρευστού στους αυλούς μπορεί να γίνει με τη μείωση του αριθμού τους. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι η ροή επιμερίζεται σε κάθε αυλό ξεχωριστά, επομένως όσο περισσότεροι υπάρχουν, τόσο μικρότερη η παροχή μέσα από τον καθένα. Η μείωση του αριθμού των αυλών όμως, επιφέρει σαν αποτέλεσμα και τη μείωση της συνολικής επιφάνειας εναλλαγής. Η λύση που προτείνεται είναι οι αυλοί να καθοδηγούν το ρευστό σε ροή με περισσότερες από μια διαδρομές από την περιοχή εναλλαγής θερμότητας κατά μήκος του κελύφους, όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 55 Εναλλαγή θερμότητας με 2 περάσματα αυλών

Στο σχεδιάγραμμα του εναλλάκτη που εμφανίζεται παραπάνω, οι αυλοί κάνουν δύο διαδρομές από το κέλυφος. Αποτέλεσμα είναι η ταχύτητα του ρευστού να διπλασιάζεται στους αυλούς, καθώς η παροχή επιμερίζεται στους μισούς αυλούς σε κάθε πέρασμα. Παρ' όλα αυτά η επιφάνεια εναλλαγής παραμένει σταθερή. Το σχήμα επίσης παρουσιάζει το αντίστοιχο θερμοκρασιακό προφίλ που δημιουργείται σε αυτό τον εναλλάκτη. Τα θερμοκρασιακά προφίλ της ροής γίνονται πιο σύνθετα στην περίπτωση πολλών διαδρομών των αυλών. Παρουσιάζεται ένας συνδυασμός μεταξύ ομοροής και αντιροής. Για το λόγο αυτό, κατά τη βασική θεωρητική ανάλυση των εναλλακτών που ακολουθεί, η περίπτωση αυτή αντιμετωπίζεται με επίλυση για ένα πέρασμα και την ύπαρξη ενός διορθωτικού συντελεστή F_t .

Χωροθέτηση ρευστών: Κατά το σχεδιασμό κάθε εναλλάκτη συμπεριλαμβάνονται τα ακόλουθα κριτήρια, βάσει των οποίων επιλέγεται το ρευστό που θα ρέει στο κέλυφος και στους αυλούς αντίστοιχα:

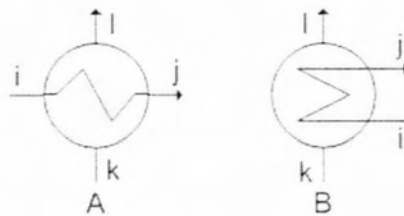
- Το ρευστό με τη μεγαλύτερη τάση σχηματισμού επικαθίσεων επιλέγεται να ρέει στους αυλούς, καθώς αυτοί καθαρίζονται πολύ πιο εύκολα σε σχέση με το κέλυφος.
- Σε περίπτωση όπου κάποιο ρευστό είναι διαβρωτικό, τοποθετείται στους αυλούς. Μπορεί έτσι να γίνει χρήση ειδικών ανθεκτικών υλικών με μικρότερο κόστος, καθώς δε θα χρειάζεται να προστατευτεί και το έλασμα του κελύφους.
- Κατά την ύπαρξη ρευστού με αυξημένη στατική πίεση, τοποθετείται στους αυλούς, καθώς η κατά πολύ μικρότερη διατομή τους σε σχέση με αυτή του ελάσματος του κελύφους, τους καθιστά ανθεκτικότερους.

-Όταν η θερμοκρασία λειτουργίας ενός ρευστού είναι υψηλή, τότε επιλέγεται η ροή του στους αυλούς για τον ίδιο λόγο με τον παραπάνω. Η αυξημένη θερμοκρασία μειώνει το όριο αντοχής των υλικών.

-Όταν η παροχή ενός ρευστού είναι μικρή, επιλέγεται η ροή του στο κέλυφος όπου επιτυγχάνεται ευκολότερα τυρβώδης ροή σε σχέση με τους αυλούς, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα χρήσης ανακλαστήρων που συνεπάγεται αυξημένο συντελεστή μεταφοράς. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να μειωθεί το μέγεθος του εναλλάκτη.

Σκοπιμότητα μοντελοποίησης: Οι εναλλάκτες αποτελούν ένα μεγάλο μέρος του κόστους επένδυσης στις εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος. Για το λόγο αυτό στην παρούσα εργασία η λειτουργία τους αναλύεται προκειμένου να υπάρξει συσχετισμός μεταξύ κόστους και παραμέτρων λειτουργίας τους. Γίνεται προσεγγιστικός υπολογισμός των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας μέσω αναλυτικών εξισώσεων και προκύπτει η συνολική επιφάνεια εναλλαγής για τον κάθε εναλλάκτη, ενώ υπολογίζεται και η πτώση πίεσης των συνεργαζόμενων ρευστών. Με αυτό τον τρόπο γίνεται ακριβέστερη κοστολόγηση τους, ενώ μέσω του συσχετισμού κόστους-παραμέτρων λειτουργίας που προκύπτει, επιτυγχάνεται η συνολική βελτιστοποίηση των μοντελοποιημένων εγκαταστάσεων.

Συμβολισμός: Στα διαγράμματα ροής, με το σχήμα A συμβολίζονται οι εναλλάκτες μιας διαδρομής των αυλών από το κέλυφος, ενώ με το σχέδιο B οι εναλλάκτες πολλαπλών διαδρομών. Βάσει του συμβολισμού, η διαδρομή του ρευστού που τοποθετείται στους αυλούς παρομοιάζεται με το σχηματισμό ζιγκ-ζαγκ των σχημάτων. Το κέλυφος παρομοιάζεται με το κυκλικό σχήμα που περικλείει τους αυλούς. Τα αντίστοιχα ρευστά εισέρχονται στον εναλλάκτη μέσω των ρευμάτων i και k και εξέρχονται μέσω των j και l.



Σχήμα 56 Συμβολισμός εναλλακτών στα διαγράμματα ροής

Μοντελοποίηση: Ως εφελθτήριο δίδεται η σχέση που συνδέει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εναλλάκτη με τα λειτουργικά:

$$\dot{Q}_{ex} = UA \Delta T_{LM} \quad (4.4.1)$$

όπου \dot{Q}_{ex} = θερμική ισχύς εναλλάκτη (4.4.2)

Η θερμική ισχύς του εναλλάκτη είναι η ισχύς που μεταβιβάζεται από το ένα ρευστό στο άλλο. A_{ex} είναι η συνολική επιφάνεια εναλλαγής, U_{tot} ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και ΔT_{Ln} η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά των ρευστών. Ο F_T είναι ένας διορθωτικός συντελεστής που προβλέπεται για την περίπτωση πολλών περασμάτων των αυλών ή της ροής στο κέλυφος. Ο τρόπος υπολογισμού των μεταβλητών αναλύεται στη συνέχεια.

Διαδικασία σχεδιασμού των εναλλακτών: Κατά το σχεδιασμό των εναλλακτών στην παρούσα εργασία, διενεργείται μια διαδικασία δοκιμής και σφάλματος. Το κριτήριο για την επίτευξη του σωστού σχεδιασμού είναι η σύγκριση δύο μεταβλητών, ο ρόλος των οποίων περιγράφεται στη συνέχεια. Υπολογίζεται η πραγματική επιφάνεια εναλλαγής του εναλλάκτη βάσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του, η οποία ορίζεται ως A_{tot} . Παράλληλα υπολογίζεται η εκτιμώμενη επιφάνεια εναλλαγής A_{ex} ως εξαρτημένη μεταβλητή της σχέσης 4.4.1. Προκύπτει λοιπόν μια σύγκριση μεταξύ των δύο μεταβλητών και όταν οι τιμές τους είναι ίσες, έχει επιτευχθεί ο σωστός σχεδιασμός του εναλλάκτη. Εισάγεται σε αυτό το σημείο ο συντελεστής E_x για τον οποίο ισχύει:

$$E_x = A_{tot} / A_{ex} \quad (4.4.3)$$

Ο συντελεστής αυτός πρέπει να προσεγγίζει τη μονάδα και αποτελεί το κριτήριο του κατά πόσο έχει σχεδιαστεί σωστά ο εναλλάκτης με βάση τις σχέσεις που ακολουθούν.

Η πραγματική επιφάνεια εναλλαγής: εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εναλλάκτη. Δεδομένου ότι το τοίχωμα των αυλών έχει κάποιο πάχος, η συνολική εξωτερική επιφάνεια τους είναι λίγο μεγαλύτερη από την εσωτερική. Στην παρούσα εργασία οι υπολογισμοί γίνονται βάσει της εξωτερικής επιφάνειας των αυλών. Όπως θα φανεί στη συνέχεια, από τη θεώρηση αυτή επηρεάζεται και η τιμή του ολικού συντελεστή μεταφοράς U_{tot} . Σημειώνεται όμως ότι το καθοριστικής σημασίας γινόμενο $A_{tot} \cdot U_{tot}$ παραμένει αμετάβλητο από τη θεώρηση οποιασδήποτε από τις δύο επιφάνειες ως βάση υπολογισμών. Εισάγονται σε αυτό το σημείο σχέσεις που καθορίζουν μια σειρά γεωμετρικών χαρακτηριστικών για τον εναλλάκτη:

$$N = \text{πλήθος αυλών} \quad (4.4.4)$$

$$L = \text{μήκος αυλών} \quad (4.4.5)$$

$$OD = \text{εξωτερική διάμετρος αυλών (4.4.6)}$$

$$ID = \text{εσωτερική διάμετρος αυλών (4.4.7)}$$

Η μεταβλητή που εκφράζει την εσωτερική επιφάνεια εναλλαγής συμβολίζεται ως A_m . Όπως αναφέρθηκε, η εξωτερική επιφάνεια εναλλαγής θα αποτελέσει εδώ τη βάση των υπολογισμών, έχοντας ήδη συμβολιστεί ως A_{tot} . Για τις επιφάνειες αυτές ισχύει:

$$A_{tot} = NL\pi O \quad (4.4.8)$$

$$\text{και } A_m = NL\pi I \quad (4.4.9)$$

Η εκτιμώμενη επιφάνεια εναλλαγής: προκύπτει όπως αναφέρθηκε μέσω της σχέσης 4.4.1. Για να υπολογιστεί η τιμή της, πρέπει να υπολογιστούν οι τιμές των υπόλοιπων όρων της σχέσης. Στη συνέχεια λοιπόν παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίον υπολογίζονται ένας προς έναν οι λοιποί όροι της σχέσης 4.4.1.

Θερμική ισχύς, ισοζύγια μάζας και ενέργειας: Για τη θερμική ισχύ ενός εναλλάκτη μπορούν να διατυπωθούν τα ακόλουθα ισοζύγια ενέργειας:

$$\dot{Q}_i = \dot{m}(i)C_p(T_i - T_j) \quad (4.4.10)$$

$$\text{και } \dot{Q}_j = \dot{m}(j)C_p(T_j - T_k) \quad (4.4.11)$$

Με τις ειδικές ενθαλπίες των ρευστών να υπολογίζονται από εγγενείς συναρτήσεις του EES ως εξαρτημένες τιμές των θερμοκρασιών των αντίστοιχων ρευμάτων. Οπότε εισάγονται και οι σχέσεις:

$$T(i) = \text{θερμοκρασία (4.4.12)}$$

$$T(j) = \text{θερμοκρασία (4.4.13)}$$

$$T(k) = \text{θερμοκρασία (4.4.14)}$$

$$T(l) = \text{θερμοκρασία (4.4.15)}$$

Σε σχέση με τις παροχές μάζας των ρευστών, ισχύουν τα επόμενα ισοζύγια μάζας:

$$m(i) = m(j) \quad (4.4.16)$$

$$m(k) = m(l) \quad (4.4.17)$$

Ενώ οι τιμές των παροχών μάζας καθορίζονται από τις σχέσεις:

$$m(i) = \text{παροχή μάζας (4.4.18)}$$

$$m(k) = \text{παροχή μάζας (4.4.19)}$$

Ο ολικός συντελεστής μεταφοράς: U_{tot} ενός εναλλάκτη προκύπτει εκτός των άλλων ως συνάρτηση δύο επιμέρους συντελεστών. Αυτοί εκφράζονται μέσω των μεταβλητών h_m και h_{out} . Πρόκειται για τους μερικούς συντελεστές μεταφοράς για

την εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια των αυλών αντίστοιχα. Ο δεύτερος συντελεστής αναφέρεται συχνά και ως μερικός συντελεστής μεταφοράς του κελύφους. Σε επόμενα εδάφια θα αναλυθεί ο τρόπος υπολογισμού τους.

Σε αυτό το σημείο διατυπώνεται η σχέση υπολογισμού του U_{tot} :

$$\frac{1}{U_{tot}} = R_{inf} + R_{outf} \quad (4.4.20)$$

Οι μεταβλητές R_{inf} και R_{outf} συμβολίζουν τους συντελεστές θερμικών αντιστάσεων λόγω επικαθίσεων στην εσωτερική επιφάνεια των αυλών και στο κέλυφος αντίστοιχα. Οι τιμές των συντελεστών εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από το συνεργαζόμενο ρευστό, αλλά και από τις συνθήκες ροής στον εναλλάκτη. Η τακτική που ακολουθείται για τη μείωση των επικαθίσεων είναι η αύξηση της ταχύτητας των ρευστών στον εναλλάκτη, έτσι ώστε να αυξηθεί και η πτώση πίεσης, μειώνοντας την τάση σχηματισμού τους. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται προτεινόμενες τιμές από την TEMA που προκύπτουν εμπειρικά για διάφορες περιπτώσεις ρευστών.

Είδος ρευστού	Θερμική αντίσταση επικαθίσεων $m^2 \cdot K / K\mu$
Διαθερμικό έλαιο	0.352
καυσαέρια κινητήρα	1.761
καυσαέρια άνθρακα	1.761
Επεξεργασμένο νερό $T < 50^\circ C$	0.176
Επεξεργασμένο νερό $T \geq 50^\circ C$	0.352
Ανεπεξεργαστο νερό $T < 50^\circ C$	0.528
Ανεπεξεργαστο νερό $T \geq 50^\circ C$	0.881
Συμπύκνωμα νερού	0.088
Συμπύκνωμα νερού με τέφρα	0.528

Πίνακας 13 Τιμές συντελεστών επικαθίσεων για διάφορες περιπτώσεις

Προκύπτουν λοιπόν και οι σχέσεις:

$$R_{inf} = \text{τιμή συντελεστή (4.4.21)}$$

$$\text{και } R_{outf} = \text{τιμή συντελεστή (4.4.22)}$$

Η μεταβλητή k_w εκφράζει τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το τοίχωμα των αυλών του εναλλάκτη:

$$k_w = \text{θερμική αγωγιμότητα τοιχώματος (4.4.24)}$$

Το υλικό που χρησιμοποιείται συνήθως για την κατασκευή των αυλών είναι ο χάλυβας. Η θερμική αγωγιμότητα του κυμαίνεται στο εύρος $45-60 \times 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{mK}}$ με τις μέγιστες τιμές να χαρακτηρίζουν τον απλό ανθρακούχο χάλυβα και τις ελάχιστες τους ανοξείδωτους χρωμιούχους χάλυβες.

Η σχέση 4.4.20 πρακτικά χωρίζεται σε τρία μέρη. Το πρώτο μέρος αποτελείται από δύο όρους που αφορούν τη μετάδοση της θερμότητας μέσω συναγωγής στην εσωτερική επιφάνεια των αυλών και στο κέλυφος. Το δεύτερο μέρος αφορά τη μετάδοση της θερμότητας μέσω αγωγής στο τοίχωμα των αυλών. Το τρίτο σχετίζεται με τις θερμικές αντιστάσεις που προκύπτουν λόγω των επικαθίσεων στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια των αυλών για τον πρώτο και το δεύτερο όρο αντίστοιχα.

Ο μερικός συντελεστής μεταφοράς στους αυλούς:

Διατυπώνεται στη συνέχεια η σχέση Sieder-Tate για τυρβώδη ροή και αναπτυγμένο οριακό στρώμα, κατάλληλη για ρευστά με αριθμό Prandtl $0.7 < Pr < 16$.

$$h = 0.023 \frac{k}{D} Re^{0.8} Pr^{0.4} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (4.4.25)$$

Όπου $k(i)$ η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού, $\mu(i)$ και $\mu_w(i)$ το δυναμικό ιξώδες στο κύριο σώμα της ροής και στην περιοχή του οριακού στρώματος αντίστοιχα και $cp(i)$ η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού. Η μεταβλητή $G(i)$ συμβολίζει τη μαζική ταχύτητα στο εσωτερικό των αυλών, η οποία υπολογίζεται με την ακόλουθη σχέση:

$$G = \frac{4 \cdot \dot{Q}}{\pi D L} \quad (4.4.26)$$

Οι μεταβλητές $k(i)$, $\mu(i)$ και $cp(i)$ υπολογίζονται από εγγενείς συναρτήσεις του EES συναρτήσει της θερμοκρασίας του ρευστού. Στην περίπτωση μείγματος ρευστών εφαρμόζεται η μέθοδος υπολογισμού της σχέσης 4.2.18. Η θερμοκρασία που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό τους είναι η μέση θερμοκρασία T_{mij} μεταξύ των ρευμάτων i και j , η οποία υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$T_{mij} = \frac{T_i + T_j}{2} \quad (4.4.27)$$

ενώ η $\mu_w(i)$ υπολογίζεται συναρτήσει της μέσης θερμοκρασίας T_m που επικρατεί σε ολόκληρο τον εναλλάκτη. Για να υπολογιστεί η τιμή της, υπολογίζεται πρώτα η μέση θερμοκρασία του ρευστού στο κέλυφος, η οποία είναι η μέση θερμοκρασία μεταξύ του ρεύματος k και l , η T_{mkl} , η τιμή της οποίας βρίσκεται με βάση τη σχέση:

$$T_{mkl} = \frac{T_k + T_l}{2} \quad (4.4.28)$$

Η T_m είναι η μέση τιμή των T_{mij} και T_{mkl} . Οπότε ισχύει:

$$T_m = \frac{T_{mij} + T_{mkl}}{2} \quad (4.4.29)$$

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η σχέση Sieder-Tate που δόθηκε για τον υπολογισμό του μερικού συντελεστή μεταφοράς στο εσωτερικό των αυλών, χαρακτηρίζεται από σφάλμα 13%.

Ο μερικός συντελεστής μεταφοράς στο κέλυφος: μπορεί επίσης να υπολογιστεί μέσω μεθόδων που βασίζονται σε αναλυτικές σχέσεις. Οι επικρατέστερες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, ανάλογα με την περίπτωση για την οποία εφαρμόζονται. Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία είναι η μέθοδος Kern. Παρατίθεται αρχικά η σχέση:



$$h_c = \frac{k(k) \cdot Pr(k)^{0.4} \cdot Re(k)^{0.8}}{D_e} \quad (4.4.30)$$

Με D_e την υδραυλική διάμετρο της γεωμετρίας του κελύφους, $k(k)$ τη θερμική αγωγιμότητα του ρευστού, $\mu(k)$ και $\mu_w(k)$ το δυναμικό ιξώδες στο κύριο σώμα της ροής και στην περιοχή του οριακού στρώματος αντίστοιχα και $cp(k)$ την ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού. Ομοίως με τους υπολογισμούς για τη ροή στους αυλούς, οι τιμές των μεγεθών αυτών υπολογίζονται συναρτήσει της θερμοκρασίας T_{mkl} , με εξαίρεση την τιμή της $\mu_w(k)$ η οποία υπολογίζεται συναρτήσει της T_m . Οι υπολογισμοί γίνονται μέσω εγγενών συναρτήσεων του EES, εκτός της περίπτωσης όπου το ρευστό είναι διαθερμικό έλαιο, οι ιδιότητες του περιγράφονται μέσω των ακόλουθων εξισώσεων:

$$k(k) = \text{θερμική αγωγιμότητα ελαίου} \quad (4.4.31)$$

$$\mu(k) = \text{δυναμικό ιξώδες ελαίου} \quad (4.4.32)$$

$$\mu_w(k) = \text{δυναμικό ιξώδες ελαίου} \quad (4.4.33)$$

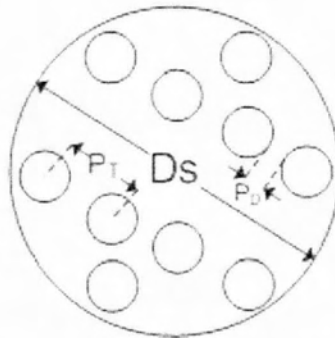
$cp(k) =$ ειδική θερμοχωρητικότητα ελαίου (4.4.34)

Η μεταβλητή $G(k)$ της σχέσης 4.4.30 συμβολίζει τη μαζική ταχύτητα του ρευστού που ρέει στο κέλυφος, για την οποία ισχύει:

$$G(k) = \frac{\dot{m}(k)}{Sm} \quad (4.4.35)$$

$$\text{με } Sm = \frac{D_s P_D L_B}{P_T} \quad (4.4.36)$$

όπου D_s η εσωτερική διάμετρος του κελύφους, P_D το διάκενο των αυλών, L_B η απόσταση μεταξύ των ανακλαστήρων και P_T το βήμα των αυλών, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 57 Σχήμα επίδειξης παραμέτρων υπολογισμών στο κέλυφος

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν, αποτυπώνονται μέσω των ακόλουθων σχέσεων:

$$D_s = \text{διάμετρος κελύφους} \quad (4.4.37)$$

$$NP_D = \text{μήκος \% της } OD \quad (4.4.38)$$

$$L_B = \frac{L}{z+1} \quad (4.4.39)$$

$$P_T = P_D + O_i \quad (4.4.40)$$

Το διάκενο των αυλών P_D εκφράζεται με το ποσοστό NP_D επί της εξωτερικής τους διαμέτρου OD και αυτό περιγράφεται από τη σχέση:

$$P_D = N_B O_i \quad (4.4.41)$$

Η απόσταση L_B μεταξύ των ανακλαστήρων εκφράζεται μέσω της σχέσης 4.98 με τη βοήθεια της μεταβλητής z που συμβολίζει τον αριθμό τους. Ορίζεται από τη σχέση:

$$z = \text{αριθμός ανακλαστήρων} \quad (4.4.42)$$

Η υδραυλική διάμετρος της γεωμετρίας του κελύφους, D_e , υπολογίζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης, η οποία ισχύει για διάταξη τριγωνικού βήματος αυλών:

$$\Delta T_{Ln} = \frac{(T_1 - T_2) \ln \left(\frac{T_3 - T_2}{T_3 - T_1} \right)}{\ln \left(\frac{T_3 - T_1}{T_3 - T_2} \right)} \quad (4.4.43)$$

Η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά: ΔT_{Ln} αποτελεί στην ουσία μια ολοκληρωτική έκφραση της θερμοκρασιακής διαφοράς των ρευστών του εναλλάκτη, βασισμένη στο λογαριθμικό κανόνα του Simpson. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta T_{Ln} = \frac{(T_1 - T_2) \ln \left(\frac{T_3 - T_2}{T_3 - T_1} \right)}{\ln \left(\frac{T_3 - T_1}{T_3 - T_2} \right)} \quad (4.4.44)$$

Η ΔT_{Ln} είναι σχεδιασμένη να δίνει αποτελέσματα για γραμμικά θερμοκρασιακά προφίλ ρευστών κατά μήκος του εναλλάκτη, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρακτικά με μικρή απόκλιση και για πραγματικές ροές, όταν:

$$\frac{T(i) - T(j)}{T(j) - T(k)} \ll 1$$

Για τον ακριβή υπολογισμό μιας ολοκληρωτικής θερμοκρασιακής διαφοράς μπορεί να σχεδιαστεί πρόγραμμα που υπολογίζει τη μεταβολή της θερμοκρασίας των ρευστών, τη μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας, αλλά και του συντελεστή μεταφοράς, σε πλήθος διακριτών σημείων κατά μήκος των αυλών.

Η περίπτωση πολλών περασμάτων: Όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενο σχήμα, τα θερμοκρασιακά προφίλ της ροής για πολλά περάσματα των αυλών από το κέλυφος, μεταβάλλονται με τρόπο κατά τον οποίο αλλάζει σε μεγάλο βαθμό και η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των ρευστών. Προκειμένου να γίνουν οι αντίστοιχοι υπολογισμοί, εισάγεται ο διορθωτικός συντελεστής F_T , η τιμή του οποίου βασίζεται σε πειραματικά δεδομένα. Βάσει των συντελεστών R_{ex} και P_{ex} , για τους οποίους ισχύει:

$$R_{ex} = \frac{T(i) - T(j)}{T(i) - T(k)} \quad (4.4.45)$$

$$P_{ex} = \frac{T(i) - T(k)}{T(i) - T(j)} \quad (4.4.46)$$

έχουν αναπτυχθεί τρόποι υπολογισμού του F_T ανά περίπτωση.

Δύο περάσματα των αυλών από το κέλυφος: Στην περίπτωση αυτή ισχύει:

$$F_T = \frac{P_{ex}}{H_{ex} R} \left[\frac{2P_{ex} R (R_2 + D) (R_2 + D)^2}{n} \right] \quad (4.4.47)$$

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εναλλακτών αυλών – κελύφους:

Τυποποιημένες διαστάσεις αυλών: Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι τύποι των αυλών που χρησιμοποιούνται στους εναλλάκτες των μοντελοποιήσεων της παρούσας εργασίας.

Εξωτερική διάμετρος	N _o BWG	Εσωτερική διάμετρος	Μέγιστη επιτρεπτή πίεση λειτουργίας
1 1/2	38.10	10	14
		12	11.4
		14	9.1

Πίνακας 14 Διαστασιολόγηση αυλών συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας

Η τυποποίηση των διαστάσεων των αυλών στους εναλλάκτες γίνεται βάσει των προτύπων BWG (Birmingham Wire Gauge).

Επιτρεπτή πίεση λειτουργίας: Στον παραπάνω πίνακα η τιμή της μέγιστης επιτρεπόμενης πίεσης λειτουργίας P υπολογίζεται για κοινό χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (ASME A214) μέσω της σχέσης Barlow

$$P = \frac{2 \cdot S \cdot t}{OD}$$

όπου t το πάχος του τοιχώματος των αυλών, OD η εξωτερική διάμετρος τους και S η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης λειτουργίας σε MPa, συναρτήσει της θερμοκρασίας λειτουργίας σε °C για διάφορους χάλυβες, κατάλληλους για χρήση σε εναλλάκτες θερμότητας βάσει των προτύπων ASME. Στον πίνακα 16 η τιμή του S δόθηκε για χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, στην περιοχή λειτουργίας 50 – 250 °C.

ASME:	A214	A213-T2	A213-T9	A213-T91
T	Low Carbon	1/2Cr-1/2Mo	9Cr-1Mo	9Cr-1Mo-1V
50	78.6	117.9	117.9	167.5
100	78.6	117.9	117.9	167.5
150	78.6	117.9	114.5	167.5
200	78.6	117.9	113.9	167.0
250	78.6	116.8	113.2	166.2

300	78.1	114.1	112.1	164.2
350	74.5	110.3	109.1	161.0
375	71.0	107.9	107.1	157.2
400	63.0	106.1	103.9	152.9
425	54.3	102.9	100.3	147.3
450	-	100.4	95.9	140.8
475	-	96.9	91.0	133.9
500	-	75.1	79.0	125.9
525	-	51.2	61.2	117.1
550	-	30.7	43.8	105.4
575	-	-	30.5	87.9
600	-	-	21.0	65.5
625	-	-	14.5	45.7
650	-	-	10.1	28.9

Πίνακας 15 Μέγιστη επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας συναρτήσει της θερμοκρασίας για χάλυβες που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή εναλλακτών

Μέγιστος αριθμός αυλών στον εναλλάκτη: Ο αριθμός των αυλών που μπορούν να τοποθετηθούν σε έναν εναλλάκτη εξαρτάται από τη διάταξη τους, τη διάμετρο του κελύφους και τον αριθμό των περασμάτων. Παρουσιάζονται στη συνέχεια οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές συναρτήσει αυτών των παραμέτρων, για τριγωνική διάταξη αυλών, βήματος 125% επί της εξωτερικής διαμέτρου τους.

Διάμετρος κελύφους (m)	1 πέρασμα των αυλών OD 1 ^{1/2} ίντσες	2 περάσματα των αυλών OD 1 ^{1/2} ίντσες
0.49	61	58
0.54	76	72
0.59	95	91
0.64	115	110
0.69	136	131
0.74	160	154
0.79	184	177
0.84	215	206
0.89	246	238
0.94	275	268
0.99	307	299

Πίνακας 16 Μέγιστος αριθμός αυλών σε εναλλάκτη συναρτήσει της διαμέτρου κελύφους

Ενδεικτικές τιμές συντελεστών μεταφοράς για διάφορες περιπτώσεις ροών: Σε αυτό το σημείο παρατίθενται συνηθισμένες τιμές συντελεστών μεταφοράς. Οι τιμές αυτές θα εξυπηρετήσουν τις μοντελοποιήσεις της παρούσας εργασίας σε περιπτώσεις όπου δε διερευνώνται περεταίρω τα λειτουργικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εναλλακτών, είτε επειδή αυτά έχουν μικρή επίδραση στο τελικό

αποτέλεσμα, είτε επειδή σε κάποιες περιπτώσεις απαιτήσης πολλών αποτελεσμάτων, η επιπλέον διερεύνηση καθίσταται εξαιρετικά χρονοβόρα.

Περιπτώσεις εναλλαγής θερμότητας με αλλαγή φάσης	Τυπικές τιμές συντελεστή μεταφοράς h (w/m^2K)
συμπύκνωση ελαφριών οργανικών σε 100kPa	2000 – 4000
εξάτμιση ελαφριών οργανικών <2MPa χωρίς αισθητή υπερθέρμανση	750 – 3000

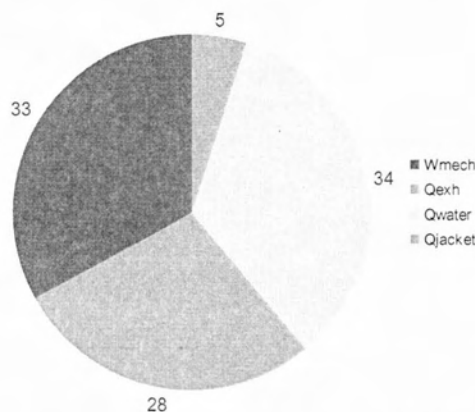
Πίνακας 17 Τυπικοί συντελεστές μεταφοράς για αλλαγή φάσης του εργαζόμενου ρευστού στον κύκλο Rankine

Περιπτώσεις εναλλαγής θερμότητας χωρίς αλλαγή φάσης	Τυπικές τιμές συντελεστή μεταφοράς h (w/m^2K)
ελαφριά οργανικά υγρά	1500 – 2000
μεσαία οργανικά υγρά	750 – 1500
αέριο πίεσης 100 – 200 kPa	80 – 120

Πίνακας 18 Τυπικοί συντελεστές μεταφοράς για περιπτώσεις ροών χωρίς αλλαγή φάσης [34], [33], [35], [36], [25], [24]

4.5 Μηχανή εσωτερικής καύσης

Η μηχανή εσωτερικής καύσης δε μοντελοποιείται στην παρούσα εργασία. Χρησιμοποιούνται μόνο τα δεδομένα του σχήματος που ακολουθεί, το οποίο παρουσιάζει τις τυπικές τιμές που εμφανίζονται στις μηχανές εσωτερικής καύσης σε σχέση με το ενεργειακό τους ισοζύγιο. Σε αυτό το διάγραμμα συμβολίζεται με W_{mech} η μηχανική ισχύς του κινητήρα, Q_{exh} η θερμική ισχύς των καυσαερίων, τα οποία βρίσκονται σε υψηλή θερμοκρασία της τάξης των $300^{\circ}C$, Q_{water} η θερμική ισχύς που απάγεται μέσω του νερού ψύξης, με θερμοκρασία της τάξης των $90^{\circ}C$ και Q_{jacket} τις απώλειες θερμότητας μέσω του περιβλήματος του κινητήρα.



Σχήμα 58 Τυπικό ενεργειακό ισοζύγιο σε Μ.Ε.Κ.

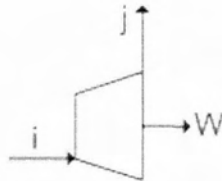
[43]

4.6 Στρόβιλος

Περιγραφή: Ο στρόβιλος είναι μια θερμοδυναμική συσκευή που μετατρέπει την ενέργεια ενός αερίου αυξημένης πίεσης, σε μηχανική ενέργεια, μέσω της εκτόνωσης του δευτέρου.

Σκοπιμότητα μοντελοποίησης: Ο τρόπος λειτουργίας των στροβίλων διαμορφώνει σε μεγάλο βαθμό τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων στις οποίες περιλαμβάνεται ως λειτουργικό στοιχείο. Συνεπώς η μοντελοποίηση του είναι απαραίτητη, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο υπολογισμός των ιδιοτήτων του εκτονούμενου ρευστού.

Συμβολισμός: Στα διαγράμματα ροής οι στροβίλοι συμβολίζονται μέσω του ακόλουθου σχήματος:



Σχήμα 59 Συμβολισμός στροβίλου στα διαγράμματα ροής

όπου με i συμβολίζεται το ρεύμα εισόδου, με j το ρεύμα εξόδου και W η μηχανική ισχύς του στροβίλου.

Μοντελοποίηση: Για το στρόβιλο ορίζονται αρχικά η υψηλή και χαμηλή πίεση λειτουργίας και η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού:

$$P_i = \text{τιμή υψηλής πίεσης λειτουργίας (4.6.1)}$$

$$P_j = \text{τιμή χαμηλής πίεσης λειτουργίας (4.6.2)}$$

$$T_i = \text{τιμή θερμοκρασίας (4.6.3)}$$

Μέσω εγγενών συναρτήσεων του EES υπολογίζονται στο ρεύμα i οι απαιτούμενες θερμοδυναμικές ιδιότητες του ρευστού. Αυτές είναι η ειδική ενθαλπία h_i και η εντροπία s_i . Για υπόθεση ισεντροπικής λειτουργίας του στροβίλου, θα ισχύει:

$$s_i = s_j \quad (4.6.4)$$

Μέσω δεδομένης εντροπίας και πίεσης στο σημείο j , υπολογίζεται μέσω εγγενών συναρτήσεων του EES η τιμή της ειδικής ενθαλπίας h_s . Αυτή συμβολίζει την ενθαλπία που θα είχε το ρευστό μετά την εκτόνωση του, εάν η λειτουργία του στροβίλου ήταν ισεντροπική. Εισάγεται σε αυτό το σημείο ο συντελεστής απόδοσης n_T του στροβίλου, για τον οποίο ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις.

$$n_T = 0.86 \quad (4.65)$$

$$\eta_T = \frac{h_i - h_j}{h_i - h_k} \quad (4.66)$$

Μέσω των δύο αυτών σχέσεων, υπολογίζεται η πραγματική τιμή της ενθαλπίας, με την υπόθεση ότι ο συντελεστής απόδοσης του στροβίλου είναι 86%. Ισχύει επίσης το ισοζύγιο μάζας:

$$m_i = m_j \quad (4.6.7)$$

και η μηχανική ισχύς του στροβίλου μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$W = \eta_T (h_i - h_j) \quad (4.6.8)$$

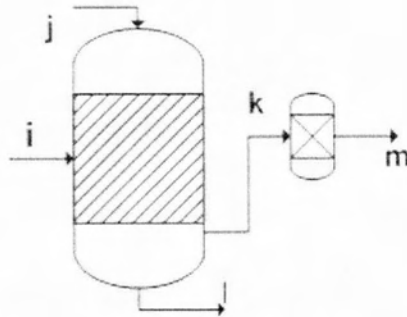
[34]

4.7 Σύστημα αεριοποίησης

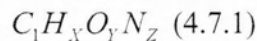
Περιγραφή: Όπως περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα συστήματα αεριοποίησης αποτελούνται από ένα σύνολο μηχανολογικών στοιχείων, που εξυπηρετούν την πραγματοποίηση των χημικών και φυσικών διεργασιών στις οποίες υπόκειται η βιομάζα. Οι διεργασίες αυτές πραγματοποιούνται με στόχο τη μετατροπή της στερεάς μάζας του καυσίμου, σε καύσιμο ρευστό που μπορεί να αξιοποιηθεί από μηχανές εσωτερικής καύσης.

Σκοπιμότητα μοντελοποίησης: Οι παράμετροι υπό τις οποίες πραγματοποιείται η αεριοποίηση, είναι καθοριστικής σημασίας όσο αφορά τη συνολική απόδοση της εγκατάστασης. Συνεπώς, η μοντελοποίηση του συστήματος αεριοποίησης δίνει τη δυνατότητα της διερεύνησης των παραμέτρων αυτών, έτσι ώστε να επιτευχτεί ο στόχος της παρούσας εργασίας, που είναι η βελτιστοποίηση της εγκατάστασης.

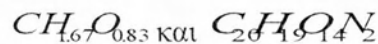
Συμβολισμός: Βάσει του σχήματος που ακολουθεί γίνεται ο συμβολισμός του συστήματος αεριοποίησης στα διαγράμματα ροής της παρούσας εργασίας. Πρόκειται για μια απλουστευμένη εκδοχή του πρότυπου διαγράμματος ροής της εγκατάστασης αεριοποίησης που περιγράφεται στο αντίστοιχο εδάφιο του προηγούμενου κεφαλαίου. Με i συμβολίζεται η τροφοδοσία της βιομάζας στον αντιδραστήρα αεριοποίησης, j η παροχή αέρα, k το ρεύμα εξόδου των παραγόμενων αερίων, l η εξαγωγή τέφρας και m το επεξεργασμένο και έτοιμο προς αξιοποίηση αέριο αεριοποίησης.



Μοντελοποίηση: Για τη διευκόλυνση της παρούσας μοντελοποίησης, διαφοροποιούνται σε αυτό το σημείο οι εξισώσεις που παρουσιάζονται στο εδάφιο που αφορά τη μοντελοποίηση της βιομάζας. Χρησιμοποιούνται από το τελευταίο οι εξισώσεις 4.3.1 – 4.3.6, σχετικές με την περιεκτικότητα της βιομάζας σε υγρασία, τέφρα και λιγνίνη. Η μορφή των συστατικών της καύσιμης ύλης της βιομάζας σε αυτό το σημείο εκφράζεται ως:



δηλαδή τα δομικά στοιχεία της βιομάζας εκφράζονται σε στοιχειομετρική αναλογία με την ποσότητα άνθρακα που θεωρείται μοναδιαία. Παρουσιάζονται επιπρόσθετα οι εξισώσεις που παρατίθενται στο 2^ο κεφάλαιο και αφορούν τη στοιχειομετρική αναλογία των συστατικών της κυτταρίνης και λιγνίνης:



Βάσει αυτών, μπορούν να εκφραστούν οι ποσότητες X, Y και Z, δεδομένης της περιεκτικότητας της καύσιμης ύλης της βιομάζας σε λιγνίνη:

$$X = 0.95 \cdot L + 1.67 \cdot (1 - L) \quad (4.7.2)$$

$$Y = 0.7 \cdot L + 0.83 \cdot (1 - L) \quad (4.7.3)$$

$$\text{και } Z = 0.1 \cdot L \quad (4.7.4)$$

Ενώ το μέσο μοριακό βάρος που προκύπτει για τη χημική ουσία που περιγράφεται στην εξίσωση 4.7.1, είναι:

$$Mr_{bio} = 0.012 + 0.001 \cdot X + 0.016 \cdot Y + 0.014 \cdot Z \quad (4.7.5)$$

δεδομένου ότι τα μοριακά βάρη των επιμέρους συστατικών C, H, O και N είναι 12, 1, 16 και 14 γραμμάρια ανά γραμμομόριο αντίστοιχα. Διατυπώνεται επίσης η εξίσωση:

$$n_0 \cdot Mr_{bio} = m_i \cdot comb \quad (4.7.6)$$

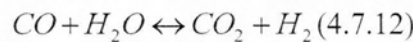
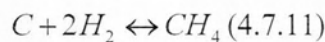
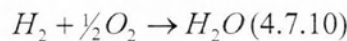
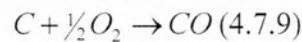
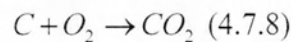
βάσει της οποίας υπολογίζεται ο αριθμός των γραμμομορίων της υποθετικής χημικής ουσίας 4.7.1, στην ποσότητα της καύσιμης ύλης της βιομάζας. Υπενθυμίζεται ότι ως m_i συμβολίζεται ολόκληρη η ποσότητα της τροφοδοτούμενης βιομάζας στο σύστημα

αεριοποίησης και με *comb* το % ποσοστό της καύσιμης ύλης που περιέχεται στη πρώτη. Αναφέρεται τελικά σε σχέση με τη μορφοποίηση των εξισώσεων που περιγράφουν τη βιομάζα, ότι και η ποσότητα υγρασίας W_i που περιέχεται σε αυτή, εκφράζεται σε στοιχειομετρική αναλογία σε σύγκριση με την ποσότητα άνθρακα της εξίσωσης 4.7.1. Αυτό γίνεται μέσω της σχέσης που ακολουθεί:

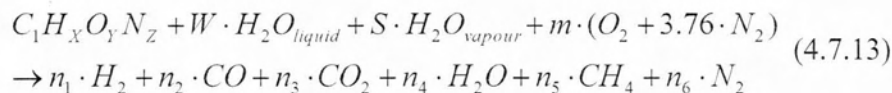
$$W = \frac{W_i \cdot m_i}{0.018 \cdot n_0} \quad (4.7.7)$$

με 0.018 το μοριακό βάρος του νερού σε kg/mole.

Το επόμενο βήμα για τη μοντελοποίηση του συστήματος αεριοποίησης είναι η διατύπωση των εξισώσεων των βασικών χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Αυτές μπορούν να διαχωριστούν σε μονόδρομες και αμφίδρομες αντιδράσεις. Οι δεύτερες συμβολίζονται με βέλος διπλής κατεύθυνσης μεταξύ των αντιδρώντων και προϊόντων στις ακόλουθες εξισώσεις:



Ενώ μπορούν όλες οι παραπάνω εξισώσεις χημικών αντιδράσεων να συμπυκνωθούν στην επόμενη:



με n από 1 έως 6 τις ποσότητες των προϊόντων της αντίδρασης, S την ποσότητα νερού που περιέχεται στον αέρα και m την ποσότητα αέρα. Όλες οι παραπάνω ποσότητες είναι εκφρασμένες σε αριθμό γραμμομορίων.

Μια κρίσιμη παράμετρος της αεριοποίησης είναι ο λόγος αέρα – καυσίμου που υπάρχει. Αυτός υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$\Lambda = \frac{m_j \cdot O_{xyg_j}}{O_{xyg_{st}} \cdot 0.032} \quad (4.7.14)$$

με m_j και O_{xyg_j} την παροχή αέρα και την περιεκτικότητα του σε οξυγόνο αντίστοιχα. Η ποσότητα $O_{xyg_{st}}$ είναι η στοιχειομετρική ποσότητα οξυγόνου για πλήρη καύση και εκφράζεται σε γραμμομόρια. Στη σχέση 4.7.14 ο συντελεστής 0.032 εκφράζει το

μοριακό βάρος του O_2 σε kg/mole. Η ύπαρξη του εξυπηρετεί την αναγωγή της ποσότητας $Oxyg_{st}$ από γραμμομόρια σε kg. Ο υπολογισμός της γίνεται μέσω της ακόλουθης σχέσης, βάσει της εξίσωσης χημικής αντίδρασης 4.7.13:

$$Oxyg_{st} = 1 + 0.25 \cdot X - 0.5 \cdot Y \quad (4.7.15)$$

Στη μοντελοποίηση εισάγεται ως παράμετρος η δήλωση της τιμής του λόγου αέρα – καυσίμου μέσω της σχέσης:

$$\Lambda = \text{τιμή συντελεστή} \quad (4.7.16)$$

και βάσει αυτής της τιμής υπολογίζονται οι ποσότητες m και S που εμφανίζονται στη σχέση 4.7.13, υπολογιζόμενες ως εξής:

$$m = \frac{Oxyg_{st} \cdot \Lambda}{n_0} \quad (4.7.17)$$

$$\text{και } S = \frac{W_j \cdot m_j}{n_0 \cdot 0.018} \quad (4.7.18)$$

με W_j την περιεκτικότητα του αέρα σε νερό (kg νερού/kg ξηρού αέρα) και 0.018 το μοριακό βάρος του νερού σε kg/mole. Στις εξισώσεις συμπεριλαμβάνονται και δεδομένα που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά του ατμοσφαιρικού αέρα (σύσταση, πίεση, θερμοκρασία).

Τελικός στόχος της παρούσας μοντελοποίησης είναι ο υπολογισμός της σύστασης του αερίου αεριοποίησης. Βάσει της σχέσης 4.7.13 λοιπόν, αναπτύσσεται στη συνέχεια η κατάλληλη μέθοδος. Οι εξισώσεις που μπορούν να διατυπωθούν σε αυτό το σημείο, που προκύπτουν από την 4.7.13, είναι οι εξής:

$$X + 2 \cdot W + 2 \cdot S = 2 \cdot n_1 + 2 \cdot n_4 + 4 \cdot n_5 \quad (4.7.19)$$

$$W + S + Y + 2 \cdot m = 2 \cdot n_3 + n_2 + n_4 \quad (4.7.20)$$

$$2 \cdot n_6 = Z + 3.76 \cdot 2 \cdot m \quad (4.7.21)$$

$$n_2 + n_3 + n_5 = 1 \quad (4.7.22)$$

Τα επόμενα βήματα για τον υπολογισμό της σύστασης του παραγόμενου αερίου, γίνονται μέσω του υπολογισμού των σταθερών της θερμοχημικής ισορροπίας που επικρατεί κατά την πραγματοποίηση των αμφίδρομων αντιδράσεων 4.7.11 και 4.7.12. Ουσιαστικά μέσω της ελαχιστοποίησης της ενέργειας Gibbs για την πραγματοποίηση των αντιδράσεων, προκύπτει η σύσταση του μείγματος προϊόντων, συναρτήσει αφενός της δεδομένης σύστασης αντιδρώντων και αφετέρου της κρίσιμης παραμέτρου της θερμοκρασίας T_k κατά την οποία πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις.

Πριν την ανάλυση της μεθόδου που περιγράφηκε, γίνεται ο υπολογισμός της T_k μέσω του ισοζυγίου ενέργειας που διατυπώνεται για το εσωτερικό του αντιδραστήρα:

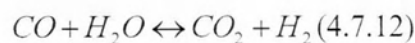
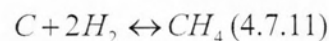
$$\begin{aligned}
 & (m_i \cdot \Delta h_{f \text{ cellulose}})_1 + (n_0 \cdot 0.018 \cdot W \cdot \Delta h_{f \text{ liquid water}})_2 + (n_0 \cdot 0.018 \cdot S \cdot \Delta h_{f \text{ water steam}})_3 \\
 & + (\Lambda \cdot 1000 \cdot LHV_{IN} \cdot m_i)_4 - (0.04 \cdot \Lambda \cdot 1000 \cdot LHV_{IN} \cdot m_i)_5 = (m_k(1) \cdot h_{H_2})_6 \\
 & + (m_k(2) \cdot (\Delta h_{f \text{ CO}} + h_{C_0}))_7 + (m_k(3) \cdot (\Delta h_{f \text{ CO}_2} + h_{C_0_2}))_8 \\
 & + (m_k(4) \cdot (\Delta h_{f \text{ water steam}} + h_{H_2O}))_9 + (m_k(5) \cdot (\Delta h_{f \text{ CH}_4} + h_{CH_4}))_{10} + (m_k(6) \cdot h_{N_2})_{11} \\
 & + (m_i \cdot A_i \cdot c_{p_A} \cdot (T_k - T_i))_{12}
 \end{aligned} \tag{4.7.23}$$

Στη συνέχεια εξηγείται ο ρόλος που διαδραματίζει ο κάθε όρος στην ανωτέρα εξίσωση:

1. Ποσό ενέργειας που προκύπτει από την ενθαλπία σχηματισμού της κυτταρίνης. $\Delta h_{f \text{ cellulose}} = - 5045.5 \text{ KJ/kg}$. Η κυτταρίνη αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος της μάζας της καύσιμης ύλης, για αυτό εδώ θεωρείται ότι το σύνολο της ενθαλπίας σχηματισμού της ύλης αυτής έχει την τιμή που ισχύει για κυτταρίνη.
2. Ενθαλπία σχηματισμού υγρού νερού $\Delta h_{f \text{ liquid water}} = - 15879.5 \text{ KJ/kg}$
3. Ενθαλπία σχηματισμού ατμού νερού $\Delta h_{f \text{ water steam}} = - 13434.4 \text{ KJ/kg}$
4. Ποσό ενέργειας που απελευθερώνεται από την καύσης μέρους της βιομάζας
5. Θερμικές απώλειες ίσες με 4% επί της θερμικής ισχύος καύσης της βιομάζας στο εσωτερικό του αντιδραστήρα.
6. – 11. Ποσά ενέργειας που δηλώνουν το άθροισμα ενθαλπίας σχηματισμού και ενθαλπίας υπολογιζόμενης συναρτήσεως της θερμοκρασίας. Τα καθαρά στοιχεία H_2 και N_2 έχουν εξ' ορισμού μηδενική ενθαλπία σχηματισμού. Οι μεταβλητές $m_k(1)$, $m_k(2)$ κ.ο.κ. δηλώνουν τη μάζα στο ρεύμα k , της κάθε χημικής ένωσης που εμφανίζεται στην εξίσωση 4.7.13 ως γραμμομοριακή ποσότητα n_1 , n_2 κ.ο.κ. Ο υπολογισμός τους γίνεται στη συνέχεια μέσω των εξισώσεων 4.7.32 – 4.7.37.
12. Ενέργεια που απορροφάται από την τέφρα που περιέχεται στη βιομάζα.

Σημειώνεται ότι οι τιμές των ειδικών ενθαλπιών συναρτήσεως της θερμοκρασίας υπολογίζονται μέσω εγγενών συναρτήσεων του EES.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μέθοδος υπολογισμού των σταθερών θερμοχημικής ισορροπίας των αντιδράσεων 4.7.11 και 4.7.12:



Εισάγονται οι σταθερές K_1 και K_2 για τις οποίες ισχύει:

$$K_1 = \frac{(P_{CH_4}/P_0)}{(P_{H_2}/P_0)^2}$$

$$\text{και } K_2 = \frac{(P_{CO_2}/P_0) \cdot (P_{H_2}/P_0)}{(P_{CO}/P_0) \cdot (P_{H_2O}/P_0)}$$

και καθώς όλες οι παραπάνω χημικές ενώσεις θεωρούνται εδώ ως ιδανικά αέρια στις υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν στον αντιδραστήρα, μπορεί να ειπωθεί ότι οι μερική πίεση κάθε χημικής ένωσης είναι ανάλογη του γραμμομοριακού της κλάσματος. Συνεπώς οι ανώτερες σχέσεις μετασχηματίζονται ως:

$$K_1 = \frac{n_{mol} \cdot n_{CH_4}}{n_{H_2}^2} \quad (4.7.24)$$

$$\text{και } K_2 = \frac{n_{CO_2} \cdot n_{H_2}}{n_{CO} \cdot n_{H_2O}} \quad (4.7.25)$$

$$\text{με: } n_{mol} = n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 \quad (4.7.26)$$

$$\text{και } n_{CH_4} = n_5, \quad n_{H_2} = n_1, \quad n_{CO_2} = n_3, \quad n_{CO} = n_2, \quad n_{H_2O} = n_4$$

Ενώ για τις σταθερές K_1 και K_2 ταυτόχρονα ισχύει:

$$LN(K_1) = \frac{\Delta G_1}{R \cdot T_k} \quad (4.7.27)$$

$$\text{και } LN(K_2) = \frac{\Delta G_2}{R \cdot T_k} \quad (4.7.28)$$

με $R = 8.314 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{mole}\cdot\text{K}$ η παγκόσμια σταθερά των αερίων και ΔG η διαφορά της ενέργειας Gibbs μεταξύ των αντιδρώντων και των προϊόντων, για την οποία ισχύει:

$$\Delta G_1 = -g_1 - g_3 + g_2 + g_4 \quad (4.7.29)$$

$$\text{και } \Delta G_2 = -g_5 + 2 \cdot g_1 \quad (4.7.30)$$

με τις τιμές των ενεργειών Gibbs να υπολογίζονται εξ' ορισμού μέσω της σχέσης:

$$g = h - T_k \cdot s \quad (4.7.31)$$

Η σχέση 4.7.31 εφαρμόζεται για κάθε χημική ένωση που συμμετέχει στις ανώτερες σχέσεις, με τις τιμές της ειδικής ενθαλπίας και εντροπίας να υπολογίζονται από εγγενείς συναρτήσεις του EES.

Καθώς το μείγμα αερίων εξέρχεται από τον αεριοποιητή μέσω του ρεύματος k , καλό θα ήταν οι ποσότητες των συστατικών να μετατραπούν από γραμμομοριακές, σε ποσότητες μάζας. Αυτό γίνεται μέσω των ακόλουθων σχέσεων:

$$\text{μάζα H}_2: m_k(1) = n_0 \cdot n_1 \cdot 0.002 \quad (4.7.32)$$

$$\text{μάζα CO: } m_k(2) = n_0 \cdot n_2 \cdot 0.028 \quad (4.7.33)$$

$$\text{μάζα CO}_2: m_k(3) = n_0 \cdot n_3 \cdot 0.044 \quad (4.7.34)$$

$$\text{μάζα H}_2\text{O: } m_k(4) = n_0 \cdot n_4 \cdot 0.018 \quad (4.7.35)$$

$$\text{μάζα CH}_4: m_k(5) = n_0 \cdot n_5 \cdot 0.016 \quad (4.7.36)$$

$$\text{μάζα N}_2: m_k(6) = n_0 \cdot n_6 \cdot 0.028 \quad (4.7.37)$$

ενώ οι αριθμητικές τιμές στα δεξιά κάθε σχέσης είναι το γραμμομοριακό βάρος της αντίστοιχης χημικής ένωσης σε kg/mole.

Διατυπώνονται σε αυτό το σημείο τα ακόλουθα ισοζύγια μάζας:

$$m_i + m_j = m_k + m_l \quad (4.7.38)$$

με I το ρεύμα απόρριψης τέφρας, για το οποίο ισχύει:

$$m_l = m_i \cdot A_i \quad (4.7.39)$$

Επίσης οι παροχές μάζας για την κάθε χημική ουσία του ρεύματος k ισούνται με αυτές του ρεύματος m, με εξαίρεση την παροχή μάζας του νερού που εξέρχεται από τον αεριοποιητή με τη μορφή ατμού. Για αυτό ισχύει:

$$m_m(4) = 0.02 \cdot m_m \text{ kg/sec} \quad (4.7.40)$$

Δηλαδή στο τελικό αέριο η μάζα του νερού αντιστοιχεί σε 20 γραμμάρια ανά κιλό αερίου. Για τις υπόλοιπες μάζες, όπως ειπώθηκε, ισχύει:

$$m_m(1) = m_k(1) \quad (4.7.41)$$

$$m_m(2) = m_k(2) \quad (4.7.42)$$

$$m_m(3) = m_k(3) \quad (4.7.43)$$

$$m_m(5) = m_k(5) \quad (4.7.44)$$

$$m_m(6) = m_k(6) \quad (4.7.45)$$

Οι ακόλουθες σχέσεις εξυπηρετούν τον υπολογισμό της % ποσοστιαίας μάζας κάθε χημικής ένωσης στη μάζα του παραγόμενου αερίου και του % ποσοστιαίου όγκου στο συνολικό:

$$P_m(1) = m_m(1)/m_5 \text{ και } V_m(1) = m_m(1) \cdot v(1)/V_m \text{ για H}_2 \quad (4.7.46-47)$$

$$P_m(2) = m_m(2)/m_5 \text{ και } V_m(2) = m_m(2) \cdot v(2)/V_m \text{ για CO} \quad (4.7.48-49)$$

$$P_m(3) = m_m(3)/m_5 \text{ και } V_m(3) = m_m(3) \cdot v(3)/V_m \text{ για CO}_2 \quad (4.7.50-51)$$

$$P_m(4) = m_m(4)/m_5 \text{ και } V_m(4) = m_m(4) \cdot v(4)/V_m \text{ για H}_2\text{O} \quad (4.7.52-53)$$

$$p_m(5) = m_m(5) / m_s \text{ και } V_m(5) = m_m(5) \cdot v(5) / V_m \text{ για } \text{CH}_4 \text{ (4.7.54-55)}$$

$$p_m(6) = m_m(6) / m_s \text{ και } V_m(6) = m_m(6) \cdot v(6) / V_m \text{ για } \text{N}_2 \text{ (4.7.56-57)}$$

με $v(\cdot)$ τον ειδικό όγκο της κάθε χημικής ένωσης που υπολογίζεται συναρτήσει της πίεσης $P_m = 101.3 \text{ kPa}$ και θερμοκρασίας $T_m = 25^\circ\text{C}$, ενώ V_m το συνολικό όγκο του αερίου που υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$V_m = m_m(1) \cdot v(1) + m_m(2) \cdot v(2) + m_m(3) \cdot v(3) + m_m(4) \cdot v(4) + m_m(5) \cdot v(5) + m_m(6) \cdot v(6) \quad (4.7.58)$$

Τέλος, υπολογίζονται οι παράμετροι που εξυπηρετούν την τεχνο-οικονομική διερεύνηση του συστήματος αεριοποίησης. Ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$LHV_{OUT} = m_m(1) \cdot 142.92 + m_m(2) \cdot 10.11 + m_m(5) \cdot 55.65 \quad (4.7.59)$$

$$\eta_{tot} = \frac{m_m \cdot LHV_{OUT}}{m_i \cdot LHV_{IN}} \quad (4.7.60)$$

με LHV_{OUT} τη θερμογόνο αξία του παραγόμενου αερίου και η_{tot} το συντελεστής μετατροπής της εγκατάστασης. Το μέγεθος διαστασιολόγησης αποτελεί η μεταβλητή Q_{gas} που συμβολίζει τη θερμική ισχύ σε KW που μπορεί εν δυνάμει να παρέχει το παραγόμενο αέριο με την καύση του. Η μεταβλητή υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$Q_{gas} = 1000 \cdot m_m \cdot LHV_{OUT} \quad (4.7.61)$$

Ενώ η παράμετρος κοστολόγησης της είναι η V_{gas} που συμβολίζει την ογκομετρική παροχή του αερίου σε m^3/hr και υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{gas} = 3600 \cdot V_m \quad (4.7.62)$$

[16], [18], [19], [21], [22]

4.8 Διαθερμικό έλαιο

Τα διαθερμικά έλαια επιλέγονται ως ρευστά μεταφοράς θερμότητας, καθώς αποδίδουν υψηλό συντελεστή μεταφοράς σε σχέση με την απαίτηση ισχύος για την άντληση τους, ενώ τα σημεία βρασμού τους βρίσκονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε αυτό το σημείο παρατίθεται πίνακας με τις ιδιότητες ενός συνηθισμένου ρευστού στη βιομηχανία, του dowtherm.

Θερμοκρασία $^\circ\text{C}$	Ειδική θερμ/τα kJ/kgK	Πυκνότητα kg/m^3	Θερμική αγωγιμότητα W/mK	Ιξώδες $\times 10^{-3}$ $\text{Pa}\cdot\text{sec}$
255	2.364	864.8	0.0992	0.39
275	2.437	849.3	0.0969	0.34
295	2.507	833.8	0.0945	0.3

315	2.577	818.3	0.0922	0.27
335	2.647	802.8	0.0899	0.24
355	2.717	787.3	0.0876	0.21

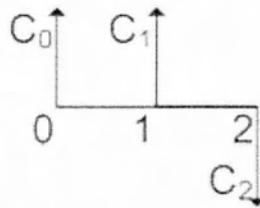
Πίνακας 19 Ιδιότητες ενός συνηθισμένου διαθερμικού ελαίου

[37]

5. Διαδικασία τεχνο-οικονομικής διερεύνησης εγκαταστάσεων

5.1 Χρονική αξία χρήματος

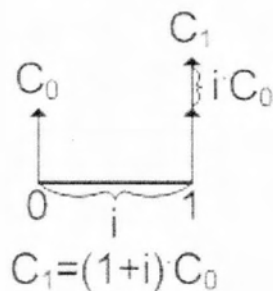
Οι μηχανολογικές εγκαταστάσεις χαρακτηρίζονται από ένα κόστος που συνδέεται με την αγορά και εγκατάσταση του μηχανολογικού εξοπλισμού από τον οποίο απαρτίζονται. Αυτό ονομάζεται αρχικό κόστος. Παρουσιάζονται επίσης δαπάνες ανάλογες του ετήσιου χρόνου λειτουργίας τους, όπως είναι η αγορά καυσίμων και ηλεκτρικής ενέργειας. Τα κόστη αυτά ονομάζονται λειτουργικά. Σε αυτό το σημείο αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο τα δυο είδη κόστους μπορούν να τεθούν σε κοινή βάση υπό το πρίσμα της χρονικής αξίας του χρήματος. Οι έννοιες που παρατίθενται μπορούν να σχηματοποιηθούν μέσω των διαγραμμάτων χρηματοροών:



Σχήμα 60 Εισαγωγικό σχήμα στον υπολογισμό χρηματοροών

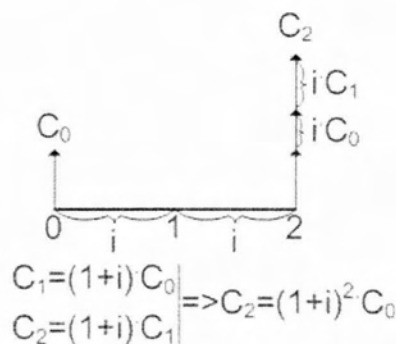
Με τη μεταβλητή C ονομάζονται τα βέλη, τα οποία συμβολίζουν οποιοδήποτε χρηματικό ποσό. Όταν το βέλος έχει προσανατολισμό προς τα κάτω εκφράζει χρηματική εκροή, δηλαδή δαπάνη. Οι δείκτες 0, 1 και 2 ορίζουν το τέλος κάθε χρονικής περιόδου. Στις περιπτώσεις που αναλύονται στην παρούσα εργασία, οι περίοδοι αυτές είναι ετήσιες. Ο δείκτης 0 αφορά το παρόν, ο δείκτης 1 την κατάσταση σε ένα χρόνο από το παρόν και ο δείκτης 2, την κατάσταση σε δύο χρόνια από το παρόν αντίστοιχα. Επομένως το βέλος C_0 συμβολίζει ένα χρηματικό ποσό στο παρόν, ενώ το C_2 μια δαπάνη στο τέλος του δεύτερου χρόνου.

Εισάγοντας την έννοια του επιτοκίου, το οποίο συμβολίζεται με i και εκφράζει ποσοστό % επί του αρχικού κεφαλαίου C_0 , ισχύει ότι:



Σχήμα 61 Χρονική μεταφορά χρηματικής αξίας συναρτήσει επιτοκίου

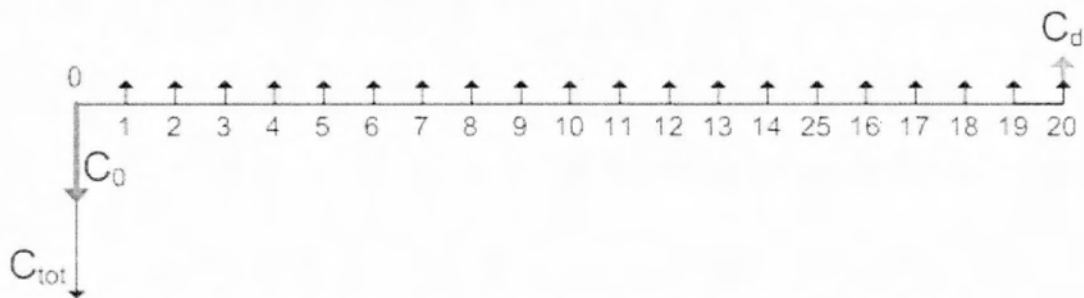
Παραδείγματος χάρη η παρούσα αξία $C_0 = 1000\text{€}$ με ετήσιο επιτόκιο $i = 20\%$, είναι ισοδύναμη με τη μελλοντική αξία πρώτου χρόνου $C_1 = 1200\text{€}$. Αντίστροφα, για την παρούσα αξία C_0 ισχύει $C_0 = \frac{1}{1+i} \cdot C_1$. Σε ορίζοντα δύο χρόνων ισχύουν τα ακόλουθα:



Σχήμα 62 Χρονική μεταφορά χρηματικής αξίας συναρτήσει επιτοκίου

Με την παρούσα αξία C_0 να συναρτάται της C_2 μέσω της σχέσης $C_0 = \frac{1}{(1+i)^2} \cdot C_2$.

Βάσει των παραπάνω, δίδεται στη συνέχεια η πρότυπη χρηματοροή που ακολουθείται για το σχεδιασμό των εγκαταστάσεων στην παρούσα εργασία, υπό το πρίσμα της χρονικής αξίας χρήματος, με ορίζοντα εικοσαετίας:



Σχήμα 63 Πρότυπη χρηματοροή που χρησιμοποιείται στις μοντελοποιήσεις

Εμφανίζονται σε αυτή το αρχικό κόστος C_0 της εγκατάστασης, τα κέρδη 20 χρόνων και το ποσό C_d που αντιστοιχεί στη λύση της εγκατάστασης μετά το πέρας της

λειτουργίας της, η οποία αποφέρει ένα ποσοστό κερδών 10% επί του αρχικού κόστους της C_0 . Εφαρμόζοντας τις σχέσεις που αναφέρθηκαν, μπορεί να υπολογιστεί η παρούσα αξία της εγκατάστασης μέσω της σχέσης:

$$C = C_0 \left[1 + \frac{R_1}{100} \right]^{-n} + \frac{C_d}{100} \left[1 + \frac{R_1}{100} \right]^{-n} \left(1 + \frac{R_2}{100} \right)^n$$

$$\text{με } C_d = 0.1 \cdot C_0$$

Με την παραδοχή ότι τα κέρδη δε μεταβάλλονται από χρόνο σε χρόνο και λαμβάνουν την τιμή C , η παραπάνω σχέση μπορεί να λάβει τη μορφή:

$$C = C_0 \left[1 + \frac{R_1}{100} \right]^{-n} \left(1 + \frac{R_2}{100} \right)^n \quad (5.1.1)$$

με τις τιμές των R_1 και R_2 να λαμβάνονται από τον πίνακα 21.

Ποσοστιαία τιμή ετήσιου επιτοκίου i	15	20	25	30
R_1	6.26	4.87	3.95	3.32
R_2	0.06	0.03	0.01	0.01

Πίνακας 20 Τιμές μεταβλητών που εξυπηρετούν τη διερεύνηση υπό το πρίσμα της χρονικής αξίας χρήματος

Οι τιμές των R_1 και R_2 εφαρμόζονται στις μοντελοποιήσεις της παρούσας εργασίας και εξυπηρετούν τη βελτιστοποίηση των μοντελοποιημένων εγκαταστάσεων και τον υπολογισμό του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (I.R.R.) με τις μεθόδους που περιγράφονται σε επόμενα κεφάλαια.

[38]

5.2 Χρονική αναπροσαρμογή κόστους

Ο χειρισμός δεδομένων που σχετίζονται με χρηματικές αξίες απαιτεί αναθεώρηση σε τακτά χρονικά διαστήματα. Το σκοπό αυτό εξυπηρετούν τιμές που ορίζονται μηνιαίως και συμβάλλουν στην αναπροσαρμογή κόστους οποιουδήποτε είδους μηχανολογικού εξοπλισμού, εγκατάστασης, βιομηχανικής διεργασίας κτλ.. Οι τιμές αυτές ονομάζονται δείκτες αναπροσαρμογής κόστους. Μέσω αυτών δίνεται η δυνατότητα να αναχθεί στην επιθυμητή χρονική στιγμή κάθε τιμή κόστους δεδομένη σε διαφορετική χρονική περίοδο.

Μια από τις πιο διαδεδομένες πηγές δεικτών αναπροσαρμογής κόστους στη βιομηχανία είναι αυτή της CEPCI (Chemical Engineering Plant Cost Index). Ως τιμή βάσης χρησιμοποιείται η περίοδος 1957-59 όπου ο γενικός βιομηχανικός δείκτης

λαμβάνει την τιμή 100. Στη συνέχεια παρατίθενται οι δείκτες CENCI που θα εξυπηρετήσουν το σκοπό της παρούσας εργασίας:

Δείκτες	Περίοδος βάσης	Σεπτέμβριος 2001	Δεκέμβριος 2013
	Γενικός δείκτης	393.7	567.6
	Δείκτης μηχανολογικού εξοπλισμού	436.1	687.8
	Εναλλάκτες θερμότητας και δοχεία	364.6	621.6
	Αντλίες και συμπιεστές	695.3	925.8

Πίνακας 21 Δείκτες αναπροσαρμογής κόστους

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζεται ο τρόπος αξιοποίησης των δεικτών αναπροσαρμογής κόστους. Έστω ότι δίδεται το κόστος C_0 ενός μηχανολογικού στοιχείου για την περίοδο του Σεπτεμβρίου 2001. Για την αναγωγή του στο κόστος C_1 που θα ισχύει για κάποια άλλη περίοδο, χρησιμοποιείται ο δείκτης I της περιόδου βάσης του παραπάνω πίνακα, μέσω της σχέσης:

$$C_1 = \left(\frac{I_1}{I_0} \right) \cdot C_0 \quad (5.2.1)$$

Για αναγωγή του κόστους C_0 σε κόστος Δεκεμβρίου 2013, $I_1 = 687.8$, επομένως:

$$C_1 = \left(\frac{687.8}{436.1} \right) \cdot C_0$$

[39], [34]

5.3 Εκτίμηση κόστους εγκαταστάσεων

5.3.1 Στάδια εκτίμησης κόστους κατά τη διαδικασία σχεδιασμού και υλοποίησης έργων

Η διαδικασία σχεδιασμού μιας εγκατάστασης είναι συνυφασμένη με την επεξεργασία δεδομένων της οικονομικής απόδοσης της. Για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί ποικίλες μέθοδοι εκτίμησης κόστους είτε μεμονωμένων μηχανολογικών στοιχείων είτε ολόκληρων εγκαταστάσεων. Αυτές βασίζονται σε δεδομένα σχετικά με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά που προδιαγράφουν τον εξοπλισμό. Η καθεμία από αυτές τις μεθόδους αποδίδει την εκτίμηση του κόστους εγκατάστασης με διαφορετικά περιθώρια σφάλματος και εξυπηρετεί συγκεκριμένα στάδια που ακολουθεί η διαδικασία σχεδιασμού. Ο στόχος είναι πάντα η υλοποίηση του έργου. Συμπράττουν προς αυτή την κατεύθυνση τρία μέρη. Ο επενδυτής που διαθέτει το κεφάλαιο, ο μελετητής που διαθέτει το μεγαλύτερο μέρος της τεχνογνωσίας και ο εργολάβος που διαθέτει τους λοιπούς πόρους για την υλοποίηση της εγκατάστασης. Η διαδικασία

σχεδιασμού και υλοποίησης κάθε εγκατάστασης που ακολουθείται, εξυπηρετεί τελικά και τα τρία συμπραττόμενα μέρη. Περιγράφεται συνοπτικά στα ακόλουθα βήματα η κοινώς αποδεκτή τυποποίηση της διαδικασίας:

1. **Εκτιμήσεις τάξης μεγέθους:** Σε αυτό το στάδιο ο επενδυτής προσεγγίζει το μελετητή, ο οποίος κάνει, για λογαριασμό του πρώτου, εκτιμήσεις που βασίζονται σε δεδομένα αντίστοιχων εφαρμογών, με σφάλμα που κυμαίνεται στην περιοχή $\pm 50\%$. Ο σκοπός που εξυπηρετείται είναι η ενδεχόμενη επιλογή συγκεκριμένης τεχνολογίας λειτουργίας μιας εγκατάστασης ή η αρχική μελέτη σκοπιμότητας για λογαριασμό του επενδυτή.

2. **Υπολογιστική μελέτη:** Σε αυτό το στάδιο γίνεται ανάλυση στο επίπεδο των βασικών μηχανολογικών στοιχείων που απαρτίζουν την εγκατάσταση. Το αποδεκτό σφάλμα κυμαίνεται στην περιοχή $\pm 30\%$ και εξυπηρετείται ο σκοπός μιας αναλυτικότερης μελέτης των λειτουργικών χαρακτηριστικών της εγκατάστασης. Σε αυτό το επίπεδο γίνεται και η ανάλυση των εγκαταστάσεων στην παρούσα εργασία.

3. **Προκαταρκτικός σχεδιασμός:** Βασίζεται σε δεδομένα επαρκή για μια πιο λεπτομερή προσέγγιση του πραγματικού κόστους της εγκατάστασης, επαγγελματικά υπολογιστικά λογισμικά, ορισμένες προδιαγραφές και σχέδια του εξοπλισμού. Το αποδεκτό σφάλμα σε αυτό το στάδιο κυμαίνεται στα όρια $\pm 20\%$. Συνήθως με την ολοκλήρωση αυτού του σταδίου λαμβάνεται από τον επενδυτή η τελική απόφαση εκπόνησης του έργου.

4. **Τελικός υπολογισμός:** Σε αυτό το στάδιο έχει συγκεντρωθεί σε μεγάλο βαθμό ο όγκος των δεδομένων που σχετίζονται με την εγκατάσταση. Το σφάλμα της εκτίμησης τελικού κόστους περιορίζεται στην περιοχή $\pm 10\%$ και τελείται σε αυτό το σημείο η δημοπρασία ή η προσφορά ανάληψης έργου από τον εργολάβο.

5. Λεπτομερής υπολογισμός: Σε αυτό το σημείο συγκεντρώνονται πλήρη μηχανολογικά, κτηριακά και λοιπά σχέδια και προδιαγραφές και συντελούνται επιθεωρήσεις στο χώρο κατασκευής. Κατά το στάδιο αυτό το σφάλμα των υπολογισμών κόστους περιορίζεται στο $\pm 5\%$.

[34]

5.3.2 Εκτιμήσεις τάξης μεγέθους

Για την εκτίμηση της τάξης μεγέθους των δεδομένων κόστους μιας συνολικής εγκατάστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέθοδος του Hill ή αλλιώς μέθοδος των έξι δεκάτων. Βασίζεται σε σχέσεις όπου παρουσιάζεται ο συντελεστής 0.6, οι οποίες λαμβάνουν τη μορφή:

$$C = C_0 \cdot \left(\frac{S}{S_0} \right)^{0.6} \quad (5.3.1)$$

Με S συμβολίζεται το κύριο λειτουργικό χαρακτηριστικό της εγκατάστασης. Αν για παράδειγμα η εγκατάσταση ήταν ένας λιγνιτικός ατμοηλεκτρικός σταθμός, θα συμβολιζόταν με S η προδιαγεγραμμένη ισχύς του. Με C συμβολίζεται το κόστος της εγκατάστασης. C_0 είναι το κόστος για S_0 και αντίστοιχα για C_1 και S_1 . Ο συντελεστής 0.6 που χρησιμοποιείται είναι κοινός για ολόκληρη την εγκατάσταση, παρόλο που η κλιμάκωση των χαρακτηριστικών λειτουργίας των επιμέρους στοιχείων θα έδινε διαφοροποιημένα δεδομένα κόστους για το καθένα. Καθώς όμως χρησιμοποιείται για εκτίμηση τάξης μεγέθους, τα περιθώρια σφάλματος της μεθόδου είναι αποδεκτά για το εύρος $\pm 50\%$.

[34]

5.3.3 Υπολογιστική μελέτη εγκαταστάσεων

Όπως αναφέρθηκε, κατά την εκτέλεση της υπολογιστικής μελέτης μιας εγκατάστασης διενεργείται η ανάλυση της στα βασικά μηχανολογικά στοιχεία από τα οποία απαρτίζεται. Σε αυτό το στάδιο αναδεικνύονται τα κυριότερα λειτουργικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης μέσω μιας διαδικασίας σχεδιασμού και πρώιμης βελτιστοποίησης που συνδέεται άρρηκτα με τη διαδικασία εκτίμησης του κόστους. Το περιθώριο σφάλματος σε αυτό το στάδιο κυμαίνεται στο $\pm 30\%$.

Οι μέθοδοι εκτίμησης κόστους των εγκαταστάσεων ποικίλουν. Εκτός της χρήσης κατάλληλων λογισμικών, μια από τις συνήθεις μεθόδους η οποία ακολουθείται και στην παρούσα εργασία, είναι αυτή του υπολογισμού του κόστους μεμονωμένα για κάθε βασικό στοιχείο της εγκατάστασης. Ο υπολογισμός του συνολικού κόστους μπορεί να γίνει τελικά με το άθροισμα των επιμέρους τιμών και της εφαρμογής ορισμένων συντελεστών, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Τον υπολογισμό του κόστους των επιμέρους μηχανολογικών στοιχείων μιας εγκατάστασης μπορούν να εξυπηρετήσουν συναρτήσεις που συνδέουν τα κυριότερα λειτουργικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των στοιχείων με το κόστος τους. [34], [23]

5.3.4 Εκτίμηση κόστους μηχανολογικών στοιχείων στην παρούσα εργασία

Οι μοντελοποιήσεις των εγκαταστάσεων που γίνονται στο προηγούμενο κεφάλαιο συμβάλλουν στον υπολογισμό των κυριότερων λειτουργικών και κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των βασικών μηχανολογικών στοιχείων από τα οποία απαρτίζονται. Σε αυτό το σημείο αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να συμβάλουν στον υπολογισμό του κόστους κάθε βασικού στοιχείου της εγκατάστασης. Μέσα από τη διαδικασία που θα αναλυθεί, θα προκύψει ένας συσχετισμός κόστους – χαρακτηριστικών λειτουργίας για τις μοντελοποιημένες εγκαταστάσεις, που θα συμβάλει στο σχεδιασμό και τη βελτιστοποίησή τους.

Όπως αναφέρθηκε, η κοστολόγηση των μοντελοποιημένων εγκαταστάσεων θα πραγματοποιηθεί μέσω των μεμονωμένων κοστολογήσεων των βασικών μηχανολογικών στοιχείων από τα οποία αυτές αποτελούνται. Το σκοπό αυτό θα εξυπηρετήσουν συναρτήσεις κόστους. Μια ομάδα συναρτήσεων κόστους που έχουν τη δυνατότητα να προβλέπουν τιμές κόστους μηχανολογικών στοιχείων με ακρίβεια που εξυπηρετεί το σκοπό της παρούσας εργασίας, είναι αυτές του εκπαιδευτικού λογισμικού CAPCOST. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα έχει τη μορφή αρχείου excel και περιλαμβάνεται στο cd της 4^{ης} έκδοσης του βιβλίου «Analysis, synthesis and design of chemical processes, R. Turton». Η συγκεκριμένη ομάδα συναρτήσεων κόστους επιλέχτηκε καθώς αυτές έχουν τις επιπλέον δυνατότητες κοστολόγησης των μηχανολογικών στοιχείων συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας και του υλικού κατασκευής τους, συμπεριλαμβάνοντας προαιρετικά και το κόστος εγκατάστασης τους εκτός της τιμής του κόστους αγοράς. Οι συναρτήσεις κόστους του CAPCOST

βασίζονται σε δεδομένα που ελήφθησαν την περίοδο Μαΐου – Σεπτεμβρίου 2001. Για τη χρονική αναπροσαρμογή του κόστους εφαρμόζεται λοιπόν ως περίοδος βάσης ο Σεπτέμβριος 2001 (πίνακας 21).

Εισάγεται η μεταβλητή C_p που εκφράζει το κόστος αγοράς ενός συγκεκριμένου μηχανολογικού στοιχείου (Purchase cost). Οι συναρτήσεις κόστους του CAPCOST λαμβάνουν τη μορφή:

$$C_p = K_1 S^{K_2} + K_3 \quad (5.3.2)$$

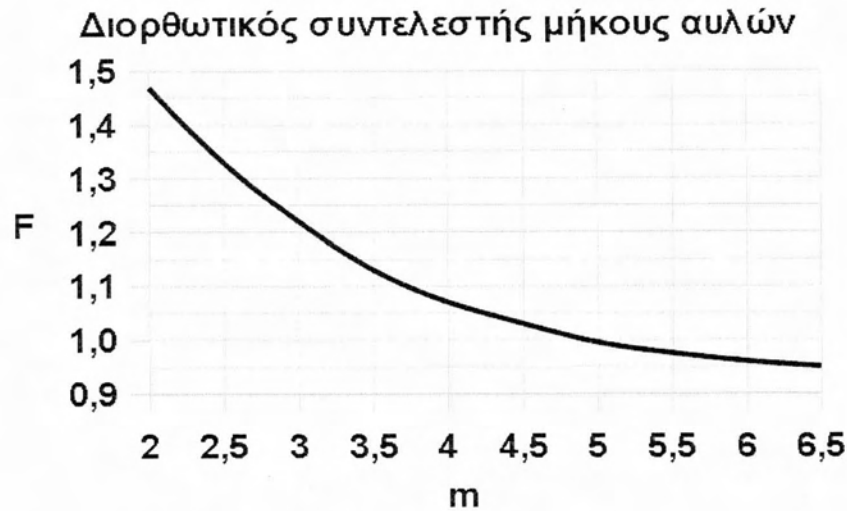
με S το κύριο χαρακτηριστικό λειτουργίας του μηχανολογικού στοιχείου και K_1 , K_2 και K_3 συντελεστές που διαφοροποιούνται για κάθε είδος μηχανολογικού στοιχείου και παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Τιμές κόστους σε δολάρια Σεπτέμβριος 2001	K1	K2	K3	Κύριο χαρ/κό S	Επιτρεπτό εύρος
εναλλάκτης αυλών – κελύφους	4.3247	- 0.303	0.1634	Επιφάνεια εναλλαγής (m ²)	10 – 1000
Φυσητήρας	3.5391	-0.3533	0.4477	παροχή όγκου (m ³ /h)	1 – 100
Αντλία θετικής εκτόπισης	3.4771	0.1350	0.1438	Μηχανική ισχύς (KW)	1 – 100
Ακτινικός στρόβιλος	2.2476	1.4965	-0.1618	Μηχανική ισχύς (KW)	100 – 1500
Μηχανή εσωτερικής καύσης	2.7635	0.8574	-0.0098	Μηχανική ισχύς (KW)	10 – 10000
*Σύστημα αεριοποίησης	7.504	-3.187	0.9176	Όγκος παραγόμενων αερίων (m ³ /hr)	50 – 1000

Πίνακας 22 Συντελεστές συναρτήσεων κόστους

*Δεν είναι συνάρτηση του capcost. Ο υπολογισμός της γίνεται στο Παράρτημα 3.

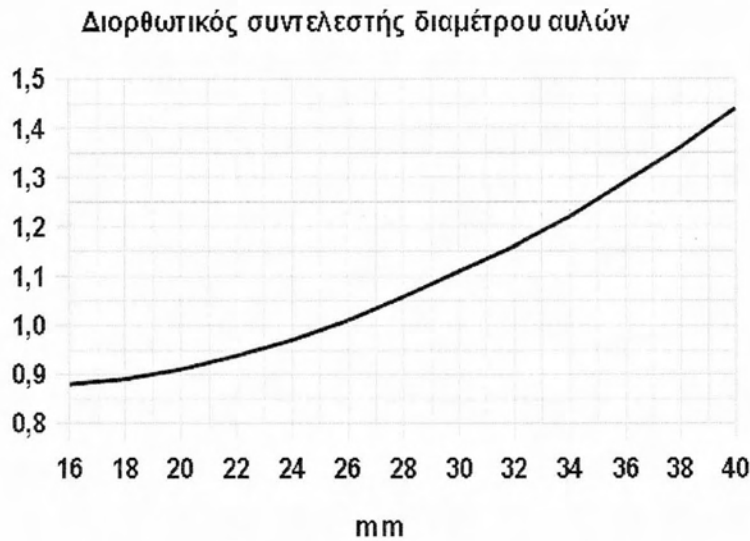
Για την εκτίμηση κόστους των εναλλακτών αυλών – κελύφους χρησιμοποιείται μια άτυπη παραδοχή που αρκετές φορές εξαιρείται από τη βιβλιογραφία. Οι τιμές κόστους δίδονται συναρτήσει της επιφάνειας εναλλαγής για εναλλάκτες μήκους 4.8 μέτρων. Παρουσιάζεται στη συνέχεια διάγραμμα για τη διόρθωση των εκτιμήσεων κόστους εναλλακτών αυλών – κελύφους που αποκλίνουν από αυτό το μήκος.



Σχήμα 64 Συντελεστής διόρθωσης μήκους αυλών

Ο συντελεστής F μπορεί να εκφραστεί και σε πολυωνυμική μορφή:

$$F = 1.36 - 0.001m^2 \quad (5.3.3)$$



Σχήμα 65 Συντελεστής διόρθωσης διαμέτρου αυλών

Ενώ σε σχέση με τη διάμετρο των αυλών, χρησιμοποιείται εκτός του F , ο συντελεστής 1.36 για τους αυλούς εξωτερικής διαμέτρου 1^{1/2} ίντσας (38mm) βάσει του παραπάνω διαγράμματος.

Το κόστος αγοράς C_p μπορεί να είναι υποπολλαπλάσιο του πραγματικού κόστους που συνοδεύει ορισμένα μηχανολογικά στοιχεία. Το επιπλέον κόστος που συνδέεται με διαδικασίες που μεσολαβούν από την αγορά, στην παράδοση εγκατεστημένου και πλήρως λειτουργικού εξοπλισμού, δε μπορεί να αμεληθεί εάν ο στόχος είναι η έστω και προσεγγιστική εκτίμηση του πραγματικού κόστους μιας

εγκατάστασης. Η ομάδα συναρτήσεων κόστους του CAPCOST περιλαμβάνει τέτοιου είδους στοιχεία με τη μορφή συντελεστών που παρουσιάζονται σε αυτές. Έτσι το αρχικό κόστος αγοράς C_p ενός μηχανολογικού στοιχείου μπορεί να αναχθεί στο κόστος μεμονωμένου στοιχείου C_{BM} (Bare Module cost) που αντιστοιχεί στο τελικό κόστος παράδοσης (turnkey state). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της σχέσης:

$$C_{BM} = C_p \cdot F_{BM} \quad (5.3.4)$$

ή εναλλακτικά $C_{BM} = C_p \cdot F_{BL}$

Οι παράγοντες F_M και F_{BM} σχετίζονται με τη μεταβολή κόστους του μηχανολογικού στοιχείου λόγω του υλικού κατασκευής και ο F_p λόγω της πίεσης λειτουργίας. Για την περίπτωση του εναλλάκτη, στο γινόμενο των συντελεστών F_M και F_p συμμετέχει και ο συντελεστής διόρθωσης F της σχέσης (5.33). Για τον F_p ισχύει:

$$F_p = C_1 + C_2 \cdot K_1 + C_3 \cdot K_2 + B_1 + B_2 \cdot K_3 \quad (5.3.5)$$

με C_1 , C_2 και C_3 συντελεστές αντίστοιχους των K_1 , K_2 και K_3 που δίδονται στον ακόλουθο πίνακα. Οι παράγοντες B_1 και B_2 επίσης διαφοροποιούνται για κάθε μηχανολογικό στοιχείο, με τον πρώτο να αποτελεί το συντελεστή κόστους για την εγκατάσταση του στοιχείου.

	C1	C2	C3	B1	B2
εναλλάκτης αυλών – κελύφους	0.03881	-0.11272	0.08183	1.63	1.66
Φυσητήρας	0.000	0.209	-0.033	F _{BM} σε επόμενο πίνακα	
Αντλία θετικής εκτόπισης	-0.245382	0.259016	-0.01363	1.89	1.35

Πίνακας 23 Συντελεστές πίεσης συναρτήσεων κόστους

Στη συνέχεια παρουσιάζονται στοιχεία σε σχέση με τους συντελεστές F_M και F_{BM} που παρέχουν συσχέτιση του κόστους των μηχανολογικών στοιχείων με το υλικό κατασκευής τους.

F_M εναλλακτών	Αυλοί ανθρακούχου χάλυβα	Αυλοί ανοξείδωτου χάλυβα
Κέλυφος ανθρακούχου χάλυβα	1.00	1.81
Κέλυφος ανοξείδωτου	-	2.73

χάλυβα		
--------	--	--

Πίνακας 24 Συντελεστές κόστους για το υλικό κατασκευής εναλλακτών

Τιμές F_M, F_{BM}	Ανθρακούχος χάλυβα	Ανοξείδωτος χάλυβα
F_{BM} φυσητήρα	2.7	5.8
F_M αντλίας θετικής εκτόπισης	1.4	2.7
F_{BM} ακτινικού στροβίλου	3.5	6.1
F_{BM} μηχανής εσωτερικής καύσης	2.0	-

Πίνακας 25 Συντελεστές κόστους για υλικό και εργασίες εγκατάστασης μηχανολογικών στοιχείων

[40], [34], [23]

5.3.5 Υπολογισμός συνολικού κόστους εγκατάστασης

Η μετάβαση από το κόστος των μηχανολογικών στοιχείων σε αυτό της συνολικής εγκατάστασης γίνεται ως εξής. Με C_{TC} το ζητούμενο κόστος, ισχύει:

$$C_{TC} = 1.3 \sum_i C_i \quad (5.3.6)$$

Εφαρμόζεται δηλαδή ο συντελεστής 1.3 στο άθροισμα των τιμών κόστους των επιμέρους μηχανολογικών στοιχείων. Το επιπλέον αυτό ποσοστό 30% επί του κόστους εγκατεστημένου και ετοιμοπαράδοτου εξοπλισμού, αναλύεται ως εξής. Θεωρείται ότι προστίθεται το αθροιστικό κόστος των στοιχείων της εγκατάστασης που δε μελετήθηκαν λεπτομερώς κατά το σχεδιασμό, όπως είναι οι σωληνώσεις και τα λοιπά ηλεκτρομηχανολογικά στοιχεία που συνδέονται άμεσα με τη λειτουργία της εγκατάστασης, που αντιστοιχεί σε 9% επιπλέον κόστους. Επίσης συμπεριλαμβάνεται ένα ποσοστό 18% για την εξασφάλιση του έργου (contingency fee) και 3% η αμοιβή του εργολάβου. Το επιπλέον κόστος που σχετίζεται με έμμεσες – για την ολοκλήρωση της εγκατάστασης – δαπάνες, όπως είναι οι κτηριακές εγκαταστάσεις και η κτήση γης, δε συμπεριλαμβάνονται στις τιμές κόστους της παρούσας εργασίας.

[40], [34], [23]

5.3.6 Στοιχεία λειτουργικού κόστους

Σε προηγούμενο εδάφιο παρουσιάστηκε ο τρόπος με τον οποίο μπορεί το λειτουργικό κόστος μια εγκατάστασης να αναχθεί σε παροντικό και να συγκριθεί με

το αρχικό κόστος της ίδιας της εγκατάστασης. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, είναι αναγκαία η διαδικασία της αναγωγής των επιμέρους τιμών κόστους που παρουσιάζονται, σε μια μοναδική τιμή με ετήσια βάση.

Σε αυτό το σημείο θα οριστεί ως παραδοχή της εργασίας ο ετήσιος χρόνος λειτουργίας t των εγκαταστάσεων που μοντελοποιούνται, συναρτήσει του είδους της βιομάζας που αξιοποιούν. Βάσει της ανάλυσης που έγινε στο 2^ο κεφάλαιο, ορίζονται δύο διαφορετικά σενάρια που εξυπηρετούν τη μεταφορά των ανομοιογενών χαρακτηριστικών των διαφορετικών ειδών βιομάζας σε κοινή βάση. Το σενάριο A αντιστοιχεί στην αξιοποίηση ξυλώδους βιομάζας, ενώ το σενάριο B σε αγροβιομάζα.

Ετήσιος χρόνος λειτουργίας 1 σε ώρες	Άμεση καύση Διαθερμικό έλαιο	Αεριοποίηση
Σενάριο A	7800	8000
Σενάριο B	7500	7600

Πίνακας 26 Δεδομένα για ετήσιο χρόνο λειτουργίας εγκαταστάσεων συναρτήσει σεναρίων A και B αξιοποιούμενης βιομάζας

Ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει τον ετήσιο χρόνο λειτουργίας t μιας εγκατάστασης είναι οι επικαθίσεις που σχηματίζονται από την τέφρα. Οι δεδομένες τιμές δικαιολογούνται ως εξής:

- Είναι αναμενόμενο να εμφανίζουν μικρότερο ετήσιο χρόνο λειτουργίας οι εγκαταστάσεις που αξιοποιούν βιομάζα με υψηλότερη περιεκτικότητα σε τέφρα, λόγω της ταχύτερης συσσώρευσης της στα λειτουργικά στοιχεία της εγκατάστασης.
- Στις εγκαταστάσεις αεριοποίησης τα αέρια που παράγονται δεν αλληλεπιδρούν με μεγάλες επιφάνειες όσο αυτά περιέχουν παράγοντες επικαθίσεων. Αποτέλεσμα είναι η εγκατάσταση να παρουσιάζει μεγαλύτερο ετήσιο χρόνο λειτουργίας.

Οι τιμές που δίδονται σε σχέση με τον ετήσιο χρόνο λειτουργίας t των εγκαταστάσεων, εξυπηρετούν την αναγωγή σε ετήσια βάση των στοιχείων λειτουργικού κόστους που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Στοιχεία λειτουργικού κόστους		Μεταβλητή	Τιμή σε €	Μονάδα μέτρησης
Βιομάζα σεναρίου Α		C_{bio}	110	€/tn
Βιομάζα σεναρίου Β			70	
Τιμή ηλεκτρικής kwh	αεριοποίηση	C_{el}	0.25	€/kwh _{el}
	καύση		0.23	

Πίνακας 27 Στοιχεία λειτουργικού κόστους εγκαταστάσεων

Έστω C η τιμή του λειτουργικού κόστους και C_{annual} το λειτουργικό κόστος σε ετήσια βάση, ισχύει:

$$C_{annual} = ACt \quad (5.3.7)$$

με A ένα συντελεστή, το είδος του οποίου εξαρτάται από το είδος του λειτουργικού κόστους. Αν για παράδειγμα υπολογιστεί το ετήσιο κόστος αγοράς βιομάζας για μια εγκατάσταση, τότε με A συμβολίζεται η κατανάλωση βιομάζας ανά ώρα λειτουργίας. [32], [44]

5.4 Διαδικασία βελτιστοποίησης εγκατάστασης

Με την ολοκλήρωση των μοντελοποιήσεων, που γίνονται στην παρούσα εργασία μέσω των εξισώσεων που παρουσιάζονται στο 4^ο κεφάλαιο, εξυπηρετείται το επόμενο βήμα της υπολογιστικής μελέτης μιας εγκατάστασης, το οποίο είναι η βελτιστοποίηση της λειτουργίας της. Μέσω της διαδικασίας της βελτιστοποίησης επιλέγονται οι κατάλληλες τιμές των παραμέτρων λειτουργίας μιας εγκατάστασης, έτσι ώστε κατά τη λειτουργία της να παρουσιάζονται κατά το μέγιστο τα επιθυμητά χαρακτηριστικά, τα οποία συνοψίζονται συνήθως μέσω της τιμής της κερδοφορίας που προκύπτει. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται συνοπτικά η διαδικασία της βελτιστοποίησης που πραγματοποιείται σε επόμενα κεφάλαια.

Μορφοποίηση του προβλήματος: Αυτό το στάδιο εξυπηρετείται μέσω της μοντελοποίησης των βασικών μηχανολογικών στοιχείων της εγκατάστασης. Η μορφοποίηση του προβλήματος βελτιστοποίησης ξεκινά με τη δημιουργία ενός συστήματος εξισώσεων. Οι μεταβλητές που συμμετέχουν στις εξισώσεις, διαχωρίζονται στις εξαρτημένες και τις ανεξάρτητες. Οι τελευταίες ονομάζονται και

μεταβλητές απόφασης. Οι μεταβλητές απόφασης είναι οι παράμετροι ως προς τις οποίες βελτιστοποιείται η εγκατάσταση. Πρόκειται για μεταβλητές που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στον τρόπο λειτουργίας της εγκατάστασης. Ένα μέρος των μεταβλητών απόφασης αποτελεί τις παραδοχές που τίθενται κατά το σχεδιασμό, δηλαδή σταθερές τιμές που επιλέγονται βάσει των επιθυμητών χαρακτηριστικών λειτουργίας της εγκατάστασης. Οι υπόλοιπες μεταβλητές απόφασης αποκτούν εύρος τιμών, έτσι ώστε στη συνέχεια μέσω των επόμενων βημάτων και της επίλυσης του συστήματος εξισώσεων, να αναδειχθούν οι κατάλληλες τιμές τους, που οδηγούν στη βελτιστοποίηση της εγκατάστασης.

Λειτουργικοί περιορισμοί: Οι περιορισμοί αποτελούν είτε εξισώσεις είτε μέγιστες και ελάχιστες τιμές συγκεκριμένων παραμέτρων λειτουργίας, που δεν πρέπει να παραβιάζονται. Οι περιορισμοί μπορούν να προκύψουν είτε ως λογικές παραδοχές, όπως για παράδειγμα οποιαδήποτε τιμή μάζας πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός, είτε ως παραδοχές που προκύπτουν από τη φύση του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Αντικειμενική συνάρτηση: Όπως παρουσιάζεται σε προηγούμενα εδάφια, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται συναρτήσεις που συνδέουν λειτουργικά χαρακτηριστικά των βασικών μηχανολογικών στοιχείων των εγκαταστάσεων που μοντελοποιούνται, με στοιχεία κόστους. Τα στοιχεία κόστους μπορούν να αποτελέσουν την κοινή βάση σύγκρισης των διαφορετικών λειτουργικών χαρακτηριστικών. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του σχηματισμού της αντικειμενικής συνάρτησης Z του προβλήματος βελτιστοποίησης. Η αντικειμενική συνάρτηση αποτελεί αθροιστική έκφραση των στοιχείων κόστους συνολικά για την εγκατάσταση τα οποία διατυπώνονται υπό κοινή χρονική αξία. Στη συγκεκριμένη εργασία τα στοιχεία κόστους διατυπώνονται σε παροντική αξία. Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να είναι είτε συνάρτηση κόστους, είτε κέρδους. Στην πρώτη περίπτωση οι τιμές των μεταβλητών απόφασης επιλέγονται έτσι ώστε αυτή να λαμβάνει την ελάχιστη δυνατή τιμή, ενώ στη δεύτερη περίπτωση συμβαίνει το αντίθετο.

[34]

5.5 Υπολογισμός εσωτερικού βαθμού απόδοσης

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης στην παρούσα εργασία δομούνται έτσι ώστε κάθε εγκατάσταση να χωρίζεται σε δύο μέρη. Το ένα μέρος χαρακτηρίζεται από

αντικειμενική συνάρτηση κέρδους, έστω Z_1 και το άλλο από αντικειμενική συνάρτηση κόστους, έστω Z_2 . Ο διαχωρισμός γίνεται για πρακτικούς λόγους, ώστε να διευκολυνθεί η μελέτη των κρίσιμων παραμέτρων και η παρατήρηση της επίδραση τους στα αντίστοιχα μέρη της εγκατάστασης. Εάν εξαιρεθεί η επίδραση της χρονικής αξίας χρήματος στις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων, θα ήταν συνολικά για την εγκατάσταση ζητούμενη η μεγιστοποίηση της τιμής της διαφοράς $Z_1 - Z_2$. Στην προκειμένη περίπτωση όμως ορίζεται η συνθήκη:

$$\frac{Z_1}{I.R.R.} = \frac{Z_2}{I.R.R.} \quad (5.5.1)$$

με I.R.R. τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης (Internal Rate of Return). Βάσει αυτής της συνθήκης, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης για το σύνολο της εγκατάστασης είναι αυτός, για τον οποίο ισχύει ότι η διαφορά των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων είναι μηδενική, όταν αυτές υπολογίζονται υπό το πρίσμα της ίδιας τιμής επιτοκίου.

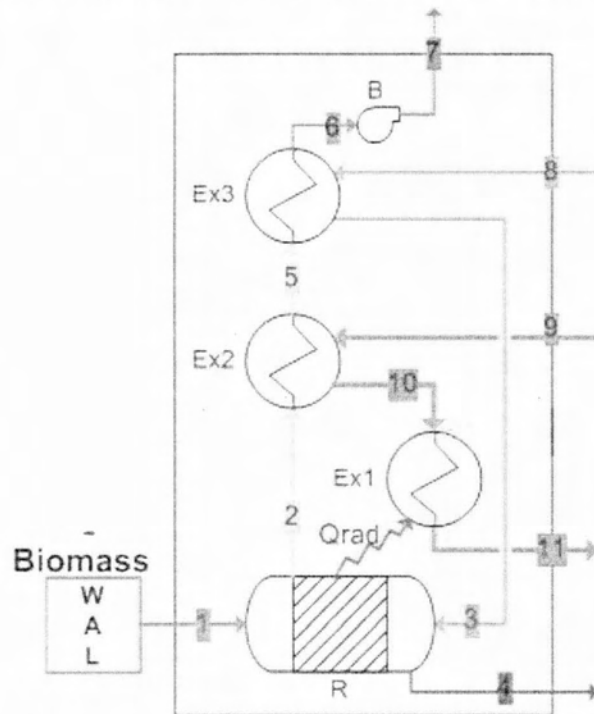
[38]

6. Υπολογιστική μελέτη εγκατάστασης άμεσης καύσης – κύκλου Rankine με οργανικό εργαζόμενο ρευστό

6.1 Εγκατάσταση άμεσης καύσης – διαθερμικού ελαίου

6.1.1 Μοντελοποίηση εγκατάστασης άμεσης καύσης

Βάσει της περιγραφής που γίνεται στο 3^ο κεφάλαιο, χρησιμοποιείται ως πρότυπη εγκατάσταση άμεσης καύσης – θέρμανσης διαθερμικού ελαίου, αυτή του διαγράμματος ροής που ακολουθεί. Σύμφωνα με την ανάλυση της διαδικασίας της υπολογιστικής μελέτης που παρουσιάζεται στο 5^ο κεφάλαιο, εντοπίζονται στο συγκεκριμένο διάγραμμα ροής τα βασικά λειτουργικά στοιχεία της εγκατάστασης.



Σχήμα 66 Διάγραμμα ροής για μοντελοποίηση εγκατάστασης άμεσης καύσης

Στον πίνακα που ακολουθεί, περιγράφονται οι κωδικές ονομασίες των λειτουργικών στοιχείων, που εμφανίζονται για πρακτικούς λόγους ως συντομογραφίες στο διάγραμμα ροής της εγκατάστασης.

Κωδική ονομασία λειτουργικού στοιχείου	Περιγραφή
Biomass	Τροφοδοτούμενη βιομάζα με δεδομένες τιμές περιεκτικότητας σε υγρασία, τέφρα και λιγνίνη
R	Αντιδραστήρας άμεσης καύσης
Ex1	Επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας μέσω ακτινοβολίας στα τοιχώματα

	του αντιδραστήρα
Ex2	Εναλλάκτης απαγωγής θερμότητας των θερμών καυσαερίων
Ex3	Εναλλάκτης προθέρμανσης αέρα καύσης
B	Φυσητήρας διακίνησης των αερίων της εγκατάστασης

Πίνακας 28 Κατάλογος βασικών λειτουργικών στοιχείων

Ενώ στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται λεπτομέρειες σε σχέση με τα ρεύματα των ρευστών που παρουσιάζονται στην εγκατάσταση. Οι δείκτες i, j, k κ.ο.κ. που εμφανίζονται για πρακτικούς λόγους στις μοντελοποιήσεις των λειτουργικών στοιχείων του 4^{ου} κεφαλαίου, υποκαθίστανται τώρα από αριθμητικούς δείκτες.

Αριθμητικός δείκτης ρεύματος	Περιγραφή
1	-Τροφοδοσία βιομάζας στον αντιδραστήρα άμεσης καύσης
2	-Έξοδος θερμών καυσαερίων από τον αντιδραστήρα -Είσοδος καυσαερίων στον εναλλάκτη διαθερμικού ελαίου
3	-Έξοδος προθερμασμένου αέρα από τον εναλλάκτη προθέρμανσης -Είσοδος προθερμασμένου αέρα στον αντιδραστήρα καύσης
4	-Ρεύμα απόρριψης τέφρας από το εσωτερικό του αντιδραστήρα
5	-Έξοδος καυσαερίων από τον εναλλάκτη διαθερμικού ελαίου -Είσοδος καυσαερίων στον εναλλάκτη προθέρμανσης αέρα καύσης
6	-Έξοδος καυσαερίων από τον εναλλάκτη προθέρμανσης αέρα -Είσοδος καυσαερίων στο φυσητήρα διακίνησης αερίων
7	-Καμινάδα – απόρριψη καυσαερίων στην ατμόσφαιρα
8	-Ρεύμα εισόδου ατμοσφαιρικού αέρα στον εναλλάκτη προθέρμανσης
9	-Είσοδος ψυχρού διαθερμικού ελαίου στον εναλλάκτη θέρμανσης του
10	-Έξοδος διαθερμικού ελαίου από εναλλάκτη θέρμανσης του -Είσοδος ελαίου στις επιφάνειες εναλλαγής του αντιδραστήρα καύσης
11	-Έξοδος ελαίου από επιφάνειες εναλλαγής αντιδραστήρα καύσης
Q _{rad}	-Ρεύμα θερμικής ισχύος μέσω ακτινοβολίας προς εσωτερικές επιφάνειες αντιδραστήρα άμεσης καύσης

Πίνακας 29 Κατάλογος με ροές ρευστών και θερμότητας

Εφαρμόζοντας τελικά τις μοντελοποιήσεις που έγιναν στο 4^ο κεφάλαιο, μεμονωμένα για κάθε βασικό λειτουργικό στοιχείο της εγκατάστασης, διαμορφώνεται η μοντελοποίηση της συνολικής εγκατάστασης άμεσης καύσης που παρατίθεται στο παράρτημα 2.

6.1.2 Μορφοποίηση του προβλήματος βελτιστοποίησης

Παραδοχές του προβλήματος: Οι γενικές παραδοχές που γίνονται σε σχέση με τη βιομάζα, τον αντιδραστήρα καύσης, τους εναλλάκτες, το διαθερμικό έλαιο και το φυσητήρα, περιγράφονται εκτενώς στα αντίστοιχα εδάφια του 4^{ου} κεφαλαίου. Σε

αυτό το σημείο αναφέρονται οι παραδοχές που γίνονται σε σχέση με τη συγκεκριμένη μοντελοποίηση.

Για τις παραμέτρους που περιγράφουν την αξιοποιούμενη βιομάζα, εφαρμόζεται το σενάριο A και B που παρουσιάζεται στην αντίστοιχη μοντελοποίηση του 4^{ου} κεφαλαίου, με τις τιμές λειτουργικού κόστους που εμφανίζονται στο 5^ο κεφάλαιο.

Όλες οι παραδοχές σχετικά με τις παραμέτρους λειτουργίας του αντιδραστήρα καύσης, περιγράφονται στο αντίστοιχο εδάφιο του 4^{ου} κεφαλαίου.

Στον εναλλάκτη Ex1 το διαθερμικό έλαιο τοποθετείται στους αυλούς, ενώ το κέλυφος δεν υφίσταται, καθώς θεωρείται μετάδοση θερμότητας στην εξωτερική επιφάνεια των αυλών, μέσω θερμικής ακτινοβολίας. Η επιφάνεια εναλλαγής προκύπτει από τη μοντελοποίηση του αντιδραστήρα καύσης, που δίδει ως αποτέλεσμα την επιφάνεια που απορροφά θερμική ισχύ μέσω ακτινοβολίας. Θεωρείται συντελεστής μεταφοράς στο εσωτερικό των αυλών $h_{m1}=750 W/m^2 \cdot K$ που αντιστοιχεί σε ελάχιστες τιμές που δίδονται στη βιβλιογραφία για συντελεστή μεταφοράς με διαθερμικό έλαιο ως συνεργαζόμενο ρευστό. Η πτώση πίεσης στους αυλούς παραβλέπεται.

Στον εναλλάκτη Ex2 το διαθερμικό έλαιο τοποθετείται στο κέλυφος, σε αντιρροή με τα θερμά καυσαέρια που τοποθετούνται στους αυλούς, βάσει των αντιστοιχών κριτηρίων που παρατίθενται σχετικά με τη χωροθέτηση ρευστών σε εναλλάκτες. Παραδοχή που προκύπτει ως ρεαλιστική τιμή παραμέτρου που συναντώνται σε αντίστοιχες εγκαταστάσεις είναι η θερμοκρασία του διαθερμικού ελαίου που εισέρχεται στον εναλλάκτη και συνήθως λαμβάνει την τιμή $T_9=150C$. Θεωρείται συντελεστής μεταφοράς στο κέλυφος $h_{m2}=750 W/m^2 \cdot K$ όπως περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο. Η πτώση πίεσης στο κέλυφος παραβλέπεται. Ο συντελεστής μεταφοράς στους αυλούς αποτελεί μεταβλητή απόφασης, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια, ενώ η αντίστοιχη πτώση πίεσης γίνεται μέσω αναλυτικών σχέσεων που λαμβάνουν υπό όψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εναλλάκτη. Το μοντέλο της εγκατάστασης φτιάχτηκε έτσι ώστε η θερμική ισχύς που αποδίδεται στο διαθερμικό έλαιο από την εγκατάσταση, να ισούται με το άθροισμα της θερμικής ισχύος που αποδίδεται ξεχωριστά από τους εναλλάκτες Ex1 και Ex2.

Στον εναλλάκτη Ex3 ο ατμοσφαιρικός αέρας τοποθετείται στο κέλυφος και σε αντιρροή με τα θερμά καυσαέρια στους αυλούς, βάσει των κριτηρίων που αναφέρονται στην προηγούμενη παράγραφο. Οι συντελεστές μεταφοράς σε αυλούς και κέλυφος, αποτελούν μεταβλητές απόφασης, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια. Οι πτώσεις πίεσης σε αυλούς και κέλυφος υπολογίζονται μέσω αναλυτικών σχέσεων που λαμβάνουν υπό όψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εναλλάκτη.

Ο φυσητήρας B θεωρείται ότι λειτουργεί με συντελεστή απόδοσης $\eta_B=65\%$. Η λειτουργία του εξυπηρετεί την εξουδετέρωση της πτώσης πίεσης στο κέλυφος του εναλλάκτη Ex3, του αντιδραστήρα καύσης και των αυλών των εναλλακτών Ex2 και Ex3. Οι αντίστοιχες πτώσεις πίεσης αναφέρθηκαν με τη σειρά που εμφανίζονται στη διαδρομή που ακολουθούν τα αέρια που αντλεί ο φυσητήρας, από την είσοδο του ατμοσφαιρικού αέρα, έως την έξοδο των καυσαερίων.

Περιορισμοί: Εκτός των τετριμμένων περιορισμών, όπως είναι οι μη αρνητικές τιμές θερμοκρασιών, πιέσεων, μάζας κ.ο.κ. ορίζονται σε αυτό το σημείο οι λοιποί περιορισμοί του προβλήματος. Δύο βασικοί περιορισμοί σχετίζονται με το είδος της αξιοποιούμενης βιομάζας και είναι οι μέγιστες επιτρεπτές θερμοκρασίες φλόγας και θερμών καυσαερίων που περιγράφονται στο αντίστοιχο εδάφιο της μοντελοποίησης του 4^{ου} κεφαλαίου. Η θερμοκρασία φλόγας συμβολίζεται στην παρούσα μοντελοποίηση ως T_f , ενώ η θερμοκρασία των θερμών καυσαερίων που εξέρχονται από τον αντιδραστήρα καύσης είναι η T_2 . Η εφαρμογή των σεναρίων A και B σε σχέση με την αξιοποιούμενη βιομάζα δίδει τις αντίστοιχες τιμές σε αυτές τις παραμέτρους που τίθενται ως περιοριστικές, έτσι ώστε για σενάριο A να ισχύει $T_f=1350$, $T_2=1050$ και για σενάριο B $T_f=1150$, $T_2=850$.

Σε σχέση με τον αντιδραστήρα καύσης R αναφέρεται ότι θα πρέπει πάντα να υπάρχει στο εσωτερικό του επαρκής ποσότητα οξυγόνου, ώστε να επιτυγχάνεται η πλήρης καύση της βιομάζας. Τίθεται λοιπόν ως περιορισμός $\lambda > 1.2$.

Ο περιορισμός που περιγράφεται στο εδάφιο που αφορά τους εναλλάκτες στο 4^ο κεφάλαιο, επιβάλλει ότι $T_5 > T_9$, δηλαδή η χαμηλότερη θερμοκρασία των καυσαερίων του εναλλάκτη Ex2, θα πρέπει να είναι πάντα υψηλότερη από τη θερμοκρασία εισόδου του διαθερμικού ελαίου σε αυτόν.

Για την τιμή της θερμοκρασίας των καυσαερίων που εξέρχονται από τον εναλλάκτη Ex3 πρέπει να ισχύει $T_6 \geq 150$ έτσι ώστε να μην υγροποιείται το νερό

που περιέχουν τα καυσαέρια. Οι υγροποιήσεις συμβάλλουν στην ταχεία οξείδωση των επιφανειών του εναλλάκτη.

Αντικειμενική συνάρτηση κόστους: Διατυπώνεται σε αυτό το σημείο η αντικειμενική συνάρτηση κόστους Z_{DC} της εγκατάστασης άμεσης καύσης:

$$Z_{DC} = C_{DC} + C_{presentbio} + C_{presentel}$$

βάση της σχέσης 5.3.6, με C_{DC} το αρχικό κόστος της εγκατάστασης άμεσης καύσης, $C_{presentbio}$ το λειτουργικό κόστος της βιομάζας ανηγμένο σε παροντικό κόστος και $C_{presentel}$ το λειτουργικό κόστος του φυσητήρα ανηγμένο επίσης σε παροντικό κόστος. Ο δείκτης I.R.R. συμβολίζει το ότι ο υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης γίνεται υπό το πρίσμα ενός επιτοκίου που εξυπηρετεί την αναγωγή των λειτουργικών στοιχείων κόστους σε παροντικά. Ο υπολογισμός καθεμιάς από τις μεταβλητές αυτές γίνεται με τη χρήση των εξισώσεων που αναλύονται στο 5^ο κεφάλαιο και σχετίζονται με την αναγωγή του λειτουργικού κόστους σε παροντικό και τον υπολογισμό του αρχικού κόστους μιας εγκατάστασης. Ο υπολογισμός του C_{DC} συμπεριλαμβάνει το αρχικό κόστος όλων των βασικών λειτουργικών στοιχείων της εγκατάστασης, που είναι οι εναλλάκτες Ex1, Ex2, Ex3, ο αντιδραστήρας καύσης, ο φυσητήρας και το σύστημα κινούμενης σχάρας. Το κάθε στοιχείο κόστους επηρεάζεται με διαφορετικό τρόπο από την τιμή που λαμβάνουν οι μεταβλητές απόφασης που ορίζονται στη συνέχεια.

Επιλογή μεταβλητών απόφασης: Παρουσιάζονται στη συνέχεια οι μεταβλητές που επιλεχθήκαν ως ανεξάρτητες, τα κριτήρια επιλογής τους και ο τρόπος με τον οποίον επιδρά η μεταβολή της τιμής της καθεμιάς στη λειτουργία της εγκατάστασης.

Ο συντελεστής μεταφοράς h επιλέγεται ως μεταβλητή απόφασης που προκύπτει υπό τις ακόλουθες παραδοχές. Ορίζεται η παραδοχή ότι οι συντελεστές μεταφοράς στους αυλούς του εναλλάκτη Ex2 και Ex3, από όπου διέρχεται το θερμό καυσαέριο, όπως και στο κέλυφος του εναλλάκτη Ex3, από όπου διέρχεται ο ατμοσφαιρικός αέρας ώστε να προθερμανθεί, είναι ίσοι. Στην πραγματικότητα διαφέρουν, αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό. Με την παραδοχή ότι οι τρεις διαφορετικοί συντελεστές μεταφοράς είναι ίσοι και λαμβάνουν την τιμή h , επιτυγχάνεται η προσεγγιστική βελτιστοποίηση λειτουργίας της εγκατάστασης ως προς τις ταχύτητες

των αερίων, μειώνοντας σημαντικά τον όγκο των δεδομένων που προκύπτουν ως αποτελέσματα.

Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη επιλογή είναι δύο. Αφενός το αυξημένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας επιβάλλει τη διερεύνηση της βέλτιστης ταχύτητας αερίων που αντλεί ο φυσητήρας. Αφετέρου η μεγάλη τιμή του

λόγου: $\frac{\text{ο γιγάρτα}}{\text{ενάμιθα}} \eta$ τιμή του οποίου ξεπερνά σε τάξεις μεγέθους τις αντίστοιχες τιμές του σε περιπτώσεις εναλλαγής θερμότητας με συνεργαζόμενο ρευστό το διαθερμικό έλαιο.

Αυξημένες τιμές του συντελεστή μεταφοράς h έχουν ως αποτέλεσμα μειωμένες επιφάνειες εναλλαγής, άρα χαμηλότερο αρχικό κόστος της εγκατάστασης, αλλά ταυτόχρονα αυξημένο λειτουργικό κόστος λόγω της μεγαλύτερης ισχύος που απαιτείται για την άντληση των αερίων.

Η θερμοκρασία T_5 επιλέγεται επίσης ως ανεξάρτητη μεταβλητή και είναι αυτή που χαρακτηρίζει τα θερμά καυσαέρια κατά την έξοδο τους από τον εναλλάκτη Ex2 και πριν την είσοδο τους στον εναλλάκτη προθέρμανσης του αέρα καύσης, Ex3.

Το κριτήριο για την επιλογή της παραμέτρου ως μεταβλητής απόφασης προέρχεται από το γεγονός ότι η μεταβολή της επιφέρει αξιοσημείωτες αλλαγές στον τρόπο λειτουργίας της εγκατάστασης και κατ' επέκταση στο αρχικό και λειτουργικό της κόστος, όπως θα φανεί σε επόμενες παραγράφους.

Αύξηση της τιμής της θερμοκρασίας T_5 επιβάλλει μείωση της τιμής της θερμοκρασίας T_{10} του διαθερμικού ελαίου που εξέρχεται από τον εναλλάκτη Ex2 και εισέρχεται στον Ex1. Ο συσχετισμός των δύο θερμοκρασιών γίνεται μέσω της επίλυσης των εξισώσεων των ισοζυγίων ενέργειας που ισχύουν για τις δύο ροές των ρευστών που διέρχονται μέσω του εναλλάκτη Ex2. Η μεταβολή της τιμής της θερμοκρασίας T_{10} επιδρά με τη σειρά της σημαντικά στη διαστασιολόγηση του εναλλάκτη Ex1, καθώς συμπεριλαμβάνεται στην εξίσωση που υπολογίζει τη θερμική ισχύ μέσω ακτινοβολίας, σε μια σχέση που η τιμή της θερμοκρασίας αυτής βρίσκεται υψωμένη στην τέταρτη δύναμη. Η τιμή της T_5 επηρεάζει επίσης τη διαστασιολόγηση του εναλλάκτη Ex3 με αντιστρόφως ανάλογα αποτελέσματα σε σχέση με τη διαστασιολόγηση του Ex2, γεγονός που προκύπτει και πάλι από την επίλυση των ισοζυγίων ενέργειας για τον πρώτο.

Η θερμοκρασία T_{11} επιλέγεται επίσης ως ανεξάρτητη μεταβλητή και είναι αυτή που χαρακτηρίζει το διαθερμικό έλαιο κατά την έξοδο του από την

εγκατάσταση καύσης και πριν την είσοδο του στο σύστημα του οργανικού κύκλου Rankine.

Επιλέχθηκε ως μεταβλητή απόφασης με κριτήριο το γεγονός ότι η τιμή της καθορίζει σε ένα βαθμό τη διαστασιολόγηση των επιφανειών εναλλαγής της εγκατάστασης.

Η μείωση της τιμής της επιφέρει μείωση των επιφανειών εναλλαγής της εγκατάστασης καύσης και ταυτόχρονα αύξηση αυτών του οργανικού κύκλου Rankine. Πρόκειται για μια κοινή μεταβλητή απόφασης για τις δύο επιμέρους εγκαταστάσεις, που εξυπηρετεί τη διαδικασία βελτιστοποίησης της συνολικής εγκατάστασης που προκύπτει μέσω του συνδυασμού και των δύο.

Η θερμική ισχύς Q_{oil} αποτελεί την τέταρτη και τελευταία μεταβλητή απόφασης του προβλήματος βελτιστοποίησης που ορίστηκε για την εγκατάσταση καύσης. Η μεταβλητή συμβολίζει τη θερμική ισχύ που αποδίδεται από την εγκατάσταση καύσης στο διαθερμικό έλαιο.

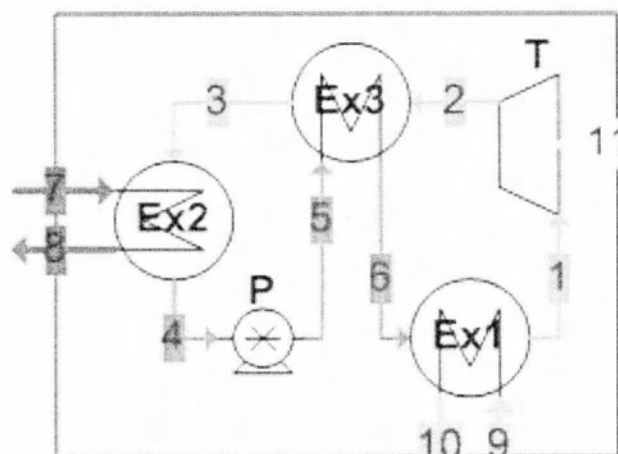
Το κριτήριο για την επιλογή της είναι προφανές, καθώς αυτή αποτελεί τη βασική παράμετρο που καθορίζει την τάξη μεγέθους της εγκατάστασης.

Η επίδραση της τιμής της στη μοντελοποιημένη εγκατάσταση έγκειται στο γεγονός ότι το μέγεθος των βασικών λειτουργικών στοιχείων καθορίζεται πρωτίστως από αυτή. Πρόκειται για μια κοινή μεταβλητή απόφασης για τις δύο επιμέρους εγκαταστάσεις άμεσης καύσης και οργανικού κύκλου Rankine, που εξυπηρετεί τη διαδικασία βελτιστοποίησης της συνολικής εγκατάστασης που προκύπτει μέσω του συνδυασμού και των δύο.

6.2 Εγκατάσταση κύκλου Rankine με οργανικό εργαζόμενο ρευστό

6.2.1 Μοντελοποίηση εγκατάστασης κύκλου Rankine

Βάσει της περιγραφής που γίνεται στο 3^ο κεφάλαιο, χρησιμοποιείται ως πρότυπη εγκατάσταση κύκλου Rankine με οργανικό εργαζόμενο ρευστό, αυτή του διαγράμματος ροής που ακολουθεί. Σύμφωνα με την ανάλυση της διαδικασίας της υπολογιστικής μελέτης που παρουσιάζεται στο 5^ο κεφάλαιο, εντοπίζονται στο συγκεκριμένο διάγραμμα ροής τα βασικά λειτουργικά στοιχεία της εγκατάστασης.



Σχήμα 67 Διάγραμμα ροής για τη μοντελοποίηση εγκατάστασης οργανικού κύκλου Rankine
 Στον πίνακα που ακολουθεί, περιγράφονται οι κωδικές ονομασίες των λειτουργικών στοιχείων, που εμφανίζονται για πρακτικούς λόγους ως συντομογραφίες στο διάγραμμα ροής της εγκατάστασης.

Κωδική ονομασία λειτουργικού στοιχείου	Περιγραφή
Ex1	Βραστήρας – εναλλάκτης διαθερμικού ελαίου
Ex2	Συμπυκνωτής – εναλλάκτης θέρμανσης νερού
Ex3	Αναγεννητής θερμότητας
T	Στρόβιλος ατμών οργανικού ρευστού
P	Αντλία θετικής εκτόπισης

Πίνακας 30 Κατάλογος βασικών λειτουργικών στοιχείων

Ενώ στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται λεπτομέρειες σε σχέση με τα ρεύματα των ρευστών που παρουσιάζονται στην εγκατάσταση. Οι δείκτες i, j, k κ.ο.κ. που εμφανίζονται για πρακτικούς λόγους στις μοντελοποιήσεις των λειτουργικών στοιχείων του 4^{ου} κεφαλαίου, υποκαθίστανται τώρα από αριθμητικούς δείκτες.

Αριθμητικός δείκτης ρεύματος	Περιγραφή
1	-Έξοδος ατμού οργανικού ρευστού υψηλής πίεσης από το βραστήρα -Είσοδος ατμού υψηλής πίεσης στο στρόβιλο
2	-Έξοδος ατμού οργανικού ρευστού χαμηλής πίεσης από το στρόβιλο -Είσοδος ρευστού χαμηλής πίεσης στον αναγεννητή θερμότητας
3	-Έξοδος ατμού οργανικού ρευστού χαμηλής πίεσης από τον αναγεννητή -Είσοδος ατμού χαμηλής πίεσης στο συμπυκνωτή
4	-Έξοδος υγρού οργανικού ρευστού χαμηλής πίεσης από συμπυκνωτή -Είσοδος υγρού ρευστού χαμηλής πίεσης στην αντλία θετικής εκτόπισης
5	-Έξοδος υγρού οργανικού ρευστού υψηλής πίεσης από την αντλία

	-Είσοδος υγρού υψηλής πίεσης στον αναγεννητή
6	-Έξοδος υγρού οργανικού ρευστού υψηλής πίεσης από τον αναγεννητή -Είσοδος υγρού υψηλής πίεσης στο βραστήρα
7	-Είσοδος ψυχρού νερού ψύξης στο συμπυκνωτή
8	-Έξοδος θερμού νερού ψύξης από το συμπυκνωτή
9	-Είσοδος θερμού διαθερμικού ελαίου στο βραστήρα
10	-Έξοδος ψυχρού διαθερμικού ελαίου από το βραστήρα

Πίνακας 31 Κατάλογος ροής ρευστών και ενέργειας

Εφαρμόζοντας τελικά τις μοντελοποιήσεις που έγιναν στο 4^ο κεφάλαιο, μεμονωμένα για κάθε βασικό λειτουργικό στοιχείο της εγκατάστασης, διαμορφώνεται η μοντελοποίηση της συνολικής εγκατάστασης που παρατίθεται στο παράρτημα 2.

6.2.2 Μορφοποίηση του προβλήματος βελτιστοποίησης

Παραδοχές του προβλήματος: Οι γενικές παραδοχές που γίνονται σε σχέση με τους εναλλάκτες, το στρόβιλο, την αντλία θετικής εκτόπισης, το ρευστό λειτουργίας και το διαθερμικό έλαιο, περιγράφονται εκτενώς στα αντίστοιχα εδάφια του 4^{ου} κεφαλαίου. Σε αυτό το σημείο αναφέρονται οι παραδοχές που γίνονται σε σχέση με τη συγκεκριμένη μοντελοποίηση.

Στον εναλλάκτη Ex1 το διαθερμικό έλαιο τοποθετείται στους αυλούς, ενώ στο κέλυφος τοποθετείται το ρευστό λειτουργίας του κύκλου Rankine. Η μετάδοση θερμότητας γίνεται με ταυτόχρονη αλλαγή φάσης του ρευστού λειτουργίας. Γίνεται η παραδοχή ότι ο συντελεστής μεταφοράς κατά τη ροή του διαθερμικού ελαίου ισούται με $750 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, τιμή τυπική για ροές μεσαίων οργανικών ρευστών, όπως εμφανίζεται στο αντίστοιχο εδάφιο του 4^{ου} κεφαλαίου. Ομοίως η τιμή του συντελεστή μεταφοράς για το ρευστό λειτουργίας με παράλληλη εξάτμιση ορίζεται ως $750 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Βάσει των δύο τιμών, εξαιρουμένων των θερμικών αντιστάσεων που προσθέτει το τοίχωμα των αυλών και με την παραδοχή ότι οι επικαθίσεις είναι αμελητέες, υπολογίζεται ο ολικός συντελεστής μεταφοράς μέσω της σχέσης 4.5.20 που δίδεται στο 4^ο κεφάλαιο, λαμβάνει την τιμή $U_{\text{eff}} = 3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Η πτώση πίεσης τόσο στους αυλούς, όσο και στο κέλυφος παραβλέπεται, καθώς η εναλλασσόμενη θερμική ισχύς είναι μεγάλη σε σχέση με τις ογκομετρικές παροχές των συνεργαζόμενων ρευστών.

Στον εναλλάκτη Ex2 το ρευστό λειτουργίας τοποθετείται στο κέλυφος και θεωρείται αντιρροή με τη ροή στους αυλούς, στους οποίους τοποθετείται το νερό ψύξης που απάγει τη θερμική ενέργεια της συμπύκνωσης. Βάσει των τυπικών τιμών

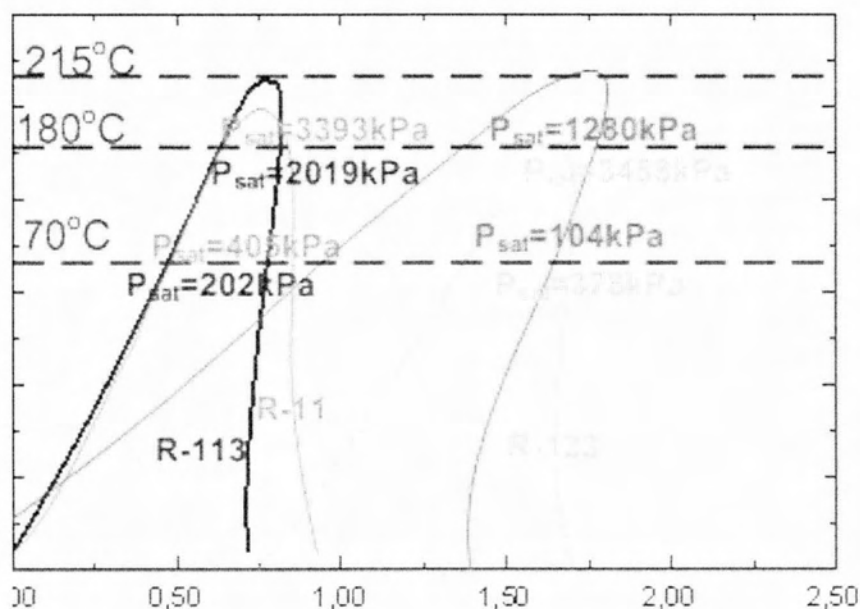
που λαμβάνουν οι συντελεστές μεταφοράς σε αντίστοιχα προβλήματα, γίνεται η παραδοχή ότι ο συντελεστής μεταφοράς στο κέλυφος ισούται με $2000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, ενώ στους αυλούς $750 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Οι τυπικές αυτές τιμές παρουσιάζονται σε πίνακα του αντίστοιχου εδαφίου στο 4^ο κεφάλαιο. Θεωρούνται και σε αυτή την περίπτωση αμελητέες οι θερμικές αντιστάσεις που προσθέτει το πάχος των τοιχωμάτων των αυλών και οι επικαθίσεις. Συνεπώς ο ολικός συντελεστής μεταφοράς λαμβάνει την τιμή $U_{ov} = 545 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ υπολογιζόμενος από τη σχέση 4.5.20 που δίδεται στο 4^ο κεφάλαιο. Η πτώση πίεσης τόσο στους αυλούς, όσο και στο κέλυφος παραβλέπεται, καθώς η εναλλασσόμενη θερμική ισχύς είναι μεγάλη σε σχέση με τις ογκομετρικές παροχές των συνεργαζόμενων ρευστών. Ορίζονται επίσης ως παραδοχές οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του νερού ψύξης από τον εναλλάκτη, οι T_7 και T_8 αντίστοιχα. Θεωρείται ότι οι θερμοκρασίες λαμβάνουν τις τιμές $T_7 = 40^\circ\text{C}$ και $T_8 = 60^\circ\text{C}$. Στην παρούσα εργασία δε μελετάται ο τρόπος ψύξης του νερού που απάγει τη θερμότητα του συμπυκνωτή. Επιπρόσθετα θεωρείται ότι η μέση θερμοκρασία στην οποία συμπυκνώνεται το ρευστό λειτουργίας του κύκλου Rankine είναι οι 70°C . Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται και η χαμηλή πίεση του κύκλου, η οποία είναι η πίεση κορεσμού του ρευστού στους 70°C .

Στον εναλλάκτη Ex3 το ρευστό υψηλής πίεσης τοποθετείται στους αυλούς, το ρευστό χαμηλής πίεσης στο κέλυφος, ενώ γίνεται η παραδοχή ότι τα ρεύματα των δύο ρευστών βρίσκονται σε αντιρροή. Οι τυπικές τιμές των συντελεστών μεταφοράς σε αυλούς και κέλυφος για αυτές τις περιπτώσεις ροής δίδονται στο αντίστοιχο εδάφιο του 4^{ου} κεφαλαίου. Γίνονται οι παραδοχές ότι ο συντελεστής μεταφοράς στους αυλούς ισούται με $1500 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ που αντιστοιχεί σε ροή ελαφρού οργανικού υγρού, ενώ στο κέλυφος ο συντελεστής λαμβάνει την τιμή $80 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ που αντιστοιχεί σε ροή αερίου με στατική πίεση κοντά στην ατμοσφαιρική. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, ο ολικός συντελεστής μεταφοράς λαμβάνει την τιμή $U_{ov} = 75 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Και σε αυτή την περίπτωση θεωρούνται αμελητέες οι θερμικές αντιστάσεις των επικαθίσεων και του πάχους του τοιχώματος των αυλών. Τέλος, η πτώση πίεσης τόσο στους αυλούς, όσο και στο κέλυφος παραβλέπεται. Η ογκομετρική παροχή των ρευστών είναι αυξημένη σε σχέση με την εναλλασσόμενη θερμική ισχύ, παρ' όλα αυτά η συνολική θερμική ισχύς του εναλλάκτη Ex3 είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερη από αυτές των Ex1 και Ex2.

Για το στρόβιλο ορίζεται η παραδοχή ότι ο συντελεστής απόδοσης του λαμβάνει την τιμή $n_T = 0.86$. Το αρχικό κόστος του υπολογίζεται από συνάρτηση που συμπεριλαμβάνει μόνο τη μηχανική του ισχύ και όχι λοιπές παραμέτρους όπως ο λόγος πίεσης, η μέση θερμοκρασία λειτουργίας ή η ογκομετρική παροχή του εκτονούμενου ρευστού. Θεωρείται επίσης ότι η απόδοση των λειτουργικών στοιχείων ηλεκτρικής ισχύος παρουσιάζουν απόδοση $n_{el} = 0.96$. Δηλαδή το 96% της μηχανικής ισχύος του στροβίλου μετατρέπεται σε ηλεκτρική.

Για την αντλία θεωρείται συντελεστής απόδοσης $n_p = 0.5$, τυπική τιμή για αντλία θετικής εκτόπισης. Η χρήση αυτού του τύπου αντλίας στη μοντελοποίηση προκύπτει ως παραδοχή που βασίζεται σε δεδομένα για τη λειτουργία υπαρκτών εγκαταστάσεων κύκλου Rankine οργανικών ρευστών.

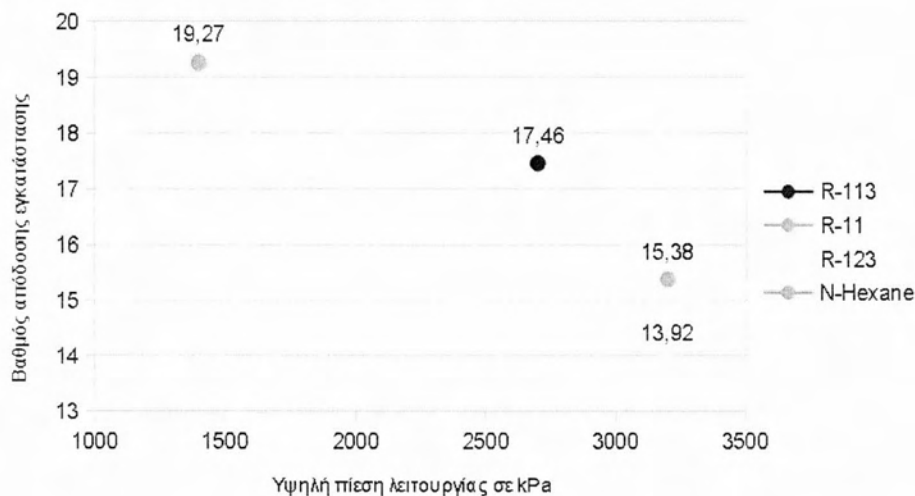
Τέλος, ως παραδοχή της μοντελοποίησης τίθεται το ρευστό λειτουργίας που χρησιμοποιείται. Έπειτα από δοκιμές που έγιναν στο μοντέλο του κύκλου Rankine αποφασίστηκε η χρήση του ρευστού R-113. Εναλλακτικά δοκιμάστηκαν τα ρευστά R-11, R-123 και το εξάνιο. Η συγκεκριμένες επιλογές έγιναν καθώς τα ρευστά αυτά παρουσιάζουν αυξημένες τιμές κρίσιμης θερμοκρασίας, ενώ πρόκειται επίσης για «στεγνά» ρευστά λειτουργίας. Στο ακόλουθο σχήμα συγκρίνονται τα διαγράμματα θερμοκρασίας – εντροπίας (T-s) των παραπάνω ρευστών λειτουργίας.



Σχήμα 68 Σύγκριση οργανικών ρευστών λειτουργίας για κύκλο Rankine

Είναι σαφές από το διάγραμμα ότι στη θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας του ρευστού του κύκλου Rankine, δηλαδή περίπου από 70 έως 200°C, τα ρευστά R-113

και εξάνιο εμφανίζουν μικρότερες πιέσεις λειτουργίας, χαρακτηριστικό που είναι επιθυμητό. Επίσης τα δύο αυτά ρευστά μπορούν να λειτουργούν σε μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος, αυξάνοντας την απόδοση του κύκλου Rankine. Χαρακτηριστικά, το R-113 και το εξάνιο παρουσιάζουν κρίσιμη θερμοκρασία κοντά στους 215 °C, ενώ το R-11 στους 198 °C και το R-123 στους 184 °C. Στο διάγραμμα που ακολουθεί εμφανίζονται τα αποτελέσματα για το συντελεστή απόδοσης της εγκατάστασης για το καθένα από τα ρευστά.



Σχήμα 69 Σύγκριση βαθμού απόδοσης κύκλου Rankine για διαφορετικά ρευστά λειτουργίας

Το εξάνιο εμφανίζει καλύτερα χαρακτηριστικά από το R-113 σε σχέση με την υψηλή πίεση λειτουργίας της εγκατάστασης και την απόδοση της. Παρ' όλα αυτά δεν επιλέγεται ως ρευστό λειτουργίας, καθώς πρόκειται για εύφλεκτο ρευστό που μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα επικίνδυνο σε περίπτωση διαρροής. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση και των τριών ρευστών R-11, R-113 και R-123 έχει περιοριστεί σημαντικά και μέχρι το 2020 θα έχει απαγορευτεί, βάσει της συνθήκης του Βανκούβερ, καθώς πρόκειται για χλωροφθοράνθρακες, ενώσεις που καταστρέφουν το ατμοσφαιρικό όζον. Παρ' όλα αυτά έχουν δημιουργηθεί ρευστά που μπορούν να αντικαταστήσουν τα πρώτα, δηλαδή ρευστά με παρόμοια θερμοδυναμική συμπεριφορά. Η σύσταση και οι ιδιότητες των ρευστών που αντικαθιστούν τους χλωροφθοράνθρακες δεν είναι πάντα γνωστές. Συνεπώς στην παρούσα μοντελοποίηση χρησιμοποιούνται οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του R-113, ενώ στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται δύο πιθανά ρευστά που θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν το πρώτο.

Κωδική ονομασία	Εμπορική ονομασία
Υδροφθοροαιθέρας – 7000	HFE – 7000

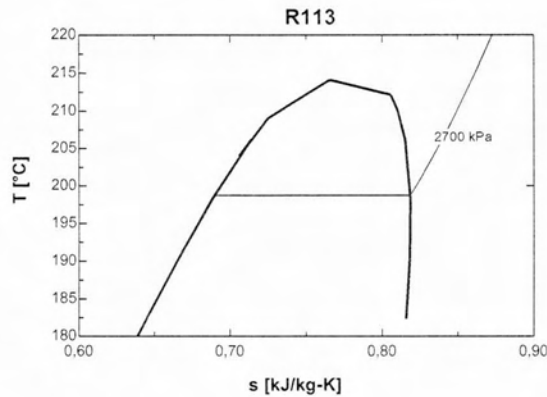
(C3F7OCH3)	
HS2-R	Hot shot 2

Πίνακας 32 Ρευστά λειτουργίας που αντικαθιστούν το υπο απαγόρευση R-113

Περιορισμοί: Εκτός των τετριμμένων περιορισμών, όπως είναι οι μη αρνητικές τιμές θερμοκρασιών, πιέσεων, μάζας κ.ο.κ. ορίζονται σε αυτό το σημείο οι λοιποί περιορισμοί του προβλήματος.

Όπως περιγράφεται στο εδάφιο του 4^ο κεφαλαίου που αφορά τους εναλλάκτες, η χαμηλότερη θερμοκρασία του θερμού ρευστού είναι πάντα υψηλότερη από τη χαμηλότερη του ψυχρού ρευστού. Συνεπώς για εναλλάκτες Ex1, Ex2 και Ex3 ισχύει $T_{10} > T_6$, $T_3 > T_5$ και $T_4 > T_7$. Επίσης η διαφορά της θερμοκρασίας T_4 και T_7 κυμαίνεται σε συγκεκριμένο πλαίσιο, που ορίζεται από το ρευστό λειτουργίας του κύκλου Rankine. Για την περίπτωση του R-113 της συγκεκριμένης μοντελοποίησης, η μέγιστη διαφορά είναι 24°C και υφίσταται για μηδενική θερμική ισχύ του εναλλάκτη Ex3.

Περιοριστικές τιμές τίθενται και στην υψηλή και χαμηλή πίεση του ρευστού λειτουργίας. Σε σχέση με τη χαμηλή πίεση, θα πρέπει η τιμή της να είναι τέτοια ώστε να ικανοποιείται ο περιορισμός $T_4 > T_7$, δηλαδή η θερμοκρασία συμπύκνωσης του ρευστού λειτουργίας, η οποία συναρτάται από την πίεση, να είναι μεγαλύτερη από το νερό ψύξης. Σε προηγούμενη παράγραφο περιγράφονται οι παραδοχές σε σχέση με τη μοντελοποίηση του εναλλάκτη Ex2 και εκεί αναφέρεται ότι η θερμοκρασία T_4 λαμβάνει την τιμή των 70°C και η T_7 την τιμή των 40°C. Η συγκεκριμένη τιμή της θερμοκρασίας T_4 επιβάλλει τον ορισμό της χαμηλής πίεσης σε τιμή $P_4 = 100\text{kPa}$. Η πίεση αυτή αποτελεί την τιμή της πίεσης κορεσμού του R-113 στη θερμοκρασία των 70°C. Η τιμή της υψηλής πίεσης ορίζεται μέσω του ακόλουθου κριτηρίου. Όπως παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα θερμοκρασίας εντροπίας (T-s), υπάρχει ένα κρίσιμο σημείο στο οποίο η κλίση της καμπύλης είναι κατακόρυφη. Αυτό το σημείο επιλέγεται ως σημείο λειτουργίας του κύκλου Rankine, έτσι ώστε κατά την αρχική εκτόνωση του ρευστού, ακριβώς μόλις αυτό εισέρχεται στο στρόβιλο, να μη δημιουργούνται υγροποιήσεις.



Σχήμα 70 Διάγραμμα καθορισμού υψηλής πίεσης λειτουργίας για κύκλο Rankine

Η μέγιστη επιτρεπτή τιμή πίεσης βάσει των παραπάνω είναι η $P=2700$. Η μείωση της υψηλής πίεσης κάτω από αυτό το όριο επιφέρει μείωση της απόδοσης λειτουργίας του κύκλου Rankine, συνεπώς ως υψηλή πίεση λειτουργίας ορίζεται η μέγιστη επιτρεπτή.

Αντικειμενική συνάρτηση κόστους: Διατυπώνεται σε αυτό το σημείο η αντικειμενική συνάρτηση κόστους Z_{ORC} της εγκατάστασης κύκλου Rankine οργανικού ρευστού:

$$Z_{ORC} = P_{presentbio}$$

βάσει της σχέσης 5.3.6, με C_{ORC} το αρχικό κόστος της εγκατάστασης και $P_{presentbio}$ το ετήσιο κέρδος της εγκατάστασης από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας, ανηγμένο σε παροντική αξία.

Ο υπολογισμός καθεμιάς από τις μεταβλητές αυτές γίνεται με τη χρήση των εξισώσεων που αναλύονται στο 5^ο κεφάλαιο και σχετίζονται με την αναγωγή του λειτουργικού κόστους σε παροντικό και τον υπολογισμό του αρχικού κόστους μιας εγκατάστασης. Ο υπολογισμός του C_{ORC} συμπεριλαμβάνει το αρχικό κόστος όλων των βασικών λειτουργικών στοιχείων της εγκατάστασης, που είναι οι εναλλάκτες Ex1, Ex2, Ex3, ο στρόβιλος και η αντλία. Το κάθε στοιχείο κόστους επηρεάζεται με διαφορετικό τρόπο από την τιμή που λαμβάνουν οι μεταβλητές απόφασης που ορίζονται στη συνέχεια.

Επιλογή μεταβλητών απόφασης: Παρουσιάζονται στη συνέχεια οι μεταβλητές που επιλεχθήκαν ως ανεξάρτητες, τα κριτήρια επιλογής τους και ο τρόπος με τον οποίον επιδρά η μεταβολή της τιμής της καθεμιάς στη λειτουργία της εγκατάστασης.

Η θερμοκρασία T_9 επιλέγεται ως μεταβλητή απόφασης και είναι αυτή που χαρακτηρίζει το ρεύμα εισόδου του διαθερμικού ελαίου στο βραστήρα. Όπως ειπώθηκε σε προηγούμενο εδάφιο, σχετικό με τις μεταβλητές απόφασης της εγκατάστασης καύσης, η μεταβλητή αυτή αποτελεί κοινή παράμετρο βελτιστοποίησης για τις δύο εγκαταστάσεις, που εξυπηρετεί τη βελτιστοποίηση λειτουργίας της συνολικής εγκατάστασης άμεσης καύσης – κύκλου Rankine οργανικού ρευστού.

Η αύξηση της τιμής της παραμέτρου επιφέρει αύξηση των επιφανειών εναλλαγής της εγκατάστασης καύσης και παράλληλη μείωση των επιφανειών εναλλαγής του κύκλου Rankine οργανικού ρευστού.

Η θερμοκρασιακή διαφορά ΔT επιλέγεται επίσης ως ανεξάρτητη μεταβλητή και είναι η διαφορά των τιμών των θερμοκρασιών T_3 και T_5 που χαρακτηρίζουν τη ροή που εξέρχεται και εισέρχεται αντίστοιχα στον εναλλάκτη Ex3.

Το κριτήριο για την επιλογή της παραμέτρου ως μεταβλητής απόφασης είναι το γεγονός ότι η έστω και μικρή μεταβολή της τιμής της επηρεάζει αισθητά το συντελεστή απόδοσης του κύκλου Rankine.

Η μείωση της τιμής της παραμέτρου επιφέρει αναγέννηση μεγαλύτερης θερμικής ισχύος από τον εναλλάκτη Ex3. Συνεπώς για την ίδια εξερχόμενη ηλεκτρική ισχύ της εγκατάστασης κύκλου Rankine οργανικού ρευστού, μεταβάλλεται η θερμική ισχύς που απαιτείται στο βραστήρα. Ως επόμενο, η μεταβολή της ΔT επηρεάζει τη διαστασιολόγηση της εγκατάστασης άμεσης καύσης που παρέχει την απαιτούμενη ισχύ στο βραστήρα του κύκλου Rankine.

Η ηλεκτρική ισχύς W_{el} της εγκατάστασης επιλέγεται ως ανεξάρτητη μεταβλητή. Το κριτήριο για την επιλογή της είναι προφανές, καθώς αυτή αποτελεί τη βασική παράμετρο που καθορίζει την τάξη μεγέθους της εγκατάστασης και η μεταβολή της μεταβάλλει τα σχετικά δεδομένα διαστασιολόγησης του συνόλου των λειτουργικών στοιχείων.

6.3 Η διαδικασία βελτιστοποίησης που ακολουθήθηκε

Η διαδικασία βελτιστοποίησης της συνολικής εγκατάστασης άμεσης καύσης – κύκλου Rankine οργανικού ρευστού γίνεται μέσω των βημάτων που παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ξεκίνησε από τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης του κύκλου Rankine στο πρόγραμμα EES. Ορίζονται αρχικά οι τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών T_9 , ΔT και W_{el} . Για την T_9 δοκιμάζεται το εύρος τιμών που κυμαίνονται από $270 - 350^\circ\text{C}$. Για τη μεταβλητή ΔT δοκιμάζονται οι τιμές 5, 10 και 15°C . Η ηλεκτρική ισχύς W_{el} της εγκατάστασης κύκλου Rankine λαμβάνει την τιμή $W_{el} = 500\text{KW}$.

Συμπληρωματικές μεταβλητές είναι οι R_1 και R_2 που παρουσιάζονται στο 5^ο κεφάλαιο και εξυπηρετούν τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης, ανηγμένης ως προς τη χρονική αξία χρήματος. Επίσης ο ετήσιος χρόνος λειτουργίας της εγκατάστασης καθορίζεται από το σενάριο που ακολουθείται σε σχέση με την αξιοποιούμενη βιομάζα.

Με την επίλυση του συστήματος εξισώσεων που αποτελούν τη μοντελοποίηση της εγκατάστασης, μέσω του προγράμματος EES, χρησιμοποιώντας τις τιμές των μεταβλητών απόφασης που αναφέρονται παραπάνω, προκύπτουν τα αποτελέσματα που παρατίθενται στο **Παράρτημα 1**.

Η μεταβλητή που υπολογίζεται στη μοντελοποίηση της εγκατάστασης κύκλου Rankine και εξυπηρετεί τη διαστασιολόγηση της εγκατάστασης άμεσης καύσης, είναι η θερμική ισχύς που απαιτείται μέσω του διαθερμικού ελαίου και συμβολίζεται με Q_{oil} . Οι τιμές που λαμβάνει είναι $Q_{oil} = 2285\text{KW}$ για $\Delta T = 5^\circ\text{C}$, $Q_{oil} = 2330\text{KW}$ για $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ και $Q_{oil} = 2376\text{KW}$ για $\Delta T = 15^\circ\text{C}$.

Τα επόμενα βήματα εκτελούνται με τη βοήθεια της μοντελοποίησης της εγκατάστασης άμεσης καύσης στο πρόγραμμα EES. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές σε αυτή τη μοντελοποίηση είναι ο μέσος συντελεστής μεταφοράς αερίων h , η θερμοκρασία T_5 των καυσαερίων μεταξύ των εναλλακτών Ex_2 και Ex_3 , η θερμοκρασία εξόδου του διαθερμικού ελαίου T_{11} και η μεταδιδόμενη θερμική ισχύς μέσω του ελαίου Q_{oil} . Το εύρος τιμών που δοκιμάζεται για το συντελεστή μεταφοράς h , είναι $60 - 80 \text{ W/m}^2\text{K}$. Η θερμοκρασία T_5 λαμβάνει διαφορετικό εύρος τιμών για τα ξεχωριστά σενάρια αξιοποιούμενου είδους βιομάζας. Για το σενάριο A τίθεται το εύρος $T_5 = 240 - 280^\circ\text{C}$, ενώ για το σενάριο B $T_5 = 190 - 230^\circ\text{C}$. Προκειμένου να καθοριστούν τα παραπάνω εύρη τιμών έγιναν δοκιμές των μοντέλων σε ευρύτερα πλαίσια τιμών, τα οποία περιορίζονται στην παρούσα εργασία μόνο στις κατάλληλες περιοχές, ως προσπάθεια να μειωθεί ο όγκος των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στο παράρτημα. Το εύρος τιμών της θερμοκρασίας εξόδου του

διαθερμικού ελαίου T_{11} έχει ήδη καθοριστεί στη μοντελοποίηση της εγκατάστασης κύκλου Rankine και ισούται με $T_{11} = 270 - 350^{\circ}\text{C}$. Η μεταδιδόμενη θερμική ισχύς Q_{oil} καθορίζεται επίσης από τη μοντελοποίηση της εγκατάστασης κύκλου Rankine και εξαρτάται από τη μεταβλητή απόφασης ΔT . Όπως αναφέρεται και παραπάνω, $Q_{oil} = 2285\text{KW}$ για $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$, $Q_{oil} = 2330\text{KW}$ για $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$ και $Q_{oil} = 2376\text{KW}$ για $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$.

Με την επίλυση του συστήματος εξισώσεων που αποτελούν τη μοντελοποίηση της εγκατάστασης, μέσω του προγράμματος EES, χρησιμοποιώντας τις τιμές των μεταβλητών απόφασης που αναφέρονται παραπάνω, προκύπτουν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο **Παράρτημα 1**. Τα αποτελέσματα αφορούν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} . Με πορτοκαλί χρώμα εμφανίζονται στα αποτελέσματα οι ελάχιστες τιμές της Z_{DC} για δεδομένες τιμές h και εύρος T_5 και T_{11} . Με κόκκινες τιμές εμφανίζονται τα ελάχιστα αποτελέσματα για δεδομένες τιμές h και T_5 , για εύρος T_{11} . Τα αποτελέσματα διαχωρίζονται σε σχέση με τις διαφορετικές τιμές της μεταβλητής ΔT .

Τα επόμενα βήματα περιγράφουν τον τρόπο βελτιστοποίησης της συνολικής εγκατάστασης άμεσης καύσης – κύκλου Rankine. Με τη βοήθεια του προγράμματος Microsoft Excell γίνεται γραμμική παρεμβολή των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης που προέκυψαν ως αποτελέσματα για διαφορετικά επιτόκια. Η γραμμική παρεμβολή αποσκοπεί στον υπολογισμό των ενδιάμεσων τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων μεταξύ των τιμών για δεδομένα επιτόκια. Η διαδικασία γίνεται με τον υπολογισμό 50 ενδιάμεσων τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων, μεταξύ των δεδομένων επιτοκίων. Οι τιμές των δεδομένων επιτοκίων διαφέρουν μεταξύ τους κατά 5 ποσοστιαίες μονάδες, συνεπώς υπολογίζονται οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων με βήμα επιτοκίου 0.1%.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται η σχέση 5.5.1 για τον υπολογισμό του εσωτερικού βαθμού απόδοσης των εγκαταστάσεων:

$$Z_{RR} = Z_{DC} \cdot \frac{1}{1 + i}$$

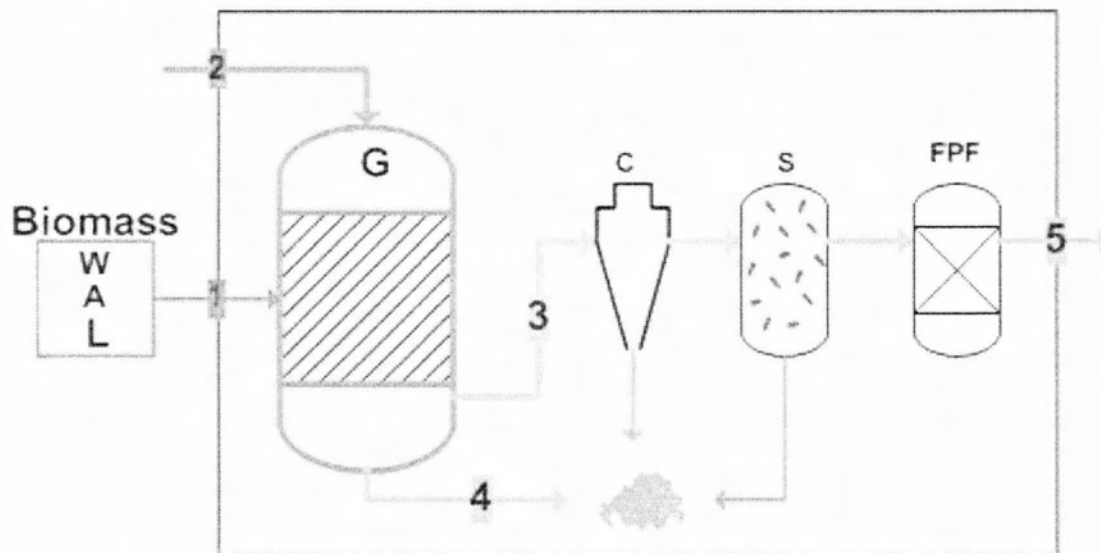
Η ελαχιστοποίηση της τιμής της διαφοράς των αντικειμενικών συναρτήσεων της εγκατάστασης καύσης και κύκλου Rankine επιφέρει το αποτέλεσμα του εσωτερικού βαθμού απόδοσης που χαρακτηρίζει το σύνολο της εγκατάστασης, για δεδομένες τιμές των μεταβλητών απόφασης. Τόσο οι τιμές των εσωτερικών βαθμών απόδοσης, όσο και οι τιμές των μεταβλητών απόφασης που οδηγούν σε αυτό το αποτέλεσμα, παρουσιάζονται στο **Παράρτημα 1**.

7. Υπολογιστική μελέτη εγκατάστασης αεριοποίησης – μηχανής εσωτερικής καύσης

7.1 Εγκατάσταση αεριοποίησης

7.1.1 Μοντελοποίηση εγκατάστασης αεριοποίησης

Βάσει της περιγραφής που γίνεται στο 3^ο κεφάλαιο, χρησιμοποιείται ως πρότυπη εγκατάσταση αεριοποίησης, αυτή του διαγράμματος ροής που ακολουθεί. Σύμφωνα με την ανάλυση της διαδικασίας της υπολογιστικής μελέτης που παρουσιάζεται στο 5^ο κεφάλαιο, εντοπίζονται στο συγκεκριμένο διάγραμμα ροής τα βασικά λειτουργικά στοιχεία της εγκατάστασης.



Σχήμα 71 Πρότυπο διάγραμμα ροής εγκατάστασης αεριοποίησης

Στον πίνακα που ακολουθεί, περιγράφονται οι κωδικές ονομασίες των λειτουργικών στοιχείων, που εμφανίζονται για πρακτικούς λόγους ως συντομογραφίες στο διάγραμμα ροής της εγκατάστασης.

Κωδική ονομασία λειτουργικού στοιχείου	Περιγραφή
Biomass	Τροφοδοσία βιομάζας στον αντιδραστήρα αεριοποίησης, με δεδομένη περιεκτικότητα σε υγρασία, τέφρα και λιγνίνη
G	Αντιδραστήρας αεριοποίησης
C	Κυκλώνας συγκράτησης μέρους των σωματιδίων που παρασέρνονται από τα παραγόμενα αέρια
S	Πλυντρίδα καθαρισμού παραγόμενου αερίου
FPF	Φίλτρο νανοσωματιδίων (με ίνες ή ύφασμα κτλ)

Πίνακας 33 Κατάλογος βασικών λειτουργικών στοιχείων

Ενώ στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται λεπτομέρειες σε σχέση με τα ρεύματα των ρευστών που παρουσιάζονται στην εγκατάσταση. Οι δείκτες i, j, k κ.ο.κ. που

εμφανίζονται για πρακτικούς λόγους στις μοντελοποιήσεις των λειτουργικών στοιχείων του 4^{ου} κεφαλαίου, υποκαθίστανται τώρα από αριθμητικούς δείκτες.

Αριθμητικός δείκτης ρεύματος	Περιγραφή
1	-Τροφοδοσία βιομάζας στον αντιδραστήρα αεριοποίησης
2	-Παροχή ατμοσφαιρικού αέρα στον αντιδραστήρα αεριοποίησης
3	-Έξοδος θερμών παραγόμενων αερίων από τον αντιδραστήρα -Διαδοχικό πέρασμα ρεύματος από διαφορετικά είδη φίλτρων
4	-Απόρριψη τέφρας από το εσωτερικό του αντιδραστήρα αεριοποίησης
5	-Έξοδος παραγόμενου αερίου – έτοιμου προς αξιοποίηση

Πίνακας 34 Κατάλογος ροής ρευμάτων

Εφαρμόζοντας τελικά τις μοντελοποιήσεις που έγιναν στο 4^ο κεφάλαιο, διαμορφώνεται η μοντελοποίηση της συνολικής εγκατάστασης αεριοποίησης που παρατίθεται στο παράρτημα 2.

7.1.2 Μορφοποίηση του προβλήματος βελτιστοποίησης

Παραδοχές του προβλήματος: Αρχικά αναφέρεται ότι σε σχέση με τις απώλειες θερμότητας του αντιδραστήρα αεριοποίησης γίνεται η παραδοχή ότι ισούνται με το 4% της θερμικής ισχύος που προκύπτει από την καύση ενός μέρους της βιομάζας.

Η ανάλυση που γίνεται σε σχέση με την εγκατάσταση, έχει ως στόχο τη σύνδεση των βασικών παραμέτρων λειτουργίας της, με τις ιδιότητες του παραγόμενου αερίου. Το σύστημα εξισώσεων που μοντελοποιεί τη λειτουργία του αντιδραστήρα βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της ενέργειας Gibbs των αμφίδρομων αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό του. Η μέθοδος αυτή δίδει διαφοροποιημένα αποτελέσματα σε σχέση με τα πραγματικά, σε αποδεκτό όμως πλαίσιο για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

Περιορισμοί: Η αντίδραση της αναγωγής του CO₂ πραγματοποιείται σύμφωνα με τη βιβλιογραφία στη θερμοκρασία των 800 °C. Η θερμοκρασιακή αυτή τιμή θα μπορούσε να αποτελεί τον κατώτατο περιορισμό, αλλά προκύπτει η αναγκαιότητα εξέτασης περισσότερων ζητημάτων. Παρόλο που ο υπολογιστικός κώδικας της εγκατάστασης αεριοποίησης στην παρούσα εργασία δεν έχει τη δυνατότητα να αναδείξει το ακόλουθο γεγονός, η δημιουργία πίσσας από τον αντιδραστήρα επηρεάζει τον τρόπο λειτουργίας της εγκατάστασης σε πραγματικές συνθήκες. Γεγονός είναι ότι η αύξηση της θερμοκρασίας αεριοποίησης προκαλεί μείωση του ρυθμού δημιουργίας πίσσας, όντας πολλές φορές η λύση στο ζήτημα.

Τίθεται λοιπόν ο περιορισμός ότι η θερμοκρασία αεριοποίησης πρέπει να πραγματοποιείται στους 1100°C και πάνω.

Αντικειμενική συνάρτηση κόστους: Διατυπώνεται σε αυτό το σημείο η αντικειμενική συνάρτηση κόστους Z_{gas} της εγκατάστασης αεριοποίησης:

$$Z_{gas}|_{RR} = Ctc + R_1 \cdot C_{bio} - R_2 \cdot Ctc$$

βάσει της σχέσης 5.3.6, με Ctc το αρχικό κόστος της εγκατάστασης και C_{bio} το ετήσιο λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης από την αγορά βιομάζας. Ο υπολογισμός καθεμιάς από τις μεταβλητές αυτές γίνεται με τη χρήση των εξισώσεων που αναλύονται στο 5^ο κεφάλαιο και σχετίζονται με την αναγωγή του λειτουργικού κόστους σε παροντικό και τον υπολογισμό του αρχικού κόστους μιας εγκατάστασης. Ο υπολογισμός του Ctc εκφράζει το αρχικό κόστος ολόκληρης της εγκατάστασης και υπολογίζεται βάσει της μεθοδολογίας του **Παραρτήματος 3** και της ανάλυσης που γίνεται στο 5^ο κεφάλαιο.

Επιλογή μεταβλητών απόφασης: Παρουσιάζονται στη συνέχεια οι μεταβλητές που επιλεχθήκαν ως ανεξάρτητες, τα κριτήρια επιλογής τους και ο τρόπος με τον οποίον επιδρά η μεταβολή της τιμής της καθεμιάς στη λειτουργία της εγκατάστασης.

Ο στοιχειομετρικός λόγος αέρα – καυσίμου Λ επιλέγεται ως μεταβλητή απόφασης και είναι η πλέον σημαντική παράμετρος επιρροής της λειτουργίας ενός αντιδραστήρα αεριοποίησης. Η μεταβολή της τιμής του προκαλεί μεταβολή στη θερμοκρασία αεριοποίησης και τελικά της σύστασης των παραγομένων αερίων.

Η θερμική ισχύς των παραγομένων αερίων, Q_{gas} επιλέγεται επίσης ως ανεξάρτητη μεταβλητή, καθώς βάσει αυτής μπορεί να διαστασιολογηθεί η εγκατάσταση αεριοποίησης.

Τέλος, τα δεδομένα που προκύπτουν από τις παραδοχές χρήσης βιομάζας σεναρίου Α και Β επίσης λειτουργούν ως μεταβλητές απόφασης.

7.2 Μηχανή εσωτερικής καύσης

Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζεται ότι η μοντελοποίηση σχετικά με τη Μ.Ε.Κ. αποτελείται μόνο από το διάγραμμα ενεργειακού ισοζυγίου που παρουσιάζεται στο αντίστοιχο εδάφιο του 4^{ου} κεφαλαίου. Ο κώδικας που παρουσιάζεται στο

Παράρτημα 2 περιλαμβάνει τις παραδοχές που γίνονται σχετικά με τη λειτουργία της Μ.Ε.Κ. Αυτές περιλαμβάνουν εκτός της θερμικής απόδοσης του κινητήρα $\eta=33\%$, την απόδοση των ηλεκτρικών στοιχείων, $\eta_{el}=96\%$.

7.3 Η διαδικασία βελτιστοποίησης που ακολουθήθηκε

Η διαδικασία βελτιστοποίησης της συνολικής εγκατάστασης αεριοποίησης – μηχανής εσωτερικής καύσης, γίνεται μέσω των βημάτων που παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ξεκίνησε από την επίλυση

Συμπληρωματικές μεταβλητές είναι οι R_1 και R_2 που παρουσιάζονται στο 5^ο κεφάλαιο και εξυπηρετούν τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης, ανηγμένης ως προς τη χρονική αξία χρήματος. Επίσης ο ετήσιος χρόνος λειτουργίας της εγκατάστασης καθορίζεται από το σενάριο που ακολουθείται σε σχέση με την αξιοποιούμενη βιομάζα.

Με την επίλυση του συστήματος εξισώσεων που αποτελούν τη μοντελοποίηση της εγκατάστασης, μέσω του προγράμματος EES, χρησιμοποιώντας τις τιμές των μεταβλητών απόφασης που αναφέρονται παραπάνω, προκύπτουν τα αποτελέσματα που παρατίθενται στο **Παράρτημα 1**.

Τα επόμενα βήματα περιγράφουν τον τρόπο βελτιστοποίησης της συνολικής εγκατάστασης άμεσης καύσης – κύκλου Rankine. Με τη βοήθεια του προγράμματος Microsoft Excell γίνεται γραμμική παρεμβολή των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης που προέκυψαν ως αποτελέσματα για διαφορετικά επιτόκια. Η γραμμική παρεμβολή αποσκοπεί στον υπολογισμό των ενδιάμεσων τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων μεταξύ των τιμών για δεδομένα επιτόκια. Η διαδικασία γίνεται με τον υπολογισμό 50 ενδιάμεσων τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων, μεταξύ των δεδομένων επιτοκίων. Οι τιμές των δεδομένων επιτοκίων διαφέρουν μεταξύ τους κατά 5 ποσοστιαίες μονάδες, συνεπώς υπολογίζονται οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων με βήμα επιτοκίου 0.1%.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται η σχέση 5.5.1 για τον υπολογισμό του εσωτερικού βαθμού απόδοσης των εγκαταστάσεων:

$$Z_{\text{gasification}} - Z_{\text{M.E.K.}} = 0$$

Η ελαχιστοποίηση της τιμής της διαφοράς των αντικειμενικών συναρτήσεων των δυο εγκαταστάσεων επιφέρει το αποτέλεσμα του εσωτερικού βαθμού απόδοσης που

χαρακτηρίζει το σύνολο της εγκατάστασης, για δεδομένες τιμές των μεταβλητών απόφασης. Τόσο οι τιμές των εσωτερικών βαθμών απόδοσης, όσο και οι τιμές των μεταβλητών απόφασης που οδηγούν σε αυτό το αποτέλεσμα, παρουσιάζονται στο **Παράρτημα 1**.

8. Παραρτήματα

Παράρτημα 1

8.1.1 Αποτελέσματα μοντελοποίησης κύκλου Rankine οργανικού ρευστού

Τιμή T_9 σε °C	Τιμή ΔT σε °C	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κέρδους Z_{ORC} για σενάριο A και τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
270	5	3221524	2393983	1828873
290	5	3225020	2397486	1832376
310	5	3227645	2400117	1835007
330	5	3229710	2402186	1837076
350	5	3231388	2403867	1838757
270	10	3291708	2464308	1899198
290	10	3295149	2467756	1902646
310	10	3297738	2470350	1905240
330	10	3299775	2472392	1907282
350	10	3301431	2474051	1908941
270	15	3329655	2502331	1937221
290	15	3333048	2505731	1940621
310	15	3335601	2508289	1943179
330	15	3337613	2510306	1945196
350	15	3339250	2511945	1946835

Τιμή T_9 σε °C	Τιμή ΔT σε °C	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κέρδους Z_{ORC} για σενάριο B και τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
270	5	2997504	2212283	1676153
290	5	3001000	2215786	1679656
310	5	3003625	2218417	1682287
330	5	3005690	2220486	1684356
350	5	3007368	2222167	1686037
270	10	3067688	2282608	1746478
290	10	3071129	2286056	1749926
310	10	3073718	2288650	1752520
330	10	3075755	2290692	1754562
350	10	3077411	2292351	1756221
270	15	3105635	2320631	1784501
290	15	3109028	2324031	1787901
310	15	3111581	2326589	1790459
330	15	3113593	2328606	1792476
350	15	3115230	2330245	1794115

8.1.2 Αποτελέσματα μοντελοποίησης εγκατάστασης άμεσης καύσης

Με πορτοκαλί χρώμα εμφανίζονται οι τοπικά ελάχιστες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για δεδομένες τιμές h και T_5 , ενώ με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι ολικά ελάχιστες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για δεδομένες τιμές h , T_5 , T_{11} και ΔT .

Σενάριο A, $T_{11} = 270^\circ\text{C}$, $\Delta T = 5^\circ\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W/m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^\circ\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	240	2916835	2450275	2130175
60	250	2916056	2448518	2127756
60	260	2916176	2447628	2126181
60	270	2917312	2447719	2125563
60	280	2919634	2448961	2126070
65	240	2914757	2447301	2126596
65	250	2914186	2445692	2124286
65	260	2914624	2445053	2122915
65	270	2916193	2445502	2122605
65	280	2919072	2447218	2123529
70	240	2914260	2445782	2124386
70	250	2913969	2444386	2122241
70	260	2914800	2444063	2121136
70	270	2916884	2444943	2121196
70	280	2920408	2447209	2122606
75	240	2915245	2445610	2123429
75	250	2915306	2444489	2121507
75	260	2916609	2444552	2120727
75	270	2919291	2445933	2121223
75	280	2923551	2448827	2123186
80	240	2917654	2446717	2123650
80	250	2918140	2445934	2122007
80	260	2919995	2446451	2121614
80	270	2923365	2448409	2122612
80	280	2928457	2452013	2125201

Σενάριο A, $T_{11} = 290^\circ\text{C}$, $\Delta T = 5^\circ\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W/m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^\circ\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	240	2917632	2451015	2130875
60	250	2916844	2449248	2128446
60	260	2916956	2448349	2126862
60	270	2918084	2448432	2126236
60	280	2920398	2449665	2126733

65	240	2915563	2448044	2127295
65	250	2914983	2446426	2124975
65	260	2915413	2445778	2123596
65	270	2916974	2446219	2123277
65	280	2919846	2447927	2124192
70	240	2915084	2446536	2125091
70	250	2914783	2445130	2122937
70	260	2915607	2444799	2121823
70	270	2917683	2445670	2121875
70	280	2921200	2447928	2123275
75	240	2916095	2446382	2124147
75	250	2916146	2445251	2122215
75	260	2917441	2445305	2121426
75	270	2920116	2446678	2121914
75	280	2924368	2449564	2123868
80	240	2918538	2447514	2124387
80	250	2919014	2446721	2122734
80	260	2920861	2447229	2122332
80	270	2924223	2449179	2123321
80	280	2929307	2452775	2125902

Σενάριο A, $T_{11} = 310^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	240	2918469	2451791	2131608
60	250	2917671	2450014	2129169
60	260	2917775	2449106	2127576
60	270	2918896	2449181	2126941
60	280	2921203	2450406	2127430
65	240	2916410	2448823	2128028
65	250	2915820	2447195	2125698
65	260	2916242	2446539	2124310
65	270	2917796	2446972	2123982
65	280	2920661	2448672	2124889
70	240	2915948	2447326	2125830
70	250	2915639	2445911	2123666
70	260	2916455	2445572	2122543
70	270	2918523	2446435	2122586
70	280	2922033	2448685	2123978
75	240	2916986	2447191	2124899
75	250	2917028	2446050	2122957
75	260	2918315	2446096	2122160
75	270	2920983	2447461	2122639
75	280	2925228	2450339	2124584
80	240	2919465	2448349	2125159
80	250	2919932	2447547	2123495

80	260	2921771	2448046	2123085
80	270	2925125	2449989	2124066
80	280	2930202	2453576	2126638

Σενάριο A, $T_{11} = 330^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	240	2919347	2452604	2132376
60	250	2918541	2450818	2129927
60	260	2918637	2449902	2128325
60	270	2919751	2449969	2127682
60	280	2922051	2451186	2128162
65	240	2917298	2449640	2128795
65	250	2916700	2448003	2126455
65	260	2917115	2447338	2125058
65	270	2918662	2447764	2124723
65	280	2921519	2449456	2125621
70	240	2916856	2448155	2126604
70	250	2916538	2446730	2124430
70	260	2917346	2446383	2123299
70	270	2919408	2447238	2123334
70	280	2922910	2449480	2124717
75	240	2917922	2448039	2125686
75	250	2917955	2446889	2123735
75	260	2919235	2446927	2122929
75	270	2921896	2448284	2123400
75	280	2926133	2451154	2125337
80	240	2920438	2449225	2125967
80	250	2920895	2448413	2124294
80	260	2922727	2448904	2123875
80	270	2926074	2450839	2124848
80	280	2931144	2454418	2127411

Σενάριο A, $T_{11} = 350^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	240	2920271	2453457	2133181
60	250	2919455	2451662	2130722
60	260	2919545	2450738	2129111
60	270	2920652	2450797	2128460
60	280	2922944	2452006	2128931
65	240	2918232	2450497	2129599
65	250	2917626	2448851	2127250

65	260	2918033	2448179	2125845
65	270	2919574	2448597	2125501
65	280	2922424	2450281	2126390
70	240	2917810	2449024	2127415
70	250	2917483	2447591	2125232
70	260	2918284	2447236	2124092
70	270	2920340	2448084	2124119
70	280	2923835	2450317	2125494
75	240	2918905	2448929	2126512
75	250	2918930	2447770	2124551
75	260	2920202	2447800	2123737
75	270	2922856	2449150	2124200
75	280	2927087	2452012	2126128
80	240	2921460	2450143	2126814
80	250	2921908	2449322	2125132
80	260	2923733	2449806	2124705
80	270	2927073	2451733	2125669
80	280	2932135	2455304	2128223

Σενάριο A, $T_{11} = 270^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W/m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	240	2967106	2491343	2164939
60	250	2966452	2489692	2162613
60	260	2966698	2488907	2161130
60	270	2967962	2489108	2160608
60	280	2970419	2490463	2161213
65	240	2965034	2488357	2161337
65	250	2964594	2486860	2159124
65	260	2965165	2486332	2157851
65	270	2966871	2486898	2157641
65	280	2969894	2488735	2158671
70	240	2964569	2486851	2159125
70	250	2964416	2485571	2157083
70	260	2965389	2485368	2156081
70	270	2967620	2486371	2156249
70	280	2971299	2488768	2157772
75	240	2965611	2486713	2158187
75	250	2965818	2485716	2156373
75	260	2967273	2485905	2155704
75	270	2970113	2487419	2156315
75	280	2974541	2490454	2158400
80	240	2968101	2487875	2158446
80	250	2968744	2487224	2156918
80	260	2970761	2487878	2156643
80	270	2974301	2489979	2157765

80	280	2979575	2493736	2160487
----	-----	---------	---------	---------

Σενάριο A, $T_{11} = 290^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	240	2967917	2492096	2165651
60	250	2967252	2490434	2163314
60	260	2967490	2489641	2161823
60	270	2968748	2489833	2161291
60	280	2971196	2491180	2161888
65	240	2965854	2489113	2162048
65	250	2965405	2487606	2159825
65	260	2965967	2487070	2158543
65	270	2967666	2487627	2158324
65	280	2970682	2489456	2159345
70	240	2965407	2487618	2159843
70	250	2965245	2486328	2157790
70	260	2966210	2486117	2156780
70	270	2968433	2487111	2156939
70	280	2972104	2489500	2158453
75	240	2966475	2487499	2158918
75	250	2966673	2486491	2157093
75	260	2968120	2486672	2156415
75	270	2970953	2488178	2157017
75	280	2975372	2491205	2159094
80	240	2969001	2488686	2159196
80	250	2969633	2488025	2157657
80	260	2971643	2488670	2157374
80	270	2975175	2490763	2158487
80	280	2980441	2494511	2161200

Σενάριο A, $T_{11} = 310^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	240	2968767	2492884	2166396
60	250	2968094	2491213	2164049
60	260	2968324	2490411	2162548
60	270	2969574	2490595	2162008
60	280	2972015	2491933	2162596
65	240	2966715	2489906	2162793
65	250	2966257	2488389	2160559
65	260	2966811	2487844	2159269
65	270	2968502	2488393	2159041

65	280	2971511	2490214	2160054
70	240	2966287	2488422	2160594
70	250	2966115	2487123	2158532
70	260	2967072	2486902	2157512
70	270	2969288	2487889	2157663
70	280	2972952	2490269	2159168
75	240	2967383	2488322	2159682
75	250	2967571	2487304	2157848
75	260	2969009	2487477	2157161
75	270	2971835	2488975	2157755
75	280	2976248	2491993	2159823
80	240	2969944	2489536	2159981
80	250	2970567	2488865	2158432
80	260	2972569	2489501	2158141
80	270	2976093	2491586	2159245
80	280	2981352	2495326	2161949

Σενάριο A, $T_{11} = 330^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W/m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	240	2969661	2493711	2167177
60	250	2968978	2492030	2164820
60	260	2969200	2491220	2163310
60	270	2970443	2491395	2162761
60	280	2972877	2492726	2163340
65	240	2967619	2490737	2163573
65	250	2967152	2489210	2161330
65	260	2967699	2488657	2160030
65	270	2969383	2489198	2159794
65	280	2972384	2491011	2160798
70	240	2967211	2489265	2161381
70	250	2967030	2487956	2159309
70	260	2967980	2487728	2158281
70	270	2970188	2488706	2158423
70	280	2973845	2491078	2159919
75	240	2968335	2489185	2160484
75	250	2968515	2488158	2158639
75	260	2969945	2488322	2157944
75	270	2972764	2489812	2158529
75	280	2977169	2492822	2160589
80	240	2970935	2490427	2160803
80	250	2971548	2489747	2159245
80	260	2973542	2490374	2158945
80	270	2977059	2492452	2160041
80	280	2982310	2496183	2162736

Σενάριο A, $T_{11} = 350^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	240	2970600	2494579	2167995
60	250	2969908	2492888	2165628
60	260	2970123	2492070	2164109
60	270	2971359	2492238	2163552
60	280	2973786	2493560	2164122
65	240	2968569	2491609	2164391
65	250	2968093	2490073	2162138
65	260	2968633	2489511	2160830
65	270	2970310	2490045	2160586
65	280	2973304	2491850	2161580
70	240	2968181	2490149	2162206
70	250	2967992	2488832	2160125
70	260	2968934	2488595	2159088
70	270	2971136	2489566	2159222
70	280	2974786	2491930	2160709
75	240	2969336	2490090	2161323
75	250	2969506	2489054	2159470
75	260	2970930	2489211	2158766
75	270	2973742	2490693	2159343
75	280	2978140	2493695	2161393
80	240	2971975	2491362	2161665
80	250	2972579	2490672	2160098
80	260	2974566	2491292	2159789
80	270	2978076	2493361	2160877
80	280	2983320	2497085	2163563

Σενάριο A, $T_{11} = 270^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	240	3018496	2533326	2200478
60	250	3017968	2531782	2198246
60	260	3018343	2531106	2196858
60	270	3019739	2531417	2196431
60	280	3022333	2532888	2197138
65	240	3016432	2530330	2196853
65	250	3016125	2528945	2194738
65	260	3016831	2528531	2193565
65	270	3018677	2529214	2193457
65	280	3021847	2531176	2194595
70	240	3016000	2528836	2194640

70	250	3015988	2527675	2192702
70	260	3017105	2527593	2191806
70	270	3019485	2528722	2192082
70	280	3023323	2531252	2193721
75	240	3017100	2528734	2193722
75	250	3017457	2527862	2192017
75	260	3019066	2528182	2191461
75	270	3022067	2529830	2192189
75	280	3026666	2533009	2194399
80	240	3019674	2529953	2194020
80	250	3020476	2529436	2192609
80	260	3022659	2530228	2192455
80	270	3026373	2532476	2193703
80	280	3031832	2536388	2196560

Σενάριο A, $T_{11} = 290^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	240	3019321	2534091	2201202
60	250	3018783	2532537	2198959
60	260	3019149	2531852	2197561
60	270	3020538	2532154	2197126
60	280	3023124	2533617	2197824
65	240	3017266	2531099	2197576
65	250	3016949	2529704	2195451
65	260	3017647	2529281	2194269
65	270	3019486	2529956	2194152
65	280	3022648	2531909	2195281
70	240	3016853	2529616	2195370
70	250	3016831	2528446	2193421
70	260	3017940	2528355	2192516
70	270	3020313	2529475	2192784
70	280	3024142	2531996	2194414
75	240	3017980	2529533	2194465
75	250	3018327	2528651	2192750
75	260	3019928	2528962	2192184
75	270	3022922	2530602	2192904
75	280	3027512	2533772	2195105
80	240	3020590	2530779	2194783
80	250	3021382	2530252	2193361
80	260	3023556	2531035	2193199
80	270	3027262	2533274	2194438
80	280	3032713	2537177	2197286

Σενάριο A, $T_{11} = 310^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	240	3020186	2534893	2201959
60	250	3019639	2533328	2199706
60	260	3019996	2532634	2198299
60	270	3021378	2532929	2197855
60	280	3023956	2534383	2198544
65	240	3018142	2531904	2198334
65	250	3017816	2530500	2196198
65	260	3018506	2530068	2195006
65	270	3020337	2530735	2194881
65	280	3023492	2532679	2196001
70	240	3017748	2530434	2196134
70	250	3017717	2529253	2194175
70	260	3018818	2529154	2193261
70	270	3021183	2530266	2193521
70	280	3025005	2532779	2195141
75	240	3018903	2530370	2195243
75	250	3019241	2529479	2193518
75	260	3020833	2529781	2192943
75	270	3023820	2531413	2193654
75	280	3028403	2534575	2195847
80	240	3021550	2531643	2195582
80	250	3022332	2531107	2194150
80	260	3024499	2531881	2193978
80	270	3028197	2534112	2195209
80	280	3033641	2538007	2198048

Σενάριο A, $T_{11} = 330^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	240	3021095	2535734	2202753
60	250	3020538	2534159	2200490
60	260	3020888	2533457	2199073
60	270	3022262	2533743	2198621
60	280	3024833	2535189	2199301
65	240	3019061	2532749	2199127
65	250	3018726	2531335	2196981
65	260	3019409	2530895	2195781
65	270	3021233	2531554	2195647
65	280	3024380	2533490	2196758
70	240	3018688	2531291	2196935
70	250	3018647	2530101	2194966

70	260	3019741	2529994	2194043
70	270	3022099	2531098	2194294
70	280	3025914	2533602	2195905
75	240	3019873	2531248	2196058
75	250	3020201	2530347	2194323
75	260	3021786	2530641	2193740
75	270	3024765	2532265	2194442
75	280	3029341	2535419	2196626
80	240	3022558	2532550	2196419
80	250	3023331	2532004	2194977
80	260	3025490	2532770	2194796
80	270	3029181	2534992	2196019
80	280	3034617	2538879	2198849

Σενάριο A, $T_{11} = 350^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W/m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	240	3022049	2536616	2203585
60	250	3021484	2535032	2201311
60	260	3021826	2534321	2199886
60	270	3023194	2534599	2199425
60	280	3025758	2536037	2200096
65	240	3020028	2533636	2199959
65	250	3019684	2532212	2197803
65	260	3020359	2531765	2196594
65	270	3022176	2532415	2196452
65	280	3025317	2534343	2197554
70	240	3019675	2532191	2197774
70	250	3019626	2530992	2195795
70	260	3020712	2530876	2194864
70	270	3023064	2531973	2195106
70	280	3026871	2534469	2196709
75	240	3020891	2532170	2196912
75	250	3021211	2531259	2195168
75	260	3022788	2531545	2194576
75	270	3025760	2533161	2195270
75	280	3030329	2536307	2197445
80	240	3023617	2533502	2197296
80	250	3024380	2532945	2195844
80	260	3026532	2533703	2195655
80	270	3030216	2535918	2196869
80	280	3035645	2539797	2199690

Σενάριο B, $T_{11} = 270^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$
--

Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε W/m^2K	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}C$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	190	2342215	2001021	1766648
60	200	2341679	1999285	1764101
60	210	2342383	1998708	1762655
60	220	2344081	1999051	1762077
60	230	2346672	2000217	1762274
65	190	2341214	1998567	1763211
65	200	2340564	1996669	1760469
65	210	2341296	1996056	1758944
65	220	2343151	1996478	1758392
65	230	2346024	1997833	1758714
70	190	2342558	1998252	1761770
70	200	2341861	1996254	1758892
70	210	2342705	1995680	1757356
70	220	2344814	1996265	1756906
70	230	2348073	1997902	1757439
75	190	2346129	1999942	1762181
75	200	2345453	1997904	1759221
75	210	2346490	1997441	1757740
75	220	2348947	1998274	1757469
75	230	2352702	2000287	1758298
80	190	2351869	2003562	1764356
80	200	2351278	2001541	1761367
80	210	2352591	2001261	1760007
80	220	2355494	2002426	1759990
80	230	2359854	2004911	1761199

Σενάριο Β, $T_{11} = 290^{\circ}C$, $\Delta T = 5^{\circ}C$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε W/m^2K	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}C$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	190	2344371	2003051	1768590
60	200	2343739	2001222	1765952
60	210	2344365	2000570	1764433
60	220	2345999	2000851	1763794
60	230	2348537	2001965	1763939
65	190	2343422	2000627	1765169
65	200	2342673	1998636	1762336
65	210	2343326	1997947	1760737
65	220	2345117	1998306	1760124
65	230	2347935	1999608	1760395
70	190	2344847	2000368	1763767
70	200	2344048	1998274	1760796
70	210	2344810	1997622	1759185
70	220	2346852	1998144	1758674

70	230	2350056	1999728	1759155
75	190	2348529	2002141	1764240
75	200	2347745	2000002	1761184
75	210	2348697	1999458	1759626
75	220	2351084	2000226	1759292
75	230	2354781	2002184	1760068
80	190	2354409	2005867	1766499
80	200	2353704	2003741	1763411
80	210	2354926	2003377	1761971
80	220	2357755	2004473	1761889
80	230	2362055	2006902	1763044

Σενάριο Β, $T_{11} = 310^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	190	2346635	2005181	1770627
60	200	2345902	2003256	1767895
60	210	2346448	2002526	1766299
60	220	2348016	2002742	1765597
60	230	2350500	2003802	1765689
65	190	2345742	2002790	1767222
65	200	2344890	2000700	1764295
65	210	2345461	1999933	1762619
65	220	2347184	2000227	1761943
65	230	2349947	2001475	1762161
70	190	2347252	2002590	1765861
70	200	2346346	2000395	1762794
70	210	2347023	1999663	1761105
70	220	2348996	2000118	1760530
70	230	2352143	2001647	1760958
75	190	2351050	2004448	1766399
75	200	2350153	2002205	1763244
75	210	2351016	2001577	1761607
75	220	2353331	2002276	1761207
75	230	2356969	2004179	1761929
80	190	2357077	2008288	1768748
80	200	2356252	2006051	1765556
80	210	2357380	2005600	1764033
80	220	2360133	2006625	1763884
80	230	2364371	2008995	1764983

Σενάριο Β, $T_{11} = 330^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$		
Τιμή συντελεστή μεταφοράς	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:

h σε W/m ² K		20%	25%	30%
60	190	2349016	2007420	1772766
60	200	2348179	2005395	1769936
60	210	2348641	2004583	1768261
60	220	2350141	2004732	1767493
60	230	2352567	2005736	1767530
65	190	2348181	2005063	1769379
65	200	2347222	2002871	1766353
65	210	2347708	2002022	1764598
65	220	2349362	2002249	1763856
65	230	2352066	2003440	1764019
70	190	2349781	2004926	1768062
70	200	2348764	2002625	1764893
70	210	2349353	2001809	1763124
70	220	2351254	2002196	1762483
70	230	2354341	2003667	1762855
75	190	2353701	2006874	1768668
75	200	2352688	2004521	1765409
75	210	2353457	2003806	1763689
75	220	2355697	2004434	1763221
75	230	2359273	2006278	1763886
80	190	2359884	2010832	1771111
80	200	2358934	2008480	1767810
80	210	2359963	2007937	1766201
80	220	2362637	2008889	1765982
80	230	2366810	2011198	1767023

Σενάριο Β, T₁₁ = 350°C, ΔT = 5°C

Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε W/m ² K	Τιμή θερμοκρασίας T ₅ σε °C	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z _{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	190	2351524	2009777	1775017
60	200	2350578	2007645	1772083
60	210	2350952	2006749	1770325
60	220	2352381	2006828	1769489
60	230	2354748	2007774	1769468
65	190	2350750	2007455	1771648
65	200	2349679	2005156	1768518
65	210	2350075	2004221	1766680
65	220	2351657	2004378	1765870
65	230	2354301	2005511	1765975
70	190	2352445	2007383	1770376
70	200	2351312	2004973	1767102
70	210	2351808	2004069	1765249
70	220	2353633	2004384	1764538
70	230	2356659	2005796	1764853
75	190	2356494	2009426	1771055

75	200	2355357	2006959	1767687
75	210	2356030	2006154	1765880
75	220	2358191	2006708	1765341
75	230	2361703	2008490	1765947
80	190	2362839	2013509	1773596
80	200	2361758	2011037	1770182
80	210	2362685	2010399	1768483
80	220	2365276	2011273	1768190
80	230	2369381	2013519	1769171

Σενάριο Β, $T_{II} = 270^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	190	2380286	2032356	1793367
60	200	2379916	2030764	1790947
60	210	2380789	2030331	1789628
60	220	2382660	2030820	1789179
60	230	2385429	2032136	1789506
65	190	2379314	2029902	1789911
65	200	2378834	2028152	1787300
65	210	2379742	2027688	1785906
65	220	2381778	2028263	1785487
65	230	2384837	2029774	1785946
70	190	2380726	2029624	1788485
70	200	2380207	2027778	1785742
70	210	2381234	2027359	1784342
70	220	2383533	2028105	1784032
70	230	2386990	2029908	1784709
75	190	2384407	2031386	1788943
75	200	2383914	2029506	1786122
75	210	2385144	2029205	1784784
75	220	2387802	2030207	1784660
75	230	2391766	2032397	1785641
80	190	2390295	2035112	1791195
80	200	2389895	2033255	1788352
80	210	2391411	2033147	1787141
80	220	2394527	2034491	1787280
80	230	2399112	2037165	1788653

Σενάριο Β, $T_{II} = 290^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	190	2382478	2034419	1795341

60	200	2382010	2032732	1792829
60	210	2382804	2032223	1791435
60	220	2384610	2032649	1790924
60	230	2387325	2033912	1791199
65	190	2381559	2031997	1791901
65	200	2380979	2030151	1789198
65	210	2381807	2029610	1787729
65	220	2383777	2030121	1787248
65	230	2386781	2031579	1787655
70	190	2383055	2031776	1790515
70	200	2382432	2029832	1787677
70	210	2383375	2029335	1786202
70	220	2385606	2030016	1785829
70	230	2389006	2031764	1786454
75	190	2386848	2033622	1791036
75	200	2386246	2031639	1788119
75	210	2387388	2031257	1786702
75	220	2389976	2032192	1786514
75	230	2393882	2034326	1787442
80	190	2392880	2037458	1793375
80	200	2392364	2035493	1790431
80	210	2393787	2035300	1789139
80	220	2396828	2036574	1789212
80	230	2401352	2039190	1790530

Σενάριο Β, $T_{11} = 310^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$

Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	190	2384780	2036585	1797411
60	200	2384210	2034800	1794803
60	210	2384922	2034211	1793332
60	220	2386661	2034572	1792757
60	230	2389320	2035780	1792977
65	190	2383918	2034196	1793989
65	200	2383234	2032250	1791189
65	210	2383977	2031629	1789642
65	220	2385879	2032074	1789097
65	230	2388827	2033477	1789450
70	190	2385501	2034036	1792645
70	200	2384769	2031989	1789709
70	210	2385626	2031410	1788154
70	220	2387787	2032023	1787717
70	230	2391129	2033716	1788287
75	190	2389413	2035970	1793233
75	200	2388697	2033880	1790214
75	210	2389748	2033413	1788716

75	220	2392262	2034279	1788462
75	230	2396107	2036355	1789334
80	190	2395595	2039920	1795663
80	200	2394957	2037844	1792613
80	210	2396284	2037561	1791237
80	220	2399248	2038763	1791242
80	230	2403709	2041320	1792502

Σενάριο Β, $T_{11} = 330^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	190	2387201	2038861	1799586
60	200	2386525	2036973	1796878
60	210	2387152	2036302	1795326
60	220	2388821	2036595	1794684
60	230	2391422	2037745	1794848
65	190	2386398	2036507	1796182
65	200	2385605	2034457	1793281
65	210	2386262	2033753	1791654
65	220	2388093	2034129	1791042
65	230	2390982	2035475	1791339
70	190	2388074	2036411	1794882
70	200	2387229	2034257	1791844
70	210	2387996	2033592	1790207
70	220	2390083	2034136	1789702
70	230	2393365	2035770	1790216
75	190	2392111	2038437	1795540
75	200	2391275	2036236	1792415
75	210	2392232	2035680	1790833
75	220	2394669	2036474	1790510
75	230	2398452	2038490	1791325
80	190	2398451	2042509	1798067
80	200	2397686	2040315	1794906
80	210	2398913	2039939	1793443
80	220	2401796	2041066	1793376
80	230	2406191	2043561	1794577

Σενάριο Β, $T_{11} = 350^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	190	2389750	2041256	1801873
60	200	2388963	2039261	1799060
60	210	2389501	2038503	1797424

60	220	2391098	2038725	1796712
60	230	2393639	2039817	1796818
65	190	2389011	2038940	1798488
65	200	2388104	2036781	1795482
65	210	2388670	2035989	1793770
65	220	2390427	2036294	1793089
65	230	2393255	2037581	1793328
70	190	2390784	2038910	1797236
70	200	2389820	2036645	1794090
70	210	2390493	2035890	1792367
70	220	2392504	2036361	1791792
70	230	2395723	2037935	1792247
75	190	2394952	2041033	1797968
75	200	2393991	2038716	1794732
75	210	2394849	2038068	1793062
75	220	2397207	2038786	1792666
75	230	2400924	2040741	1793421
80	190	2401458	2045233	1800595
80	200	2400561	2042917	1797319
80	210	2401683	2042444	1795764
80	220	2404482	2043493	1795622
80	230	2408808	2045923	1796762

Σενάριο Β, $T_{11} = 270^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W/m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	190	2419202	2064386	1820680
60	200	2419001	2062939	1818388
60	210	2420046	2062653	1817198
60	220	2422092	2063291	1816880
60	230	2425042	2064759	1817340
65	190	2418260	2061934	1817205
65	200	2417954	2060333	1814726
65	210	2419041	2060021	1813465
65	220	2421261	2060751	1813182
65	230	2424509	2062422	1813780
70	190	2419744	2061694	1815795
70	200	2419405	2060002	1813187
70	210	2420618	2059742	1811926
70	220	2423110	2060650	1811759
70	230	2426768	2062622	1812582
75	190	2423536	2063531	1816301
75	200	2423231	2061810	1813621
75	210	2424656	2061675	1812428
75	220	2427518	2062849	1812454
75	230	2431697	2065218	1813591

80	190	2429576	2067365	1818633
80	200	2429372	2065675	1815937
80	210	2431093	2065741	1814879
80	220	2434427	2067268	1815177
80	230	2439241	2070134	1816716

Σενάριο B, $T_{11} = 290^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	190	2421430	2066484	1822686
60	200	2421129	2064940	1820300
60	210	2422094	2064576	1819035
60	220	2424075	2065151	1818653
60	230	2426970	2066565	1819060
65	190	2420543	2064064	1819228
65	200	2420136	2062365	1816655
65	210	2421140	2061975	1815318
65	220	2423293	2062640	1814972
65	230	2426486	2064257	1815517
70	190	2422113	2063883	1817859
70	200	2421667	2062091	1815155
70	210	2422796	2061750	1813817
70	220	2425219	2062593	1813586
70	230	2428820	2064510	1814356
75	190	2426021	2065805	1818430
75	200	2425604	2063980	1815652
75	210	2426940	2063762	1814379
75	220	2429730	2064868	1814340
75	230	2433849	2067181	1815423
80	190	2432207	2069752	1820851
80	200	2431884	2067953	1818052
80	210	2433511	2067932	1816911
80	220	2436769	2069387	1817142
80	230	2441521	2072195	1818625

Σενάριο B, $T_{11} = 310^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	190	2423770	2068685	1824790
60	200	2423366	2067042	1822307
60	210	2424247	2066597	1820963
60	220	2426160	2067105	1820516
60	230	2428998	2068463	1820868

65	190	2422942	2066300	1821350
65	200	2422428	2064500	1818679
65	210	2423347	2064028	1817263
65	220	2425431	2064626	1816852
65	230	2428567	2066187	1817342
70	190	2424601	2066181	1820024
70	200	2424045	2064285	1817221
70	210	2425086	2063861	1815803
70	220	2427437	2064635	1815505
70	230	2430979	2066495	1816220
75	190	2428630	2068193	1820664
75	200	2428097	2066259	1817782
75	210	2429341	2065955	1816427
75	220	2432056	2066990	1816321
75	230	2436114	2069245	1817347
80	190	2434970	2072258	1823179
80	200	2434524	2070344	1820272
80	210	2436053	2070232	1819046
80	220	2439232	2071615	1819207
80	230	2443919	2074362	1820632

Σενάριο Β, $T_{11} = 330^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	190	2426232	2070999	1827000
60	200	2425719	2069251	1824416
60	210	2426514	2068722	1822989
60	220	2428356	2069161	1822474
60	230	2431136	2070462	1822769
65	190	2425465	2068650	1823580
65	200	2424840	2066744	1820806
65	210	2425671	2066187	1819308
65	220	2427683	2066716	1818829
65	230	2430758	2068219	1819262
70	190	2427218	2068596	1822299
70	200	2426547	2066592	1819392
70	210	2427496	2066080	1817890
70	220	2429773	2066783	1817524
70	230	2433253	2068584	1818181
75	190	2431375	2070703	1823011
75	200	2430720	2068656	1820022
75	210	2431868	2068261	1818581
75	220	2434505	2069223	1818404
75	230	2438500	2071417	1819372
80	190	2437877	2074892	1825624
80	200	2437301	2072859	1822605

80	210	2438728	2072653	1821289
80	220	2441825	2073958	1821378
80	230	2446445	2076642	1822743

Σενάριο Β, $T_{11} = 350^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$				
Τιμή συντελεστή μεταφοράς h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Τιμή θερμοκρασίας T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{DC} για τιμή επιτοκίου:		
		20%	25%	30%
60	190	2428824	2073434	1829325
60	200	2428199	2071577	1826634
60	210	2428904	2070960	1825121
60	220	2430672	2071327	1824536
60	230	2433390	2072567	1824771
65	190	2428122	2071123	1825925
65	200	2427381	2069106	1823044
65	210	2428120	2068461	1821460
65	220	2430056	2068917	1820910
65	230	2433070	2070359	1821284
70	190	2429975	2071138	1824693
70	200	2429183	2069020	1821676
70	210	2430036	2068418	1820086
70	220	2432235	2069047	1819649
70	230	2435652	2070786	1820247
75	190	2434265	2073344	1825480
75	200	2433483	2071179	1822378
75	210	2434531	2070690	1820847
75	220	2437087	2071576	1820597
75	230	2441015	2073706	1821504
80	190	2440937	2077664	1828196
80	200	2440226	2075506	1825060
80	210	2441547	2075201	1823651
80	220	2444558	2076427	1823663
80	230	2449109	2079045	1824966

8.1.3 Αποτελέσματα εσωτερικού βαθμού απόδοσης συνολικής εγκατάστασης άμεσης καύσης – οργανικού κύκλου Rankine

Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι τιμές του εσωτερικού βαθμού απόδοσης που αντιστοιχεί σε βέλτιστη εγκατάσταση.

Σενάριο Α				
Τιμή εσωτερικού βαθμού απόδοσης	Τιμές μεταβλητών απόφασης			
	ΔT σε $^{\circ}\text{C}$	T_{11} σε $^{\circ}\text{C}$	T_5 σε $^{\circ}\text{C}$	h σε $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
24.30%	5	270	260	70
24.35%	5	290	260	70
24.35%	5	310	260	70

24.40%	5	330	260	70
24.40%	5	350	260	70
24.45%	10	270	260	70
24.50%	10	290	260	70
24.55%	10	310	260	70
24.55%	10	330	260	70
24.55%	10	350	260	70
24.40%	15	270	260	70
24.45%	15	290	260	70
24.45%	15	310	260	70
24.45%	15	330	260	70
24.50%	15	350	260	70

Σενάριο Β				
Τιμή εσωτερικού βαθμού απόδοσης	Τιμές μεταβλητών απόφασης			
	ΔT σε $^{\circ}C$	T_{11} σε $^{\circ}C$	T_5 σε $^{\circ}C$	h σε W/m^2K
28.65%	5	270	220	70
28.70%	5	290	220	70
28.70%	5	310	220	70
28.70%	5	330	220	70
28.70%	5	350	220	70
29.20%	10	270	220	70
29.20%	10	290	220	70
29.25%	10	310	220	70
29.25%	10	330	220	70
29.25%	10	350	220	70
29.55%	15	270	220	70
29.60%	15	290	220	70
29.60%	15	310	220	70
29.60%	15	330	220	70
29.60%	15	350	220	70

8.1.4 Αποτελέσματα εγκατάστασης αεριοποίησης – μηχανής εσωτερικής καύσης

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης κόστους της εγκατάστασης αεριοποίησης.

Λ	$T_{\text{gasification}}$ σε $^{\circ}C$	Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης για σενάριο Α και επιτόκια:		
		25%	30%	40%
0.16	991	2936000	2722000	2458000
0.17	1060	3018000	2802000	2537000
0.18	1133	3102000	2884000	2617000
0.19	1207	3190000	2969000	2699000
0.20	1280	3282000	3058000	2786000

Λ	T _{gasification} σε °C	Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης για σενάριο Β και επιτόκια:		
		25%	30%	40%
0.16	965	3049000	2829000	2560000
0.17	1028	3135000	2914000	2643000
0.18	1095	3224000	3000000	2727000
0.19	1164	3316000	3090000	2815000
0.20	1233	3414000	3185000	2907000

Ενώ οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης κέρδους της Μ.Ε.Κ. είναι:

Ηλεκτρική ισχύς 500 KW	Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης για σενάριο Β και επιτόκια:		
	25%	30%	40%
	3524000	2894000	2070000

Με το συνδυασμό των δύο ομάδων τιμών, προκύπτει το συνολικό επιτόκιο της εγκατάστασης.

Παράρτημα 2

9.2.1 Υπολογιστικός κώδικας EES εγκατάστασης άμεσης καύσης

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το σύστημα εξισώσεων εκ του οποίου μοντελοποιείται η εγκατάσταση άμεσης καύσης. Το παρόν μοντέλο συμπεριλαμβάνει τον υπολογισμό των συντελεστών μεταφοράς και της πτώσης πίεσης στους αυλούς των εναλλακτών Ex1 και Ex2. Στο κέλυφος του εναλλάκτη Ex3 γίνεται η υπόθεση ότι η πτώση πίεσης είναι ίδια με τους αυλούς, και ο συντελεστής μεταφοράς ισούται με 70% αυτού για τους αυλούς. Οι συντελεστές μεταφοράς σε εναλλάκτη Ex1 και κέλυφος Ex2 θεωρούνται ίσοι με $750 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Επίσης στο diagram window δίδονται οι τιμές των R1 και R2 για τον καθορισμό των επιτοκίων, η περιεκτικότητα της βιομάζας σε υγρασία και τέφρα W και A και επίσης σε κυτταρίνη έτσι ώστε να υπολογίζεται η τιμή της HHV. Δίδονται ακόμα οι μέγιστες επιτρεπτές τιμές των θερμοκρασιών των θερμοκρασιών φλόγας και καυσαερίων T_f και T₂ που ορίζουν τα σενάρια A και B, όπως και το κόστος της βιομάζας biocost, ο ετήσιος χρόνος λειτουργίας της εγκατάστασης t σε ώρες και η θερμική ισχύς της εγκατάστασης Q_{oil}.

Μέσω της διαμόρφωσης παραμετρικών πινάκων στο EES δοκιμάζονται οι διάφορες τιμές των μεταβλητών απόφασης και εξερχόμενο αποτέλεσμα είναι η αντικειμενική συνάρτηση κόστους, οι τιμές της οποίας παρουσιάζονται στο παράρτημα 1.

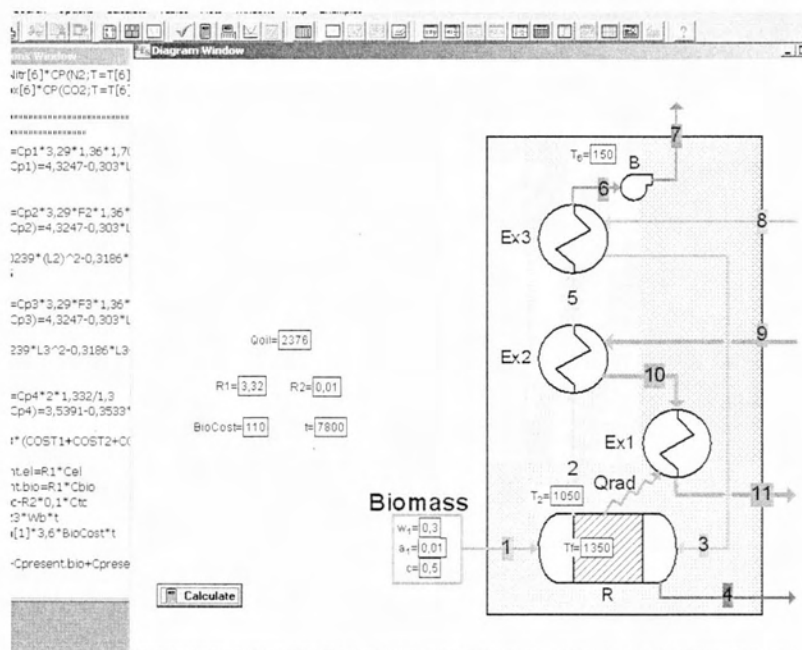
```
"AIR DATA"
Oxyg[8]=0,21
Nitr[8]=0,78
W[8]=0,01
P[8]=101,3
T[8]=25

"BIOMASS DATA"
CPa=0,75
T[1]=298

"REACTOR DATA"
Thloss=0,04
DPR=0,99
T[4]=600
Arej=0,6

"Thermal fluid DATA"
miw[9]=0,00033
cp[9]=2,228
cp[10]=2,228
ro[9]=895,8
T[9]=150

"EXCHANGER2 DATA"
"tubes"
OD2=0,0381
```



ID2=0,03388
kw2=45
Rinf2=0,001761
Ps2=1
h=hin2

"shell"
P[9]=101,3
Routf2=0

"EXCHANGER3 DATA"

"tubes"
OD3=0,0381
ID3=0,03388
kw3=45
Rinf3=0,001761
Ps3=1
hin2=hin3
"shell"
NPt3=1,25
Routf3=0

....."TOTAL".....

Qoil=Qrad+Qex2
ntot=Qoil/Qtot

....."BIOMASS".....

comb=1-w[1]-A[1]
C[1]=comb*c
HHV=comb*(18,6*c+24,9*(1-c))
Carb[1]=comb*(0,4697-0,0243*C)
Oxyg[1]=comb*(0,4386+0,0541*C)
Nitr[1]=comb*(0,0547-0,0547*C)
Hydr[1]=comb*(0,037+0,0249*C)

....."R".....

Arej=m[4]/(A[1]*m[1])
A[1]*m[1]=A[2]*m[2]+m[4]
Oxygst=m[1]*(2,6667*Carb[1]+8*Hydr[1]-Oxyg[1])
Lambda=Oxyg[3]*m[3]/Oxygst
AtoF=m[3]/m[1]
m[1]+m[3]=m[2]+m[4]
m[2]*Oxyg[2]=m[3]*Oxyg[3]-Oxygst
m[2]*CarbDiox[2]=3,6667*m[1]*Carb[1]
m[2]*Nitr[2]=m[1]*Nitr[1]+m[3]*Nitr[3]
m[2]*W[2]=m[1]*W[1]+m[3]*W[3]+9*m[1]*Hydr[1]
Qtot=1000*HHV*m[1]
Qtot=(Thloss*Qtot)+(m[4]*CPa*(T[4]-T[1]))-m[3]*cp[3]*(T[3]-T[1])+Qrad+m[2]*cp[2]*(T[2]-T[1])
cp[2]=Oxyg[2]*CP(O2;T=T[2])+CarbDiox[2]*CP(CO2;T=T[2])+Nitr[2]*CP(N2;T=T[2])+W[2]*CP(Steam;T=T[2];P=P[2])

P[2]=DPR*P[3]

....."EX1".....

Qrad=m[10]*cp[10]*(T[11]-T[10])
Arad = Qtot/300
crad=0,0021
Tw=(T[10]+T[11])/2
Qrad=crad*Arad*(((Tf+273)/100)^4)-(((Tw+273)/100)^4))
Nrad=Qrad/Qoil

....."EX2".....

Qex2=m[2]*cp[2]*(T[2]-T[5])
Qex2=m[9]*cp[9]*(T[10]-T[9])
m[2]=m[5]
m[9]=m[10]

Nitr[2]=Nitr[5]
Oxyg[2]=Oxyg[5]
CarbDiox[2]=CarbDiox[5]

```

W[2]=W[5]
A[2]=A[5]

Qex2=Aex2*Utot2*DeltaTLn2*Ft2/1000
Ex2=Atot2/Aex2
Ex2=1
Atot2=3,1415*N2*L2*OD2*Ps2
Ain2=3,1415*N2*L2*ID2*Ps2
1/Utot2=((Atot2/(Ain2*hin2)))+(1/hout2))+((ID2*LN(Atot2/Ain2))/(2*kw2))+((Rinf2*Atot2/Ain2)+Routf2)

"tubes"
hin2=0,023*(k[2]/ID2)*(((ID2*G[2])/mi[2])^0,8)*(((1000*cp[2]*mi[2])/k[2])^(1/3))*((mi[2]/miw[2])^0,14)
G[2]=1,2733*m[2]/(N2*ID2^2)
Tm25=(T[2]+T[5])/2
Tm910=(T[9]+T[10])/2
Tm2=(Tm25+Tm910)/2
k[2]=Nitr[2]*CONDUCTIVITY(N2;T=Tm25)+Oxyg[2]*CONDUCTIVITY(O2;T=Tm25)+CarbDiox[2]*CONDUCTIVITY(CO2;T=Tm25)+W[2]*CONDUCTIVITY(Steam;T=Tm25;P=P[2])
mi[2]=Nitr[2]*VISCOSITY(N2;T=Tm25)+Oxyg[2]*VISCOSITY(O2;T=Tm25)+CarbDiox[2]*VISCOSITY(CO2;T=Tm25)+W[2]*VISCOSITY(Steam;T=Tm25;P=P[2])
miw[2]=Nitr[2]*VISCOSITY(N2;T=Tm2)+Oxyg[2]*VISCOSITY(O2;T=Tm2)+CarbDiox[2]*VISCOSITY(CO2;T=Tm2)+W[2]*VISCOSITY(Steam;T=Tm2;P=P[2])

"pressure drop tubes"
1000*DELTAP25=2*((0,046*(((ID2*G[2])/mi[2])^(-0,2)))*(G[2]^2)*L2*Ps2/(ro[2]*ID2*1,02*((mi[2]/miw[2])^0,14)))
ro[2]=Nitr[2]*DENSITY(N2;T=Tm25;P=P[2])+Oxyg[2]*DENSITY(O2;T=Tm25;P=P[2])+CarbDiox[2]*DENSITY(CO2;T=Tm25;P=P[2])+W[2]*DENSITY(Steam;T=Tm25;P=P[2])
P[5]=P[2]-DELTAP25

"shell"
hout2=750

"delta T"
DeltaTLn2=((T[2]-T[10])-(T[5]-T[9]))/LN(abs((T[2]-T[10])/(T[5]-T[9])))
Ft2=1

*****EX3*****
Qex3=m[5]*cp[5]*(T[5]-T[6])
Qex3=m[8]*cp[3]*(T[3]-T[8])
cp[5]=Oxyg[5]*CP(O2;T=T[5])+CarbDiox[5]*CP(CO2;T=T[5])+Nitr[5]*CP(N2;T=T[5])+W[5]*CP(Steam;T=T[5];P=P[5])
cp[8]=Nitr[8]*CP(N2;T=T[8])+Oxyg[8]*CP(O2;T=T[8])+W[8]*CP(Steam;T=T[8];P=P[8])
cp[3]=Nitr[8]*CP(N2;T=T[8])+Oxyg[8]*CP(O2;T=T[8])
m[6]=m[5]
m[8]=m[3]

Oxyg[8]=Oxyg[3]
Nitr[8]=Nitr[3]
W[8]=W[3]

Nitr[6]=Nitr[5]
Oxyg[6]=Oxyg[5]
CarbDiox[6]=CarbDiox[5]
W[6]=W[5]
A[6]=A[5]

Qex3=Aex3*Utot3*DeltaTLn3*Ft3/1000
Ex3=Atot3/Aex3
Ex3=1
Atot3=3,1415*N3*L3*OD3*Ps3
Ain3=3,1415*N3*L3*ID3*Ps3
1/Utot3=((Atot3/(Ain3*hin3)))+(1/hout3))+((ID3*LN(Atot3/Ain3))/(2*kw3))+((Rinf3*Atot3/Ain3)+Routf3)

"tubes"
hin3=0,023*(k[5]/ID3)*(((ID3*G[5])/mi[5])^0,8)*(((1000*cp[5]*mi[5])/k[5])^(1/3))*((mi[5]/miw[5])^0,14)
G[5]=1,2733*m[5]/(N3*ID3^2)
Tm56=((T[5]+T[6])/2)
Tm83=((T[8]+T[3])/2)
Tm3=(Tm56+Tm83)/2
k[5]=Nitr[5]*CONDUCTIVITY(N2;T=Tm56)+Oxyg[5]*CONDUCTIVITY(O2;T=Tm56)+CarbDiox[5]*CONDUCTIVITY(CO2;T=Tm56)+W[5]*CONDUCTIVITY(Steam;T=Tm56;P=P[5])

```

```
mi[5]=Nitr[5]*VISCOSITY(N2;T=Tm56)+Oxyg[5]*VISCOSITY(O2;T=Tm56)+CarbDiox[5]*VISCOSITY(CO2;T=Tm56)
+W[5]*VISCOSITY(Steam;T=Tm56;P=P[5])
miw[5]=Nitr[5]*VISCOSITY(N2;T=Tm3)+Oxyg[5]*VISCOSITY(O2;T=Tm3)+CarbDiox[5]*VISCOSITY(CO2;T=Tm3)+
+W[5]*VISCOSITY(Steam;T=Tm3;P=P[5])
```

```
"pressure drop tubes"
1000*DELTAP56=2*((0,046*((ID3*G[5])/mi[5]))^(-
0,2))*((G[5]^2)*L3*Ps3/(ro[5]*ID3*1,02*((mi[5]/miw[5])^0,14))
ro[5]=Nitr[5]*DENSITY(N2;T=Tm56;P=P[5])+Oxyg[5]*DENSITY(O2;T=Tm56;P=P[5])+CarbDiox[5]*DENSITY(CO2;
T=Tm56;P=P[5])+W[5]*DENSITY(Steam;T=Tm56;P=P[5])
P[6]=P[5]-DELTAP56
```

```
"shell"
hout3=0,7*hin3
```

```
"pressure drop shell"
P[3]=P[8]-DELTAP83
DELTAP83=DELTAP56
```

```
"delta T"
DeltaTLn3=((T[5]-T[3])-(T[6]-T[8]))/LN(abs((T[5]-T[3])/(T[6]-T[8])))
Ft3=1
```

```
*****B*****
m[6]=m[7]
Wb=(P[7]-P[6])*m[6]/(ntotb*ro[5])
P[7]=101,3
ntotb=0,65
(1-ntotb)*Wb=m[6]*cp[6]*(T[6]-T[7])
cp[6]=Nitr[6]*CP(N2;T=T[6])+Oxyg[6]*CP(O2;T=T[6])+CarbDiox[6]*CP(CO2;T=T[6])+W[6]*CP(Steam;T=T[6];P=
P[6])
```

```
*****COST FUNCTIONS*****
```

```
COST1=Cp1*3,29*1,36*1,705/1,3
LOG10(Cp1)=4,3247-0,303*LOG10(Arad)+0,1634*(LOG10(Arad)^2)
```

```
COST2=Cp2*3,29*F2*1,36*1,705/1,3
LOG10(Cp2)=4,3247-0,303*LOG10(Atot2)+0,1634*(LOG10(Atot2)^2)
"F2=0,0239*(L2)^2-0,3186*(L2)+2,012"
f2=0,95
```

```
COST3=Cp3*3,29*F3*1,36*1,705/1,3
LOG10(Cp3)=4,3247-0,303*LOG10(Atot3)+0,1634*(LOG10(Atot3)^2)
F3=0,0239*L3^2-0,3186*L3+2,012
```

```
COST4=Cp4*2*1,332/1,3
LOG10(Cp4)=3,5391-0,3533*LOG10(Wb)+0,4477*(LOG10(Wb)^2)
```

```
Ctc=1,3*(COST1+COST2+COST3+COST4)
```

```
Cpresent.el=R1*Cel
Cpresent.bio=R1*Cbio
Cfin=Ctc-R2*0,1*Ctc
Cel=0,23*Wb*t
Cbio=m[1]*3,6*BioCost*t
```

```
Z=Cfin+Cpresent.bio+Cpresent.el
```

9.2.2 Υπολογιστικός κώδικας EES εγκατάστασης οργανικού κύκλου Rankine

Σε αυτό τον κώδικα EES μοντελοποιείται βάσει του συστήματος εξισώσεων η εγκατάσταση οργανικού κύκλου Rankine. Οι μεταβλητές απόφασης λαμβάνουν τις τιμές τους μέσω παραμετρικού πίνακα, ενώ στο diagram window δηλώνονται οι μεταβλητές R1 και R2 για τον υπολογισμό του επιτοκίου και ο ετήσιος χρόνος λειτουργίας της εγκατάστασης t.

Wel=500

*****Ex1 DATA*****

Utot1=375
CP[9]=2,228
T[10]=150

*****Ex2 DATA*****

Utot2=545
cp[7]=4,22
T[8]=60
T[7]=40

*****Ex3 DATA*****

Utot3=75
T[3]=T[5]+dt

*****T DATA*****

P[1]=2700
P[2]=200
nt=0,86

*****P DATA*****

np=0,5

ntot=Wel/Qex1
Wp+Wel=nel*W
nel=0,96

*****Ex1*****

Qex1=Aex1*Utot1*DELTATLN1/1000
DELTATLN1=((T[9]-T[1])-(T[10]-T[6]))/LN((T[9]-T[1])/(T[10]-T[6]))
Qex1=m[1]*(h[1]-h[6])
Qex1=m[9]*cp[9]*(T[9]-T[10])
m[9]=m[10]
m[6]=m[1]

P[6]=P[1]

*****T*****

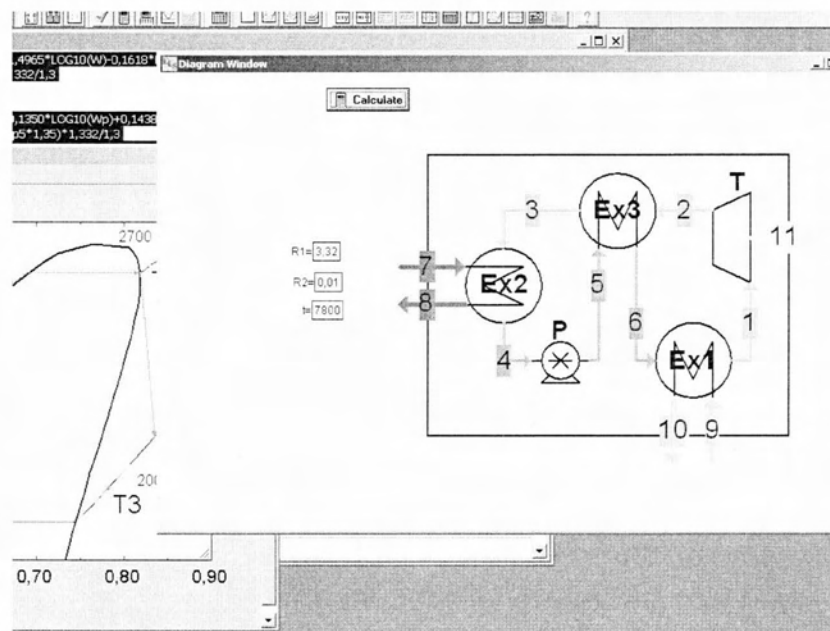
T[1]=0,1+T_SAT(R113;P=P[1])
h[1]=ENTHALPY(R113;T=T[1];P=P[1])
s1=ENTROPY(R113;T=T[1];P=P[1])

s2=ENTROPY(R113;T=Ts.t;P=P[2])
s1=s2
hs.t=ENTHALPY(R113;T=Ts.t;P=P[2])
W=m[1]*(h[1]-h[2])
nt=(h[1]-h[2])/(h[1]-hs.t)
T[2]=TEMPERATURE(R113;h=h[2];P=P[2])

m[1]=m[2]

*****Ex3*****

Qex3=Aex3*Utot3*DELTATLN3/1000
DELTATLN3=((T[2]-T[6])-(T[3]-T[5]))/LN((T[2]-T[6])/(T[3]-T[5]))
Qex3=m[2]*(h[2]-h[3])
Qex3=m[5]*(h[6]-h[5])



```

T[5]=TEMPERATURE(R113;h=h[5];P=P[5])
h[3]=ENTHALPY(R113;T=T[3];P=P[3])
T[6]=TEMPERATURE(R113;h=h[6];P=P[6])

m[2]=m[3]
m[5]=m[6]

P[3]=P[2]
P[6]=P[5]

*****Ex2*****
Qex2=Aex2*Utot2*DELTATLN2/1000
DELTATLN2=((T[3]-T[8])-(T[4]-T[7]))/LN((T[3]-T[8])/(T[4]-T[7]))
Qex2=m[3]*(h[3]-h[4])
Qex2=m[7]*cp[7]*(T[8]-T[7])

h[4]=ENTHALPY(R113;T=T[4];P=P[4])
T[4]=-0,1+T_SAT(R113;P=P[4])

P[4]=P[3]

*****P*****
Wp=m[4]*(h[5]-h[4])

np=(h[5]-h[4])/(hs.p-h[4])
hs.p=ENTHALPY(R113;T=Ts.p;P=P[5])
s4=ENTROPY(R113;T=T[4];P=P[4])
s5=ENTROPY(R113;T=Ts.p;P=P[5])
s4=s5

m[4]=m[5]

*****COST FUNCTIONS*****

"Ex1"
log10(Cp1)=4,3247-0,303*LOG10(Aex1)+0,1634*LOG10(Aex1)^2
COST1=Cp1*(1,63+Fp1*1,66)*1,705/1,3
log10(Fp1)=0,03881-0,11272*LOG10(P[1]/100)+0,08183*LOG10(P[1]/100)^2

"Ex2"
log10(Cp2)=4,3247-0,303*LOG10(Aex2)+0,1634*LOG10(Aex2)^2
COST2=Cp2*(1,63+1,66)*1,705/1,3

"Ex3"
log10(Cp3)=4,3247-0,303*LOG10(Aex3)+0,1634*LOG10(Aex3)^2
COST3=Cp3*(1,63+1,66)*1,705/1,3

"T"
log10(Cp4)=2,2476+1,4965*LOG10(W)-0,1618*LOG10(W)^2
COST4=Cp4*(3,5)*1,332/1,3

"P"
log10(Cp5)=3,4771+0,1350*LOG10(Wp)+0,1438*LOG10(Wp)^2
COST5=Cp5*(1,89+Fp5*1,35)*1,332/1,3
log10(Fp5)=-0,245382+0,259016*LOG10(P[5]/100)-0,01363*LOG10(P[5]/100)^2

Ctc=1,2*(COST1+COST2+COST3+COST4+COST5)
Ppresent.el=R1*Pel
Pel=0,23*Wel*t
Cfin=Ctc-R2*0,1*Ctc

"Z"
Z=Ppresent.el-Cfin

```

9.2.3 Υπολογιστικός κώδικας EES εγκατάστασης αεριοποίησης

Σε αυτό τον κώδικα EES μοντελοποιείται βάσει του συστήματος εξισώσεων η εγκατάσταση αεριοποίησης. Οι μεταβλητές απόφασης λαμβάνουν τις τιμές τους μέσω του diagram window, όπου και παρουσιάζονται οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης κόστους Z_{gas} και της σύστασης του παραγομένου αερίου.

"AIR DATA"

Oxyg[2]=0,21
Nitr[2]=0,79
P[2]=101,3
T[2]=25
w[2]=0,012

"BIOMASS DATA"

CPa=0,75
T[1]=25

*****BIOMASS*****

comb=1-w[1]-A[1]
LHVin=comb*(18,6*c+24,9*(1-c))-2,5*w[1]
X=1,67*C+0,95*(1-C)
Y=0,83*C+0,7*(1-C)
Z=0,1*(1-C)
Mrbio=0,012+0,001*X+0,016*Y+0,014*Z
n[0]*Mrbio=m[1]*comb
W=w[1]*m[1]/(0,018*n[0])

*****GASIFIER*****

OxygSt=(1+0,25*X-0,5*Y)*n[0]
LAMBDA=m[2]*Oxyg[2]/(OxygSt*0,032)
m=OxygSt*LAMBDA/n[0]
S=w[2]*m[2]/(0,018*n[0])

X+2*W+2*S=2*n[1]+2*n[4]+4*n[5]
W+S+Y+2*m=2*n[3]+n[2]+n[4]
n[2]+n[3]+n[5]=1
z+3,76*2*m=2*n[6]

(m[1]*comb*(-5045,5)+n[0]*0,018*W*(-15879,5))+n[0]*0,018*S*(-13434,4)+LAMBDA*1000*LHVin*m[1]-0,04*LAMBDA*1000*LHVin*m[1]=m3[1]*ENTHALPY(H2;T=T[3])+m3[2]*ENTHALPY(CO;T=T[3])+m3[3]*ENTHALPY(CO2;T=T[3])+m3[4]*ENTHALPY(H2O;T=T[3])+m3[5]*ENTHALPY(CH4;T=T[3])+m3[6]*ENTHALPY(N2;T=T[3])+A[1]*m[1]*Cpa*(T[3]-25)

k1=n[3]*n[1]/(n[2]*n[4])
k2=n[5]*n/(n[1]^2)
n=n[1]+n[2]+n[3]+n[4]+n[5]

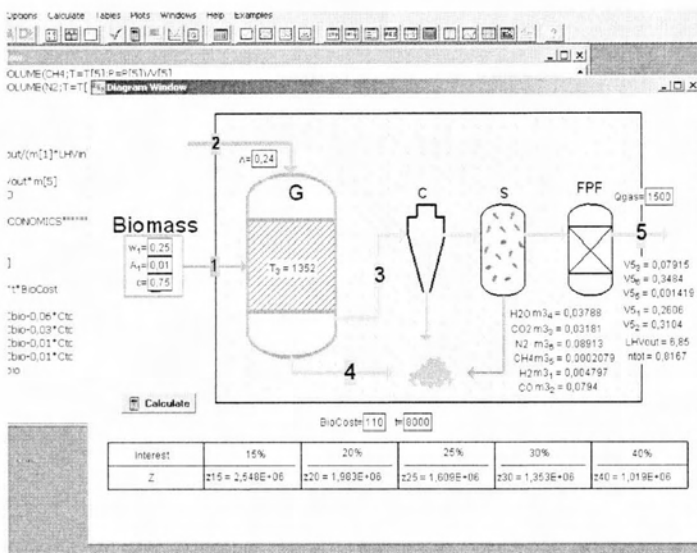
LN(k1)=1000*DELTAgo1/(8,314*(T[3]+273))
LN(k2)=1000*DELTAgo2/(8,314*(T[3]+273))

DELTAgo1=-DELTAg1-DELTAg3+DELTAg2+DELTAg4
DELTAgo2=-DELTAg5+2*DELTAg1

DELTAg1=(ENTHALPY(H2;T=T[3])-(T[3]+273)*ENTROPY(H2;T=T[3];P=P[2]))*0,002
DELTAg2=(ENTHALPY(CO;T=T[3])-(T[3]+273)*ENTROPY(CO;T=T[3];P=P[2]))*0,028
DELTAg3=(ENTHALPY(CO2;T=T[3])-(T[3]+273)*ENTROPY(CO2;T=T[3];P=P[2]))*0,044
DELTAg4=(ENTHALPY(H2O;T=T[3])-(T[3]+273)*ENTROPY(H2O;T=T[3];P=P[2]))*0,018
DELTAg5=(ENTHALPY(CH4;T=T[3])-(T[3]+273)*ENTROPY(CH4;T=T[3];P=P[2]))*0,016

m[4]+m[3]=m[1]+m[2]
m[4]=m[1]*A[1]

m3[1]=n[0]*n[1]*0,002
m3[2]=n[0]*n[2]*0,028
m3[3]=n[0]*n[3]*0,044



m3[4]=n[0]*n[4]*0,018
m3[5]=n[0]*n[5]*0,016
m3[6]=n[0]*n[6]*0,028

p3[1]=m3[1]/m[3]
p3[2]=m3[2]/m[3]
p3[3]=m3[3]/m[3]
p3[4]=m3[4]/m[3]
p3[5]=m3[5]/m[3]
p3[6]=m3[6]/m[3]

m5[1]=m3[1]
m5[2]=m3[2]
m5[3]=m3[3]
m5[4]=0,02*m[5]
m5[5]=m3[5]
m5[6]=m3[6]
m[5]=m[3]-p3[4]*m[3]+0,01*m[3]
LHVout=(m3[1]*142,92+m3[2]*10,11+m3[5]*55,65)/m[5]
p5[1]=m5[1]/m[5]
p5[2]=m5[2]/m[5]
p5[3]=m5[3]/m[5]
p5[4]=m5[4]/m[5]
p5[5]=m5[5]/m[5]
p5[6]=m5[6]/m[5]

V[5]=m5[1]*VOLUME(H2;T=T[5];P=P[5])+m5[2]*VOLUME(CO;T=T[5];P=P[5])+m5[3]*VOLUME(CO2;T=T[5];P=P[5])+m5[5]*VOLUME(CH4;T=T[5];P=P[5])+m5[6]*VOLUME(N2;T=T[5];P=P[5])

V5[1]=m5[1]*VOLUME(H2;T=T[5];P=P[5])/V[5]
V5[2]=m5[2]*VOLUME(CO;T=T[5];P=P[5])/V[5]
V5[3]=m5[3]*VOLUME(CO2;T=T[5];P=P[5])/V[5]
V5[5]=m5[5]*VOLUME(CH4;T=T[5];P=P[5])/V[5]
V5[6]=m5[6]*VOLUME(N2;T=T[5];P=P[5])/V[5]

T[5]=25
P[5]=101

ntot=m[5]*LHVout/(m[1]*LHVin)

Qgas=1000*LHVout*m[5]
Vgas=V[5]*3600

*****ECONOMICS*****

LOG10(Ctc)=7,504-3,187*LOG10(Vgas)+0,9176*LOG10(Vgas)^2

Cbio=m[1]*3,6**t**BioCost

z15=Ctc+6,26*Cbio-0,06*Ctc
z20=Ctc+4,87*Cbio-0,03*Ctc
z25=Ctc+3,95*Cbio-0,01*Ctc
z30=Ctc+3,32*Cbio-0,01*Ctc
z40=Ctc+2,5*Cbio

Παράρτημα 3

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζεται η μέθοδος υπολογισμού της συνάρτησης κόστους της εγκατάστασης αεριοποίησης που συμπεριλαμβάνεται στην παρούσα εργασία. Λόγω της ποικιλίας των ειδών μηχανολογικών στοιχείων που περιλαμβάνονται στην εγκατάσταση, ο υπολογισμός του κόστους καθίσταται αρκετά δύσκολος. Για το λόγο αυτό η κοστολόγηση γίνεται απευθείας για το σύνολο της εγκατάστασης και όχι βάσει της κοστολόγησης των επιμέρους στοιχείων.

Τα δεδομένα που εξυπηρέτησαν τη διαδικασία, προέρχονται από πραγματικές εφαρμογές εγκαταστάσεων αεριοποίησης της αγοράς. Πρόκειται για δεδομένα κόστους εγκαταστάσεων αεριοποίησης τριών διαφορετικών δυναμικοτήτων. Τα δεδομένα αυτά συνδέονται με την ογκομετρική παροχή του παραγόμενου αερίου. Πρόκειται για ποσά εκφρασμένα σε λίρες Η.Β. του έτους 2013, οπότε δεν απαιτείται χρονική αναπροσαρμογή του κόστους, καθώς όλα τα κόστη της παρούσας εργασίας υπολογίζονται για τα τέλη του έτους 2013. Η ισοτιμία που χρησιμοποιείται είναι 1.25 ευρώ προς λίρα. Ο υπολογισμός γίνεται βάσει του κώδικα που ακολουθεί, η επίλυση του οποίου έγινε στο EES.

"producer gas volume in m3/hr"

Vgas[1]=90

Vgas[2]=180

Vgas[3]=450

pte=1,25

"cost in pounds"

C[1]=48272*pte

c[2]=77104*pte

c[3]=257726*pte

"LOG1(COST1)=K1+K2*LOG10(Vgas)+K3*LOG10(Vgas)^2"

LOG10(C[1])=K1+K2*LOG10(Vgas[1])+K3*LOG10(Vgas[1])^2

LOG10(C[2])=K1+K2*LOG10(Vgas[2])+K3*LOG10(Vgas[2])^2

LOG10(C[3])=K1+K2*LOG10(Vgas[3])+K3*LOG10(Vgas[3])^2

Και τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στο αντίστοιχο εδάφιο του 5^{ου} κεφαλαίου είναι: $K_1=7.504$, $K_2=-3.187$, $K_3=0.9176$.

10. Βιβλιογραφία

- [1.] McKendry P., 2001. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology* 83 (2002) 37–46. Review paper
- [2.] McKendry P., 2001. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies
- [3.] S. Vassiliev, D. Baxter, L. Andersen, C. Vassilieva, T. Morgan, 2011. An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel* 94 (2012) 1–33, Review article
- [4.] A. Demirbas, 2010, *Biorefineries*, Ch. 2 fuels from biomass
- [5.] I. Obernberger, 2008. Industrial combustion of solid biomass fuels – state-of-the-art and relevant future developments. Institute for process Engineering. Graz University of Technology
- [6.] B.M. Jenkins, L.L. Baxter, T.R. Miles Jr, T.R. Miles, Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology* 54(1998) 17–46
- [7.] S. Clarke, F. Preto, 2011, Biomass Burn Characteristics, Fact Sheet, Ministry of Agriculture Food and Rurl Affiars, Ontario
- [8.] Ayhan Demirbas, 1997, Calculation of higher heating values of biomass fuels. *Fuel* Vol. 76, No. 5, pp. 431-434
- [9.] Jha Pushpa, 2002, Selection criteria for Agro-Residues for various thermochemical processes
- [10.] A. Demirbas, 2009, Biofuels from Agricultural Biomass. *Energy Sources, Part A*, 31:1573–1582

- [11.] Ener supply, Ενεργειακή Αποδοτικότητα και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας - Υποστήριξη των Ενεργειακών Πολιτικών σε Τοπικό Επίπεδο
- [12.] Giuseppe Toscano, Fabrizio Corinaldesi, 2010, Ash fusibility characteristics of some biomass feedstocks and examination of the effects of inorganic additives. *J. of Ag. Eng. - Riv. di Ing. Agr.* (2010), 2, 13-19
- [13.] Linghong Zhang, Chunbao (Charles) Xu, Pascale Champagne, 2010, Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management* 51 (2010) 969–982
- [14.] Jaya Shankar Tumuluru, Shahab Sokhansanj, Christopher T. Wright, Richard D. Boardman, Neal A. Yancey, August 2011, ASABE Annual International Meeting, A Review on Biomass Classification and Composition, Co-Firing Issues and Pretreatment Methods
- [15.] Friedrich Biedermann, Ingwald Obernberger, 2005. Ash related problems during biomass combustion and possibilities for a sustainable ash utilization
- [16.] Fernando Preto, CanmetENERGY, Natural Resources Canada, 2011, A Review of Biomass Boiler Technologies. *Agricultural Biomass for Combustion Energy*, April 14 2011, Guelph
- [17.] S.K. Patra, P.P. Datta, 2006, Insights into Biomass Gasification Technology. *Technical Digest*, ISSUE 9, 2006
- [18.] Ralph P. Overend, 2007, Thermochemical conversion of biomass, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA
- [19.] S. Jarunthammachote, A. Dutta, 2008, Equilibrium modeling of gasification: Gibbs free energy minimization approach and its application to spouted bed and spout-fluid bed gasifiers. *Energy Conversion and Management*

- [20.] M. Vaezi, M. Passandideh-Fard, M. Moghiman, M. Charmchi, 2008, Modeling biomass Gasification: A new approach to utilize renewable sources of energy. 2008 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, October 31-November 6, 2008, Boston, Massachusetts, USA
- [21.] Black Mountain Woodfuels, Ankur Scientific Energy Technologies , 2013, Biomass Gasification – The Technology, Company’s information
- [22.] Andrés Melgar, Juan Pérez, Alfonso Horrillo, 2009, Biomass gasification process in a downdraft fixed bed gasifier: a real time diagnosis model based on gas composition analysis. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 49. pp. 9-18. Septiembre, 2009
- [23.] Z.A Zainal, R Ali, C.H. Lean, K.N. Seetharamu, Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. Energy Conversion and Management 42 (2001) 1499-1515
- [24.] Ying Feng, G.P. Rangaiah, 2011, Evaluating Capital Cost Estimation Programs. Chemical Engineering, Aug 2011
-
- [25.] Ing. Bruno Vanslambrouck, 2013, Waste heat recovery via Organic Rankine Cycle: Results of a ERA-SME Technology Transfer Project, Presentation based on results from research, supported by IWT
- [26.] Sebastian Teir, Anne Jokivuori, 2002, Thermal Design of Heat Exchangers, Energy Engineering and Environmental Protection Publications, Steam Boiler Technology eBook, Espoo 2002
- [27.] M.J. Fernandez Llonte, J.E. Carrasco Garcia, 2005. Concentration of elements in woody and herbaceous biomass as a function of the dry ashing temperature

- [28.] Skrifvars B.J., Backman R., Hupa M., 1996. Ash chemistry and sintering Combustion properties of biomass, B. M. Jenkins
- [29.] Effect of moisture on heating value, the biomass energy databook
<http://cta.ornl.gov>
- [30.] Y. P. Abbi, Handbook on energy audit and environmental management,
- [31.] The glossary of biomass, National renewable energy laboratory
<http://www.nrel.gov/>
- [32.] Biofuel properties,
http://www.biofuelsb2b.com/useful_info.php?page=Typic
- [33.] Τιμές ειδών βιομάζας στη Θεσσαλία, Ενεργειακή συνεταιριστική εταιρία Καρδίτσας
- [34.] KLM Technology group, Engineering guidelines in boiler design
- [35.] Max S. Peters, Σχεδιασμός και οικονομική μελέτη εγκαταστάσεων για μηχανικούς
- [36.] Y, A, Cengel, Μεταφορά θερμότητας
- [37.] American society of mechanical engineers, Code for pressure piping
- [38.] Dowtherm data
- [39.] Γ. Δούνιας, Μεθοδολογίες λήψης οικονομοτεχνικών αποφάσεων
- [40.] Engineering practice journal Chemical engineering journal
www.che.com

- [41.] R. Turton, Analysis, synthesis and design of chemical processes
- [42.] Ετήσιος χρόνος λειτουργίας εγκαταστάσεων βιομάζας, Ενεργειακή συνεταιριστική εταιρία Καρδίτσας
- [43.] Solar energy research institute, Handbook of Biomass downdraft gasifier – engine systems, 7 Oct. 1988
- [44.] ΔΕΣΜΗΕ, τιμολόγηση ηλεκτρικής ενέργειας

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000121281

