



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ II:

ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ
ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΓΙΑ ΤΗ
ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ
ΒΙΟΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ

ΚΟΥΦΟΛΙΟΥΛΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ: 05108031

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΚΟΚΟΣΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των σπουδών μου στη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με την ολοκλήρωση της συγγραφής θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Αντώνιο Κοκόση για το θέμα που μου εμπιστεύτηκε καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το Διδάκτορα ΕΜΠ κ. Αθανάσιο Νικολακόπουλο για τον χρόνο που αφιέρωσε και την αμέριστη βοήθεια του κατά τη διεκπεραίωση της εργασίας. Τέλος οφείλω να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Κωνσταντίνο Πυργάκη και τον απόφοιτο της Σχολής Χημικών Μηχανικών κ. Μιχαήλ Στεφανάκη για την παροχή δεδομένων χωρίς τα οποία η πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής δε θα ήταν εφικτή.

Κουφολιούλιος Δημήτριος
Αθήνα, Ιανουάριος 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματική είναι η δημιουργία ενός εργαλείου για την αξιολόγηση και την επιλογή προϊόντων και διεργασιών που θα υλοποιηθούν στα πλαίσια μιας βιομηχανικής μονάδας. Η επιλογή αυτή γίνεται λαμβάνοντας υπόψη μας εκτός των άλλων και την εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται αν οι διεργασίες που θα υλοποιηθούν ολοκληρωθούν μεταξύ τους ενεργειακά σε μια Συνολική Μονάδα. Ειδικά στην περίπτωση ενεργοβόρων βιομηχανικών μονάδων, όπως το βιοδυλιστήριο που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική, η εξοικονόμηση ενέργειας είναι μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την επιλογή των διεργασιών που θα υλοποιηθούν. Η ενεργειακή ολοκλήρωση των διεργασιών μεταξύ τους υποθέτουμε ότι γίνεται με έμμεσο τρόπο χρησιμοποιώντας ως μέσο μεταφοράς θερμότητας τους ατμούς που χρησιμοποιούνται στην μονάδα. Έτσι η μεθοδολογία που προτείνεται περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των βοηθητικών παροχών για τις οποίες εξασφαλίζεται η οικονομικότερη λειτουργία της μονάδας λαμβάνοντας υπόψη την εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της ολοκλήρωσης μεταξύ διεργασιών που επιτυγχάνεται αλλά και το κόστος για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών με αυτές τις βοηθητικές παροχές.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία περιλαμβάνει την διατύπωση τριών διαδοχικών μοντέλων. Με το πρώτο μοντέλο γίνεται ο υπολογισμός των ενεργειακών αναγκών που πρέπει να καλύψει η κάθε βοηθητική παροχή για κάθε διεργασία και κάθε συνδυασμό βοηθητικών παροχών που εξετάζεται. Το δεύτερο μοντέλο προσδιορίζει το βέλτιστο συνδυασμό διεργασιών για κάθε συνδυασμό παροχών που εξετάζουμε χρησιμοποιώντας οικονομικά στοιχεία για τις διεργασίες και λαμβάνοντας υπόψη την εξοικονόμηση ενέργειας όπως αυτή υπολογίζεται μέσω της Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας. Με το τρίτο μοντέλο γίνεται ο προσδιορισμός του συνδυασμού παροχών και κατά συνέπεια του συνδυασμού διεργασιών για τους οποίους η λειτουργία της μονάδας είναι οικονομικά βέλτιστη.

Η εφαρμοσιμότητα του μοντέλου παρουσιάζεται με την μελέτη της περίπτωσης επιλογής μεταξύ οχτώ πιλοτικών διεργασιών ενός βιοδυλιστηρίου. Επιπλέον μέσω της διατύπωσης ενός χαρακτηριστικού παραδείγματος αναδεικνύεται η δυνατότητα που δίνει το μοντέλο που διατυπώθηκε για αξιολόγηση σχεδιαστικών αποφάσεων, με βάση τις οικονομικές τους επιπτώσεις, λαμβάνοντας υπόψη κάθε αλλαγή στην ενεργειακή ολοκλήρωση μεταξύ των διεργασιών.

ABSTRACT

The purpose of this diploma thesis is to create a tool that can be used to evaluate and choose the products and the processes that should constitute the total site. The choice is based on many criteria, one of which being the amount of energy that can be reserved if the processes that will be used are heat integrated in a Total Site. Energy recovery plays a key role especially in energy-consuming industries, such as the biorefineries, which are further examined in this diploma thesis. It is assumed that the heat integration of the processes is achieved with the indirect way, by using the steam levels, as a mean of heat transfer. As a result, the methodology that is proposed includes the identification of the utilities for which the site operates in the most cost-efficient way, by taking into consideration at the same time the recovery of energy due to the heat integration of the processes in a total site and the total energy cost for these utilities.

The proposed methodology includes three consequent models. The first model calculates the utility needs for each process and combination of utilities that is examined. The second model identifies the optimum combination of processes for each combination of utilities, by using economic data for the processes, while taking into consideration the recovery of energy as it is calculated by the Total Site Analysis. The third model is used to identify the combination of utilities and flowingly the combination of processes for which the operation of the site is financially optimized.

The applicability of the proposed model is demonstrated through a case study of eight candidate pilot processes of a biorefinery. Finally, through this case study emerges the capability of the proposed model to evaluate design decisions, based on the financial outcomes, while taking into consideration each change in the heat integration of the processes.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 1 |
| 1.1 | ΓΕΝΙΚΑ..... | 1 |
| 1.2 | ΣΚΟΠΟΣ..... | 1 |
| 1.3 | ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ..... | 2 |
| 2. | ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ..... | 3 |
| 3. | ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ... 5 | |
| 3.1 | ΓΕΝΙΚΑ..... | 5 |
| 3.2 | ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ... 5 | |
| 3.3 | ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΓΕΝΙΚΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ Γ.Π..... 6 | |
| 3.4 | ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ 8 | |
| 4. | ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΦΟΡΤΩΣΗΣ (TRANSSHIPMENT MODEL) ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΠΑΡΟΧΩΝ..... 11 | |
| 4.1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 11 |
| 4.2 | ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΑ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΑ (TEMPERATURE INTERVALS)..... 11 | |
| 4.3 | ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΤΩΣΗΣ..... 12 | |
| 4.4 | ΤΟ ΑΝΕΠΤΥΓΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΦΟΡΩΣΗΣ..... 15 | |
| 4.5 | ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΑΝΕΠΤΥΓΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΦΟΡΤΩΣΗΣ..... 22 | |
| 5. | ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ (TOTAL SITE ANALYSIS)..... 27 | |
| 5.1 | ΓΕΝΙΚΑ..... | 27 |
| 5.2 | ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ..... 27 | |
| 5.3 | ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ..... 36 | |
| 5.3.1 | Γενικά..... | 36 |
| 5.3.2 | Υπολογισμός Ενεργειακών Απαιτήσεων Συνολικής Μονάδας..... 37 | |
| 5.3.3 | Επιλογή Βοηθητικών Παροχών και Προσδιορισμός των Φορτίων τους..... 39 | |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.3.4 | Υπολογισμός της Εξοικονόμησης Ενέργειας και των Τελικών Ενεργειακών Απαιτήσεων | 39 |
| 5.3.5 | Διατύπωση του Μοντέλου | 41 |
| 5.4 | ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΘΕΡΜΩΝ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΠΑΡΟΧΩΝ..... | 48 |
| 5.5 | ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΒΕΛΤΙΣΗΣ ΛΥΣΗΣ | 50 |
| 6. | ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ..... | 53 |
| 6.1 | ΓΕΝΙΚΑ | 53 |
| 6.2 | ΚΟΣΤΟΣ ΠΑΓΙΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ..... | 53 |
| 6.3 | ΚΟΣΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ - ΕΣΟΔΑ..... | 57 |
| 6.3.1 | Λειτουργικό κόστος..... | 57 |
| 6.3.2 | Κόστος βοηθητικών παροχών..... | 59 |
| 6.3.3 | Εξοικονόμηση λόγω παραγωγής ατμών από τα ρεύματα των διεργασιών..... | 62 |
| 7. | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ..... | 63 |
| 7.1 | ΓΕΝΙΚΑ | 63 |
| 7.2 | ΠΡΩΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ | 65 |
| 7.3 | ΔΕΥΤΕΡΟ ΣΕΝΑΡΙΟ | 69 |
| 7.4 | ΤΡΙΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ..... | 72 |
| 8. | ΑΛΛΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ | 76 |
| 8.1 | ΓΕΝΙΚΑ | 76 |
| 8.2 | ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΠΑΡΟΧΩΝ..... | 76 |
| 8.3 | ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΕΣ ΑΠΟΦΑΣΕΙΣ..... | 77 |
| 9. | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ | 81 |
| 10. | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 84 |
| | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. Δεδομένα Διεργασιών | 86 |
| | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. Μεταφορά του μοντέλου στο GAMS..... | 89 |

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|--|----|
| Εικόνα 2-1 Μετασχηματισμός Βιομάζας σε Ενδιάμεσα και Τελικά Προϊόντα..... | 3 |
| Εικόνα 4-1 Ισοζύγια θερμότητας στο θερμοκρασιακό διάστημα k | 14 |
| Εικόνα 4-2 Σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών στο διάστημα k | 16 |
| Εικόνα 4-3 Σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών σε δυο διαδοχικά διαστήματα..... | 17 |
| Εικόνα 4-4 Αναπαράσταση όλων των σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών σε ένα διάστημα k του ανεπτυγμένου μοντέλου..... | 19 |
| Εικόνα 5-1 Έμμεση εναλλαγή θερμότητας μεταξύ των διεργασιών μιας Συνολικής Μονάδας .. | 28 |
| Εικόνα 5-2 Τυπική μορφή του Μεγάλου Σύνθετου Γραφίσματος (ΜΣΓ)..... | 29 |
| Εικόνα 5-3 Υπολογισμός των φορτίων θερμών και ψυχρών παροχών στο ΜΣΓ | 30 |
| Εικόνα 5-4 Κατασκευή του Συνολικού Διαγράμματος Μονάδας (ΣΔΜ) | 31 |
| Εικόνα 5-5 Θερμοκρασιακή μετατόπιση των κλάδων του ΣΔΜ..... | 32 |
| Εικόνα 5-6 Υπολογισμός της κατανάλωσης θερμών και ψυχρών παροχών και της παραγωγής ατμών στο ΣΔΜ..... | 33 |
| Εικόνα 5-7 Απεικόνιση της δυνατότητας βελτιστοποίησης του τρόπου χρήσης των παροχών ... | 34 |
| Εικόνα 5-8 Υπολογισμός της ανάγκης παραγωγής παροχών με χρήση του ΣΔΜ..... | 35 |
| Εικόνα 5-9 Το ΜΣΓ μιας διεργασίας για δυναμικότητα Q και $Q/2$ | 38 |
| Εικόνα 5-10 Σχέσεις μεταξύ των διεργασιών που μπορούν να υλοποιηθούν στα πλαίσια της μονάδας..... | 45 |
| Εικόνα 5-11 Ένα ΣΔΜ στο οποίο απεικονίζονται τα πιθανά επίπεδα ατμών που θεωρούμε | 49 |
| Εικόνα 6-1 Συσχέτιση της πραγματικής εξάρτησης του πάγιου κόστους από τη δυναμικότητα με τα αποτελέσματα της εξίσωσης 6.1 | 54 |
| Εικόνα 6-2 Συσχέτιση της πραγματικής εξάρτησης του πάγιου κόστους από τη δυναμικότητα με τα αποτελέσματα του υπολογισμού του πάγιου κόστους για τρεις διαφορετικές δυναμικότητες | 55 |
| Εικόνα 6-3 Συσχέτιση της πραγματικής εξάρτησης του πάγιου κόστους από τη δυναμικότητα με τα αποτελέσματα του υπολογισμού του πάγιου κόστους με ένα γνωστό σημείο..... | 56 |
| Εικόνα 6-4 Απεικόνιση των της εξάρτησης των εσόδων και του λειτουργικού κόστους από τη δυναμικότητα λειτουργίας | 58 |
| Εικόνα 7-1 Διεργασίες που επιλέγεται να υλοποιηθούν στα πλαίσια της Συνολικής Μονάδας για το πρώτο σενάριο..... | 65 |
| Εικόνα 7-2 ΣΔΜ για το πρώτο σενάριο..... | 69 |

| | |
|--|----|
| Εικόνα 7-3 Διεργασίες που επιλέγεται να υλοποιηθούν στα πλαίσια της Συνολικής Μονάδας για το δεύτερο σενάριο | 70 |
| Εικόνα 7-4 ΣΔΜ για το δεύτερο σενάριο | 71 |
| Εικόνα 7-5 Διεργασίες που επιλέγεται να υλοποιηθούν στα πλαίσια της Συνολικής Μονάδας για το τρίτο σενάριο | 73 |
| Εικόνα 7-6 ΣΔΜ για το τρίτο σενάριο..... | 74 |
| Εικόνα 8-1 ΜΣΓ της παραγωγής Ιτακονικού Οξέος | 78 |
| Εικόνα 8-2 ΜΣΓ της παραγωγής Ιτακονικού Οξέος με τις προτεινόμενες αλλαγές | 79 |

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|--|----|
| Πίνακας 6-1 Υπολογισμός των συντελεστών α και β για μια σειρά παροχών | 61 |
| Πίνακας 7-1 Περιπτώσεις για τα τρία διαφορετικά επίπεδα ατμού..... | 63 |
| Πίνακας 7-2 Οικονομικά στοιχεία των διεργασιών στη δυναμικότητα που έχουν σχεδιαστεί | 64 |
| Πίνακας 7-3 Επιλογή διεργασιών και κέρδος για κάθε συνδυασμό βοηθητικών παροχών | 66 |
| Πίνακας 7-4 Συνολικές ενεργειακές ανάγκες για ξεχωριστή ολοκλήρωση , ολοκλήρωση σε Συνολική Μονάδα και εξοικονόμηση ενέργειας για το πρώτο σενάριο..... | 68 |
| Πίνακας 7-5 Συνολικές ενεργειακές ανάγκες για ξεχωριστή ολοκλήρωση , ολοκλήρωση σε Συνολική Μονάδα και εξοικονόμηση ενέργειας για το δεύτερο σενάριο | 71 |
| Πίνακας 7-6 Συνολικές ενεργειακές ανάγκες για ξεχωριστή ολοκλήρωση , ολοκλήρωση σε Συνολική Μονάδα και εξοικονόμηση ενέργειας για το τρίτο σενάριο..... | 74 |

ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

Σύνολα

- $H = \{h/h=1,2,3,\dots,N_H\}$, όπου N_H ο αριθμός των θερμών ρευμάτων
- $C = \{c/c=1,2,3,\dots,N_C\}$, όπου N_C ο αριθμός των ψυχρών ρευμάτων
- $S = \{s/s=1,2,3,\dots,N_S\}$, όπου N_S ο αριθμός των θερμών παροχών
- $W = \{w/w=1,2,3,\dots,N_W\}$, όπου N_W ο αριθμός των ψυχρών παροχών
- $K = \{k/k=1,2,3,\dots,N_K\}$, όπου N_K ο αριθμός των θερμοκρασιακών διαστημάτων
- $J = \{j/j=1,2,3,\dots,N_J\}$, όπου N_J ο αριθμός των διεργασιών που εξετάζονται
- $I = \{i/i=1,2,3,\dots,N_I\}$, όπου N_I ο αριθμός των συνδυασμών βοηθητικών παροχών
- $G = \{g/g=1,2\}$, όπου $g=1$ ανάγκη για βοηθητική παροχή και $g=2$ περίσσεια βοηθητικής παροχής
- $M = \{m/m=1,2,3,\dots,N_M\}$, όπου N_M ο αριθμός των ενδιάμεσων προϊόντων
- H_k θερμό ρεύμα h που παρέχει θερμότητα στο θερμοκρασιακό διάστημα k
- H'_k θερμό ρεύμα h που παρέχει θερμότητα στο διάστημα k ή σε κάποιο υψηλότερο
- H'_{kji} θερμό ρεύμα h που παρέχει θερμότητα στο διάστημα k ή σε κάποιο υψηλότερο της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i
- S_k θερμή παροχή s που παρέχει θερμότητα στο θερμοκρασιακό διάστημα k
- S'_k θερμή παροχή s που παρέχει θερμότητα στο διάστημα k ή σε κάποιο υψηλότερο
- S'_{kji} θερμή παροχή s που παρέχει θερμότητα στο διάστημα k ή σε κάποιο υψηλότερο της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i
- C_k ψυχρό ρεύμα c που απαιτεί θερμότητα από το θερμοκρασιακό διάστημα k
- C_{kji} ψυχρό ρεύμα c που απαιτεί θερμότητα από το θερμοκρασιακό διάστημα k της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i
- W_k ψυχρή παροχή w που απομακρύνει θερμότητα από το θερμοκρασιακό διάστημα k
- W_{kji} ψυχρή παροχή w που απομακρύνει θερμότητα από το θερμοκρασιακό διάστημα k της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i

Παράμετροι

| | |
|---------------|--|
| TH_k | θερμοκρασία του άνω ορίου του θερμοκρασιακού διαστήματος k |
| QH_{hk} | προσφορά θερμότητας του θερμού ρεύματος h στο θερμοκρασιακό διάστημα k |
| QH_{hkji} | προσφορά θερμότητας του θερμού ρεύματος h στο θερμοκρασιακό διάστημα k της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i |
| $TINH_h$ | θερμοκρασία εισόδου του θερμού ρεύματος h |
| $TOUTH_h$ | θερμοκρασία εξόδου του θερμού ρεύματος h |
| $FCPH_h$ | ειδική θερμότητα του θερμού ρεύματος h |
| QC_{ck} | ζήτηση θερμότητας του ψυχρού ρεύματος c από το θερμοκρασιακό διάστημα k |
| QC_{ckji} | ζήτηση θερμότητας του ψυχρού ρεύματος c από το θερμοκρασιακό διάστημα k της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i |
| $TINC_c$ | θερμοκρασία εισόδου του ψυχρού ρεύματος c |
| $TOUTC_c$ | θερμοκρασία εξόδου του ψυχρού ρεύματος c |
| $FCPC_c$ | ειδική θερμότητα του ψυχρού ρεύματος c |
| $QLHC_{hc}$ | ελάχιστο όριο εναλλαγής θερμότητας μεταξύ του θερμού ρεύματος h και του ψυχρού ρεύματος c |
| $QUHC_{hc}$ | μέγιστο όριο εναλλαγής θερμότητας μεταξύ του θερμού ρεύματος h και του ψυχρού ρεύματος c |
| $QLHW_{hw}$ | ελάχιστο όριο εναλλαγής θερμότητας μεταξύ του θερμού ρεύματος h και της ψυχρής βοηθητικής παροχής w |
| $QUHW_{hw}$ | μέγιστο όριο εναλλαγής θερμότητας μεταξύ του θερμού ρεύματος h και της ψυχρής βοηθητικής παροχής w |
| $QLSC_{sc}$ | ελάχιστο όριο εναλλαγής θερμότητας μεταξύ της θερμής βοηθητικής παροχής s και του ψυχρού ρεύματος c |
| $QUSC_{sc}$ | μέγιστο όριο εναλλαγής θερμότητας μεταξύ της θερμής βοηθητικής παροχής s και του ψυχρού ρεύματος c |
| $QLHC_{hcji}$ | ελάχιστο όριο εναλλαγής θερμότητας μεταξύ του θερμού ρεύματος h και του ψυχρού ρεύματος c της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i |
| $QUHC_{hcji}$ | μέγιστο όριο εναλλαγής θερμότητας μεταξύ του θερμού ρεύματος h και του ψυχρού ρεύματος c της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i |
| $QLHW_{hwji}$ | ελάχιστο όριο εναλλαγής θερμότητας μεταξύ του θερμού ρεύματος h της διεργασίας j και της ψυχρής βοηθητικής παροχής w του συνδυασμού βοηθητικών παροχών i |
| $QUHW_{hwji}$ | μέγιστο όριο εναλλαγής θερμότητας μεταξύ του θερμού ρεύματος h της διεργασίας j και της ψυχρής βοηθητικής παροχής w του συνδυασμού βοηθητικών παροχών i |
| $QLSC_{scji}$ | ελάχιστο όριο εναλλαγής θερμότητας μεταξύ της θερμής βοηθητικής παροχής s του συνδυασμού βοηθητικών παροχών i και του ψυχρού ρεύματος c της διεργασίας j |
| $QUSC_{scji}$ | μέγιστο όριο εναλλαγής θερμότητας μεταξύ της θερμής βοηθητικής παροχής s του συνδυασμού βοηθητικών παροχών i και του ψυχρού ρεύματος c της διεργασίας j |
| $TINS_{si}$ | θερμοκρασία εισόδου της θερμής παροχής s του συνδυασμού παροχών i |

| | |
|-------------|--|
| CS_s | μοναδιαίο κόστος της θερμής παροχής s |
| CS_{si} | μοναδιαίο κόστος της θερμής παροχής s του συνδυασμού παροχών i |
| PS_{si} | μοναδιαίο κέρδος από την περίσσεια θερμής παροχής s του συνδυασμού παροχών i |
| $TINW_{wi}$ | θερμοκρασία εισόδου της ψυχρής παροχής w του συνδυασμού παροχών i |
| CW_w | μοναδιαίο κόστος της ψυχρής παροχής w |
| CW_{wi} | μοναδιαίο κόστος της ψυχρής παροχής w του συνδυασμού παροχών i |
| INC_j | ετήσια έσοδα από τις πωλήσεις του προϊόντος της διεργασίας j |
| INC'_m | ετήσια έσοδα από τις πωλήσεις του ενδιάμεσου προϊόντος m |
| FC_j | ετησιοποιημένο πάγιο κόστος κεφαλαίου της διεργασίας j |
| OC_j | ετήσιο λειτουργικό κόστος της διεργασίας j |
| EEC_j | ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για τη διεργασία j |
| $PROF_i$ | ετήσιο κέρδος για το συνδυασμό παροχών i |

Μεταβλητές

| | |
|---------------|---|
| QS_s | θερμότητα που προσφέρει η θερμή παροχή s |
| QS_{sji} | θερμότητα που προσφέρει η θερμή παροχή s στη διεργασία j για το συνδυασμό παροχών i |
| QW_w | θερμότητα που απομακρύνεται από την ψυχρή παροχή w στη διεργασία j για το συνδυασμό παροχών i |
| QW_{wji} | θερμότητα που απομακρύνεται από την ψυχρή παροχή w στη διεργασία j για το συνδυασμό παροχών i |
| QHC_{hck} | θερμότητα που εναλλάσσεται μεταξύ του θερμού ρεύματος h και του ψυχρού ρεύματος c στο θερμοκρασιακό διάστημα k |
| QHC_{hckji} | θερμότητα που εναλλάσσεται μεταξύ του θερμού ρεύματος h και του ψυχρού ρεύματος c στο θερμοκρασιακό διάστημα k της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i |
| QHW_{hwk} | θερμότητα που εναλλάσσεται μεταξύ του θερμού ρεύματος h και της ψυχρής παροχής w στο θερμοκρασιακό διάστημα k |
| QHW_{hwkji} | θερμότητα που εναλλάσσεται μεταξύ του θερμού ρεύματος h και της ψυχρής παροχής w στο θερμοκρασιακό διάστημα k της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i |
| QSC_{sck} | θερμότητα που εναλλάσσεται μεταξύ της θερμής παροχής s και του ψυχρού ρεύματος c στο θερμοκρασιακό διάστημα k |
| QSC_{sckji} | θερμότητα που εναλλάσσεται μεταξύ της θερμής παροχής s και του ψυχρού ρεύματος c στο θερμοκρασιακό διάστημα k της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i |
| R_k | το υπόλοιπο θερμότητας που εξέρχεται από το θερμοκρασιακό διάστημα k |
| RH_{hk} | το υπόλοιπο θερμότητας που προσφέρει το θερμό ρεύμα h και εξέρχεται από το θερμοκρασιακό διάστημα k |
| RH_{hkji} | το υπόλοιπο θερμότητας που προσφέρει το θερμό ρεύμα h και εξέρχεται από το θερμοκρασιακό διάστημα k της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i |
| RS_{sk} | το υπόλοιπο θερμότητας που προσφέρει η θερμή παροχή s και εξέρχεται από το θερμοκρασιακό διάστημα k |
| RS_{skji} | το υπόλοιπο θερμότητας που προσφέρει η θερμή παροχή s και εξέρχεται από το θερμοκρασιακό διάστημα k της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i |
| T_{mi} | ποσοστό του ενδιάμεσου προϊόντος m για το συνδυασμό παροχών i που δεν επεξεργάζεται σε καμία διεργασία αλλά διατίθεται προς πώληση |
| X_{ji} | ποσοστό συμμετοχής της διεργασίας j στο συνδυασμό διεργασιών που υλοποιούνται για το συνδυασμό παροχών i |
| QST_{si} | συνολική ανάγκη ή περίσσεια θερμής παροχής s του συνδυασμού i στη Συνολική Μονάδα |
| QST'_{sig} | συνολική ανάγκη παροχής s του συνδυασμού i στη Συνολική Μονάδα όταν $g=1$ και συνολική περίσσεια θερμής παροχής s του συνδυασμού i στη Συνολική Μονάδα όταν $g=2$ |
| QWT_{wi} | συνολική ανάγκη της ψυχρής παροχής w του συνδυασμού i στη Συνολική Μονάδα |
| BS_i | παίρνει τιμή διάφορη και μεγαλύτερη του μηδενός μόνο για ένα συνδυασμό i ο οποίος είναι ο συνδυασμός που μεγιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση |

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ολοκλήρωση διεργασιών είναι μια παγιωμένη τεχνική στις μέρες μας η ανάπτυξη της οποίας ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του '70. Με την ολοκλήρωση διεργασιών προσδιορίζεται ο ορθός τρόπος χρήσης των πρώτων υλών και της ενέργειας αναλύοντας, συνθέτοντας και επαναπροσδιορίζοντας μια μονάδα, προσεγγίζοντας τη στην ολιστική της μορφή. Με αυτή τη διαδικασία έρχονται στην επιφάνεια δυνατότητες εξοικονόμησης και εξορθολογισμού, οι οποίες μπορούν μετά από αξιολόγηση να χρησιμοποιηθούν ώστε μια χημική βιομηχανία να καταστεί βιώσιμη και αποδοτική.

1.2 ΣΚΟΠΟΣ

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας η οποία υλοποιείται και αυτοματοποιείται με την χρήση H/Y και επιτρέπει την ανάδειξη του βέλτιστου συνδυασμού διεργασιών που μπορούν να υλοποιηθούν στα πλαίσια μιας βιομηχανικής μονάδας. Η βέλτιστη λύση προσδιορίζεται με βάση οικονομικά κριτήρια, με ιδιαίτερη μνεία να γίνεται στο ενεργειακό κόστος και στις δυνατότητες που δίνονται για τον περιορισμό του μέσω της ενεργειακής ολοκλήρωσης των διεργασιών σε μια Συνολική Μονάδα (total site).

Η επιλογή της ανάλυσης Συνολικής Μονάδας ως επιπλέον κριτήριο, εκτός από τα κλασικά οικονομικά κριτήρια, για την επιλογή διεργασιών προς υλοποίηση έγινε καθώς μέσω αυτής αναδεικνύονται σχέσεις αλληλεπίδρασης μεταξύ των διεργασιών, οι οποίες μεταφράζονται σε εξοικονόμηση ενέργειας. Κάτι το οποίο είναι πολύ σημαντικό ειδικά σε περιπτώσεις όπως το βιοδιωλιστήριο, που εξετάζεται ως παράδειγμα στην παρούσα διπλωματική, το οποίο τόσο λόγω της μεγάλης δυναμικότητας αλλά και της φύσης των διεργασιών του είναι εξαιρετικά ενεργοβόρο.

Επιπλέον έγινε προσπάθεια αυτοματοποίησης του προβλήματος μέσω της δημιουργίας ενός μοντέλου για την επίλυση του και τη μεταφορά του σε κώδικα H/Y. Με αυτό τον τρόπο γίνεται δυνατή η επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού διεργασιών παρά τον, όπως θα φανεί στα επόμενα κεφάλαια, τεράστιο αριθμό διαφορετικών περιπτώσεων που υπάρχει. Επίσης μέσω της

διατύπωσης του συγκεκριμένου μοντέλου προτείνεται ένας τρόπος και διαμορφώνεται ένα εργαλείο για την αντιμετώπιση όλων των προβλημάτων αυτού του τύπου.

1.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

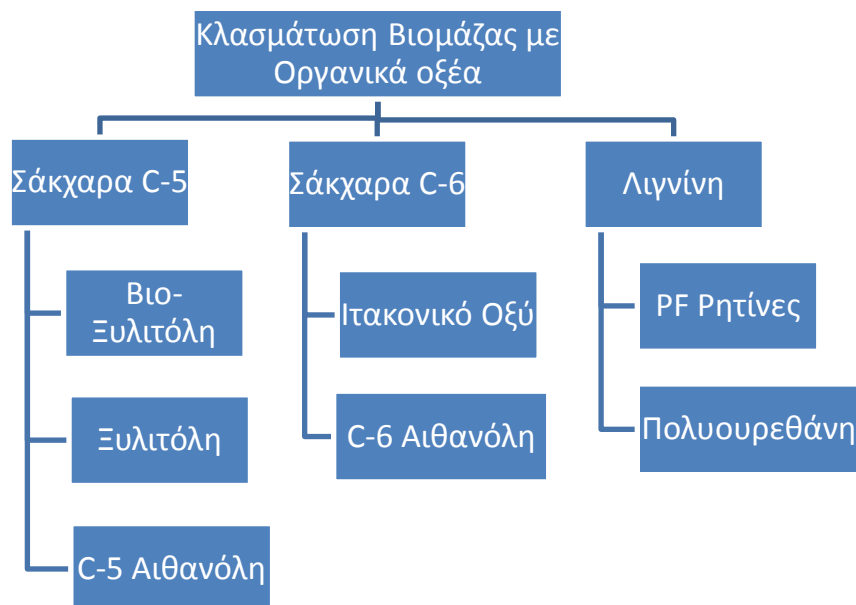
Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέγεται ένας αριθμός διεργασιών που μπορούν να υλοποιηθούν στα πλαίσια ενός βιοδιυλιστηρίου και έχουν σχεδιαστεί αναλυτικά, αφού θεωρούνται “γνωστές” στην χημική βιομηχανία και μπορούν να υλοποιηθούν με σχετική ευκολία και σιγουριά. Ο τελικός συνδυασμός των διεργασιών που θα υλοποιηθούν στα πλαίσια του βιοδιυλιστηρίου επιλέγεται με βάση τα οικονομικά στοιχεία της κάθε διεργασίας, λαμβάνοντας υπ όψιν τον τρόπο που αυτά επηρεάζονται από την εξοικονόμηση ενέργειας λόγω της έμμεσης ενεργειακής ολοκλήρωσης μεταξύ των διεργασιών, όπως αυτή υπολογίζεται από την ανάλυση Συνολικής Μονάδας (total site analysis) σε κάθε περίπτωση.

Αναλυτικότερα σε ένα πρώτο στάδιο γίνεται χρήση ενός μοντέλου μεταφόρτωσης (transshipment model) γραμμικού προγραμματισμού (LP), για τον υπολογισμό των ελάχιστων απαιτήσεων σε παροχές της κάθε διεργασίας. Το μοντέλο αυτό διατυπώθηκε στην αρχική του μορφή από τους Paroulías και Grossmann (1983) και τροποποιήθηκε σύμφωνα με τις ανάγκες του συγκεκριμένου προβλήματος [1]. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αποτελούν τα δεδομένα του δεύτερου μοντέλου που διαμορφώνεται και χρησιμοποιείται για την τελική λήψη της απόφασης. Στο δεύτερο αυτό μοντέλο εκτελούνται υπολογισμοί για τις συνολικές απαιτήσεις σε παροχές που προκύπτουν από την ανάλυση Συνολικής Μονάδας. Τα στοιχεία που προκύπτουν σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα οικονομικά στοιχεία των διεργασιών (πάγια - λειτουργικά κόστη), χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της βέλτιστης επιλογής διεργασιών.

Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν όπως αναφέρθηκε είναι το μοντέλο μεταφόρτωσης για τον υπολογισμό των ενεργειακών απαιτήσεων της κάθε διεργασίας μεμονωμένα και το μοντέλο για την εκτέλεση της Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας. Τα δύο αυτά μοντέλα αποτελούν προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού και επιλέχθηκε για την επίλυση τους να χρησιμοποιηθεί H/Y. Έτσι τα μοντέλα μεταφέρθηκαν στο πρόγραμμα GAMS (General Algebraic Modeling System), ώστε να γίνει εφικτή η επίλυση του προβλήματος και να αυτοματοποιηθεί.

2. ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Κατά τον αρχικό σχεδιασμό μιας χημικής βιομηχανίας πρέπει να παρθούν πολλές σοβαρές αποφάσεις, όμως η πιο σημαντική απόφαση είναι η επιλογή των προϊόντων που θα παραχθούν και κυρίως των διεργασιών μέσω των οποίων θα γίνει αυτό. Στην περίπτωση του βιοδιωλιστηρίου που εξετάζεται η λιγνοκυτταρινούχος βιομάζα μετατρέπεται σε τρία ενδιάμεσα προϊόντα, τη λιγνίνη τα C-5 και τα C-6 σάκχαρα μέσω κλασμάτωσης με οργανικά οξέα. Για τα ενδιάμεσα αυτά προϊόντα υπάρχει η δυνατότητα μέσω των κατάλληλων διεργασιών να μετατραπούν σε ένα πολύ μεγάλο αριθμό διαφορετικών τελικών προϊόντων. Ωστόσο στα πλαίσια αυτής της εργασίας θα περιοριστούμε σε έναν αρκετά μικρότερο αριθμό διεργασιών, καθώς δεν υπάρχουν για όλες τις διεργασίες επαρκή δεδομένα από προσομοιώσεις, αλλά είναι και προτιμότερο το πρόβλημα να παραμείνει σε μια απλή μορφή ώστε να μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό και να επιλυθεί. Παρόλα αυτά η μεθοδολογία που προτείνεται είναι πλήρως εφαρμόσιμη για οποιοδήποτε αριθμό διεργασιών αρκεί να είναι διαθέσιμες για αυτές όλες οι απαραίτητες πληροφορίες. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-1 οι διεργασίες που εξετάζονται είναι η παραγωγή αιθανόλης και ξυλιτόλης με βιοτεχνολογική και καταλυτική μέθοδο από τα C-5 σάκχαρα, η παραγωγή ιτακονικού οξέως και αιθανόλης από τα C-6 σάκχαρα και η παραγωγή PF ρητινών και πολυουρεθάνης από τη λιγνίνη [2].



Εικόνα 2-1 Μετασχηματισμός Βιομάζας σε Ενδιάμεσα και Τελικά Προϊόντα

Όπως είναι προφανές ενώ η παραγωγή των ενδιάμεσων προϊόντων θεωρείται δεδομένη, αυτά μπορούν να μετατραπούν σε ένα αριθμό από τελικά προϊόντα. Το ζήτημα που προκύπτει είναι να προσδιοριστεί ποια τελικά προϊόντα θα παραχθούν και σε ποια ποσότητα. Αν επιπλέον αναλογιστεί κανείς ότι υπάρχει η δυνατότητα, η ποσότητα του κάθε ενδιάμεσου προϊόντος να κατανεμηθεί για την παραγωγή δύο ή τριών τελικών προϊόντων, γίνεται εύκολα κατανοητή η πολυπλοκότητα του προβλήματος και η ανάγκη για μοντελοποίηση του καθώς και συστηματικοποίηση του τρόπου επίλυσης του.

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Γραμμικός Προγραμματισμός είναι η διαδικασία εύρεσης μιας βέλτιστης λύσης μιας γραμμικής συνάρτησης, η οποία να είναι συμβατή με ένα πεπερασμένο σύνολο γραμμικών ανισοτήτων, δηλαδή, ο γραμμικός προγραμματισμός περιγράφει ένα μοντέλο που αφορά τη μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση μιας γραμμικής συνάρτησης κάτω από κάποιους γραμμικούς περιορισμούς. Από την οικονομική σκοπιά, ο γραμμικός προγραμματισμός είναι μια τεχνική που ασχολείται με το πρόβλημα της κατανομής των περιορισμένων πόρων ενός συστήματος σε ανταγωνιζόμενες δραστηριότητες κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο (καθώς και με άλλα προβλήματα με ανάλογη ή παραπλήσια διαμόρφωση). Θεωρείται σαν μια από τις πιο σπουδαίες μαθηματικές ανακαλύψεις των μέσων χρόνων του εικοστού αιώνα και στις μέρες μας αποτελεί ένα μοντέλο ευρείας χρήσης για καθημερινά ζητήματα των περισσότερων μεσαίου και μεγάλου μεγέθους εμπορικών - βιομηχανικών εταιρειών. Ο όρος «προγραμματισμός» δεν έχει την έννοια του «προγραμματισμού ηλεκτρονικών υπολογιστών» αλλά αυτήν του «σχεδιασμού». Ο γραμμικός προγραμματισμός ασχολείται με τη σχεδίαση των δραστηριοτήτων του συστήματος που περιγράφει για να προκύψει το άριστο αποτέλεσμα, το αποτέλεσμα δηλαδή εκείνο, που μεταξύ όλων των δυνατών εναλλακτικών λύσεων πραγματώνει τον προκαθορισμένο σκοπό κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση και την επίλυση πολλών συνδυαστικών προβλημάτων τα οποία εκ πρώτης όψεως δεν σχετίζονται με το γραμμικό προγραμματισμό [3].

3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

Αν κάποιος καταφέρει να προσαρμόσει το πρόβλημα του στο πρότυπο του γραμμικού προγραμματισμού, έχει στη διάθεση του ένα σύνολο εργαλείων, όχι μόνο για να βρει την καλύτερη λύση στο ερώτημα που τον απασχολεί, αλλά και για να προχωρήσει σε μια ανάλυση υποθέσεων για τις διάφορες παραμέτρους του προβλήματος. Η λύση, ανεξάρτητα από το πόσο λεπτομερής ή εξεζητημένη είναι, έχει απλά έναν υποστηρικτικό ρόλο.

Κάθε πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού έχει τα εξής χαρακτηριστικά στοιχεία:

- τις μεταβλητές (αγνώστους) του προβλήματος,
- την αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να βελτιστοποιηθεί,
- τους περιορισμούς που θα πρέπει να τηρηθούν ώστε να ικανοποιούνται οι συνθήκες του προβλήματος και
- τις παραμέτρους (δεδομένα) του προβλήματος.

Οι **μεταβλητές** είναι τα δομικά στοιχεία του προβλήματος που μπορεί να επηρεάσει ο αναλυτής. Είναι δηλαδή τα μεγέθη εκείνα για τα οποία καλούμαστε να προσδιορίσουμε τις καλύτερες δυνατές τιμές. Για το λόγο αυτό συχνά αναφέρονται και ως μεταβλητές ελέγχου ή μεταβλητές απόφασης. Στο γραμμικό προγραμματισμό οι μεταβλητές είναι πάντα συνεχείς και μη αρνητικές.

Η **αντικειμενική συνάρτηση** αποτελεί το κριτήριο βελτιστοποίησης, το οποίο εκφράζεται στο γραμμικό προγραμματισμό από την ελαχιστοποίηση ή τη μεγιστοποίηση μιας γραμμικής σχέσης ως προς τις μεταβλητές απόφασης.

Οι **περιορισμοί** είναι γραμμικές σχέσεις (ισότητες ή ανισότητες) των μεταβλητών απόφασης. Οι περιορισμοί περιγράφουν το πρόβλημα περιορίζοντας τις τιμές που μπορούν να πάρουν οι μεταβλητές απόφασης και καθορίζουν το εφικτό χωρίο των λύσεων.

Οι **παραμέτροι** είναι τα δεδομένα του προβλήματος και συγκεκριμένα στη μοντελοποιημένη μορφή του προβλήματος είναι πραγματικοί αριθμοί ως συντελεστές των μεταβλητών απόφασης στην αντικειμενική συνάρτηση ή στους περιορισμούς.

3.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΓΕΝΙΚΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ Γ.Π.

Το γενικό πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

Να βρεθούν οι τιμές των μεταβλητών x_1, \dots, x_n που μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση

$$z = f(x) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (3.1)$$

Οι μεταβλητές πρέπει να ικανοποιούν τους περιορισμούς

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\{ \leq = \geq \} b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\{ \leq = \geq \} b_2 \\ \vdots & \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\{ \leq = \geq \} b_m \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\text{και } x_j \geq 0, \quad j=1,2,\dots,n \quad (3.3)$$

όπου τα a_{ij} , b_i , c_j είναι γνωστές σταθερές.

Η συνάρτηση:

$$z = f(x) = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (3.4)$$

ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση (objective function). Αυτή η συνάρτηση είναι γραμμική ως προς τις μεταβλητές x_j , $j=1,2,3,\dots,n$. Επίσης, κάθε περιορισμός είναι μια γραμμική συνάρτηση ως προς τις μεταβλητές x_j , $j=1,2,3,\dots,n$.

Οι συντελεστές c_j , $j=1,2,3,\dots,n$ της αντικειμενικής συνάρτησης γενικά αναφέρονται σαν αντικειμενικοί συντελεστές. Σε προβλήματα μεγιστοποίησης χαρακτηρίζονται σαν συντελεστές κέρδους ενώ σε προβλήματα ελαχιστοποίησης σαν συντελεστές κόστους.

Η συνθήκη $x_j \geq 0$, $j=1,2,\dots,n$ αναφέρεται και ως συνθήκη της μη αρνητικότητας.

Λύση ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού ονομάζεται κάθε σύνολο x_j , $j=1,2,3,\dots,n$ το οποίο ικανοποιεί τους περιορισμούς του προβλήματος.

Εφικτή ή δυνατή λύση είναι κάθε λύση που ικανοποιεί τους περιορισμούς μη αρνητικότητας.

Βέλτιστη λύση είναι κάθε εφικτή λύση η οποία βελτιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση.

Συνήθως σε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού υπάρχουν άπειρες λύσεις και επιδιώκουμε την εύρεση της βέλτιστης δυνατής λύσης.

3.4 ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

Έχοντας εξετάσει κάποιες περιπτώσεις όπου είναι δυνατό να εφαρμοστεί ο γραμμικός προγραμματισμός και τη γενική διατύπωση ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού είναι σημαντικό να εξετάσουμε τις απαιτούμενες προϋποθέσεις για την εφαρμογή του σ' ένα οποιοδήποτε πρόβλημα βελτιστοποίησης. Αυτές είναι που περιορίζουν γενικά το φάσμα των δυνατοτήτων εφαρμογής του γραμμικού προγραμματισμού. Οι προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν για να διατυπωθεί ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού είναι οι εξής:

- Γραμμικότητα (Αναλογικότητα και Προσθετικότητα)
- Διαιρετότητα
- Βεβαιότητα (Προσδιοριστικότητα) και
- Μονοδιάσταση.

Γραμμικότητα (Αναλογικότητα και Προσθετικότητα)

Όλες οι συναρτήσεις του προβλήματος, αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμοί πρέπει να είναι γραμμικές ως προς τις άγνωστες μεταβλητές x_j , $j=1,2,3,\dots,n$. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να ισχύουν οι ιδιότητες της αναλογικότητας και της προσθετικότητας, δηλαδή εάν y είναι μια συνάρτηση n μεταβλητών και

a_j , $j=1,2,3,\dots,n$. είναι σταθερές, πρέπει να ισχύει:

$$y(a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n) = a_1y(x_1) + a_2y(x_2) + \dots + a_ny(x_n) \quad (3.5)$$

Σε πολλές περιπτώσεις στις οποίες δεν ισχύει απόλυτα η προϋπόθεση της γραμμικότητας μπορεί να γίνει μια αρκετά καλή προσέγγιση με γραμμικές συναρτήσεις.

Διαιρετότητα

Το μοντέλο του γραμμικού προγραμματισμού υποθέτει ότι κάθε μεταβλητή είναι συνεχής και επομένως άπειρα διαιρετή. Αυτό συνεπάγεται ότι όλες οι μεταβλητές επιτρέπεται να πάρουν κλασματικές ή ακέραιες τιμές. Όταν η υπόθεση της διαιρετότητας δεν ισχύει υπάρχουν δύο ενδεχόμενα :

- α) Να αγνοηθεί η υπόθεση αυτή, να λυθεί το πρόβλημα με μεθόδους γραμμικού προγραμματισμού, και οι τιμές των μεταβλητών να στρογγυλευθούν στην κοντινότερη ακέραια μονάδα. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κυρίως όταν οι τιμές των μεταβλητών είναι μεγάλες.
- β) Όταν οι τιμές των μεταβλητών είναι μικρές (π.χ. 0 ή 1) όπως σε πολλά προβλήματα επενδύσεων τότε πρέπει να χρησιμοποιηθούν τεχνικές του ακέραιου προγραμματισμού.

Βεβαιότητα (Προσδιοριστικότητα)

Το μοντέλο του γραμμικού προγραμματισμού. προϋποθέτει ότι όλοι οι παράμετροι του προβλήματος είναι γνωστές με απόλυτη βεβαιότητα. Στην περίπτωση που μερικοί ή όλοι οι συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης ή των περιορισμών είναι τυχαίες μεταβλητές το πρόβλημα γίνεται πρόβλημα στοχαστικού προγραμματισμού.

Μονοδιάσταση

Η προϋπόθεση της μονοδιάστασης σημαίνει ότι σε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού η βελτιστοποίηση γίνεται με βάση μία μόνο αντικειμενική συνάρτηση. Σε περίπτωση που είναι απαραίτητα τα κριτήρια βελτιστοποίησης να είναι περισσότερα από ένα, το πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί σαν πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού αν θέσουμε στόχους για κάθε ένα από τα κριτήρια αυτά και ελαχιστοποιήσουμε το άθροισμα των αποκλίσεων από αυτές.

Έτσι για να χαρακτηριστεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης σαν πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού (π.γ.π.) πρέπει :

- Να αφορά τη μεγιστοποίηση (ή ελαχιστοποίηση) μιας γραμμικής συνάρτησης των αγνώστων (μεταβλητών). Η συνάρτηση αυτή ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση.
- Οι τιμές των αγνώστων (μεταβλητών) να ικανοποιούν ένα σύνολο περιορισμών. Κάθε περιορισμός πρέπει να είναι μια γραμμική εξίσωση ή ανίσωση.
- Κάθε μεταβλητή x_j να είναι συνεχής και μη αρνητική ($x_j \geq 0$).

4. ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΦΟΡΤΩΣΗΣ (TRANSSHIPMENT MODEL) ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΠΑΡΟΧΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η ανάλυση του μοντέλου που έχει προταθεί από τους Paroulias και Grossmann το 1983 [1] αλλά και των αλλαγών που έγιναν ώστε να το εφαρμόσουμε στο παρών πρόβλημα. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο η θερμότητα μεταφορτώνεται από τις πηγές (θερμά ρεύματα) στους προορισμούς (ψυχρά ρεύματα). Με σκοπό να εξασφαλιστεί θερμοδυναμικά η δυνατότητα ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων, αυτή η ανταλλαγή γίνεται διαμέσου ενδιάμεσων σταθμών.

4.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΑ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΑ (TEMPERATURE INTERVALS)

Οι ενδιάμεσοι σταθμοί του μοντέλου μεταφόρτωσης αντιπροσωπεύουν τα θερμοκρασιακά διαστήματα στα οποία η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων είναι εφικτή. Για να προσδιοριστούν αυτά τα διαστήματα πρέπει πρώτα να μετατοπιστούν τα θερμά και τα ψυχρά ρεύματα της διεργασίας κατά $-\Delta T_{min} / 2$ και $+\Delta T_{min} / 2$ αντίστοιχα. Όπου ΔT_{min} είναι η ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας στην οποία θεωρούμε ότι συμβαίνει μεταφορά θερμότητας. Το ΔT_{min} εξαρτάται από τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται. Με αυτή τη μετατόπιση των ρευμάτων εξασφαλίζουμε ότι η ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας θα τηρείται ακόμα και αν γίνεται μεταφορά θερμότητας μεταξύ ρευμάτων με την ίδια μετατοπισμένη θερμοκρασία εισόδου και εξόδου αντίστοιχα. Αφού μετατοπιστούν οι θερμοκρασίες των ρευμάτων, μπορούν να προσδιοριστούν τα θερμοκρασιακά διαστήματα με βάση τις θερμοκρασίες εισόδου των ρευμάτων της διεργασίας, τη μεγαλύτερη και τη μικρότερη θερμοκρασία εισόδου ή εξόδου των ρευμάτων της διεργασίας και τις θερμοκρασίες εισόδου των βοηθητικών παροχών, εφόσον αυτές βρίσκονται εντός του εύρους μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας των ρευμάτων της διεργασίας [4].

4.3 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΤΩΣΗΣ

Αφού προσδιοριστούν τα θερμοκρασιακά διαστήματα και κατά συνέπεια τα ρεύματα που συμμετέχουν σε καθένα διάστημα, μπορούμε να συνεχίσουμε με τη διατύπωση του μοντέλου. Αν υποθέσουμε μια διεργασία με H θερμά ρεύματα και C ψυχρά ρεύματα στην οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν S θερμές βοηθητικές παροχές (π.χ. ατμοί) και W ψυχρές παροχές (π.χ. νερό ψύξης), μπορούμε να ορίσουμε τα ακόλουθα σύνολα:

$$H_k = \{ h \mid \text{θερμό ρεύμα } h \text{ που παρέχει θερμότητα στο θερμοκρασιακό διάστημα } k \}$$

$$C_k = \{ c \mid \text{ψυχρό ρεύμα } c \text{ που απαιτεί θερμότητα από το θερμοκρασιακό διάστημα } k \}$$

$$S_k = \{ s \mid \text{θερμή παροχή } s \text{ που παρέχει θερμότητα στο θερμοκρασιακό διάστημα } k \}$$

$$W_k = \{ w \mid \text{ψυχρή παροχή } w \text{ που απομακρύνει θερμότητα από το θερμοκρασιακό διάστημα } k \}$$

Στη συνέχεια μπορούμε να υπολογίσουμε την προσφορά θερμότητας των θερμών ρευμάτων και τη ζήτηση θερμότητας από τα ψυχρά ρεύματα σε κάθε θερμοκρασιακό διάστημα. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με βάση τις μετατοπισμένες θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των ρευμάτων καθώς και τις θερμοχωρητικότητες τους σε συνδυασμό με τις θερμοκρασίες που ορίζουν τα όρια του κάθε θερμοκρασιακού διαστήματος.

Έτσι έχουμε για τα θερμά ρεύματα:

$$\begin{cases} QH_{hk} = FCPH_h(TH_k - TH_{k+1}), & TOUTH_h \leq TH_{k+1} \\ QH_{hk} = FCPH_h(TH_k - TOUTH_h), & TOUTH_h > TH_{k+1} \end{cases}$$

και για τα ψυχρά ρεύματα:

$$\begin{cases} QC_{ck} = FCPC_c(TH_k - TH_{k+1}), & TOUTC_c \geq TH_k \\ QC_{ck} = FCPC_c(TOUTC_c - TH_{k+1}), & TOUTC_c < TH_k \end{cases}$$

Μετά από αυτούς τους υπολογισμούς οι γνωστές παράμετροι του προβλήματος είναι:

QH_{hk} : προσφορά θερμότητας του θερμού ρεύματος h στο θερμοκρασιακό διάστημα k

QC_{ck} : ζήτηση θερμότητας του ψυχρού ρεύματος c από το θερμοκρασιακό διάστημα k

CS_s : μοναδιαίο κόστος της θερμής παροχής s

CW_w : μοναδιαίο κόστος της ψυχρής παροχής w

και οι μεταβλητές του προβλήματος είναι:

QS_s : θερμότητα που προσφέρει η θερμή παροχή s

QW_w : θερμότητα που απομακρύνεται από τη ψυχρή παροχή w

R_k : το υπόλοιπο θερμότητας που εξέρχεται από το θερμοκρασιακό διάστημα k

Το μοντέλο περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις

$$\min Z = \sum_s CS_s QS_s + \sum_w CW_w QW_w \quad (4.1)$$

s.t.

$$R_k - R_{k-1} - \sum_{s \in S_k} QS_s + \sum_{w \in W_k} QW_w = \sum_{h \in H_k} QH_{hk} - \sum_{c \in C_k} QC_{ck} , \quad (4.2)$$
$$k = 1, 2, \dots, KM$$

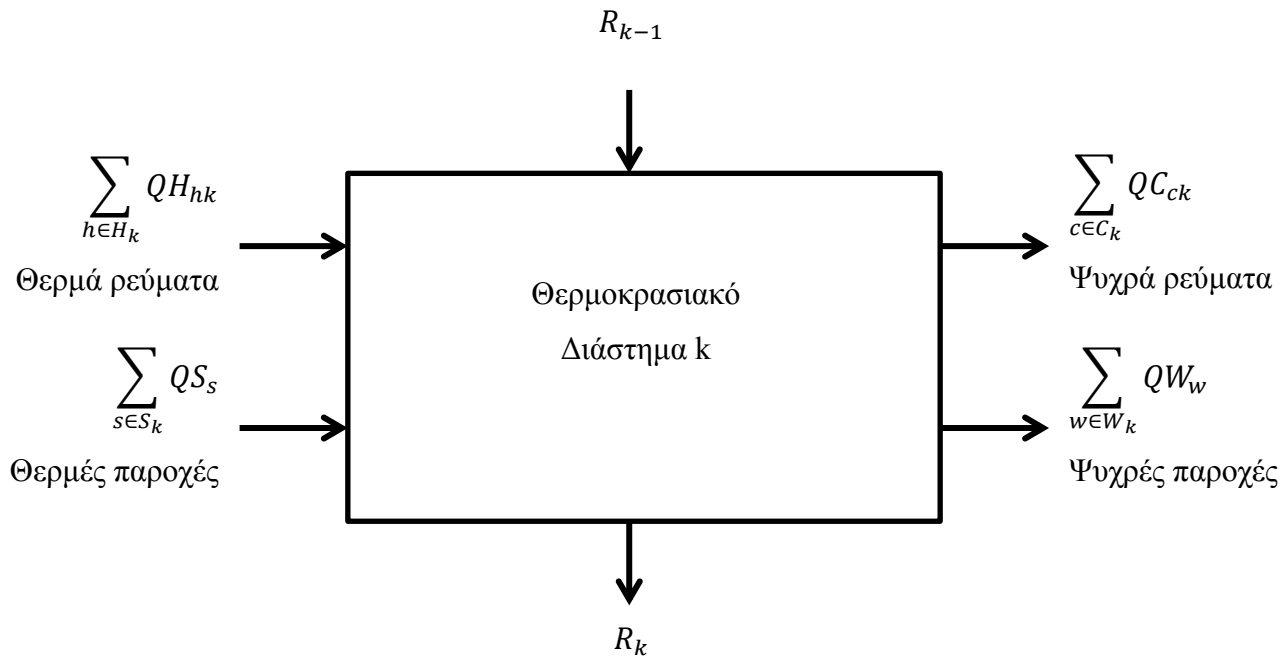
$$QS_s \geq 0, \quad QW_w \geq 0, \quad R_k \geq 0 \quad k = 1, \dots, KM - 1 \quad (4.3)$$

$$R_0 = 0, R_k = 0 \quad (4.4)$$

Η παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους των βοηθητικών παροχών. Αυτός ο στόχος επιτυγχάνεται αφενός μεγιστοποιώντας την εναλλαγή

θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων της διεργασίας, μέσα στα όρια πάντα που επιβάλλουν οι περιορισμοί και αφετέρου χρησιμοποιώντας κατά το δυνατόν τις βοηθητικές παροχές με το μικρότερο κόστος.

Όσο αναφορά τους περιορισμούς του προβλήματος περιγράφουν τα ισοζύγια θερμότητας σε κάθε θερμοκρασιακό διάστημα και γίνονται πιο κατανοητά σε συνδυασμό με την Εικόνα 4-1 στην οποία απεικονίζονται οι ροές θερμότητας σε κάθε θερμοκρασιακό διάστημα.

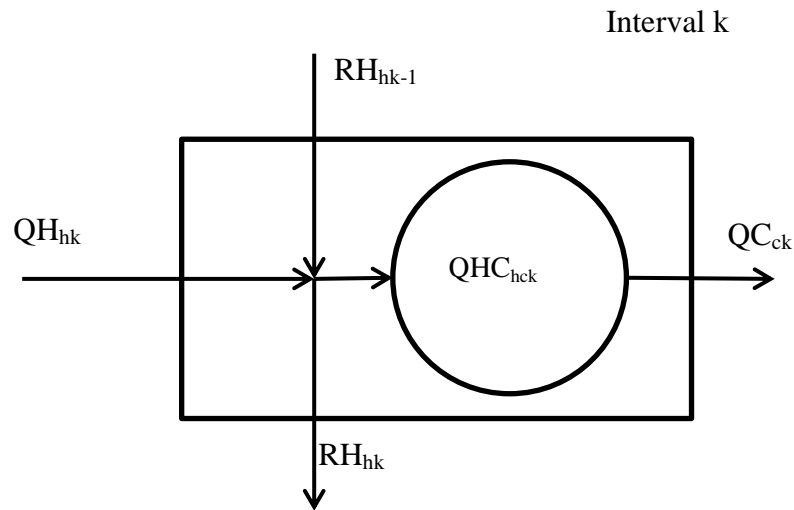


Εικόνα 4-1 Ισοζύγια θερμότητας στο θερμοκρασιακό διάστημα k

4.4 ΤΟ ΑΝΕΠΤΥΓΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΦΟΡΩΣΗΣ

Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε μέχρι τώρα, γίνεται η υπόθεση ότι κάθε ρεύμα μπορεί να ανταλλάξει θερμότητα με οποιοδήποτε άλλο αν αυτό είναι θερμοδυναμικά εφικτό και αυτό συμβαίνει γιατί δεν υπάρχει κανένας περιορισμός σχετικά με το ποια ρεύματα μπορούν να ανταλλάξουν θερμότητα. Στην πράξη όμως πολλές φορές η εναλλαγή θερμότητας μεταξύ δυο ρευμάτων είναι ανεπιθύμητη ή ανέφικτη. Αυτό μπορεί να συμβαίνει είτε γιατί τα δυο ρεύματα είναι πολύ μακριά μεταξύ τους και απαιτείται περίπλοκος και ακριβός εξοπλισμός για να ανταλλάξουν θερμότητα, ή λόγω προβλημάτων που πιθανόν να προκύπτουν σε σχέση με τον έλεγχο, την ασφάλεια και την εύκολη εκκίνηση της μονάδας. Έτσι είναι προφανής η ανάγκη για τη διατύπωση ενός ανεπτυγμένου μοντέλου μεταφόρτωσης το οποίο θα περιλαμβάνει περιορισμούς για τους συνδυασμούς μεταξύ ρευμάτων [5].

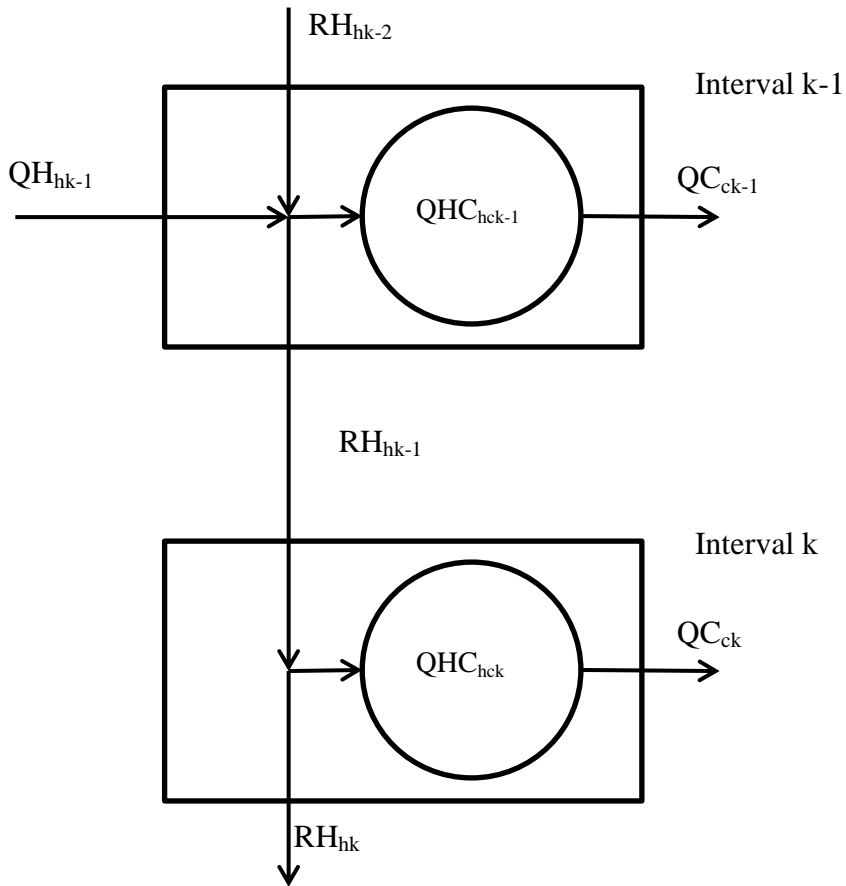
Με σκοπό να μπορέσουμε να διατυπώσουμε τους περιορισμούς πρέπει να κάνουμε κάποιες ουσιαστικές αλλαγές στο μοντέλο. Αρχικά αντί για ένα συνολικό υπόλοιπο θερμότητας R_k που εξέρχεται από το θερμοκρασιακό διάστημα k , ορίζουμε ξεχωριστά υπόλοιπα θερμότητας RH_{hk} , RS_{sk} για κάθε θερμό ρεύμα h και θερμή παροχή s που συμμετέχει στο θερμοκρασιακό διάστημα k ή στα θερμοκρασιακά διαστήματα με μεγαλύτερη θερμοκρασία. Επιπλέον για κάθε διάστημα ορίζουμε τη μεταβλητή QHC_{hck} για να δηλώσουμε το ποσό θερμότητας που εναλλάσσεται μεταξύ του θερμού ρεύματος h και του ψυχρού ρεύματος c σε αυτό το διάστημα k . Τέτοιες μεταβλητές ορίζουμε και για την εναλλαγή μεταξύ θερμών ρευμάτων h και ψυχρών παροχών w και μεταξύ θερμών παροχών s και ψυχρών ρευμάτων c , QHW_{hwk} και QSC_{sck} αντίστοιχα. Οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών QHW_{hwk} , RH_{hk} και των παραμέτρων QH_{hk} και QC_{ck} στο θερμοκρασιακό διάστημα k για ένα θερμό ρεύμα h και ένα ψυχρό ρεύμα c απεικονίζονται στην Εικόνα 4-2.



Εικόνα 4-2 Σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών στο διάστημα k

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι με τις θεωρήσεις που έγιναν ένα συγκεκριμένο ζεύγος ρευμάτων μπορεί να ανταλλάξει θερμότητα σε ένα θερμοκρασιακό διάστημα k αν ισχύει μία από τις παρακάτω συνθήκες:

1. Το θερμό ρεύμα h και το ψυχρό ρεύμα c να συμμετέχουν στο ίδιο θερμοκρασιακό διάστημα k . Η περίπτωση αυτή είναι προφανής και απεικονίζεται στην Εικόνα 4-2.
2. Μόνο το ψυχρό ρεύμα c να συμμετέχει στο θερμοκρασιακό διάστημα k ενώ το θερμό ρεύμα h να συμμετέχει σε κάποιο πιο υψηλό διάστημα, δηλαδή σε κάποιο διάστημα του οποίου τα όρια ορίζονται σε πιο υψηλή θερμοκρασία. Ο λόγος που αυτό είναι εφικτό στο μοντέλο είναι καθώς η θερμότητα μεταφέρεται από το υπόλοιπο RH_{hk-1} στο διάστημα k . Αυτή η περίπτωση απεικονίζεται στην Εικόνα 4-3.



Εικόνα 4-3 Σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών σε δυο διαδοχικά διαστήματα

Βασιζόμενοι στις παραπάνω παρατηρήσεις μπορούμε να διατυπώσουμε το ανεπτυγμένο μοντέλο μεταφόρτωσης το οποίο περιλαμβάνει πληροφορίες για την εναλλαγή θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων και των παροχών. Έτσι ορίζουμε τα ακόλουθα σύνολα:

$$H'_k = \{ h \mid \text{θερμό ρεύμα } h \text{ που παρέχει θερμότητα στο διάστημα } k \text{ ή σε κάποιο υψηλότερο} \}$$

$$S'_k = \{ s \mid \text{θερμή παροχή } s \text{ που παρέχει θερμότητα στο διάστημα } k \text{ ή σε κάποιο υψηλότερο} \}$$

Τα σύνολα C_k και W_k ορίζονται όπως και στο προηγούμενο μοντέλο

Οι γνωστές παράμετροι του προβλήματος είναι όπως και στο σύντομο μοντέλο μεταφόρτωσης:

QH_{hk} : προσφορά θερμότητας του θερμού ρεύματος h στο θερμοκρασιακό διάστημα k

QC_{ck} : ζήτηση θερμότητας του ψυχρού ρεύματος c από το θερμοκρασιακό διάστημα k

CS_s : μοναδιαίο κόστος της θερμής παροχής s

CW_w : μοναδιαίο κόστος της ψυχρής παροχής w

Ενώ οι μεταβλητές του προβλήματος είναι:

QS_s : θερμότητα που προσφέρει η θερμή παροχή s

QW_w : θερμότητα που απομακρύνεται από την ψυχρή παροχή w

QHC_{hck} : θερμότητα που εναλλάσσεται μεταξύ του θερμού ρεύματος h και του ψυχρού ρεύματος c στο θερμοκρασιακό διάστημα k

QHW_{hwk} : θερμότητα που εναλλάσσεται μεταξύ του θερμού ρεύματος h και της ψυχρής παροχής w στο θερμοκρασιακό διάστημα k

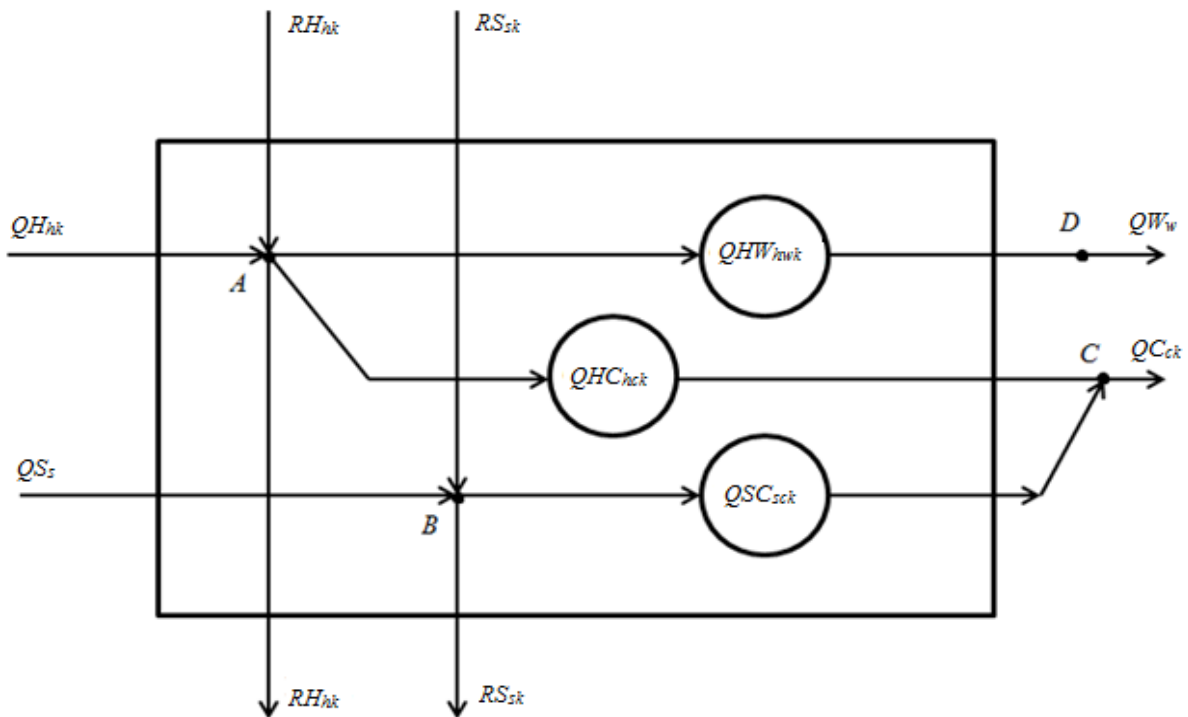
QSC_{sck} : θερμότητα που εναλλάσσεται μεταξύ της θερμής παροχής s και του ψυχρού ρεύματος c στο θερμοκρασιακό διάστημα k

RH_{hk} : το υπόλοιπο θερμότητας που προσφέρει το θερμό ρεύμα h και εξέρχεται από το θερμοκρασιακό διάστημα k

RS_{sk} : το υπόλοιπο θερμότητας που προσφέρει η θερμή παροχή s και εξέρχεται από το θερμοκρασιακό διάστημα k

Όπως και στο σύντομο μοντέλο μεταφόρτωσης έτσι και στο ανεπτυγμένο οι περιορισμοί περιγράφουν τα ισοζύγια θερμότητας. Όμως σε αυτή την περίπτωση σε αντίθεση με το σύντομο μοντέλο δεν πρόκειται για συνολικά ισοζύγια θερμότητας γύρω από το κάθε θερμοκρασιακό διάστημα, αλλά ισοζύγια θερμότητας σε καθένα από τα παρακάτω σημεία μέσα σε κάθε θερμοκρασιακό διάστημα:

1. Για τα θερμά ρεύματα και τις θερμές παροχές στους κόμβους που συσχετίζουν την προσφερόμενη θερμότητα με την εναλλαγή θερμότητας και τα υπόλοιπα θερμότητας (σημεία A και B στην Εικόνα 4-4).
2. Για τα ψυχρά ρεύματα και τις ψυχρές παροχές στους κόμβους που συσχετίζουν την εναλλαγή θερμότητας με την θερμότητα που απάγεται (σημεία C και D στην Εικόνα 4-4)



Εικόνα 4-4 Αναπαράσταση όλων των σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών σε ένα διάστημα k του ανεπτυγμένου μοντέλου

Έτσι το ανεπτυγμένο μοντέλο μεταφόρτωσης για τον υπολογισμό της ελάχιστης ανάγκης για βοηθητικές παροχές περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\min Z = \sum_s CS_s QS_s + \sum_w CW_w QW_w \quad (4.5)$$

s.t.

$$RH_{hk} - RH_{hk-1} + \sum_{c \in C_k} QHC_{hck} + \sum_{w \in W_k} QHW_{hwk} = QH_{hk}, \quad (4.6)$$

$$h \in H'_k$$

$$RS_{sk} - RS_{sk-1} + \sum_{c \in C_k} QSC_{sck} - QS_s = 0, \quad s \in S'_k \quad (4.7)$$

$$\sum_{h \in H'_k} QHC_{hck} + \sum_{s \in S'_k} QSC_{sck} = QC_{ck}, \quad c \in C_k \quad (4.8)$$

$$\sum_{h \in H'_k} QHW_{hwk} = QW_w, \quad w \in W_k \quad k = 1, 2, \dots, KM \quad (4.9)$$

$$RH_{hk}, RS_{sk}, QHC_{hck}, QHW_{hwk}, QSC_{sck}, QS_s, QW_w \geq 0 \quad (4.10)$$

$$RH_{h,0} = RS_{s,0} = 0 \quad (4.11)$$

Το μοντέλο αυτό όπως είναι εμφανές είναι αρκετά μεγαλύτερο από το σύντομο μοντέλο που παρουσιάστηκε προηγουμένως, όμως η σημαντικότητα του έγκειται στο γεγονός ότι δίνεται η δυνατότητα να οριστούν περιορισμοί για την εναλλαγή θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων και μεταξύ ρευμάτων και βοηθητικών παροχών. Έτσι αν θέλουμε να απαγορεύσουμε την εναλλαγή θερμότητας μεταξύ του θερμού ρεύματος h και του ψυχρού ρεύματος c το μόνο που έχουμε να κάνουμε είναι να ορίσουμε τη μεταβλητή $QHC_{hck} = 0$ για όλα τα θερμοκρασιακά διαστήματα k . Εναλλακτικά στην περίπτωση που θέλουμε να περιορίσουμε την εναλλαγή θερμότητας μεταξύ των δυο ρευμάτων ανάμεσα σε κάποια όρια τότε πρέπει να θέσουμε περιορισμούς της μορφής:

$$QLHC_{hc} \leq \sum_{k=1}^{KM} QHC_{hck} \leq QUHC_{hc} \quad (4.12)$$

Όπου τα $QLHC_{hc}$ και $QUHC_{hc}$ είναι παράμετροι που αντιπροσωπεύουν τα κατώτερα και ανώτερα όρια εναλλαγής θερμότητας μεταξύ δυο ρευμάτων αντίστοιχα.

Αντίστοιχοι περιορισμοί διατυπώνονται για την εναλλαγή θερμότητας μεταξύ θερμού ρεύματος και ψυχρής βοηθητικής παροχής και μεταξύ ψυχρού ρεύματος και θερμής παροχής στις σχέσεις (4.13) και (4.14) αντίστοιχα.

$$QLHW_{hw} \leq \sum_{k=1}^{KM} QHW_{hwk} \leq QUHW_{hw} \quad (4.13)$$

$$QLSC_{sc} \leq \sum_{k=1}^{KM} QSC_{sck} \leq QUSC_{sc} \quad (4.14)$$

Όπου τα $QLHW_{hw}$ και $QUHW_{hw}$ είναι τα κατώτερα και ανώτερα όρια εναλλαγής θερμότητας μεταξύ ενός θερμού ρεύματος και μιας ψυχρής παροχής, ενώ τα $QLSC_{sc}$ και $QUSC_{sc}$ είναι τα αντίστοιχα όρια για την εναλλαγή θερμότητας μεταξύ ενός ψυχρού ρεύματος και μιας θερμής βοηθητικής παροχής.

Αυτή η δυνατότητα που προσφέρει το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ιδιαίτερα σημαντική συγκεκριμένα για τον τύπο του προβλήματος που εξετάζεται στη συγκεκριμένη εργασία. Αυτό

δικαιολογείται από το γεγονός ότι ενδιαφερόμαστε για τον υπολογισμό των αναγκών για βοηθητικές παροχές όπως αυτές προκύπτουν μετά το σχεδιασμό του δικτύου εναλλαγής θερμότητας της κάθε διεργασίας ξεχωριστά. Έτσι μας δίνεται η δυνατότητα να ενσωματώσουμε στους υπολογισμούς αποφάσεις που παίρνονται κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του δικτύου εναλλαγής θερμότητας και αφορούν τον περιορισμό του αριθμού των εναλλακτών θερμότητας με σκοπό τη μείωση του παγίου κόστους.

4.5 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΑΝΕΠΤΥΓΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΦΟΡΤΩΣΗΣ

Τα δύο μοντέλα που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια διατυπώθηκαν από τους Ραρούλιας και Grossmann το 1983 [1] και μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για τον υπολογισμό των ενεργειακών απαιτήσεων. Όμως για της ανάγκες της επίλυσης του προβλήματος που αντιμετωπίζεται σε αυτή την εργασία πρέπει να γίνουν κάποιες αλλαγές. Αυτές οι αλλαγές γίνονται στο ανεπτυγμένο μοντέλο μεταφόρτωσης καθώς παρά την περιπλοκότητα του, τα πλεονεκτήματα που προσφέρει είναι πολύ σημαντικά.

Η πρώτη αλλαγή που πρέπει να γίνει αφορά τον αριθμό των διεργασιών που εξετάζονται. Τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν μέχρι στιγμής κάνουν υπολογισμούς για μια μόνο διεργασία. Όμως στο πρόβλημα που εξετάζεται υπάρχει ανάγκη για υπολογισμό των ενεργειακών απαιτήσεων περισσότερων διεργασιών. Έτσι για λόγους συμβατότητας μεταξύ των δυο μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν αλλά και για εξοικονόμηση υπολογιστικής ισχύος το μοντέλο μεταφόρτωσης πρέπει να τροποποιηθεί.

Επιπλέον όπως θα φανεί στη συνέχεια είναι επιθυμητό οι θερμοκρασίες των διάφορων ατμών που χρησιμοποιούνται ως θερμές παροχές να είναι ελεύθερες μεταβλητές κατά την επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού διεργασιών που θα υλοποιηθούν. Για αυτό το λόγο επιλέγεται να γίνει ο υπολογισμός των ενεργειακών αναγκών για πολλούς διαφορετικούς συνδυασμούς ατμών, ώστε να αναδειχτούν όσο το δυνατό περισσότερες δυνατότητες για ενεργειακή ολοκλήρωση μεταξύ των διεργασιών.

Για να μπορεί το μοντέλο να ικανοποιήσει τις παραπάνω απαιτήσεις πρέπει να γίνουν κάποιες αλλαγές στον τρόπο που διατυπώνεται. Έτσι αρχικά ο αριθμός των συνόλων, των μεταβλητών

και οι παραμέτρων που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να καλύπτονται όλες οι περιπτώσεις που εξετάζονται.

Κατά συνέπεια τα σύνολα που ορίζουμε για τη διατύπωση του μοντέλου είναι:

$H'_{kji} = \{ h \mid \text{θερμό ρεύμα } h \text{ που παρέχει θερμότητα στο διάστημα } k \text{ ή σε κάποιο υψηλότερο της διεργασίας } j \text{ για το συνδυασμό παροχών } i \}$

$C_{kji} = \{ c \mid \text{ψυχρό ρεύμα } c \text{ που απαιτεί θερμότητα από το θερμοκρασιακό διάστημα } k \text{ της διεργασίας } j \text{ για το συνδυασμό παροχών } i \}$

$S'_{kji} = \{ s \mid \text{θερμή παροχή } s \text{ που παρέχει θερμότητα στο διάστημα } k \text{ ή σε κάποιο υψηλότερο της διεργασίας } j \text{ για το συνδυασμό παροχών } i \}$

$W_{kji} = \{ w \mid \text{ψυχρή παροχή } w \text{ που απομακρύνει θερμότητα από το θερμοκρασιακό διάστημα } k \text{ της διεργασίας } j \text{ για το συνδυασμό παροχών } i \}$

Οι γνωστές παράμετροι του προβλήματος είναι:

QH_{hkji} : προσφορά θερμότητας του θερμού ρεύματος h στο θερμοκρασιακό διάστημα k της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i

QC_{ckji} : ζήτηση θερμότητας του ψυχρού ρεύματος c από το θερμοκρασιακό διάστημα k της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i

CS_{si} : μοναδιαίο κόστος της θερμής παροχής s του συνδυασμού i

CW_{wi} : μοναδιαίο κόστος της ψυχρής παροχής w του συνδυασμού i

Ενώ οι μεταβλητές του προβλήματος είναι:

QS_{sji} : θερμότητα που προσφέρει η θερμή παροχή s στη διεργασία j για το συνδυασμό παροχών i

QW_{wji} : θερμότητα που απομακρύνεται από την ψυχρή παροχή w στη διεργασία j για το συνδυασμό παροχών i

QHC_{hckji} : θερμότητα που εναλλάσσεται μεταξύ του θερμού ρεύματος h και του ψυχρού ρεύματος c στο θερμοκρασιακό διάστημα k της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i

QHW_{hwkji} : θερμότητα που εναλλάσσεται μεταξύ του θερμού ρεύματος h και της ψυχρής παροχής w στο θερμοκρασιακό διάστημα k της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i

QSC_{sckji} : θερμότητα που εναλλάσσεται μεταξύ της θερμής παροχής s και του ψυχρού ρεύματος c στο θερμοκρασιακό διάστημα k της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i

RH_{hkji} : το υπόλοιπο θερμότητας που προσφέρει το θερμό ρεύμα h και εξέρχεται από το θερμοκρασιακό διάστημα k της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i

RS_{skji} : το υπόλοιπο θερμότητας που προσφέρει η θερμή παροχή s και εξέρχεται από το θερμοκρασιακό διάστημα k της διεργασίας j για το συνδυασμό παροχών i

Κατά αντιστοιχία οι περιορισμοί που παρουσιάστηκαν κατά τη διατύπωση του ανεπτυγμένου μοντέλου μεταφόρτωσης πρέπει σε αυτό το μοντέλο να διατυπωθούν για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς διεργασιών και παροχών που χρησιμοποιούνται. Επιπλέον η αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να διατυπωθεί με τρόπο τέτοιο ώστε η ελαχιστοποίηση της να συνεπάγεται την ελαχιστοποίηση του κόστους των βοηθητικών παροχών για κάθε συνδυασμό διεργασίας και πιθανών παροχών. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται για αυτόν το σκοπό εκφράζει το συνολικό κόστος για βοηθητικές όλων των περιπτώσεων διεργασιών και πιθανών συνδυασμών παροχών. Οπότε το μοντέλο διατυπώνεται ως εξής:

$$\min Z = \sum_i \sum_j \sum_s CS_{si}QS_{sji} + \sum_i \sum_j \sum_w CW_{wi}QW_{wji} \quad (4.15)$$

s.t.

$$RH_{hkji} - RH_{h,k-1,j,i} + \sum_{c \in C_{kji}} QHC_{hckji} + \sum_{w \in W_{kji}} QHW_{hwkji} = QH_{hkji}, \quad (4.16)$$

$$h \in H'_{kji}$$

$$RS_{skji} - RS_{s,k-1,j,i} + \sum_{c \in C_{kji}} QSC_{sckji} - QS_{sji} = 0, \quad s \in S'_{kji} \quad (4.17)$$

$$\sum_{h \in H'_{kji}} QHC_{hckji} + \sum_{s \in S'_{kji}} QSC_{sckji} = QC_{ckji}, \quad c \in C_{kji} \quad (4.18)$$

$$\sum_{h \in H'_{kji}} QHW_{hwkji} = QW_{wji}, \quad w \in W_{kji} \quad (4.19)$$

$$k = 1, 2, \dots, KM_{ji}, \quad j = 1, 2, \dots, JM, \quad i = 1, 2, \dots, IM \quad (4.20)$$

$$RH_{hkji}, RS_{skji}, QHC_{hckji}, QHW_{hwkji}, QSC_{sckji}, QS_{sji}, QW_{wji} \geq 0 \quad (4.21)$$

$$RH_{h,0,ji} = RS_{s,0,ji} = 0 \quad (4.22)$$

Κατά αντιστοιχία με το ανεπτυγμένο μοντέλο μεταφόρτωσης μπορούμε και στο τροποποιημένο μοντέλο να θέσουμε όρια στην εναλλαγή θερμότητας μεταξύ ρευμάτων και βοηθητικών παροχών μέσω της διατύπωσης περιορισμών. Αυτοί οι περιορισμοί διατυπώνονται στις σχέσεις (4.23), (4.24) και (4.25) για όλες τις πιθανές περιπτώσεις εναλλαγής θερμότητας.

$$QLHC_{hcji} \leq \sum_{k=1}^{KM_{ji}} QHC_{hckji} \leq QUHC_{hcji} \quad (4.23)$$

$$QLHW_{hwji} \leq \sum_{k=1}^{KM_{ji}} QHW_{hwkji} \leq QUHW_{hwji} \quad (4.24)$$

$$QLSC_{scji} \leq \sum_{k=1}^{KM_{ji}} QSC_{sckji} \leq QUSC_{scji} \quad (4.25)$$

Για τη διατύπωση των παραπάνω περιορισμών ορίζονται τα ανώτερα και κατώτερα όρια της εναλλαγής θερμότητας μεταξύ ψυχρών και θερμών ρευμάτων, μεταξύ θερμών ρευμάτων και ψυχρών παροχών και μεταξύ ψυχρών ρευμάτων και θερμών παροχών, που είναι αντίστοιχα οι παράμετροι $QUHC_{hcji}$ και $QLHC_{hcji}$, $QUHW_{hwji}$ και $QLHW_{hwji}$, $QUSC_{scji}$ και $QLSC_{scji}$. Η χρησιμότητα των περιορισμών των σχέσεων (4.23), (4.24) και (4.25) είναι η ίδια με το ανεπτυγμένο μοντέλο μεταφόρτωσης, δηλαδή μας δίνουν τη δυνατότητα να ενσωματώσουμε στους υπολογισμούς μας σχεδιαστικές αποφάσεις που έχουν παρθεί για τη λειτουργία της κάθε διεργασίας.

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ (TOTAL SITE ANALYSIS)

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει ανάλυση του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας στο πρόβλημα που εξετάζουμε και την εκμετάλλευση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για τη λήψη αποφάσεων. Έτσι αρχικά θα παρουσιαστεί η κλασική μεθοδολογία της Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας και στη συνέχεια ο τρόπος με τον οποίο η συγκεκριμένη μεθοδολογία μοντελοποιείται για να εφαρμοστεί στο πρόβλημα που εξετάζεται.

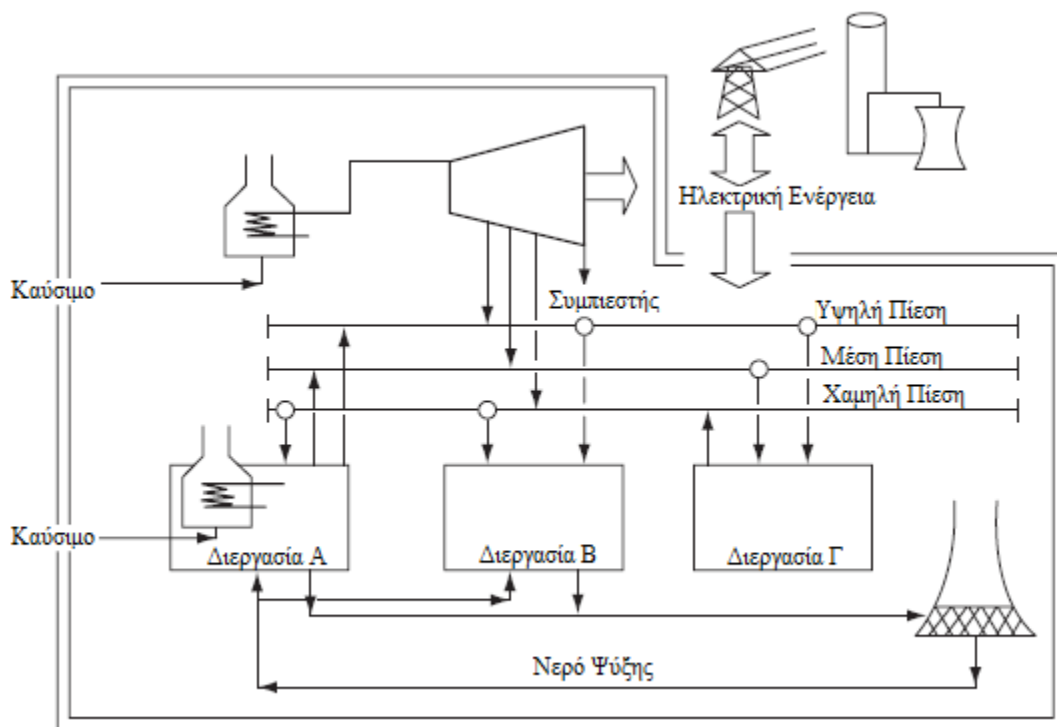
5.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ

Μέχρι τώρα έγινε ανάλυση του τρόπου υπολογισμού των ελάχιστων ενεργειακών απαιτήσεων για την κάθε διεργασία όπως αυτές προκύπτουν μετά από ενεργειακή ολοκλήρωση μεταξύ των ρευμάτων της. Όμως όταν υλοποιείται ένας αριθμός διεργασιών μέσα στα πλαίσια μιας μονάδας τότε υπάρχουν προοπτικές ενεργειακής ολοκλήρωσης μεταξύ των διεργασιών αυτών. Αυτές οι προοπτικές έρχονται στην επιφάνεια μέσω της Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας.

Η ολοκλήρωση μεταξύ διεργασιών μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: άμεσα και έμμεσα. Όμως η άμεση μεταφορά θερμότητας μεταξύ ρευμάτων που ανήκουν σε διαφορετικές διεργασίες παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα όπως [6]:

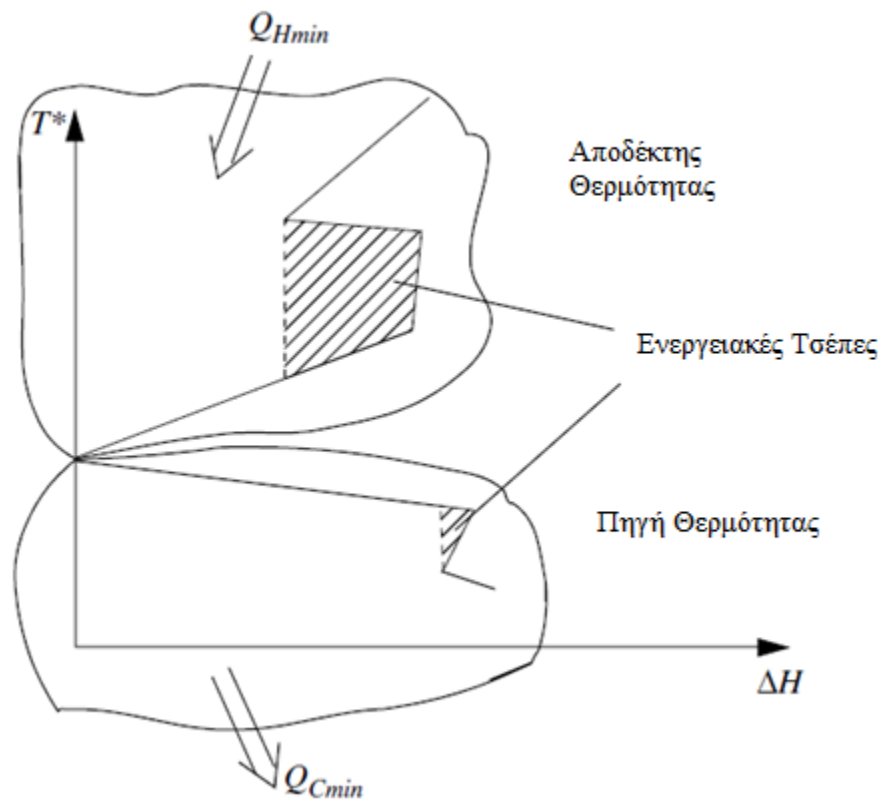
- Δυσκολίες κατά την εκκίνηση (startup) και το σταμάτημα (shutdown) λειτουργίας της εγκατάστασης.
- Υψηλό πάγιο και λειτουργικό κόστος λόγω της ανάγκης για σωληνώσεις και αντλίες για τη μεταφορά ρευμάτων από διεργασία σε διεργασία.
- Θέματα ασφαλείας.
- Η χωροθέτηση των διεργασιών γίνεται μια περίπλοκη και δύσκολη διαδικασία.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων εφαρμόζεται η λύση της έμμεσης μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των διεργασιών με την χρήση κάποιου μέσου μεταφοράς θερμότητας όπως είναι ο ατμός. Στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις γίνεται παραγωγή και κατανάλωση ατμού σε διάφορα επίπεδα πίεσης τα οποία όμως είναι συγκεκριμένα για την κάθε εγκατάσταση. Έτσι με την κατάλληλη διάταξη, ο ατμός που παράγεται σε μία διεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις υπόλοιπες, αρκεί ο ατμός που παράγεται να ανήκει σε κάποιο από τα χρησιμοποιούμενα επίπεδα. Η περίπτωση της έμμεσης εναλλαγής θερμότητας μεταξύ των διεργασιών φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 5-1[7].



Εικόνα 5-1 Έμμεση εναλλαγή θερμότητας μεταξύ των διεργασιών μιας Συνολικής Μονάδας

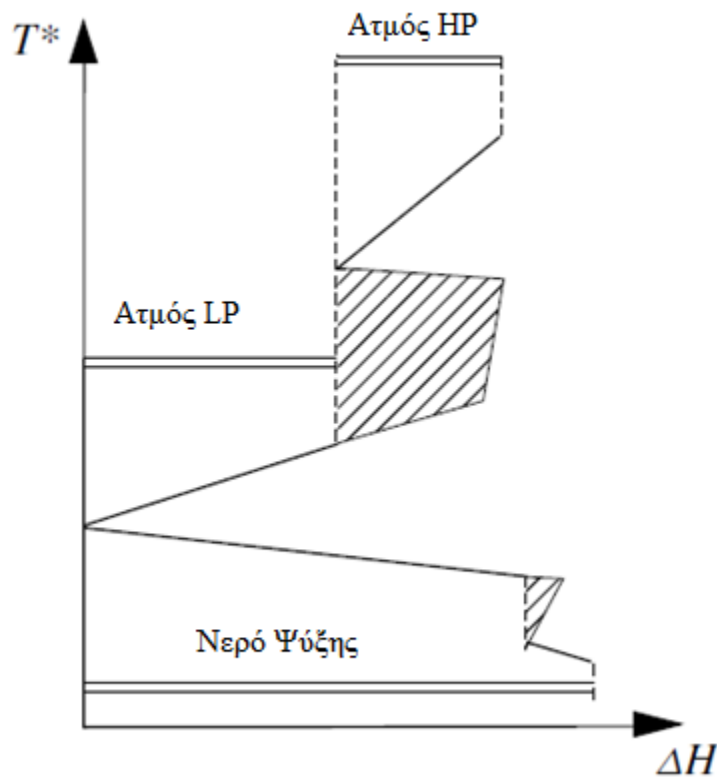
Για να γίνει κατανοητή η κλασική προσέγγιση της Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας πρέπει πρώτα να παρουσιαστεί συνοπτικά ο τρόπος με τον οποίο γίνεται γραφικά ο υπολογισμός των ελάχιστων ενεργειακών απαιτήσεων για μία διεργασία. Ο υπολογισμός γίνεται μέσω της κατασκευής του Μεγάλου Σύνθετου Γραφήματος (ΜΣΓ) το οποίο προκύπτει μετά από πράξεις μεταξύ των ενεργειακών φορτίων των ρευμάτων της διεργασίας που συμμετέχουν σε κάθε θερμοκρασιακό διάστημα. Το ΜΣΓ απεικονίζει τις ενεργειακές απαιτήσεις της διεργασίας σε κάθε θερμοκρασία. Η τυπική μορφή του ΜΣΓ φαίνεται στην Εικόνα 5-2.



Εικόνα 5-2 Τυπική μορφή του Μεγάλου Σύνθετου Γραφήματος (ΜΣΓ)

Το σημείο τομής του ΜΣΓ με τον άξονα των θερμοκρασιών ονομάζεται Κόμβος Ανάσχεσης και είναι η θερμοκρασία στην οποία η διεργασία δεν έχει ενεργειακές απαιτήσεις. Το τμήμα του ΜΣΓ που βρίσκεται πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης ονομάζεται αποδέκτης θερμότητας (Heat sink) καθώς είναι το τμήμα που απεικονίζει την ανάγκη για προσφορά θερμότητας σε κάθε θερμοκρασία, ενώ το τμήμα κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης ονομάζεται πηγή θερμότητας (Heat source) και απεικονίζει τη θερμότητα που πρέπει να απομακρυνθεί σε κάθε θερμοκρασία. Έτσι η

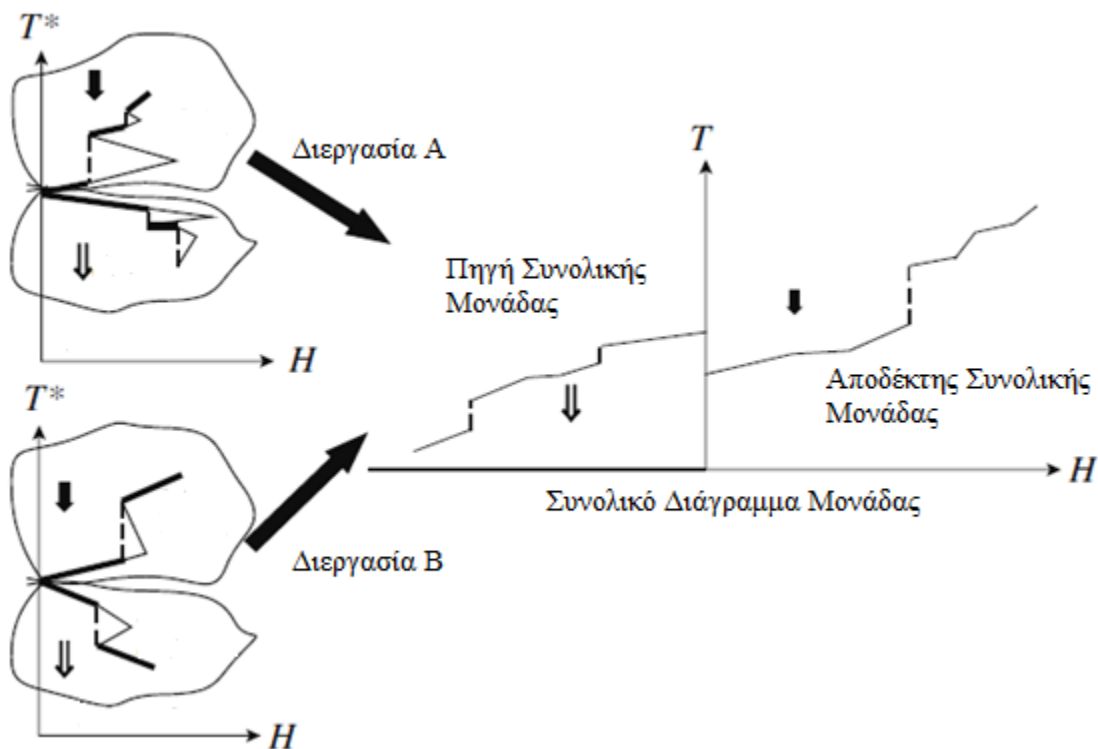
οριζόντια απόσταση του γραφήματος από τον κατακόρυφο άξονα στην υψηλότερη θερμοκρασία είναι η ελάχιστη ενέργεια που πρέπει να προσφερθεί στη διεργασία μέσω θερμών παροχών. Αντίστοιχα η οριζόντια απόσταση στην χαμηλότερη θερμοκρασία είναι η ελάχιστη ενέργεια που πρέπει να απομακρυνθεί από τα ρεύματα της διεργασίας μέσω των ψυχρών παροχών. Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται η ανάγκη για κάθε βοηθητική παροχή σε περίπτωση που αυτές είναι περισσότερες από μια θερμή και μια ψυχρή φαίνεται στην Εικόνα 5-3



Εικόνα 5-3 Υπολογισμός των φορτίων θερμών και ψυχρών παροχών στο ΜΣΓ

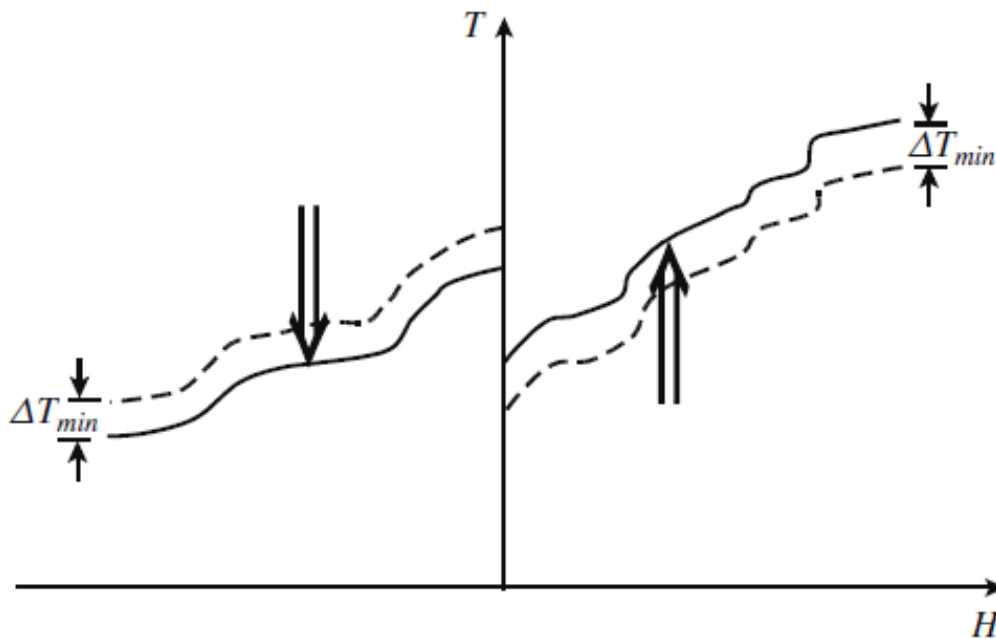
Γενικά επιλέγεται να χρησιμοποιούνται κατά το δυνατόν οι πιο οικονομικές παροχές, αυτό φαίνεται στην Εικόνα 5-3 όπου χρησιμοποιείται ο ατμός χαμηλής πίεσης για να καλύψει όσο το δυνατόν περισσότερες ενεργειακές ανάγκες και οι υπόλοιπες καλύπτονται από τον ατμό υψηλής πίεσης. Επιπλέον τα γραμμοσκιασμένα τμήματα του ΜΣΓ της εικόνας 5-3 ονομάζονται ενεργειακές τσέπες και είναι τμήματα στα οποία η ανάγκη για θερμότητα σε μια θερμοκρασία καλύπτεται από την περίσσεια θερμότητας των ρευμάτων της διεργασίας σε μια υψηλότερη θερμοκρασία, δηλαδή απεικονίζουν εναλλαγή θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων της διεργασίας.

Για να μπορέσουμε να μελετήσουμε θερμοδυναμικά μια συνολική μονάδα πρέπει να έχουμε μια συνολική εικόνα για τα θερμικά φορτία, ανάλογη με αυτή που παίρνουμε από το ΜΣΓ για μία διεργασία. Έτσι ξεκινώντας από την κατασκευή των ΜΣΓ για κάθε διεργασία προχωράμε στην κατασκευή του Συνολικού Διαγράμματος Μονάδας (ΣΔΜ) συνδυάζοντας τα ΜΣΓ. Αυτή η διαδικασία φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 5-4 όπου γίνεται συνδυασμός των τμημάτων του αποδέκτη και της πηγής για δυο διεργασίες ώστε να πάρουμε τα τμήματα του αποδέκτη και της πηγής για τη Συνολική Μονάδα. Έτσι για την κατασκευή του ΣΔΜ προσθέτουμε τα θερμικά φορτία στα θερμοκρασιακά διαστήματα που υπάρχει θερμοκρασιακή επικάλυψη μεταξύ των ρευμάτων των διεργασιών [8]. Επιπλέον όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5-4 σε αυτούς τους υπολογισμούς δεν παίρνουμε υπ όψη μας τις τσέπες των ΜΣΓ ώστε να είμαστε σίγουροι ότι αυτή η ανάκτηση θερμότητας θα συμβεί στα όρια της κάθε διεργασίας. Αυτή η επιλογή γίνεται καθώς η ενεργειακή ολοκλήρωση στα όρια της διεργασίας παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση την ενεργειακή ολοκλήρωση στα όρια μιας συνολικής μονάδας. Πλεονεκτήματα τα οποία έχουν σχέση με την ανάγκη για πιο φθηνό εξοπλισμό, την ασφάλεια και την εύκολη διαχείριση της διεργασίας.



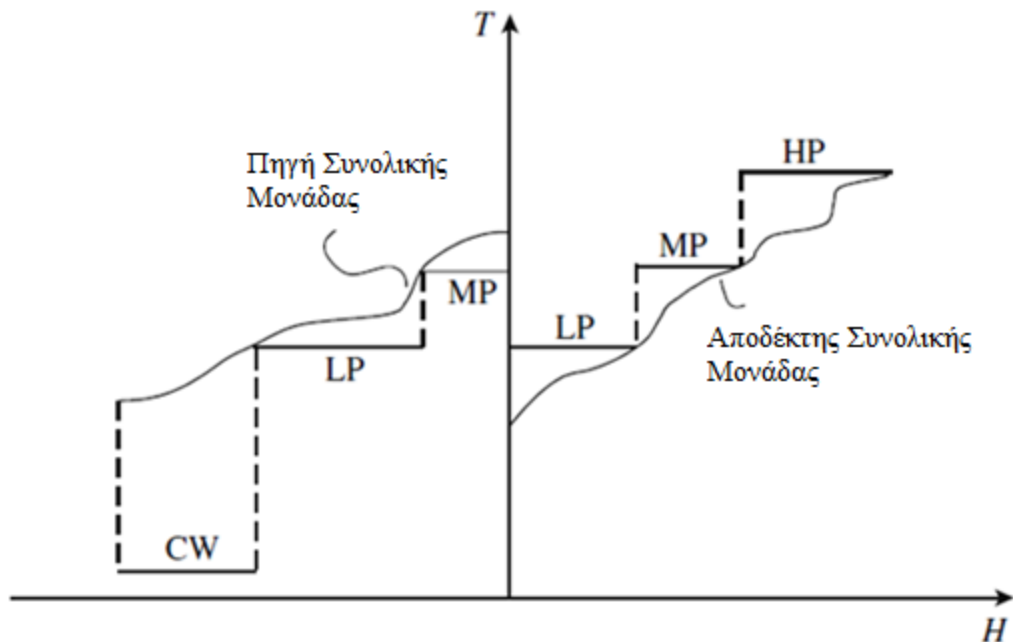
Εικόνα 5-4 Κατασκευή του Συνολικού Διαγράμματος Μονάδας (ΣΔΜ)

Ένα ακόμα σημείο στο οποίο πρέπει να δοθεί έμφαση έχει να κάνει με τις θερμοκρασίες των ρευμάτων και των παροχών. Όπως αναφέραμε κατά τον υπολογισμό των ενεργειακών αναγκών της κάθε διεργασίας έγινε μετατόπιση των θερμοκρασιών των ρευμάτων και των παροχών κατά $\Delta T_{min} / 2$ όμως κατά την κατασκευή του ΣΔΜ είναι σημαντικό όπως θα φανεί στη συνέχεια να χρησιμοποιήσουμε τις πραγματικές θερμοκρασίες των παροχών. Έτσι το τμήμα της πηγής και του αποδέκτη στο ΣΔΜ πρέπει να μετατοπιστούν κατά $\Delta T_{min} / 2$ άλλη μια φορά ώστε να εξασφαλίζεται η επιθυμητή διαφορά ΔT_{min} μεταξύ των ρευμάτων και των παροχών που εναλλάσσουν θερμότητα [4]. Η συνολική μετατόπιση των κλάδων του ΣΔΜ φαίνεται στην Εικόνα 5-5.



Εικόνα 5-5 Θερμοκρασιακή μετατόπιση των κλάδων του ΣΔΜ

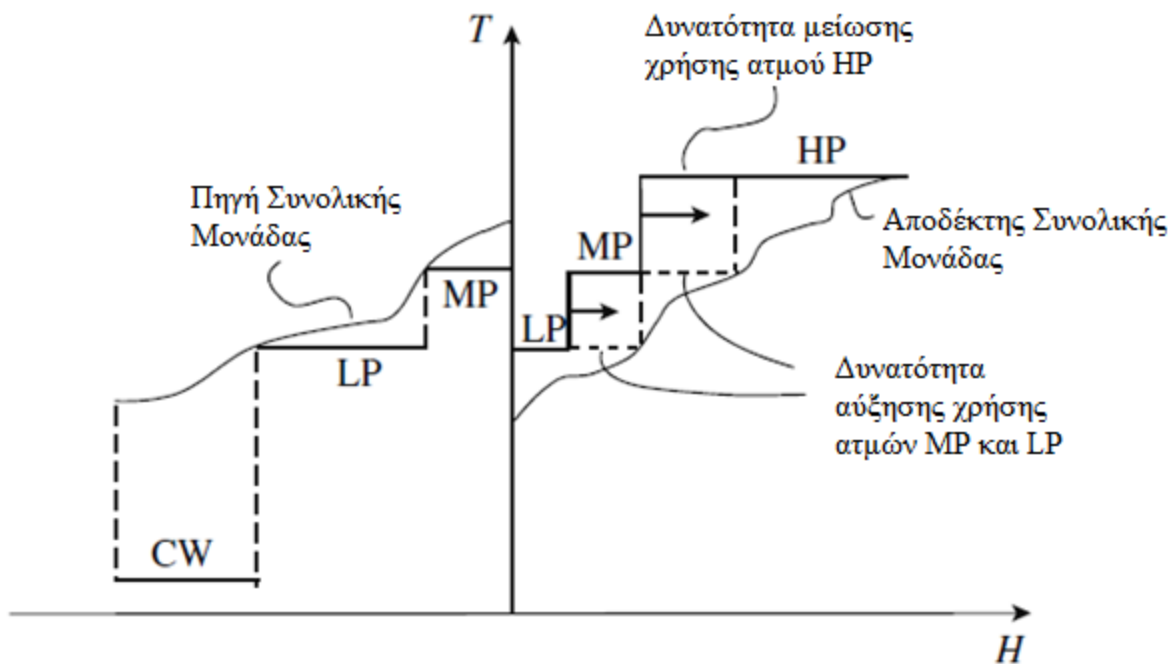
Αφού κατασκευάσουμε το ΣΔΜ μπορούμε να τοποθετήσουμε στο διάγραμμα τις παροχές και συγκεκριμένα αυτό που έχει ενδιαφέρον είναι ότι μας δίνεται η δυνατότητα να ορίσουμε τους στόχους για την κατανάλωση και την παραγωγή ατμών. Έτσι η συνολική κατανάλωση και η συνολική παραγωγή ατμών αναπαρίσταται με τον τρόπο που φαίνεται στην Εικόνα 5-6.



Εικόνα 5-6 Υπολογισμός της κατανάλωσης θερμών και ψυχρών παροχών και της παραγωγής ατμών στο ΣΔΜ

Όπως φαίνεται επιλέγεται να καταναλώνονται κατά το δυνατόν οι χαμηλότερης πίεσης ατμοί και να παράγονται όσο το δυνατόν περισσότερο οι υψηλότερης πίεσης κάτι που είναι λογικό. Είναι φανερό ότι οι ενεργειακές ανάγκες της Μονάδας μπορούν να καλυφθούν με διαφορετικούς συνδυασμούς παροχών κάτι όμως που αυξάνει να λειτουργικά έξοδα καθώς γίνεται χρήση πιο ακριβών παροχών στη θέση πιο οικονομικών. Αυτή η περίπτωση φαίνεται στην εικόνα 5-7 και καταδεικνύει ότι η βέλτιστη επιλογή είναι αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 5-6.

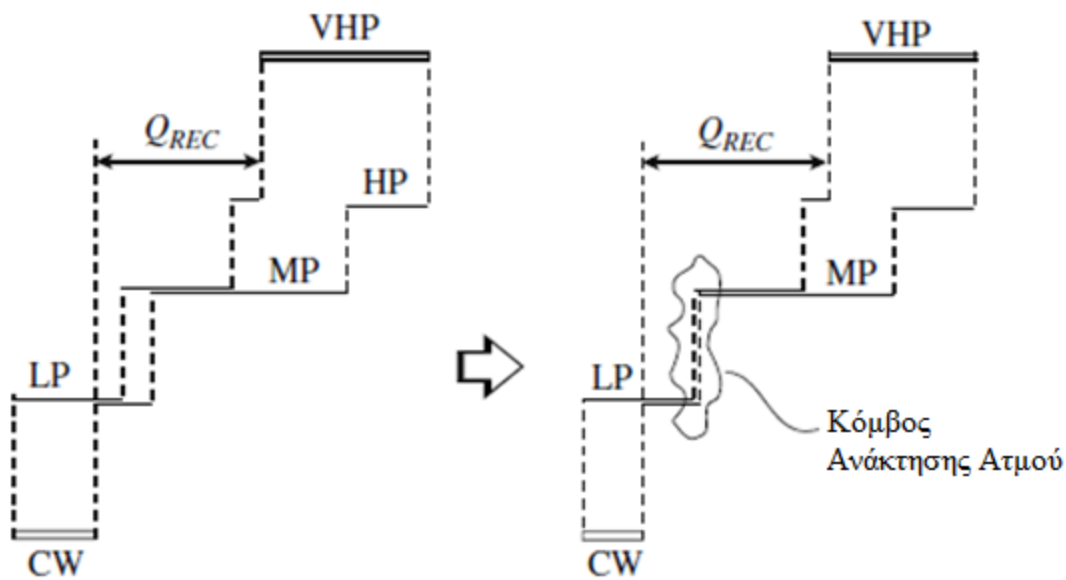
Επιπλέον το γεγονός ότι τα προφίλ των ατμών ακουμπάνε στο ΣΔΜ, δεν σημαίνει ότι συμβαίνει εναλλαγή θερμότητας με $\Delta T = 0$, καθώς η μετατόπιση κατά ΔT_{min} από τις πραγματικές θερμοκρασίες που έγινε κατά την κατασκευή του διαγράμματος εξασφαλίζει ότι η εναλλαγή θερμότητας είναι εφικτή. Έτσι στην ουσία τα ρεύματα του αποδέκτη του ΣΔΜ είναι κατά ΔT_{min} ψυχρότερα, ρεύματα της πηγής κατά ΔT_{min} θερμότερα, ενώ οι ατμοί σχεδιάζονται στις πραγματικές τους θερμοκρασίες.



Εικόνα 5-7 Απεικόνιση της δυνατότητας βελτιστοποίησης του τρόπου χρήσης των παροχών

Η διαδικασία που περιγράφηκε μέχρι τώρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να θέσουμε στόχους για την ελάχιστη κατανάλωση παροχών στη Συνολική Μονάδα. Όμως η χρησιμότητα του ΣΔΜ έγκειται στο γεγονός ότι μας επιτρέπει να θέσουμε στόχους για την εναλλαγή θερμότητας μεταξύ των διεργασιών της Μονάδας και κατά συνέπεια την εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων λόγω μείωσης της ανάγκης για χρήση βοηθητικών παροχών.

Η διαδικασία με την οποία μπορούμε να θέσουμε αυτούς τους στόχους με την χρήση του ΣΔΜ φαίνεται στην Εικόνα 5-8. Συγκεκριμένα επικαλύπτουμε τα προφίλ των παροχών όπως αυτά σχεδιάστηκαν στα προηγούμενα βήματα και η μέγιστη επικάλυψη που μπορεί να γίνει αντιστοιχεί στη μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας. Έτσι στο παράδειγμα της εικόνας 5-8 γίνεται τόσο παραγωγή ατμών υψηλής πίεσης (HP), μέσης πίεσης (MP) και χαμηλής πίεσης (LP), όσο και κατανάλωση τους. Κατά συνέπεια οι ποσότητες ατμών που παράγονται με χρήση της πλεονάζουσας θερμότητας των διεργασιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε άλλες διεργασίες μειώνοντας έτσι την κατανάλωση καυσίμου για την παραγωγή ατμών.



Εικόνα 5-8 Υπολογισμός της ανάγκης παραγωγής παροχών με χρήση του ΣΔΜ

Μία επιπλέον παρατήρηση που πρέπει να γίνει και είναι εμφανής αν παρατηρήσουμε την Εικόνα 5-8 είναι το γεγονός ότι με τη διαδικασία που ακολουθήσαμε είναι πιθανό οι στόχοι που θέτουμε να περιλαμβάνουν την παραγωγή περισσότερου ατμού κάποιας πίεσης από ότι χρειαζόμαστε για την κάλυψη των αναγκών της μονάδας. Στο παράδειγμα της εικόνας 5-8 αυτό συμβαίνει στην περίπτωση του ατμού χαμηλής πίεσης (LP). Όπως φαίνεται στην εικόνα ο ατμός που παράγεται και δεν καταναλώνεται από τη μονάδα πρέπει θεωρητικά να απορρίψει την πλεονάζουσα θερμότητα του σε κάποια ψυχρή παροχή. Με άλλα λόγια θεωρητικά δεν θα έπρεπε να παράγονται πλεονάζουσες ποσότητες ατμών. Όμως κατά την Ανάλυση Συνολικής Μονάδας αυτές οι περιπτώσεις είναι αποδεκτές καθώς ο ατμός που δεν καταναλώνεται στις διεργασίες της μονάδας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας σε στροβίλους ή να αξιοποιηθεί σε κάποια γειτονική μονάδα. Έτσι ακόμα και αν κάποια ποσότητα παραγόμενου ατμού δεν αξιοποιείται στα πλαίσια της μονάδας έχουμε οικονομικά οφέλη από την παραγωγή του.

5.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ

5.3.1 Γενικά

Η διαδικασία που περιγράφηκε μέχρι στιγμής είναι ένας από τους πιο καθιερωμένους τρόπους με τους οποίους πραγματοποιείται η Ανάλυση Συνολικής Μονάδας. Ωστόσο όπως έχει αναφερθεί για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι απαραίτητο οι υπολογισμοί που περιγράφηκαν να μεταφερθούν σε μορφή μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο θα γίνει δυνατό να εξεταστούν όλες οι διαφορετικές περιπτώσεις που προκύπτουν και να επιλεγεί αποτελεσματικά η καλύτερη από αυτές.

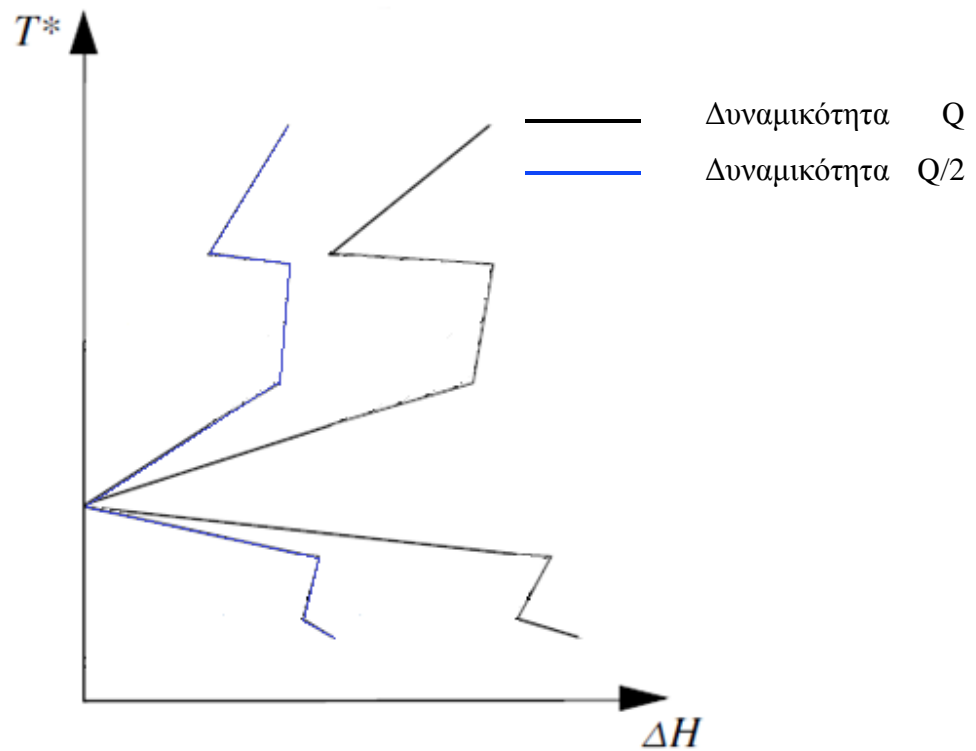
Η μέθοδος με την οποία προσεγγίζεται η μοντελοποίηση του συγκεκριμένου προβλήματος απαιτεί την αναγνώριση των βασικών σταδίων της μεθόδου και στη συνέχεια τη μεταφορά τους σε μορφή μοντέλου με τις απαραίτητες παραδοχές. Τα βασικά στάδια της Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας όπως περιγράφηκε περιλαμβάνουν:

- Τον υπολογισμό των ενεργειακών απαιτήσεων σε κάθε θερμοκρασία για τη Συνολική Μονάδα.
- Την επιλογή των κατάλληλων βοηθητικών παροχών και τον προσδιορισμό των ενεργειακών αναγκών που πρέπει να καλύψει η κάθε μία.
- Τον προσδιορισμό της ενεργειακής εξοικονόμησης και κατά συνέπεια των στόχων για τις ενεργειακές ανάγκες που πρέπει να καλυφθούν από ενεργειακά φορτία που δεν προκύπτουν από τις διεργασίες που συμμετέχουν στη Συνολική Μονάδα.

5.3.2 Υπολογισμός Ενεργειακών Απαιτήσεων Συνολικής Μονάδας

Στο πρώτο στάδιο της Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας πρέπει να προσθέσουμε τις ενεργειακές απαιτήσεις των διεργασιών σε κάθε θερμοκρασία. Για αυτόν το λόγο είναι προφανές ότι χρειαζόμαστε ενεργειακά δεδομένα για κάθε διεργασία που συμμετέχει στη Συνολική Μονάδα. Αυτά τα δεδομένα τα λαμβάνουμε με την χρήση του μοντέλου μεταφόρτωσης που περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους.

Σύμφωνα με τις ανάγκες του προβλήματος χρειάζεται να υπολογιστούν οι ενεργειακές απαιτήσεις για κάθε δυνατή δυναμικότητα της κάθε διεργασίας. Όμως με το μοντέλο μεταφόρτωσης μπορούμε να υπολογίσουμε τις ενεργειακές απαιτήσεις μιας διεργασίας μόνο εφόσον γνωρίζουμε τις θερμοκρασίες, τη σύσταση και την παροχή των ρευμάτων της εν λόγω διεργασίας. Από αυτές τις παραμέτρους η παροχή των ρευμάτων εξαρτάται από τη δυναμικότητα, η οποία μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να επηρεάζει και τις άλλες παραμέτρους. Το πρόβλημα που προκύπτει είναι ότι θα έπρεπε να υπολογιστούν οι παράμετροι των ρευμάτων των διεργασιών για κάθε δυνατή δυναμικότητα κάτι που είναι αδύνατον αφού η δυναμικότητα είναι μια συνεχής μεταβλητή. Μία πιθανή λύση στο πρόβλημα αυτό θα ήταν να υπολογιστούν οι παράμετροι των ρευμάτων για έναν μεγάλο αριθμό διαφορετικών δυναμικοτήτων και να εξετάσουμε μόνο αυτές τις περιπτώσεις. Όμως και αυτή η αντιμετώπιση δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτική, καθώς οι παράμετροι για τα ρεύματα της κάθε διεργασίας προκύπτουν μετά από το σχεδιασμό της διεργασίας για κάποια συγκεκριμένη δυναμικότητα. Αυτό σημαίνει ότι ο υπολογισμός των παραμέτρων αυτών για πολλές διαφορετικές δυναμικότητες ενός μεγάλου αριθμού διεργασιών είναι εξαιρετικά χρονοβόρος έως αδύνατος. Αυτά τα προβλήματα μας οδηγούν να κάνουμε μια παραδοχή σχετικά με την εξάρτηση των ενεργειακών απαιτήσεων από τη δυναμικότητα της διεργασίας. Έτσι υποθέτουμε ότι οι ενεργειακές ανάγκες της διεργασίας εξαρτώνται γραμμικά από τη δυναμικότητα της. Αυτή η παραδοχή δεν απέχει σημαντικά από την πραγματικότητα αν αναλογιστούμε ότι μεταβολές στη δυναμικότητα μιας διεργασίας συχνά επηρεάζουν μόνο τις παροχές των ρευμάτων και μάλιστα γραμμικά, ενώ με τη σειρά τους οι ενεργειακές απαιτήσεις εξαρτώνται και αυτές γραμμικά από μια κοινή μεταβολή στις παροχές όλων των ρευμάτων της διεργασίας. Οι μεταβολές που συμβαίνουν στο ΜΣΓ μιας διεργασίας κατά τη μεταβολή της δυναμικότητας της σύμφωνα με αυτή την παραδοχή απεικονίζονται στην Εικόνα 5-9.



Εικόνα 5-9 Το ΜΣΓ μιας διεργασίας για δυναμικότητα Q και $Q/2$

Επιπλέον για την ανάλυση που θα ακολουθήσει δεν θα χρειαστούμε άμεσα τις ενεργειακές ανάγκες κάθε διεργασίας σε κάθε θερμοκρασία, αλλά την ποσότητα ενέργειας που πρέπει να προσφέρει ή να απομακρύνει η κάθε βοηθητική παροχή. Αυτά τα μεγέθη προφανώς εξαρτώνται από τη δυναμικότητα της διεργασίας και μάλιστα σύμφωνα με την παραδοχή που κάναμε είναι ανάλογα της δυναμικότητας. Αυτό γίνεται προφανές αν κανείς προσπαθήσει να τοποθετήσει τις βοηθητικές παροχές στα ΜΣΓ της εικόνας 5-9.

Έτσι λαμβάνοντας τα αποτελέσματα σχετικά με την ποσότητα ενέργειας που πρέπει να προσφέρει ή να απομακρύνει η κάθε παροχή σε μία διεργασία κάποιας δυναμικότητας, μπορούμε με απλές πράξεις να εξάγουμε αντίστοιχα αποτελέσματα για όποια δυναμικότητα θέλουμε.

5.3.3 Επιλογή Βοηθητικών Παροχών και Προσδιορισμός των Φορτίων τους

Περνώντας στο δεύτερο στάδιο της Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας πρέπει να προσδιορίσουμε τις βοηθητικές παροχές που θα χρησιμοποιηθούν και την ενέργεια που πρέπει να προσφέρει ή να απομακρύνει κάθε μία από αυτές. Η επιλογή των βοηθητικών παροχών που θα χρησιμοποιηθούν γίνεται θεωρώντας όλες τις περιπτώσεις παροχών που θέλουμε να εξετάσουμε και βελτιστοποιούμε το πρόβλημα ως προς των συνδυασμό βοηθητικών παροχών και διεργασιών που θα χρησιμοποιηθούν. Αυτός ο τρόπος επίλυσης επιβάλλεται από την αντιμετώπιση του προβλήματος μέχρι στιγμής. Συγκεκριμένα το γεγονός ότι για τον υπολογισμό των ενεργειακών αναγκών μιας διεργασίας από το μοντέλο μεταφόρτωσης πρέπει οι θερμοκρασίες των βοηθητικών παροχών να είναι ορισμένες παράμετροι μας οδηγεί στη διάκριση περιπτώσεων.

Σχετικά με το δεύτερο σκέλος του δεύτερου σταδίου της Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας, δηλαδή τον υπολογισμό των ενεργειακών φορτίων που πρέπει να προσφέρει ή να απομακρύνει η κάθε παροχή, γίνεται απλά προσθέτοντας τα φορτία της κάθε παροχής για όλες τις διεργασίες που υλοποιούνται στη μονάδα. Με αυτόν τον τρόπο καταφέρνουμε να πάρουμε απευθείας τα δεδομένα που απορρέουν από τα προφίλ των παροχών στο ΣΔΜ χωρίς να χρειαστεί να προσδιορίσουμε τις καμπύλες του ΣΔΜ. Με αυτόν τον τρόπο το μοντέλο και οι υπολογισμοί απλοποιούνται σημαντικά χωρίς να χάνουμε κανένα αποτέλεσμα που θα ήταν χρήσιμο για την επίλυση του προβλήματος.

5.3.4 Υπολογισμός της Εξοικονόμησης Ενέργειας και των Τελικών Ενεργειακών Απαιτήσεων

Οι ενεργειακές ανάγκες που υπολογίσαμε στο πρώτο στάδιο της Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας δεν αποτελούν τις τελικές ανάγκες μιας ολοκληρωμένης Συνολικής Μονάδας καθώς δεν περιλαμβάνουν την ενεργειακή εξοικονόμηση λόγω της ολοκλήρωσης των διεργασιών μεταξύ τους. Για να υπολογίσουμε την ενεργειακή εξοικονόμηση λόγω της ολοκλήρωσης των διεργασιών μεταξύ τους μέσω του δικτύου των παροχών πρέπει αρχικά να υπολογιστεί η

ενέργεια που μπορούν να αποδώσουν οι διεργασίες για την παραγωγή ατμών που χρησιμοποιούνται στη μονάδα.

Με σκοπό να υπολογίσουμε αυτή τη δυνατότητα των διεργασιών να αποδώσουν ενέργεια στο δίκτυο των παροχών, θεωρούμε επιπλέον ψυχρές παροχές τόσες όσοι είναι οι ατμοί που υπάρχουν στη μονάδα και τέτοιες ώστε να αντιστοιχούν στην υγροποιημένη μορφή του κάθε ατμού. Δηλαδή θεωρούμε ρεύματα κορεσμένου νερού τα οποία αν θερμανθούν από τα ρεύματα της διεργασίας θα παραχθούν οι αντίστοιχοι κορεσμένοι ατμοί που χρησιμοποιούνται στη μονάδα. Αυτά τα ρεύματα ενσωματώνονται στο μοντέλο μεταφόρτωσης ως ψυχρές παροχές και υπολογίζεται η ενέργεια που μπορούν να απομακρύνουν στη θέση άλλων παροχών για παράδειγμα του νερού ψύξης. Κατά αυτή τη διαδικασία θεωρούμε ότι όλη η θερμότητα που απομακρύνει το ρεύμα χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του σε κορεσμένο ατμό. Αυτή η ποσότητα ατμού που παράγεται μπορεί στη συνέχεια να αποδώσει το ίδιο ποσό θερμότητας σε κάποια άλλη διεργασία με συνέπεια τη μετατροπή της και πάλι σε κορεσμένο υγρό.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η εξοικονόμηση ατμού που πρέπει να παραχθεί ισούται σε όρους ενέργειας με την παραγωγή ατμού από ρεύματα των διεργασιών. Οπότε για τον υπολογισμό της ενέργειας που πρέπει να προσφερθεί από ατμούς που παράγονται με χρήση καυσίμου αφαιρούμε από τις συνολικές απαιτήσεις για προσφορά ενέργειας από κάποιον ατμό το ποσό που παράγεται μέσω ανταλλαγής θερμότητας με τις διεργασίες της μονάδας.

Ωστόσο κατά αυτόν τον υπολογισμό εμφανίζονται δυο διαφορετικές περιπτώσεις. Η πρώτη είναι η ανάγκη για μια θερμή παροχή στη Συνολική Μονάδα να είναι θετική. Σε αυτή την περίπτωση το μέγεθος που προκύπτει πολλαπλασιάζεται στην αντικειμενική συνάρτηση με το μοναδιαίο κόστος παραγωγής του ατμού. Η δεύτερη περίπτωση είναι η ανάγκη για κάποια θερμή παροχή στη Συνολική Μονάδα να είναι αρνητική κάτι που σημαίνει ότι η ποσότητα που παράγεται από τις διεργασίες είναι μεγαλύτερη από αυτή που καταναλώνεται. Σε αυτή την περίπτωση ο ατμός μπορεί να εκτονωθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και κάποιου κορεσμένου ατμού χαμηλότερης θερμοκρασίας. Άρα το μέγεθος αυτό πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το μοναδιαίο κέρδος που αντιστοιχεί στην κάθε παροχή, το οποίο προφανώς δεν είναι ίδιο με το μοναδιαίο κόστος παραγωγής της.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω υπάρχει ανάγκη διάκρισης περιπτώσεων σχετικά με την τιμή της ανάγκης για θερμές παροχές, ώστε αυτή να πολλαπλασιαστεί με το κατάλληλο μέγεθος στην αντικειμενική συνάρτηση. Όμως η ανάγκη για θερμή παροχή είναι μια μεταβλητή του μοντέλου που θα διατυπωθεί στη συνέχεια άρα για τη διάκριση περιπτώσεων για την τιμή της θα πρέπει το μοντέλο που θα διατυπωθεί να είναι ένα μοντέλο Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού.

5.3.5 Διατύπωση του Μοντέλου

Έχοντας αναλύσει τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει η μεταφορά της Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας σε μορφή μοντέλου και τις παραδοχές που κάναμε, μπορούμε πλέον να προχωρήσουμε με τη διατύπωση του μοντέλου.

Έτσι οι γνωστές παράμετροι του προβλήματος είναι:

QS_{sj} : θερμότητα που προσφέρει η θερμή παροχή s στη διεργασία j για το συνδυασμό παροχών i

QW_{wji} : θερμότητα που απομακρύνεται από την ψυχρή παροχή w στη διεργασία j για το συνδυασμό παροχών i

CS_{si} : μοναδιαίο κόστος της θερμής παροχής s του συνδυασμού i

PS_{si} : μοναδιαίο κέρδος από την περίσσεια θερμής παροχής s του συνδυασμού i

CW_{wi} : μοναδιαίο κόστος της ψυχρής παροχής w του συνδυασμού i

INC_j : ετήσια έσοδα από τις πωλήσεις του προϊόντος της διεργασίας j

INC'_m : ετήσια έσοδα από τις πωλήσεις του ενδιάμεσου προϊόντος m

FC_j : ετησιοποιημένο πάγιο κόστος κεφαλαίου της διεργασίας j

OC_j : ετήσιο λειτουργικό κόστος της διεργασίας j

EEC_j : ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για τη διεργασία j

και οι μεταβλητές του προβλήματος είναι:

X_{ji} : ποσοστό συμμετοχής της διεργασίας j στο συνδυασμό διεργασιών που υλοποιούνται για το συνδυασμό παροχών i

T_{mi} : ποσοστό του ενδιάμεσου προϊόντος m για το συνδυασμό παροχών i που δεν επεξεργάζεται σε καμία διεργασία αλλά διατίθεται προς πώληση

QST_{si} : συνολική ανάγκη ή περίσσεια θερμής παροχής s του συνδυασμού i στη Συνολική Μονάδα

QST'_{sig} : συνολική ανάγκη παροχής s του συνδυασμού i στη Συνολική Μονάδα όταν $g=1$ και συνολική περίσσεια θερμής παροχής s του συνδυασμού i στη Συνολική Μονάδα όταν $g=2$

QWT_{wi} : συνολική ανάγκη της ψυχρής παροχής w του συνδυασμού i στη Συνολική Μονάδα

Όσον αφορά τις παραμέτρους του προβλήματος κάποιες χρήζουν περαιτέρω σχολιασμού. Συγκεκριμένα οι τιμές των QS_{sji} και QW_{wji} υπολογίζονται από το μοντέλο μεταφόρτωσης που περιγράφηκε και αναφέρονται στη μέγιστη δυναμικότητα που μπορεί να λειτουργεί η κάθε διεργασία λόγω της διαθεσιμότητας του ενδιάμεσου προϊόντος που αποτελεί πρώτη ύλη για την κάθε διεργασία. Το FC_j εκφράζει τις αποσβέσεις κεφαλαίου που υπολογίζονται με τη μέθοδο γραμμικής απόσβεσης κάνοντας τη ρεαλιστική παραδοχή ότι ο χρόνος ζωής μιας χημικής βιομηχανίας είναι 10 έτη, έτσι οι ετήσιες αποσβέσεις είναι το 10% του πάγιου κεφαλαίου. Η παράμετρος OC_j εκφράζει το ετήσιο λειτουργικό κόστος της διεργασίας όμως δεν περιλαμβάνει το κόστος των βοηθητικών παροχών αφού αυτό εκφράζεται από διαφορετικές παραμέτρους των οποίων οι τιμές πρέπει να υπολογιστούν ξεχωριστά μέσα στο μοντέλο.

Σχετικά με τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση του προβλήματος ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβλητή X_{ji} οι τιμές της οποίας δίνουν τη λύση του προβλήματος. Όπως έχει αναφερθεί οι διεργασίες σχεδιάζονται στη μέγιστη δυνατή δυναμικότητα η οποία καθορίζεται από τη διαθεσιμότητα των ενδιάμεσων προϊόντων. Έτσι η μεταβλητή X_{ji} εκφράζει την υλοποίηση μιας διεργασίας και τη δυναμικότητα της μέσω ποσοστού της δυναμικότητας που σχεδιάστηκε. Άρα αν $X_{ji} = 1$ η διεργασία j υλοποιείται στα

πλαίσια της συνολικής μονάδας με τη μέγιστη δυναμικότητα στην οποία σχεδιάστηκε, αν $X_{ji} = 0$ η διεργασία δεν υλοποιείται και αν $0 < X_{ji} < 1$ η διεργασία υλοποιείται με μια δυναμικότητα μικρότερη αυτής που σχεδιάστηκε. Οι μεταβλητές QST_{si} και QWT_{wi} εκφράζουν την ανάγκη της Συνολικής Μονάδας για θερμή παροχή s και ψυχρή παροχή w αντίστοιχα και υπολογίζονται με την Ανάλυση Συνολικής Μονάδας όπως περιγράφηκε. Όμως όπως αναφέρθηκε η μεταβλητή QST_{si} μπορεί να πάρει θετικές και αρνητικές τιμές και σε κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις πρέπει να πολλαπλασιαστεί με ένα διαφορετικό μέγεθος στην αντικειμενική συνάρτηση, αυτό το σκοπό του διαχωρισμού των τιμών της QST_{si} σε θετικές και αρνητικές επιτελεί στο μοντέλο που διατυπώνεται η μεταβλητή QST'_{sig} . Αυτή η μεταβλητή ορίζεται για κάθε θερμή παροχή (s) κάθε συνδυασμού παροχών (i) δυο φορές, μια αντιστοιχεί στην περίπτωση που η μεταβλητή QST_{si} είναι θετική και η άλλη στην περίπτωση που είναι αρνητική. Ο περιορισμός που τίθεται σε αυτή τη μεταβλητή είναι ότι το πολύ μια από τις δύο μεταβλητές που αντιστοιχούν στην κάθε θερμή παροχή του κάθε συνδυασμού παροχών μπορεί να είναι διαφορετική του μηδενός, επιπλέον αυτές οι μεταβλητές παίρνουν μόνο θετικές τιμές. Η συγκεκριμένη μεταβλητή ανήκει σε ένα ειδικά διατεταγμένο σύνολο μεταβλητών. Τα ειδικά διατεταγμένα σύνολα μεταβλητών χρησιμοποιούνται στον ακέραιο και στο μικτό ακέραιο προγραμματισμό για τη διατύπωση περιορισμών μεταξύ των μεταβλητών, περιορισμούς σαν αυτόν που περιγράψαμε. Ακόμα και αν οι μεταβλητές που ανήκουν στο διατεταγμένο σύνολο μεταβλητών είναι συνεχείς, όπως στην περίπτωση του μοντέλου που περιγράφεται, το μοντέλο θα είναι μικτού ακέραιου προγραμματισμού. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένοι περιορισμοί μεταξύ των μεταβλητών του μοντέλου μπορούν να διατυπωθούν με την χρήση δυαδικών μεταβλητών, όμως μια τέτοια προσέγγιση θα καθιστούσε το μοντέλο αρκετά πιο δύσκολο στην κατανόηση του αλλά και στην επίλυση του. Αυτό συμβαίνει καθώς για μια τέτοια προσέγγιση θα έπρεπε να οριστεί ο κατάλληλος αριθμός επιπλέον μεταβλητών αλλά και περιορισμοί που να περιγράφουν τις λογικές σχέσεις που συνδέουν αυτές τις δυαδικές μεταβλητές[9].

Συνεχίζοντας στη διατύπωση του μοντέλου η αντικειμενική συνάρτηση που θα χρησιμοποιηθεί θα υπολογίζει τα ετήσια κέρδη από το συνδυασμό διεργασιών που υλοποιούνται στα πλαίσια της Συνολικής Μονάδας με σκοπό να επιλέγεται ο συνδυασμός που αποφέρει τα μέγιστα κέρδη. Όσον αφορά τους περιορισμούς του μοντέλου αυτοί εξυπηρετούν δύο σκοπούς, αφενός εκφράζουν τις σχέσεις μεταξύ των διεργασιών και αφετέρου περιγράφουν τους υπολογισμούς της Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας.

Οπότε το μοντέλο διατυπώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
\max Y = & \sum_i \sum_j X_{ji} INC_j + \sum_i \sum_m T_{mi} INC'_m - \sum_i \sum_j X_{ji} FC_j - \sum_i \sum_j X_{ji} OC_j \\
& - \sum_i \sum_j X_{ji} EEC_j - \sum_i \sum_s QST'_{si,1} CS_{si} - \sum_i \sum_s QST'_{si,2} PS_{si} \\
& - \sum_i \sum_w QWT_{wi} CW_{wi}
\end{aligned} \tag{5.1}$$

s.t.

$$\left. \begin{aligned}
X_{1,i} &= 1 \\
X_{2,i} + X_{3,i} + X_{4,i} + T_{1,i} &= 1 \\
X_{5,i} + X_{6,i} + T_{2,i} &= 1 \\
X_{7,i} + X_{8,i} + T_{3,i} &= 1
\end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Σχέσεις μεταξύ} \\ \text{διεργασιών} \\ \text{, } \forall i \end{array} \tag{5.2}$$

$$QST_{1,i} = \sum_j X_{ji} QS_{1,ji} - \sum_j X_{ji} QW_{5,ji}, \quad \forall j, i \tag{5.3}$$

$$QST_{2,i} = \sum_j X_{ji} QS_{2,ji} - \sum_j X_{ji} QW_{6,ji}, \quad \forall j, i \tag{5.4}$$

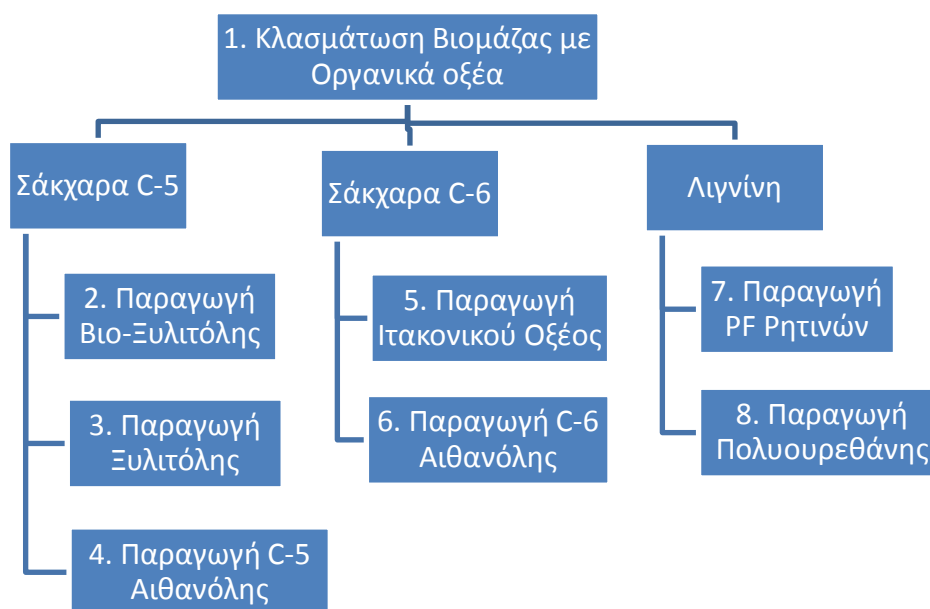
$$QST_{3,i} = \sum_j X_{ji} QS_{3,ji} - \sum_j X_{ji} QW_{7,ji}, \quad \forall j, i \tag{5.5}$$

$$QST'_{si,1} - QST'_{si,2} = QST_{si}, \quad \forall s, i \tag{5.6}$$

$$QWT_{wi} = \sum_j X_{ji} QW_{wji} , \quad w = 1,2,3,4 \quad (5.7)$$

$$QWT_{wi} = 0 , \quad w = 5,6,7 \quad (5.8)$$

Οι περιορισμοί του μοντέλου που αφορούν τις σχέσεις μεταξύ των διεργασιών δεν έχουν γενική ισχύ για κάθε πρόβλημα της μορφής που εξετάζουμε. Όμως αντίστοιχοι περιορισμοί που εκφράζουν τις σχέσεις μεταξύ των διεργασιών πρέπει να διατυπωθούν σε κάθε περίπτωση. Οι περιορισμοί που διατυπώθηκαν παραπάνω εκφράζουν τις σχέσεις που αποτυπώνονται στην Εικόνα 5-10.



Εικόνα 5-10 Σχέσεις μεταξύ των διεργασιών που μπορούν να υλοποιηθούν στα πλαίσια της μονάδας

Για να μπορέσουμε να εξηγήσουμε τον τρόπο με τον οποίο διατυπώνονται οι σχέσεις μεταξύ των διεργασιών πρέπει να αντιστοιχίσουμε τις διεργασίες με τα στοιχεία του συνόλου j που χρησιμοποιούμε στο μοντέλο. Η αντιστοιχία αυτή φαίνεται στην Εικόνα 5-10 μέσω της αρίθμησης που χρησιμοποιείται, να σημειωθεί ότι αντιστοιχούμε τις διεργασίες για αυτό τα ενδιαμέσα προϊόντα δεν έχουν αρίθμηση. Έτσι παρατηρούμε ότι από την κλασμάτωση βιομάζας παράγονται τρία προϊόντα τα οποία τροφοδοτούνται σε άλλες διεργασίες, για την κλασμάτωση βιομάζας δεν προτείνονται εναλλακτικές διεργασίες οπότε η δυναμικότητα στην οποία θα

λειτουργεί εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα της πρώτης ύλης και άλλους οικονομικούς παράγοντες. Είναι προφανές λοιπόν ότι η ύπαρξη της κλασμάτωσης βιομάζας στη λύση του προβλήματος είναι υποχρεωτική και η δυναμικότητα της δεν καθορίζεται από την επίλυση του προβλήματος έτσι σε κάθε περίπτωση η δυναμικότητα της θα είναι αυτή που αποφασίστηκε κατά το σχεδιασμό της διεργασίας άρα θα ισχύει $X_{l,i} = I$. Για τους υπόλοιπους περιορισμούς παρατηρούμε ότι κάποιες διεργασίες χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη το ίδιο προϊόν της κλασμάτωσης βιομάζας, επιπλέον αυτές οι διεργασίες έχουν σχεδιαστεί για δυναμικότητα τέτοια ώστε να εκμεταλλεύονται όλη την ποσότητα της πρώτης ύλης που παράγεται. Άρα το κάθε προϊόν της κλασμάτωσης βιομάζας πρέπει να κατανεμηθεί στις πιθανές διεργασίες επεξεργασίας του και αυτές οι διεργασίες πρέπει να λειτουργούν σε τέτοια δυναμικότητα ώστε να επεξεργάζονται όλη την παραγόμενη ποσότητα. Με αυτή τη λογική διατυπώνονται οι υπόλοιποι περιορισμοί απαιτώντας το άθροισμα των X_{ji} των διεργασιών που εκμεταλλεύονται το ίδιο προϊόν της κλασμάτωσης βιομάζας να είναι ίσο με τη μονάδα.

Όσον αφορά τους περιορισμούς που περιγράφουν τους υπολογισμούς που γίνονται για την ανάλυση συνολικής μονάδας πρέπει να επισημάνουμε ότι τα ρεύματα του κορεσμένου νερού που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ατμού έχουν όλα τα χαρακτηριστικά των ψυχρών παροχών και ως τέτοιες αντιμετωπίζονται για τον υπολογισμό της δυνατότητας παραγωγής ατμού από τις διεργασίες με τη χρήση του μοντέλου μεταφόρτωσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε υποθέσει ότι έχουμε τρία επίπεδα ατμού, κατά συνέπεια θεωρούμε τρεις επιπλέον ψυχρές παροχές που αντικατοπτρίζουν την παραγωγή των ατμών αυτών των επιπέδων από τα ρεύματα των διεργασιών. Οπότε στην περίπτωση μας οι δείκτες $w = 5, 6, 7$ αντιπροσωπεύουν παραγόμενο ατμό στον οποίο αντιστοιχεί ο δείκτης $s = 1, 2, 3$ αντίστοιχα. Αυτή η αντιστοιχία μεταξύ θερμών παροχών και της δυνατότητας παραγωγής τους από τα ρεύματα των διεργασιών είναι απαραίτητη για τη διατύπωση των περιορισμών (5.3), (5.4), (5.5), (5.7) και (5.8). Στους τρεις πρώτους από αυτούς τους περιορισμούς έχοντας υπολογίσει με το μοντέλο μεταφόρτωσης τα φορτία των βοηθητικών παροχών και έχοντας υπόψη μας την παραδοχή ότι το φορτίο των βοηθητικών παροχών είναι ανάλογο της δυναμικότητας που λειτουργεί η διεργασία, για τον υπολογισμό της ανάγκης παραγωγής ατμών αφαιρούμε από την κατανάλωση ατμών την ποσότητα που παράγεται αξιοποιώντας την πλεονάζουσα θερμότητα των διεργασιών. Σχετικά με τον υπολογισμό της ανάγκης για ψυχρές παροχές στη Συνολική Μονάδα, γίνεται με τον περιορισμό (5.7), στον οποίο απλά προσθέτουμε για κάθε ψυχρή παροχή

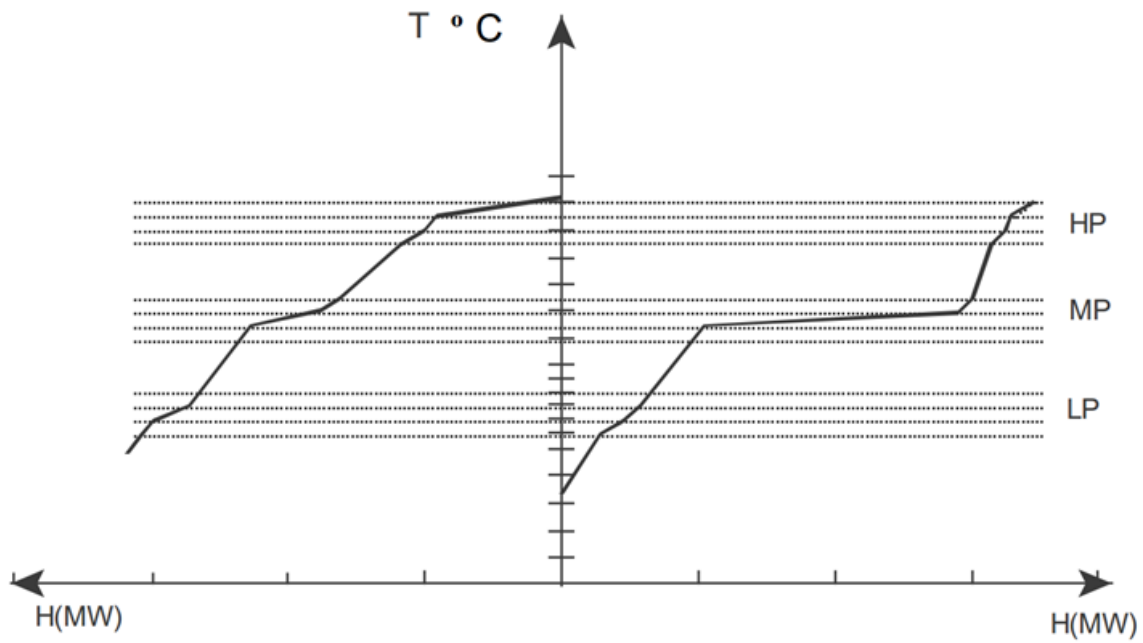
το ποσό θερμότητας που απομακρύνουν από κάθε διεργασία που υλοποιείται στα πλαίσια της μονάδας. Τέλος στον περιορισμό (5.8) του μοντέλου μηδενίζουμε την ανάγκη για τις ψυχρές παροχές με δείκτες $w = 5, 6, 7$ καθώς αντιστοιχούν στην παραγωγή ατμού με χρήση της πλεονάζουσας θερμότητας των διεργασιών και τις παραγόμενες αυτές ποσότητες τις έχουμε λάβει υπ όψη μας στις σχέσεις (5.3), (5.4) και (5.5) για τον υπολογισμό της συνολικής ανάγκης για θερμές παροχές.

Όπως φαίνεται από τον τρόπο που διατυπώνονται οι περιορισμοί (5.3), (5.4) και (5.5) υπάρχει πιθανότητα η ανάγκη για παραγωγή κάποιου ατμού να είναι αρνητική αυτό σημαίνει ότι υπάρχει πλεόνασμα του συγκεκριμένου ατμού αφού η ποσότητα που παράγεται από τις διεργασίες δεν καταναλώνεται. Αυτός ο πλεονάζον ατμός που παράγεται μπορεί να εκτονωθεί σε στρόβιλο ώστε να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια και κάποιος ατμός χαμηλότερης πίεσης άρα το πλεόνασμα κάποιου ατμού που μπορεί να προκύπτει σε κάποια περίπτωση είναι αποδεκτό αφού αντικατοπτρίζει αυτή την περίπτωση. Προφανώς το κέρδος που προκύπτει από την παραγωγή μιας ποσότητας ατμού από τα ρεύματα των διεργασιών δεν ισούται με το κόστος για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ατμού με χρήση καυσίμου. Άρα όπως αναφέρθηκε πρέπει να διακρίνουμε περιπτώσεις σχετικά με το πρόσημο της μεταβλητής QST_{si} , το ρόλο αυτό επιτελεί το ειδικά διατεταγμένο σύνολο μεταβλητών QST'_{sig} . Για αυτές τις μεταβλητές ισχύει ότι μπορούν να πάρουν μόνο θετικές τιμές και ότι για κάθε s και i μόνο μία εκ των $QST'_{si,1}$ και $QST'_{si,2}$ μπορεί να πάρει τιμή διάφορη του μηδενός, οπότε χρησιμοποιούμε τον περιορισμό που διατυπώνεται στο μοντέλο για να διαχωρίσουμε τις μεταβλητές QST_{si} ανάλογα με το πρόσημο τους, με σκοπό αυτές να πολλαπλασιάζονται με το κατάλληλο κόστος ή κέρδος αντίστοιχα στην αντικειμενική συνάρτηση.

5.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΘΕΡΜΩΝ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΠΑΡΟΧΩΝ

Σε αυτό το σημείο έχοντας παρουσιάσει την Ανάλυση Συνολικής Μονάδας και τις δυνατότητες που μας προσφέρει είναι σκόπιμο να αναφέρουμε τη σπουδαιότητα της επιλογής των κατάλληλων βοηθητικών παροχών. Ο λόγος που η επιλογή βοηθητικών παροχών είναι αναπόσπαστο κομμάτι της Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας είναι ότι σύμφωνα με αυτά που είπαμε οι βοηθητικές παροχές είναι το μέσο το οποίο μας επιτρέπει να ολοκληρώνουμε διεργασίες μεταξύ τους. Έτσι καλούμαστε να επιλέξουμε βοηθητικές παροχές και συγκεκριμένα ατμούς που θα έχουν κάποια επιθυμητά χαρακτηριστικά. Ο βασικός στόχος αυτής της διαδικασίας είναι η επιλογή ατμών που είναι κατά το δυνατόν οικονομικότεροι και καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες της μονάδας, όμως η Ανάλυση Συνολικής Μονάδας φέρνει στην επιφάνεια και άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν την επιλογή αυτή καθώς κάποιος ατμός πιθανόν να επιτρέπει καλύτερη ενεργειακή ολοκλήρωση σε σχέση με κάποιον πιο οικονομικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη θέση του. Γίνεται προφανές λοιπόν ότι η επιλογή των ατμών που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να γίνει στο στάδιο της Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας με οικονομικά κριτήρια ώστε αυτή η επιλογή να είναι βέλτιστη. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της αντιμετώπισης του συνδυασμού βοηθητικών παροχών σαν ανεξάρτητη μεταβλητή, ειδικά στο πρόβλημα που εξετάζουμε στην παρούσα διπλωματική, είναι το γεγονός ότι επηρεάζουν την επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού διεργασιών που θα υλοποιηθούν στη μονάδα. Αυτό συμβαίνει γιατί κάθε συνδυασμός ατμών πιθανόν να φέρνει στην επιφάνεια διαφορετικές δυνατότητες ολοκλήρωσης μεταξύ διαφορετικών διεργασιών. Κατά συνέπεια πρέπει η επιλογή βοηθητικών παροχών και διεργασιών που θα υλοποιηθούν να γίνει ταυτόχρονα. Μέσα από αυτή την παρατήρηση προκύπτει ένας ακόμα λόγος για τον οποίο επιλέγουμε να διακρίνουμε περιπτώσεις για τις βοηθητικές παροχές. Αυτός ο λόγος είναι ότι σε διαφορετική περίπτωση θα έπρεπε να γίνει με το μοντέλο προσδιορισμός δυο μεταβλητών που δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους κάτι που σημαίνει ότι θα έπρεπε να διατυπώσουμε ένα μοντέλο μη γραμμικού προγραμματισμού το οποίο θα ήταν αρκετά πιο πολύπλοκο και πιθανόν να μην μας οδηγούσε με ακρίβεια στη βέλτιστη λύση. Στην Εικόνα 5-11 παρουσιάζεται ένα ΣΔΜ πάνω στο οποίο έχουν σχεδιαστεί οι διαφορετικές περιπτώσεις που υποθέτουμε για τα επίπεδα των ατμών, αν παρατηρήσουμε την εικόνα γίνεται προφανές ότι είναι αδύνατον να αποφασίσουμε ποιος συνδυασμός είναι ο πιο συμφέρον οικονομικά παρά μόνο αν επιλύσουμε το πρόβλημα της

επιλογής διεργασιών για όλους τους συνδυασμούς και στη συνέχεια επιλέξουμε αυτόν για τον οποίο η λύση αποφέρει τα μεγαλύτερα κέρδη.



Εικόνα 5-11 Ένα ΣΔΜ στο οποίο απεικονίζονται τα πιθανά επίπεδα ατμών που θεωρούμε

5.5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΒΕΛΤΙΣΗΣ ΛΥΣΗΣ

Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι το μοντέλο όπως διατυπώθηκε μέχρι στιγμής υπολογίζει τις βέλτιστες τιμές της μεταβλητής απόφασης X_{ji} για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς βοηθητικών παροχών. Αυτό σημαίνει ότι πιθανόν ο συνδυασμός διεργασιών που πρέπει να υλοποιηθούν μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το συνδυασμό παροχών που επιλέγουμε. Ωστόσο για να δώσουμε σαφή απάντηση ως προς το ποιες διεργασίες πρέπει να υλοποιηθούν στα πλαίσια της μονάδας πρέπει να προσδιορίσουμε το συνδυασμό παροχών για τον οποίο μεγιστοποιούνται τα κέρδη της βιομηχανίας. Έτσι καλούμαστε να διατυπώσουμε ένα τρίτο μοντέλο που θα πραγματοποιεί αυτή την επιλογή και η τιμή της αντικειμενικής του συνάρτησης θα αντιστοιχεί στο κέρδος που αποφέρει ο βέλτιστος συνδυασμός διεργασιών που αντιστοιχεί στο βέλτιστο συνδυασμό παροχών. Έτσι διατυπώνουμε το παρακάτω μοντέλο μικτού ακέραιου προγραμματισμού.

Οι γνωστές παράμετροι του προβλήματος είναι:

X_{ji} : ποσοστό συμμετοχής της διεργασίας j στο συνδυασμό διεργασιών που υλοποιούνται για το συνδυασμό παροχών i όπως υπολογίστηκε στο προηγούμενο μοντέλο

QST'_{sig} : συνολική ανάγκη ή παραγωγή θερμής παροχής s του συνδυασμού i στη Συνολική Μονάδα όπως υπολογίστηκε στο προηγούμενο μοντέλο

QWT_{wi} : συνολική ανάγκη της ψυχρής παροχής w του συνδυασμού i στη Συνολική Μονάδα όπως υπολογίστηκε στο προηγούμενο μοντέλο

CS_{si} : μοναδιαίο κόστος της θερμής παροχής s του συνδυασμού i

PS_{si} : μοναδιαία εξοικονόμηση από την παραγωγή θερμής παροχής s του συνδυασμού i

CW_{wi} : μοναδιαίο κόστος της ψυχρής παροχής w του συνδυασμού i

INC_j : ετήσια έσοδα από τις πωλήσεις του προϊόντος της διεργασίας j

FC_j : ετησιοποιημένο πάγιο κόστος κεφαλαίου της διεργασίας j

OC_j : ετήσιο λειτουργικό κόστος της διεργασίας j

EEC_j : ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για τη διεργασία j

$PROF_i$: ετήσιο κέρδος για το συνδυασμό παροχών i

Η μοναδική μεταβλητή του προβλήματος είναι:

BS_i : παίρνει τιμή διάφορη και μεγαλύτερη του μηδενός μόνο για ένα συνδυασμό i ο οποίος είναι ο συνδυασμός που μεγιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση

Η παράμετρος $PROF_i$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} PROF_i = & \sum_j X_{ji} INC_j + \sum_m T_{mi} INC'_m - \sum_s QST'_{s,i,1} CS_{si} + \sum_s QST'_{s,i,2} PS_{si} \\ & - \sum_w QWT_{wi} CW_{wi} - \sum_j X_{ji} FC_j - \sum_j X_{ji} OC_j - \sum_j X_{ji} EEC_j \end{aligned} \quad (5.9)$$

και το μοντέλο διατυπώνεται ως εξής:

$$\max W = \sum_i BS_i * PROF_i \quad (5.10)$$

s.t.

$$\sum_i BS_i = 1 \quad (5.11)$$

Σύμφωνα με τη διατύπωση του μοντέλου για τη μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης πρέπει η μεταβλητή απόφασης BS_i να πάρει την τιμή 1 για το συνδυασμό βοηθητικών παροχών που έχουμε το μεγαλύτερο κέρδος. Έτσι προσδιορίζουμε έμμεσα το βέλτιστο συνδυασμό διεργασιών που θα υλοποιηθούν στα πλαίσια της μονάδας. Αυτός ο συνδυασμός είναι αυτός που αντιστοιχεί στη βέλτιστη επιλογή βοηθητικών παροχών. Επιπλέον μέσω της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του τελευταίου μοντέλου προσδιορίζεται το μέγιστο κέρδος της μονάδας. Όπως θα αναφερθεί σε επόμενο κεφάλαιο η τιμή που παίρνει αυτή η αντικειμενική συνάρτηση όταν κάνουμε μεταβολές στις σχεδιαστικές παραμέτρους των διεργασιών μπορεί να μας βοηθήσει να αξιολογήσουμε αυτές τις αλλαγές στα πλαίσια της Συνολικής Μονάδας.

6. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στα προηγούμενα κεφάλαια περιγράφηκε η Ανάλυση Συνολικής Μονάδας και ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η μοντελοποίηση της, όμως τα αποτελέσματα της πρέπει να ερμηνευτούν σε οικονομικούς όρους και να συγκριθούν με άλλα οικονομικά στοιχεία των διεργασιών ώστε να γίνει η βέλτιστη επιλογή διεργασιών που θα υλοποιηθούν. Σε μια τυπική διαδικασία επιλογής διεργασιών που θα υλοποιηθούν στα πλαίσια μιας μονάδας λαμβάνονται υπ όψη τα έσοδα από την πώληση των προϊόντων σε συνδυασμό με τα πάγια και τα λειτουργικά κόστη. Η σημαντική διαφορά στην παρούσα διπλωματική είναι ότι το ενεργειακό κόστος που αποτελεί ένα μεγάλο ποσοστό των λειτουργικών εξόδων, υπολογίζεται για την ολοκληρωμένη μονάδα.

6.2 ΚΟΣΤΟΣ ΠΑΓΙΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Ως πάγιο κόστος ορίζουμε το κεφάλαιο που δαπανάται ώστε η βιομηχανική μονάδα να είναι έτοιμη για την παραγωγή των προϊόντων και περιλαμβάνει την εκπόνηση μελετών, την αγορά και εγκατάσταση μηχανημάτων κ.α.

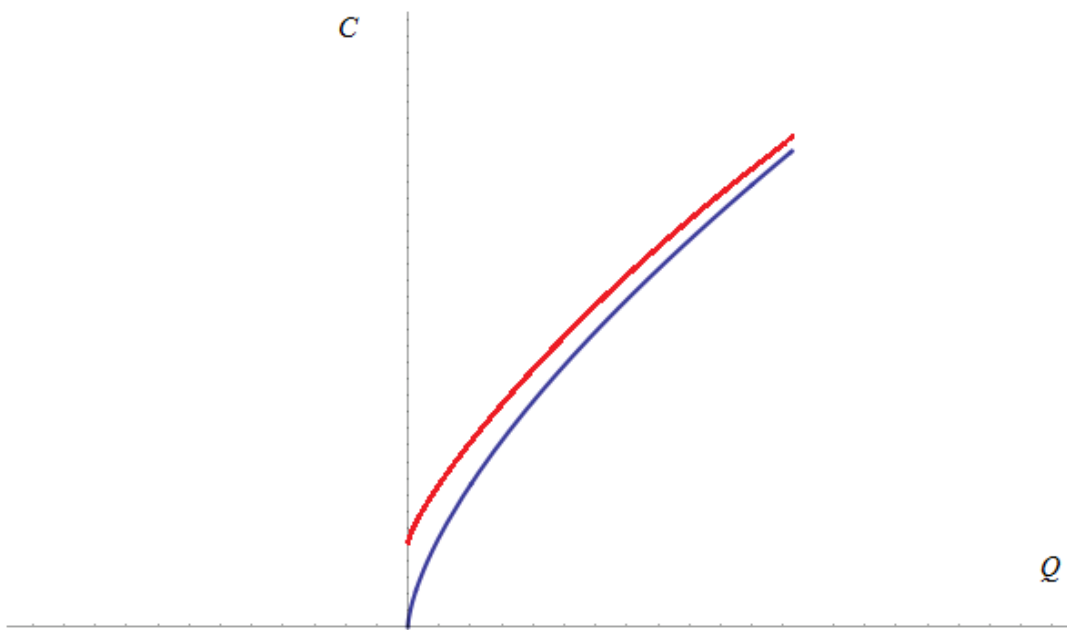
Η αποτελεσματικότερη και ακριβέστερη μέθοδος εκτίμησης του πάγιου κόστους μιας εγκατάστασης είναι η συγκέντρωση προσφορών από τους διάφορους κατασκευαστές και προμηθευτές. Η μέθοδος αυτή όμως προϋποθέτει ότι έχει ολοκληρωθεί ο λεπτομερής σχεδιασμός διότι μόνο τότε είναι δυνατή η σύνταξη των τεχνικών προδιαγραφών, οι οποίες περιέχουν όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για την ακριβή κοστολόγηση συσκευών, μηχανημάτων και υλικών. Παρ' όλα αυτά είναι απαραίτητο πολλές φορές να γίνει εκτίμηση στοιχείων κόστους χωρίς να έχει ολοκληρωθεί ο βασικός σχεδιασμός. Αυτή ακριβώς είναι η κατάσταση στην παρούσα διπλωματική καθώς χρειαζόμαστε στοιχεία για τις διεργασίες που εξετάζουμε για οποιαδήποτε δυναμικότητα μεταξύ της ελάχιστης που είναι μηδέν δηλαδή δεν υλοποιείται η διεργασία και της μέγιστης που καθορίζεται από τη διαθεσιμότητα της πρώτης ύλης.

Για αυτές τις περιπτώσεις έχουν αναπτυχθεί ορισμένες προσεγγιστικές μέθοδοι, η γνωστότερη από τις οποίες είναι η μέθοδος των 2/3. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην εξίσωση:

$$C_2 = C_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^n \quad (6.1)$$

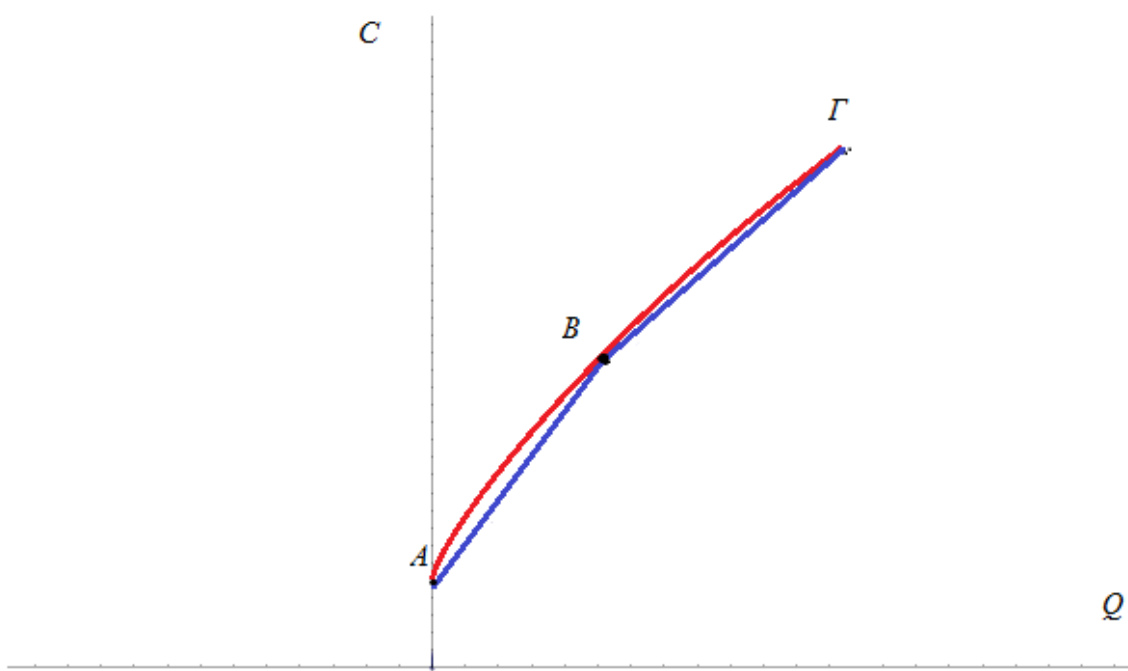
όπου: Q_1, Q_2 = δυναμικότητες, C_1 = πάγιο κόστος για την Q_1 , C_2 = πάγιο κόστος για την Q_2 ,
 $n=2/3$

Για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου πρέπει να γνωρίζουμε το πάγιο κόστος της διεργασίας που εξετάζουμε για κάποια δυναμικότητα και με την χρήση της εξίσωσης 6.1 μπορούμε να υπολογίσουμε το πάγιο κόστος για όποια άλλη δυναμικότητα μας ενδιαφέρει. Όμως αυτή η μέθοδος προσφέρει περιορισμένη ακρίβεια καθώς η τιμή του n επιλέχθηκε αυθαίρετα και σε αρκετές περιπτώσεις δεν είναι αντιπροσωπευτική και επιπλέον δεν λαμβάνει υπ' όψη ότι ένα μέρος του πάγιου κόστους κεφαλαίου είναι ανεξάρτητο της δυναμικότητας της μονάδας. Έτσι όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-1 στην πραγματικότητα το διάγραμμα του πάγιου κόστους προς τη δυναμικότητα δεν ξεκινάει από την αρχή των αξόνων και πιθανόν να αποκλίνει λόγω της αυθαίρετης τιμής του n .



Εικόνα 6-1 Συσχέτιση της πραγματικής εξάρτησης του πάγιου κόστους από τη δυναμικότητα με τα αποτελέσματα της εξίσωσης 6.1

Έτσι με σκοπό να προσεγγίσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια τη μεταβολή του πάγιου κόστους σε συνάρτηση με τη δυναμικότητα καταφεύγουμε σε μια διαφορετική μεθοδολογία. Η προσέγγιση που ακολουθούμε περιλαμβάνει τον υπολογισμό του πάγιου κόστους για διάφορες δυναμικότητες και υπόθεση γραμμικότητας μεταξύ αυτών των σημείων. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να πετύχουμε την επιθυμητή ακρίβεια αυξάνοντας από την άλλη μεριά σημαντικά τους υπολογισμούς που πρέπει να γίνουν, αφού πρέπει να σχεδιάσουμε τη διεργασία για αρκετές δυναμικότητες. Αυτή η προσέγγιση φαίνεται καλύτερα στην Εικόνα 6-2 όπου η διεργασία σχεδιάζεται για δυναμικότητες Q_A , Q_B και Q_G .



Εικόνα 6-2 Συσχέτιση της πραγματικής εξάρτησης του πάγιου κόστους από τη δυναμικότητα με τα αποτελέσματα του υπολογισμού του πάγιου κόστους για τρεις διαφορετικές δυναμικότητες

Η μέθοδος που περιγράφηκε είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος για τον υπολογισμό του πάγιου κόστους καθώς προσφέρει αρκετά καλή ακρίβεια η οποία είναι ελέγξιμη μέσω του αριθμού των διαφορετικών δυναμικοτήτων στις οποίες σχεδιάζεται η διεργασία. Επιπλέον σε αντίθεση με τη μέθοδο των 2/3 που το μοντέλο στο οποίο χρησιμοποιείται θα είναι μη γραμμικό η χρήση της μεθόδου σχεδιασμού της διεργασίας σε διάφορες δυναμικότητες απαιτεί την χρήση ενός

μοντέλου μικτού ακέραιου προγραμματισμού, κάτι που εγγυάται ότι η λύση που θα προκύψει από την επίλυση του μοντέλου θα είναι η καλύτερη δυνατή.

Στην παρούσα διπλωματική λόγω έλλειψης δεδομένων του πάγιου κόστους των διεργασιών σε άλλες δυναμικότητες εκτός της μέγιστης δυνατής που υπαγορεύεται από τη διαθεσιμότητα της πρώτης ύλης, επιλέγεται να προσεγγίσουμε την καμπύλη που περιγράφει τη σχέση μεταξύ πάγιου κόστους και δυναμικότητας ως μια ευθεία που ξεκινάει από την αρχή των αξόνων και καταλήγει στο μοναδικό γνωστό σημείο της καμπύλης που αντιστοιχεί στη μέγιστη δυναμικότητα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-3.



Εικόνα 6-3 Συσχέτιση της πραγματικής εξάρτησης του πάγιου κόστους από τη δυναμικότητα με τα αποτελέσματα του υπολογισμού του πάγιου κόστους με ένα γνωστό σημείο

Προφανώς αυτή η προσέγγιση υστερεί σημαντικά σε ακρίβεια των άλλων δύο, ωστόσο είναι μια παραδοχή την οποία είμαστε αναγκασμένη να κάνουμε καθώς θέλουμε να αποφύγουμε τη μη γραμμικότητα του μοντέλου για λόγους βεβαιότητας ως προς το αν η λύση του μοντέλου είναι η βέλτιστη σε κάθε περίπτωση και επιπλέον ξεφεύγουμε από την ανάγκη για υπολογισμό του πάγιου κόστους σε άλλες πιθανές δυναμικότητες πέραν της μέγιστης δυνατής καθώς αν και μια

τέτοια διαδικασία θα ήταν η πλέον σωστή να ακολουθηθεί ξεφεύγει σημαντικά από τα πλαίσια και τους στόχους της παρούσας διπλωματικής που είναι η διατύπωση μιας μεθοδολογίας για την επίλυση μιας σειράς προβλημάτων του ίδιου τύπου και όχι η επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος.

6.3 ΚΟΣΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ - ΕΣΟΔΑ

6.3.1 Λειτουργικό κόστος

Το λειτουργικό κόστος περιλαμβάνει όλα τα έξοδα που σχετίζονται άμεσα με τη διαδικασία παραγωγής ή το φυσικό εξοπλισμό μιας μονάδας. Το κόστος λειτουργίας περιλαμβάνει σταθερά και αναλογικά ως προς την παραγόμενη ποσότητα στοιχεία. Έτσι μπορούμε να χωρίσουμε τα λειτουργικά έξοδα σε πάγιες χρεώσεις και μεταβλητά κόστη.

Τα μεταβλητά κόστη παραγωγής περιλαμβάνουν έξοδα τα οποία σχετίζονται άμεσα με την παραγωγική διαδικασία και εξαρτώνται από το ρυθμό παραγωγής. Χαρακτηρίστηκα μεταβλητά λειτουργικά κόστη είναι τα έξοδα για τις πρώτες ύλες, για το προσωπικό παραγωγής, για τις βοηθητικές παροχές, για τους καταλύτες και τους διαλύτες. Αυτά τα έξοδα υφίστανται μόνο όταν η μονάδα λειτουργεί.

Οι πάγιες χρεώσεις είναι τα έξοδα που είναι ανεξάρτητα ή σχεδόν ανεξάρτητα του ρυθμού παραγωγής. Τέτοιες χρεώσεις είναι η απόσβεση κεφαλαίων, οι φόροι ιδιοκτησίας και τα ενοίκια. Αυτά τα έξοδα υφίστανται ακόμα και αν η μονάδα δεν λειτουργεί. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον από αυτά τα έξοδα παρουσιάζει η απόσβεση κεφαλαίων. Ο εξοπλισμός, τα κτήρια και τα άλλα υλικά αντικείμενα που συνιστούν μια παραγωγική μονάδα, απαιτούν μια αρχική επένδυση η οποία θα πρέπει να αποπληρωθεί και αυτό γίνεται χρεώνοντας την απόσβεση ως έξοδο παραγωγής. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί το πάγιο κόστος κεφαλαίου να συσχετιστεί με τα λειτουργικά έξοδα και τα έσοδα της μονάδας και να βγάλουμε συμπεράσματα για τη βιωσιμότητα της επιχείρησης.

Με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί το κόστος λειτουργίας αποτελείται από σταθερά και αναλογικά ως προς την παραγόμενη ποσότητα στοιχεία. Αν θεωρήσουμε ότι q είναι τα σταθερά και p τα αναλογικά, τότε το κόστος λειτουργίας (OC) είναι δυνατό να εκφραστεί ως εξής:

$$OC = q + pQ \quad (6.2)$$

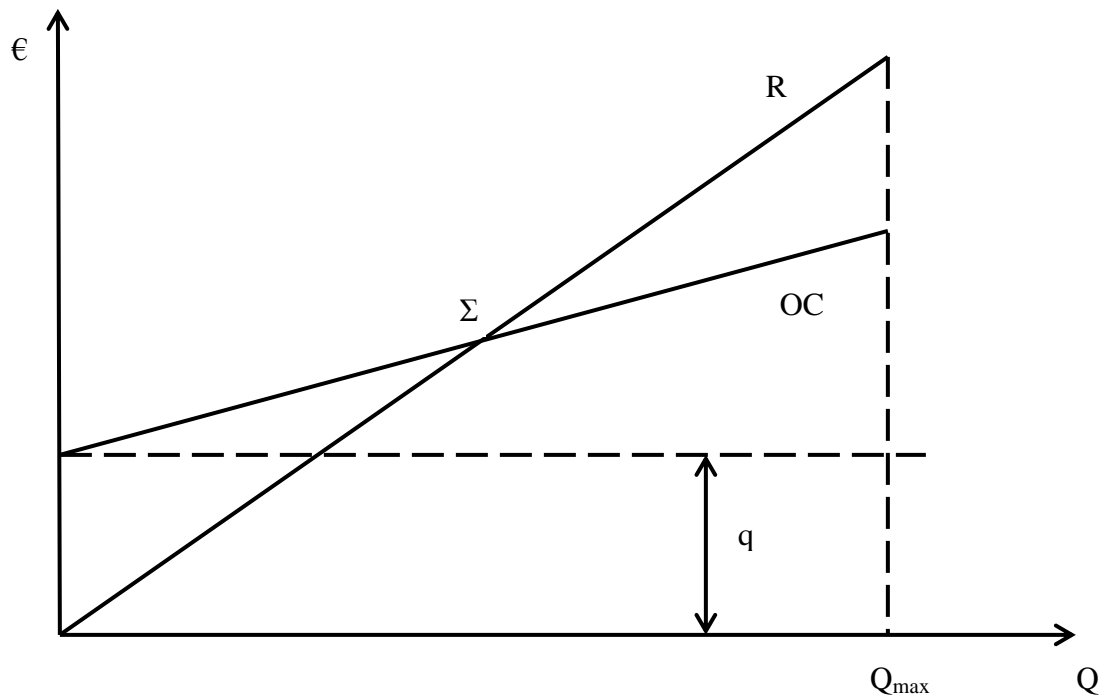
όπου Q = παραγόμενη ποσότητα ή δυναμικότητα λειτουργίας

Όσο αναφορά τα έσοδα από τις πωλήσεις είναι δυνατό να εκτιμηθούν μετά από σχετική έρευνα αγοράς, η οποία προσδιορίζει τόσο την τιμή πώλησης όσο και την ποσότητα των προϊόντων που είναι δυνατό να απορροφηθεί από την αγορά. Για τις ανάγκες του προκαταρκτικού σχεδιασμού οι τιμές πώλησης μπορούν να βρεθούν από βιβλιογραφικά δεδομένα και να υποθέσουμε ότι όλη η παραγόμενη ποσότητα μπορεί να απορροφηθεί αν πουληθεί στα $\frac{3}{4}$ της βιβλιογραφικής τιμής. Έτσι τα έσοδα (R) μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$R = sQ \quad (6.3)$$

όπου s = η αναθεωρημένη τιμή που εξασφαλίζει την απορρόφηση όλης της παραγόμενης ποσότητας και Q = η παραγόμενη ποσότητα ή δυναμικότητα λειτουργίας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αν θεωρήσουμε ως μεταβλητή το μέγεθος Q και απεικονίσουμε τις εξισώσεις 6.2 και 6.3 λαμβάνουμε το γράφημα της εικόνας 6-1[10].



Εικόνα 6-4 Απεικόνιση των της εξάρτησης των εσόδων και του λειτουργικού κόστους από τη δυναμικότητα λειτουργίας

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-1 οι γραμμές R και OC τέμνονται στο σημείο Σ , όπου τα έσοδα και το κόστος λειτουργίας γίνονται ίσα. Το σημείο Σ ονομάζεται νεκρό σημείο και ορίζει τη δυναμικότητα λειτουργίας κάτω από την οποία παρουσιάζεται ζημιά. Επιπλέον παρατηρούμε ότι αν η κλίση της ευθείας R ήταν μικρότερη από την κλίση της OC τότε δεν θα υπήρχε νεκρό σημείο και δεν θα είχαμε κέρδη για καμία δυναμικότητα λειτουργίας. Όμως σε περίπτωση που υπάρχει το νεκρό σημείο και οι δυο ευθείες τέμνονται μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα κέρδη μεγιστοποιούνται για λειτουργία στη μέγιστη δυναμικότητα Q_{max} . Έτσι δεδομένης της υπόθεσης που κάναμε για πλήρη απορρόφηση των προϊόντων αν πουληθούν στα $\frac{3}{4}$ της βιβλιογραφικής τιμής, μπορούμε να επιλέξουμε τις διεργασίες που θα υλοποιηθούν στα πλαίσια της μονάδας με κριτήριο το κέρδος που αποφέρει η καθεμία αν λειτουργεί στη μέγιστη δυναμικότητα για την οποία έχει σχεδιαστεί. Αυτή η παραδοχή γίνεται γιατί η τελική επιλογή επηρεάζεται από το πάγιο κόστος κεφαλαίου το λειτουργικό κόστος και τα έσοδα από την πώληση του παραγόμενου προϊόντος ενώ το πρώτο εξαρτάται από τη μέγιστη δυναμικότητα της διεργασίας και τα άλλα δυο από τη δυναμικότητα στην οποία λειτουργεί η μονάδα. Υποθέτοντας λοιπόν ότι οι διεργασίες λειτουργούν στη μέγιστη δυναμικότητα για την οποία σχεδιάζονται μειώνουμε τις μεταβλητές του προβλήματος καθιστώντας το επιλύσιμο.

6.3.2 Κόστος βοηθητικών παροχών

Στην παρούσα διπλωματική δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στο κόστος των βοηθητικών παροχών και στον τρόπο που αυτό επηρεάζει την επιλογή των διεργασιών που θα υλοποιηθούν και τη δυναμικότητα τους. Έτσι είναι χρήσιμο να παρουσιαστεί ο τρόπος που υπολογίζεται το κόστος τους. Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκε ο τρόπος με τον οποίο γίνεται ο υπολογισμός των φορτίων που πρέπει να καλύψει η κάθε παροχή, για να προσδιοριστεί το κόστος της παροχής στη μονάδα του χρόνου όμως πρέπει να προσδιοριστεί το κόστος της ανά μονάδα ενέργειας που προσφέρει ή απομακρύνει.

Η αποτελεσματικότερη και ακριβέστερη μέθοδος για τον υπολογισμό του κόστους των βοηθητικών παροχών ανά μονάδα ενέργειας που προσφέρουν ή απομακρύνουν είναι ο σχεδιασμός του δικτύου βοηθητικών παροχών και ο προσδιορισμός της ανάγκης για καύσιμο ή ηλεκτρική ενέργεια και των λοιπών εξόδων για την παραγωγή της απαιτούμενης ποσότητας

βοηθητικών παροχών. Όμως για να εφαρμοστεί η συγκεκριμένη μέθοδος πρέπει να είναι γνωστά τα φορτία της κάθε βοηθητικής παροχής ώστε να σχεδιαστεί το κατάλληλο δίκτυο. Αυτή η προϋπόθεση μας αποτρέπει από το να χρησιμοποιήσουμε τη συγκεκριμένη προσέγγιση για την επίλυση του προβλήματος καθώς στην περίπτωση που εξετάζουμε το φορτίο των βοηθητικών παροχών δεν είναι γνωστό αφού εξαρτάται από τις διεργασίες που θα υλοποιηθούν στα πλαίσια της μονάδας. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε προσεγγιστικές σχέσεις για τον προσδιορισμό των τιμών των βοηθητικών παροχών.

Η προσεγγιστική σχέση που χρησιμοποιήθηκε οφείλεται στους Gael D. Ulrich και Palligarnai T. Vasudevan [11]. Αυτοί ξεκινώντας από την παρατήρηση ότι το κόστος των βοηθητικών παροχών εξαρτάται τόσο από πληθωριστικούς παράγοντες όπως το κόστος της εργασίας και το μέγεθος του πάγιου κεφαλαίου όσο και από την τιμή της ενέργειας διατύπωσαν μια σχέση που λαμβάνει υπόψη αυτές τις δύο παραμέτρους και υπολογίζει το μοναδιαίο κόστος της βοηθητικής παροχής. Έτσι για τον υπολογισμό του κόστους χρειαζόμαστε μια σχέση της μορφής:

$$C_{S,u} = a(CE PCI) + b(C_{S,f}) \quad (6.4)$$

όπου $C_{S,u}$ = το μοναδιαίο κόστος της βοηθητικής παροχής, a και b = συντελεστές κόστους, $C_{S,f}$ = η τιμή του καυσίμου σε €/GJ και $CE PCI$ = δείκτης που αποτυπώνει τον πληθωρισμό.

Για τον υπολογισμό του μοναδιαίου κόστους μιας βοηθητικής παροχής πρέπει λοιπόν να υπολογίσουμε τους συντελεστές a και b αφού η τιμές του καυσίμου και του δείκτη $CE PCI$ είναι γνωστές. Για κάθε παροχή προσδιορίζουμε τις παραμέτρους που επηρεάζουν την τιμή της και τις κατατάσσουμε ανάλογα με το αν αυτές εξαρτώνται από τον πληθωριστικό δείκτη ή την τιμή του καυσίμου. Έτσι υπολογίζονται τα a και b για τα οποία δίνονται τιμές για μια πληθώρα παροχών στον Πίνακα 6-1.

Πίνακας 6-1 Υπολογισμός των συντελεστών α και β για μια σειρά παροχών

| TABLE 1. UTILITY COST COEFFICIENTS ^a | | | | | | |
|---|---|---|---|--|--|-----------------------------|
| | | Cost coefficients | | | Cost coefficients | |
| | | a | b | | a | b |
| Electricity, \$/kWh | | | | Wastewater Treatment^d, \$/m³ (0.01 < q < 10 m ³ /s) | | |
| Purchased from outside | 1.3 × 10 ⁻⁴ | 0.010 | | • Primary (filtration) | | |
| Onsite power charged to process module | 1.4 × 10 ⁻⁴ | 0.011 | | Process module | 0.0001 + 2 × 10 ⁻⁷ q ⁻¹ | 0.002 |
| Onsite power charged to grass-roots plant | 1.1 × 10 ⁻⁴ | 0.011 | | Grass-roots plant | 0.00005 + 2 × 10 ⁻⁷ q ⁻¹ | 0.002 |
| Compressed and Dried Air^b, \$/Nm³ (0.1 < q < 100 Nm ³ /s; 2 < p < 35 bara) | | | | • Secondary (filtration and activated sludge processing) | | |
| Process module | 5.0 × 10 ⁻⁵ q ^{-0.30} (ln p) | 9.0 × 10 ⁻⁴ (ln p) | | Process module | 0.0007 + 2 × 10 ⁻⁶ q ⁻¹ | 0.003 |
| Grass-roots plant | 4.5 × 10 ⁻⁵ q ^{-0.30} (ln p) | 9.0 × 10 ⁻⁴ (ln p) | | Grass-roots plant | 0.00035 + 2 × 10 ⁻⁶ q ⁻¹ | 0.003 |
| Instrument Air^b, \$/std m³ | | | | • Tertiary (filtration, activated sludge, and chemical processing) (0.0003 < q < 10 m ³ /s) | | |
| Process module | 1.25 × 10 ⁻⁴ | 1.25 × 10 ⁻³ | | Process module | 0.001 + 2 × 10 ⁻⁴ q ^{-0.6} | 0.1 |
| Grass-roots plant | 1.15 × 10 ⁻⁴ | 1.25 × 10 ⁻³ | | Grass-roots plant | 0.0005 + 1 × 10 ⁻⁴ q ^{-0.6} | 0.1 |
| Process Steam^c, \$/kg (1 < p < 46 barg; 0.06 < m _s < 40 kg/s) | | | | Membrane Processes (see water desalination costs above) | | |
| Process module | 2.7 × 10 ⁻⁵ m _s ^{-0.9} | 0.0034p ^{0.05} | | Liquid/Solid Waste Disposalⁿ, \$/kg | | |
| Grass-roots plant | 2.3 × 10 ⁻⁵ m _s ^{-0.9} | 0.0034p ^{0.05} | | • Conventional solid or liquid wastes | | |
| Cooling Water^d, \$/m³ (0.01 < q < 10 m ³ /s) | | | | Process module | 4.0 × 10 ⁻⁴ | — |
| Process module | 0.0001 + 3.0 × 10 ⁻⁵ q ⁻¹ | 0.003 | | Grass-roots plant | 3.0 × 10 ⁻⁴ | — |
| Grass-roots plant | 0.00007 + 2.5 × 10 ⁻⁵ q ⁻¹ | 0.003 | | • Toxic or hazardous solids and liquids | | |
| Demineralized (boiler feed) Water^d, \$/m³ (0.001 < q < 1.0 m ³ /s) | | | | Process module | 2.5 × 10 ⁻³ | — |
| Process module | 0.007 + 2.5 × 10 ⁻⁴ q ^{-0.6} | 0.04 | | Grass-roots plant | 2 × 10 ⁻³ | — |
| Grass-roots plant | 0.005 + 2.0 × 10 ⁻⁴ q ^{-0.6} | 0.04 | | • Combustion as Supplementary Fuel ^h (1 < m × HHV < 1,000 MJ/s) | | |
| Drinking Water^d, \$/m³ (0.001 < q < 10 m ³ /s) | | | | Process module | 3.0 × 10 ⁻⁵ (HHV) ^{0.77} (m ^{-0.23}) | -5 × 10 ⁻⁴ (HHV) |
| Process module | 7.0 × 10 ⁻⁴ + 3.0 × 10 ⁻⁵ q ^{-0.6} | 0.02 | | Grass-roots plant | 2.5 × 10 ⁻⁵ (HHV) ^{0.77} (m ^{-0.23}) | -5 × 10 ⁻⁴ (HHV) |
| Grass-roots plant | 5.0 × 10 ⁻⁴ + 2.5 × 10 ⁻⁵ q ^{-0.6} | 0.02 | | • Combustion as Supplementary Fuel (with flue gas cleaning) | | |
| Natural Water, Pumped and Screened^d, \$/m³ (0.001 < q < 10 m ³ /s) | | | | Process module | 5.0 × 10 ⁻⁵ (HHV) ^{0.77} (m ^{-0.23}) | -4 × 10 ⁻⁴ (HHV) |
| Process module | 1.0 × 10 ⁻⁴ + 3 × 10 ⁻⁶ q ^{-0.6} | 0.003 | | Grass-roots plant | 4.0 × 10 ⁻⁵ (HHV) ^{0.77} (m ^{-0.23}) | -4 × 10 ⁻⁴ (HHV) |
| Grass-roots plant | 7.0 × 10 ⁻⁵ + 2 × 10 ⁻⁶ q ^{-0.6} | 0.003 | | Gas Emissions Treatmentⁱ, \$/Nm³ (0.05 < q < 50 Nm ³ /s) | | |
| Water Desalination < 500 ppm total dissolved solids (tds) in product Can be applied to membrane purification of wastewater also | | | | • Endothermic Flaring | | |
| • Brackish ^d (up to 5,000 ppm tds in feed), \$/m ³ (0.04 < q < 1.0 m ³ /s) | | | | Process module | 1 × 10 ⁻⁶ q ^{-0.23} | 0.004 |
| Process module | 0.0014 + 4.0 × 10 ⁻⁵ q ^{-0.6} | 0.02 | | Grass-roots plant | 0.7 × 10 ⁻⁶ q ^{-0.23} | 0.004 |
| Grass-roots plant | 0.001 + 3.0 × 10 ⁻⁵ q ^{-0.6} | 0.02 | | • Thermal or Catalytic Incineration | | |
| • Seawater ^d (35,000–40,000 ppm tds in feed), \$/m ³ (0.001 < q < 1.0 m ³ /s) | | | | Process module | 1 × 10 ⁻⁵ q ^{-0.23} | 0.002 |
| Process module | 0.0015 + 6.0 × 10 ⁻⁵ q ^{-0.6} | 0.13 | | Grass-roots plant | 0.7 × 10 ⁻⁵ q ^{-0.23} | 0.002 |
| Grass-roots plant | 0.0012 + 4.5 × 10 ⁻⁵ q ^{-0.6} | 0.13 | | • Thermal or Catalytic Incineration (with flue gas cleaning) | | |
| Refrigerant, \$/kJ cooling capacity^e (1 < Q _c < 1,000 kJ/s; 0 < T < 300 K) | | | | Process module | 1.5 × 10 ⁻⁵ q ^{-0.23} | 0.003 |
| Process module | 0.6 Q _c ^{-0.9} (T ⁻³) | 1.1 × 10 ⁶ T ⁻⁵ | | Grass-roots plant | 1.1 × 10 ⁻⁵ q ^{-0.23} | 0.003 |
| Grass-roots plant | 0.5 Q _c ^{-0.9} (T ⁻³) | 1.1 × 10 ⁶ T ⁻⁵ | | • Combustion as Supplementary Fuel (1 < q × LHV < 1,000 MJ/s) | | |
| Hot Water, Hot Oil, or Molten-Salt Heat Transfer Media, \$/kJ heating capacity^f (100 < Q _H < 20,000 kJ/s; 350 < T < 850 K) | | | | Process module | 3.0 × 10 ⁻⁵ (LHV) ^{0.77} (q ^{-0.23}) | -6 × 10 ⁻⁴ (LHV) |
| Process module | 7.0 × 10 ⁻⁷ Q _H ^{-0.9} (T ^{0.5}) | 6.0 × 10 ⁻⁸ T ^{0.5} | | Grass-roots plant | 2.5 × 10 ⁻⁵ (LHV) ^{0.77} (q ^{-0.23}) | -6 × 10 ⁻⁴ (LHV) |
| Grass-roots plant | 6.0 × 10 ⁻⁷ Q _H ^{-0.9} (T ^{0.5}) | 6.0 × 10 ⁻⁸ T ^{0.5} | | • Combustion as Supplementary Fuel (with flue gas cleaning) | | |
| | | | | Process module | 5.0 × 10 ⁻⁵ (LHV) ^{0.77} (q ^{-0.23}) | -5 × 10 ⁻⁴ (LHV) |
| | | | | Grass-roots plant | 4.0 × 10 ⁻⁵ (LHV) ^{0.77} (q ^{-0.23}) | -5 × 10 ⁻⁴ (LHV) |

6.3.3 Εξοικονόμηση λόγω παραγωγής ατμών από τα ρεύματα των διεργασιών

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε ο τρόπος υπολογισμού του μοναδιαίου κόστους για την παραγωγή βοηθητικών παροχών με χρήση καυσίμου. Όμως κατά τη διατύπωση του μοντέλου έγινε εμφανές ότι υπάρχει περίπτωση για κάποια θερμή βοηθητική παροχή να μην υπάρχει ανάγκη για παραγωγή της αλλά αντίθετα να βρίσκεται σε περίσσεια. Σε αυτή την περίπτωση καλούμαστε να υπολογίσουμε το μοναδιαίο κόστος που εξοικονομείται καθώς αυτό δεν είναι ίδιο με το αντίστοιχο κόστος παραγωγής της ίδιας ποσότητας θερμής παροχής με χρήση καυσίμου. Για να γίνει αυτός ο υπολογισμός διακρίνουμε δύο περιπτώσεις σχετικά με το αν χρησιμοποιείται στη Συνολική Μονάδα κάποιος ατμός χαμηλότερης θερμοκρασίας από τον εξεταζόμενο που βρίσκεται σε περίσσεια. Στην πρώτη περίπτωση που υπάρχει κάποιος ατμός χαμηλότερης θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται στη Συνολική Μονάδα, υποθέτουμε ότι ο ατμός που βρίσκεται σε περίσσεια μπορεί να εκτονωθεί σε αμοστρόβιλο προς παραγωγή του ατμού με την αμέσως χαμηλότερη θερμοκρασία και την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι σε αυτή την περίπτωση η εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται είναι ίση με το κόστος παραγωγής ατμού με την αμέσως χαμηλότερη θερμοκρασία που μπορεί να προσφέρει τουλάχιστον το ποσό θερμότητας που θα προσέφερε η περίσσεια του ατμού μεγαλύτερης θερμοκρασίας συν ένα ποσοστό της διαφοράς κόστους παραγωγής των δύο ατμών που ανακτάται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όσον αφορά τη δεύτερη περίπτωση δηλαδή την περίπτωση περίσσειας ατμού της χαμηλότερης θερμοκρασίας κορεσμού που χρησιμοποιείται στη μονάδα θεωρούμε και πάλι ότι αυτή η περίσσεια ατμού μπορεί να εκτονωθεί σε αμοστρόβιλο, αλλά αυτή τη φορά με μοναδικό οικονομικό όφελος την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι σε αυτή την περίπτωση θεωρούμε ότι η μοναδιαία εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται ισούται με ένα ποσοστό του μοναδιαίου κόστους παραγωγής του ατμού που βρίσκεται σε περίσσεια αν αυτός παραγόταν με χρήση καυσίμου.

7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7.1 ΓΕΝΙΚΑ

Για την επίλυση του προβλήματος της επιλογής διεργασιών που θα υλοποιηθούν στα πλαίσια της Συνολικής Μονάδας, αλλά και της επιλογής των κατάλληλων βοηθητικών παροχών για τη βέλτιστη ενεργειακή ολοκλήρωση αυτών των διεργασιών, χρησιμοποιήθηκαν το τροποποιημένο ανεπτυγμένο μοντέλο μεταφόρτωσης, το μοντέλο της Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας και το μοντέλο επιλογής της βέλτιστης λύσης. Με σκοπό να εκμεταλλευτούμε κατά το δυνατόν τις δυνατότητες ενεργειακής ολοκλήρωσης μεταξύ των διεργασιών το πρόβλημα επιλύθηκε για μια σειρά συνδυασμών βοηθητικών παροχών. Οι βοηθητικές παροχές που επηρεάζουν την ενεργειακή ολοκλήρωση των διεργασιών στα πλαίσια της Συνολικής Μονάδας είναι οι θερμές παροχές και μόνο. Έτσι θεωρούμε τις ψυχρές παροχές κοινές για όλους τους συνδυασμούς βοηθητικών παροχών. Ενώ για τις θερμές παροχές επιλέγουμε να χρησιμοποιηθούν τρία επίπεδα ατμού, για κάθε ένα από τα οποία θεωρούμε διαφορετικές περιπτώσεις, αυτές οι περιπτώσεις φαίνονται στον Πίνακα 7-1.

Πίνακας 7-1 Περιπτώσεις για τα τρία διαφορετικά επίπεδα ατμού

| | Ατμός Χαμηλής Πίεσης (LP) | Ατμός Μέσης Πίεσης (MP) | Ατμός Υψηλής Πίεσης (HP) |
|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Θερμοκρασία κορεσμού (°C) | 120 | 240 | 360 |
| | 130 | 250 | 370 |
| | 140 | 260 | 380 |
| | 150 | - | - |
| | 160 | - | - |

Επιλέγοντας έναν ατμό από κάθε επίπεδο σε κάθε συνδυασμό παροχών προκύπτουν 45 διαφορετικοί συνδυασμοί παροχών. Τα μοντέλα μεταφόρτωσης και ανάλυσης Συνολικής Μονάδας κάνουν υπολογισμούς για όλες τις διαφορετικές περιπτώσεις βοηθητικών παροχών, το τρίτο μοντέλο της επιλογής της βέλτιστης λύσης επιλέγει το συνδυασμό παροχών στον οποίο αντιστοιχεί η λύση με τα μεγαλύτερα οικονομικά οφέλη.

Τα οικονομικά στοιχεία των διεργασιών στη δυναμικότητα που έχουν σχεδιαστεί όπως υπολογίζονται από το μοντέλο και όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-2. Το ενεργειακό κόστος των διεργασιών παρουσιάζεται για το συνδυασμό ατμού χαμηλής πίεσης με θερμοκρασία κορεσμού 130 °C, ατμού μέσης πίεσης με θερμοκρασία κορεσμού 240 °C και ατμού υψηλής πίεσης με θερμοκρασία κορεσμού 360 °C.

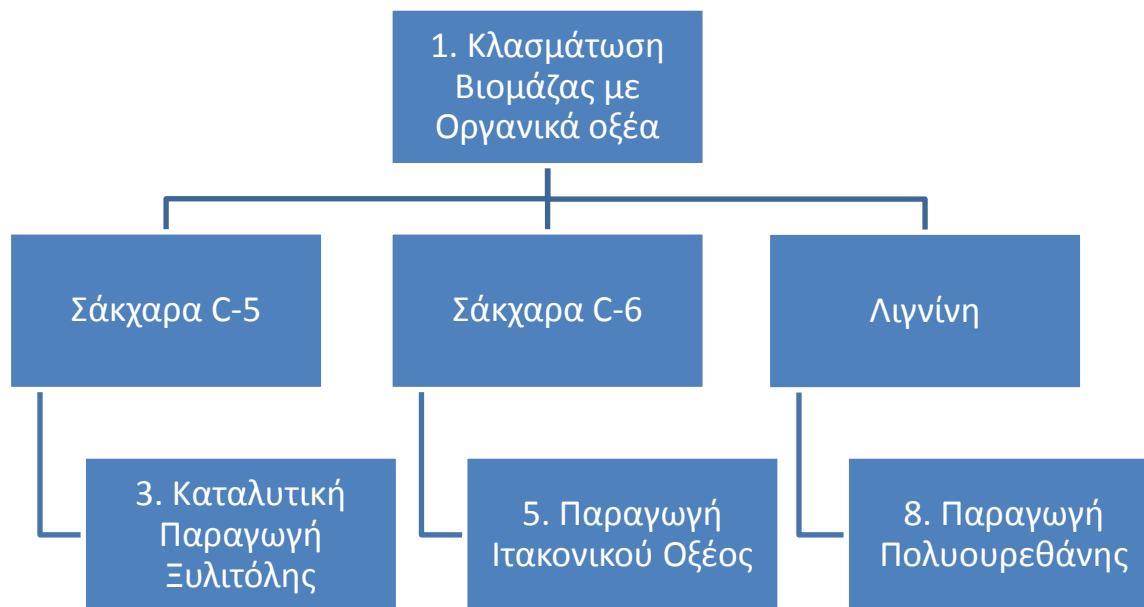
Πίνακας 7-2 Οικονομικά στοιχεία των διεργασιών στη δυναμικότητα που έχουν σχεδιαστεί

| Διεργασίες | Έσοδα από πωλήσεις προϊόντων (€/y) | Ετησιοποιημένο κόστος εγκατάστασης (€/y) | Λειτουργικό κόστος εκτός ενεργειακού κόστους (€/y) | Ενεργειακό κόστος χωρίς ολοκλήρωση σε Συνολική Μονάδα (€/y) |
|------------------------------------|------------------------------------|--|--|---|
| Κλασμάτωση βιομάζας | 0 | 5,200,000 | 14,690,000 | 8,740,000 |
| Παραγωγή βιο-ξυλιτόλης | 70,270,000 | 5,430,000 | 8,730,000 | 2,000,000 |
| Παραγωγή καταλυτικής ξυλιτόλης | 77,120,000 | 1,320,000 | 8,100,000 | 170,000 |
| Παραγωγή αιθανόλης από C-5 σάκχαρα | 13,550,000 | 1,040,000 | 1,660,000 | 12,200,000 |
| Παραγωγή ιτακονικού οξέος | 40,800,000 | 2,240,000 | 190,000 | 2,450,000 |
| Παραγωγή αιθανόλης από C-6 σάκχαρα | 15,100,000 | 1,620,000 | 3,000,000 | 8,240,000 |
| Παραγωγή PF-ρητινών | 120,180,000 | 9,690,000 | 93,290,000 | 250,000 |
| Παραγωγή πολυουρεθάνης | 193,460,000 | 1,030,000 | 164,390,000 | 30,000 |

7.2 ΠΡΩΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ

Το πρόβλημα επιλογής διεργασιών επιλύθηκε για τρία διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο σενάριο θεωρούμε ότι όλα τα πιθανά προϊόντα μπορούν να πουληθούν στο 75% της βιβλιογραφικής τους τιμής όποια και αν είναι η παραγόμενη ποσότητα, επιπλέον δεν υπάρχει καμία απαίτηση για συμμετοχή κάποιας διεργασίας στη λύση, δηλαδή οι περιορισμοί του δεύτερου μοντέλου που περιγράφουν τις σχέσεις μεταξύ των διεργασιών είναι ακριβώς αυτοί που διατυπώθηκαν στις σχέσεις 5-2. Τα αποτελέσματα μετά τους υπολογισμούς που γίνονται με τη βοήθεια των μοντέλων μεταφόρτωσης και ανάλυσης Συνολικής Μονάδας φαίνονται για όλους τους συνδυασμούς παροχών στον Πίνακα 7-3.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 7-3 η επιλογή των διεργασιών που υλοποιούνται στα πλαίσια της Συνολικής Μονάδας είναι η ίδια για κάθε συνδυασμό βοηθητικών παροχών. Συγκεκριμένα επιλέγεται να υλοποιηθούν η Κλασμάτωση Βιομάζας με Οργανικά οξέα, η Καταλυτική Παραγωγή Ξυλιτόλης, η Παραγωγή Ιτακονικού Οξέος και η Παραγωγή Πολυουρεθάνης. Ο τρόπος με τον οποίο επιλέγεται να επεξεργαστούν τα ενδιάμεσα προϊόντα φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 7-1.



Εικόνα 7-1 Διεργασίες που επιλέγεται να υλοποιηθούν στα πλαίσια της Συνολικής Μονάδας για το πρώτο σενάριο

Πίνακας 7-3 Επιλογή διεργασιών και κέρδος για κάθε συνδυασμό βοηθητικών παροχών

| i | X_{1i} | X_{2i} | X_{3i} | X_{4i} | X_{5i} | X_{6i} | X_{7i} | X_{8i} | $PROF_i$ (€/y) |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------|
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 105,340,000 |
| 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 105,400,000 |
| 3 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 103,260,000 |
| 4 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 103,170,000 |
| 5 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 101,930,000 |
| 6 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 105,030,000 |
| 7 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 105,090,000 |
| 8 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 102,950,000 |
| 9 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 102,860,000 |
| 10 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 101,620,000 |
| 11 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 104,690,000 |
| 12 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 104,750,000 |
| 13 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 102,610,000 |
| 14 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 102,520,000 |
| 15 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 101,280,000 |
| 16 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 105,290,000 |
| 17 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 105,350,000 |
| 18 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 103,210,000 |
| 19 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 103,120,000 |
| 20 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 101,880,000 |
| 21 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 104,980,000 |
| 22 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 105,040,000 |
| 23 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 102,900,000 |
| 24 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 102,810,000 |
| 25 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 101,570,000 |
| 26 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 104,640,000 |
| 27 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 104,700,000 |
| 28 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 102,570,000 |
| 29 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 102,470,000 |
| 30 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 101,230,000 |
| 31 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 105,170,000 |
| 32 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 105,230,000 |
| 33 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 103,100,000 |
| 34 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 103,000,000 |
| 35 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 101,770,000 |
| 36 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 104,860,000 |
| 37 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 104,920,000 |
| 38 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 102,790,000 |

| | | | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|-------------|
| 39 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 102,700,000 |
| 40 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 101,460,000 |
| 41 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 104,520,000 |
| 42 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 104,580,000 |
| 43 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 102,450,000 |
| 44 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 102,360,000 |
| 45 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 101,120,000 |

Το γεγονός ότι η επιλογή διεργασιών είναι κοινή για όλους τους συνδυασμούς παροχών αποτελεί χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου προβλήματος που εξετάζουμε και δεν χαρακτηρίζει όλα τα προβλήματα που μπορούν να επιλυθούν με το συνδυασμό μοντέλων που διατυπώσαμε. Αυτό το χαρακτηριστικό υποδεικνύει την απουσία δυνατότητας παραγωγής ατμού από κάποια διεργασία εκτός λύσης ικανής να τη θέσει εντός λύσης για κάποιο συνδυασμό παροχών. Στο πρόβλημα που εξετάζουμε το χαρακτηριστικό αυτό εμφανίζεται καθώς η μοναδική διεργασία στην οποία γίνεται παραγωγή ατμού είναι η κλασμάτωση βιομάζας που συμμετέχει υποχρεωτικά στη λύση.

Παρόλο που η επιλογή βοηθητικών παροχών όπως φαίνεται δεν επηρεάζει το συνδυασμό διεργασιών που θα υλοποιηθούν στα πλαίσια της Συνολικής Μονάδας, είναι σημαντικό να επιλέξουμε το συνδυασμό παροχών με τον οποίο έχουμε τη βέλτιστη ενεργειακή ολοκλήρωση και κατά συνέπεια μεγιστοποιεί τα κέρδη από τη λειτουργία της μονάδας. Αυτή η επιλογή γίνεται με το μοντέλο επιλογής της βέλτιστης λύσης, ο συνδυασμός παροχών είναι αυτός που αντιστοιχεί σε $i = 2$, δηλαδή επιλέγεται ατμός χαμηλής πίεσης με θερμοκρασία κορεσμού 130 °C, ατμός μέσης πίεσης με θερμοκρασία κορεσμού 240 °C και ατμός υψηλής πίεσης 360 °C. Στην ίδια επιλογή καταλήγουμε και αν συγκρίνουμε την τελευταία στήλη του Πίνακα 7-3.

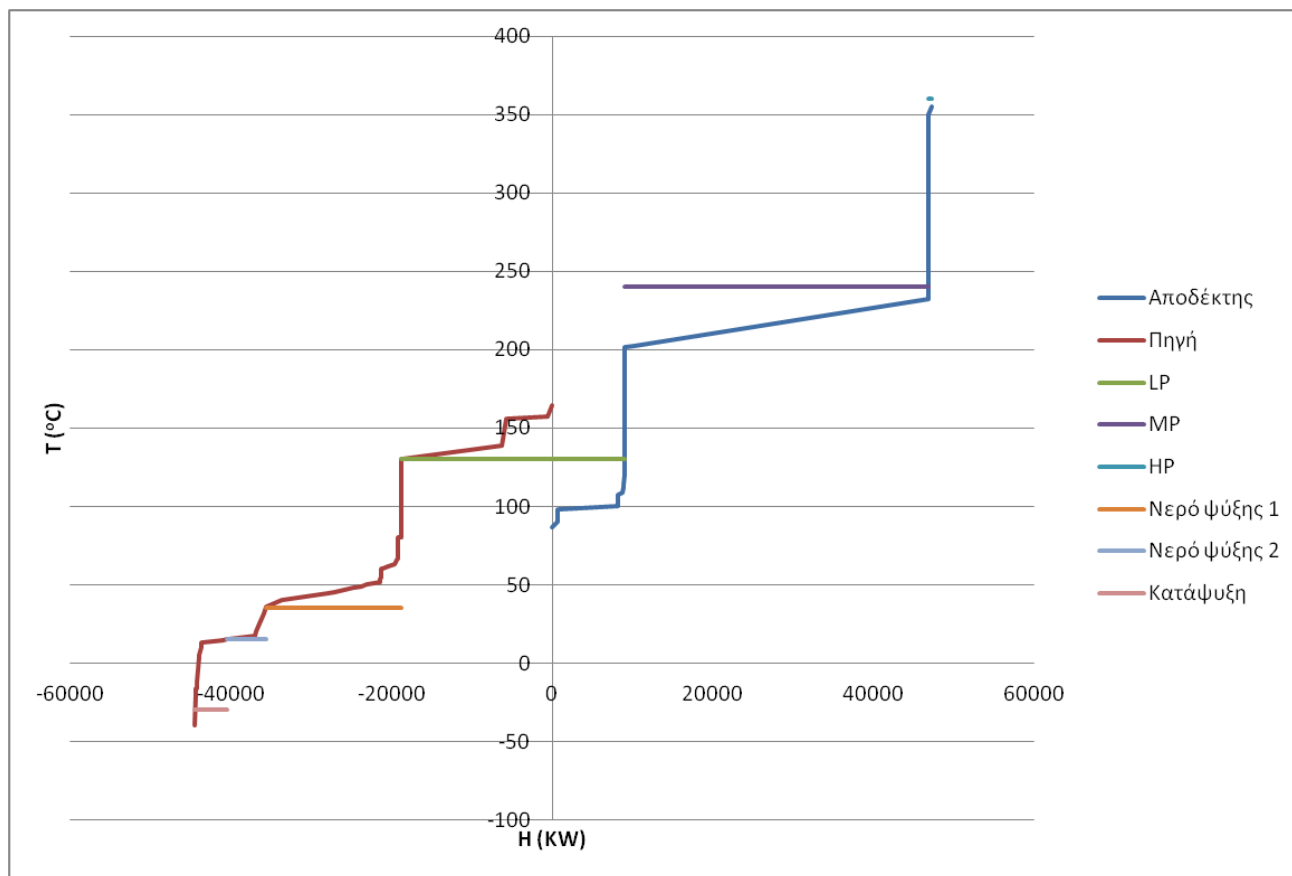
Ένα επιπλέον σημείο που αξίζει να σταθούμε είναι η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται μέσω της ολοκλήρωσης Συνολικής Μονάδας για το συνδυασμό βοηθητικών παροχών και διεργασιών που συμμετέχουν στη λύση που προέκυψε. Παρόλο που η επιλογή διεργασιών και βοηθητικών παροχών δεν γίνεται με μοναδικό κριτήριο την εξοικονόμηση ενέργειας, δηλαδή η λύση που επιλέγεται πιθανόν να μην είναι η βέλτιστη ενεργειακά λύση, είναι σημαντικό να αποτυπωθεί σε αριθμούς η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται με την ολοκλήρωση των

διεργασιών σε μια Συνολική Μονάδα ώστε να γίνουν σαφή τα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας προσέγγισης για την ενεργειακή ολοκλήρωση των διεργασιών μιας βιομηχανικής μονάδας. Στον Πίνακα 7-4 παρουσιάζονται οι ενεργειακές ανάγκες για τις διεργασίες της λύσης αν αυτές ολοκληρωθούν ανεξάρτητα και αν ολοκληρωθούν στα πλαίσια μιας Συνολικής Μονάδας καθώς και το ποσοστό ενέργειας που εξοικονομούμε με την ολοκλήρωση σε μια Συνολική Μονάδα. Επιπλέον καταγράφεται και η ποσότητα που παράγεται από κάθε προϊόν ώστε να γίνει αντιληπτή η κλίμακα στην οποία αναφέρονται τα υπόλοιπα μεγέθη.

Πίνακας 7-4 Συνολικές ενεργειακές ανάγκες για ξεχωριστή ολοκλήρωση , ολοκλήρωση σε Συνολική Μονάδα και εξοικονόμηση ενέργειας για το πρώτο σενάριο

| Προϊόν | Μαζική Παροχή [kt/y] | Συνολικές Ενεργειακές Ανάγκες για Ξεχωριστή Ολοκλήρωση [MW] | | Συνολικές Ενεργειακές Ανάγκες για Ολοκλήρωση σε Συνολική Μονάδα [MW] | | Εξοικονόμηση Ενέργειας [%] | |
|---------------------|----------------------|---|-------|--|-------|----------------------------|-------|
| | | θέρμανση | ψύξη | θέρμανση | ψύξη | θέρμανση | ψύξη |
| Καταλυτική Ξυλιτόλη | 29.38 | 47.25 | 44.54 | 38.27 | 25.70 | 18.99 | 42.30 |
| Ιτακονικό Οξύ | 33.99 | | | | | | |
| Πολυουρεθάνη | 156.80 | | | | | | |

Η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται λόγω ολοκλήρωσης μεταξύ των διεργασιών αλλά και ο τρόπος που γίνεται αυτό απεικονίζεται σχηματικά στο ΣΔΜ για το συνδυασμό διεργασιών που επιλέχθηκε (Εικόνα 7-2). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7-2 ένα μεγάλο ποσό θερμότητας απομακρύνεται από την πηγή μέσω της παραγωγής ατμού χαμηλής πίεσης (LP) (18842 KW), επιπλέον παρατηρούμε ότι μόνο ένα ποσό αυτής της παραγόμενης χρησιμοποιείται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του αποδέκτη της μονάδας (8972 KW) ενώ το υπόλοιπο εκτονώνεται σε ατμοστρόβιλο προς παραγωγή ενέργειας.

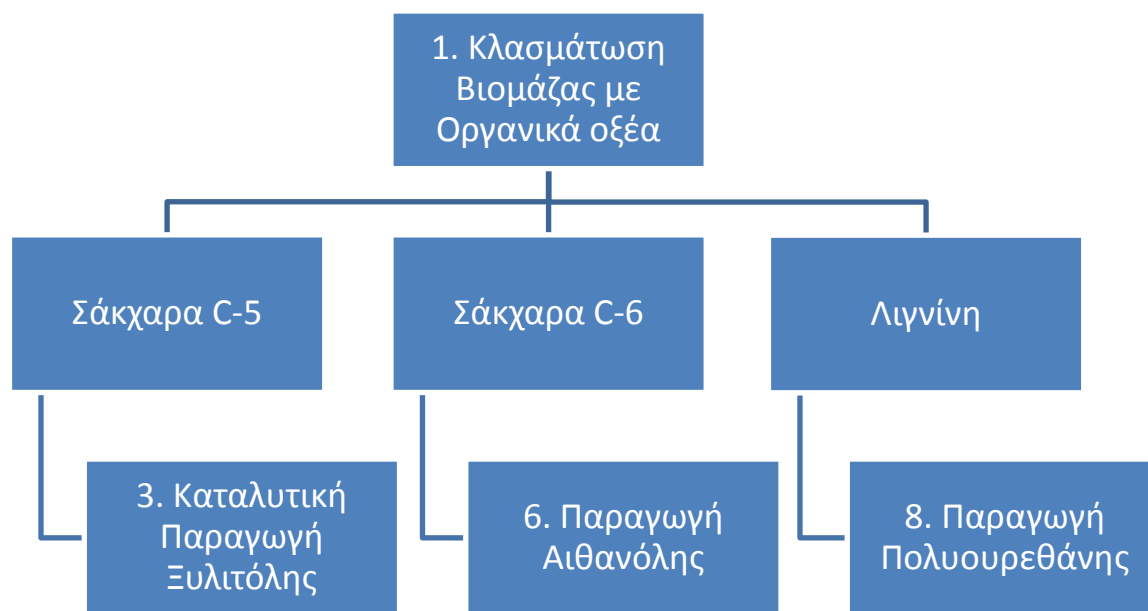


Εικόνα 7-2 ΣΔΜ για το πρώτο σενάριο

7.3 ΔΕΥΤΕΡΟ ΣΕΝΑΡΙΟ

Η περίπτωση που παρουσιάστηκε στο πρώτο σενάριο μπορεί να θεωρηθεί ως μια φιλόδοξη προσέγγιση και αυτό γιατί κάποια από τα πιθανά προϊόντα όπως η ξυλιτόλη και το ιτακονικό οξύ είναι προϊόντα που δεν παράγονται στις ποσότητες παράγονται σύμφωνα με την παρούσα μελέτη. Έτσι είναι πολύ πιθανό η τιμή πώληση τους λόγω μαζικής παραγωγής να πέσει ραγδαία. Για αυτό το λόγο στο δεύτερο σενάριο υποθέτουμε ότι η τιμή πώλησης της ξυλιτόλης είναι το 20% της τιμής που είχαμε υποθέσει στο πρώτο σενάριο και η τιμή πώλησης του ιτακονικού οξέος είναι το 10% αυτής που είχαμε υποθέσει αρχικά.

Όπως ήταν αναμενόμενο λόγω της μεγάλης μείωσης στην τιμή των προϊόντων που συμμετείχαν στη λύση τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση του μοντέλου διαφέρουν από αυτά του πρώτου σεναρίου. Συγκεκριμένα επιλέγεται να υλοποιηθούν η Κλασμάτωση Βιομάζας με Οργανικά οξέα, η Καταλυτική Παραγωγή Ξυλιτόλης, η Παραγωγή αιθανόλης από C-6 Σάκχαρα και η Παραγωγή Πολυουρεθάνης όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7-3.



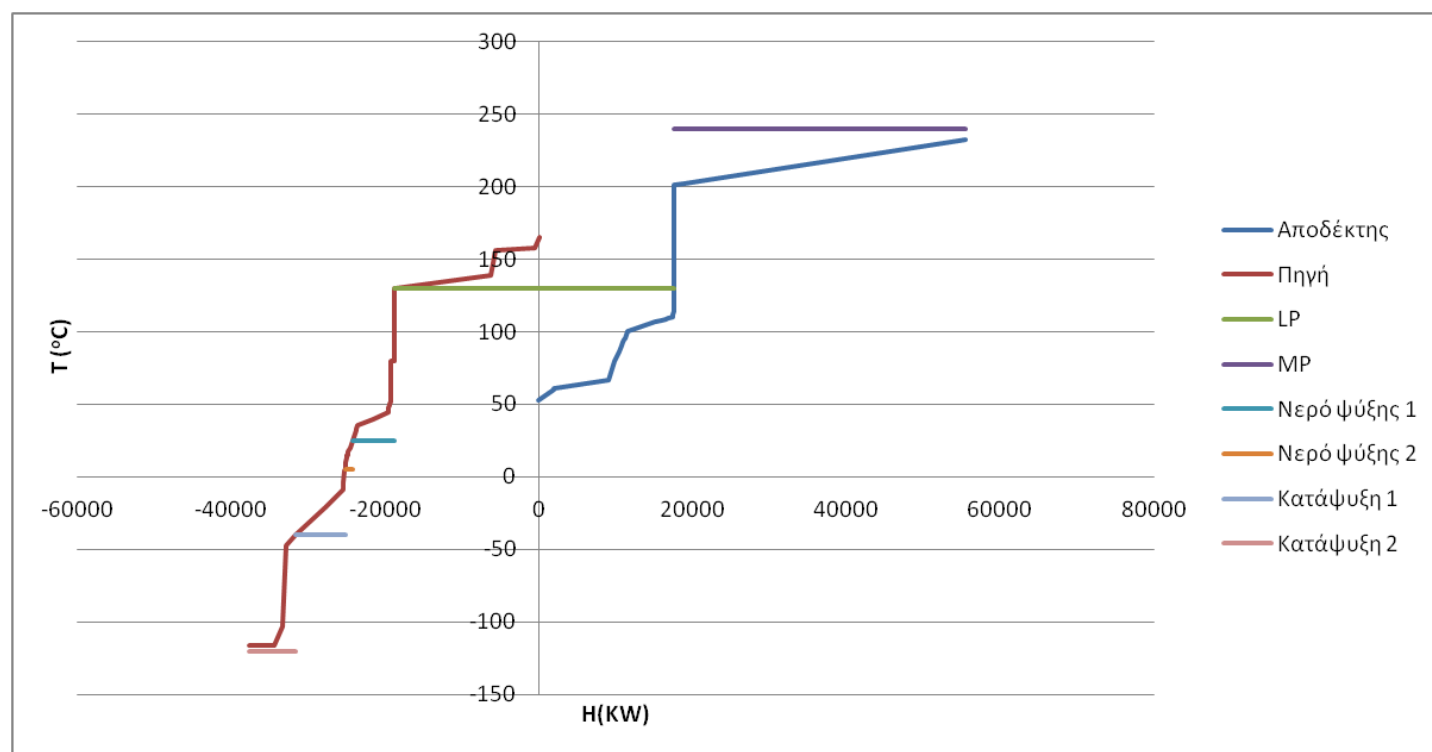
Εικόνα 7-3 Διεργασίες που επιλέγεται να υλοποιηθούν στα πλαίσια της Συνολικής Μονάδας για το δεύτερο σενάριο

Πρέπει να σχολιαστεί το γεγονός ότι παρά τη μεγάλη μείωση στην τιμή πώλησης της ξυλιτόλης η διεργασία παραγωγής ξυλιτόλης παραμένει μέρος της λύσης, αυτό συμβαίνει γιατί η παραγωγή αιθανόλης από C-5 σάκχαρα είναι μια διεργασία που έχει πολύ μεγάλο ενεργειακό κόστος καθώς οι αποστακτικές της στήλες απαιτούν ψύξη σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ενώ όσο αναφορά τη βιο-ξυλιτόλη θεωρούμε ότι τιμή πώλησης της υφίσταται την ίδια μείωση τιμής με την καταλυτική ξυλιτόλη. Αντίθετα τα C-6 επιλέγεται να μετατραπούν σε αιθανόλη παρά το γεγονός ότι η αντίστοιχη διεργασία είναι επίσης εξαιρετικά ενεργοβόρα και αυτό γιατί η τιμή πώλησης του ιτακονικού οξέος υφίσταται μια πολύ μεγάλη μείωση.

Η επιλογή βοηθητικών παροχών είναι η ίδια με αυτή του πρώτου σεναρίου ενώ όπως είναι λογικό τα κέρδη που προκύπτουν από τη λειτουργία της μονάδας είναι σημαντικά μειωμένα και ανέρχονται στα 10,375,000 €/y. Επιπλέον οι ενεργειακές απαιτήσεις της μονάδας, η εξοικονόμηση ενέργειας και ο τρόπος ολοκλήρωσης των διεργασιών διαφέρουν σε σχέση με το πρώτο σενάριο και παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-5 και στο ΣΔΜ της Εικόνας 7-4.

Πίνακας 7-5 Συνολικές ενεργειακές ανάγκες για ξεχωριστή ολοκλήρωση , ολοκλήρωση σε Συνολική Μονάδα και εξοικονόμηση ενέργειας για το δεύτερο σενάριο

| Προϊόν | Μαζική Παροχή [kt/y] | Συνολικές Ενεργειακές Ανάγκες για Ξεχωριστή Ολοκλήρωση [MW] | | Συνολικές Ενεργειακές Ανάγκες για Ολοκλήρωση σε Συνολική Μονάδα [MW] | | Εξοικονόμηση Ενέργειας [%] | |
|---------------------|----------------------|---|-------|--|-------|----------------------------|-------|
| | | θέρμανση | ψύξη | θέρμανση | ψύξη | θέρμανση | ψύξη |
| Καταλυτική Ξυλιτόλη | 29.38 | 55.45 | 37.72 | 37.87 | 18.88 | 31.70 | 49.95 |
| Αιθανόλη | 20.15 | | | | | | |
| Πολυουρεθάνη | 156.80 | | | | | | |



Εικόνα 7-4 ΣΑΜ για το δεύτερο σενάριο

Όπως περιμέναμε η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται μέσω της παραγωγής ατμού με χρήση της θερμότητας που απορρίπτει η πηγή της μονάδας είναι η ίδια με αυτή του πρώτου σεναρίου (18842 KW) και αυτό γιατί η μόνη διεργασία που παρέχει τη δυνατότητα παραγωγής ατμού είναι η κλασμάτωση βιομάζας που υλοποιείται σε οποιαδήποτε περίπτωση. Από την άλλη

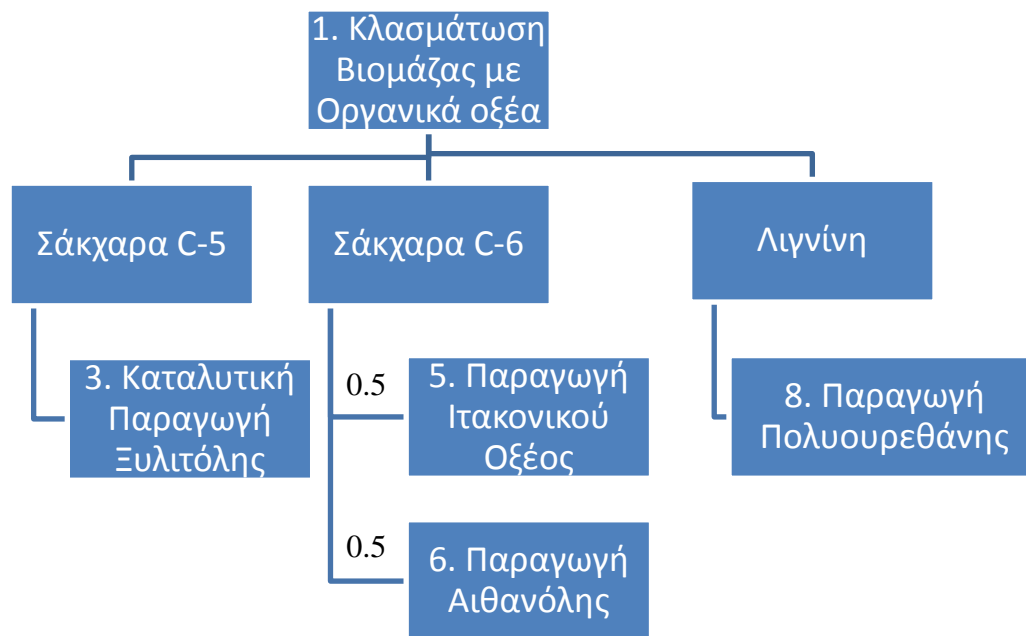
η ποσότητα του παραγόμενου ατμού που προσφέρει θερμότητα στον αποδέκτη (17579 KW) όπως φαίνεται και στο ΣΔΜ είναι μεγαλύτερη από αυτή του πρώτου σεναρίου. Αυτή η διαφορά προκύπτει λόγω της συμμετοχής της διεργασίας παραγωγής αιθανόλης από C-6 Σάκχαρα, τα ρεύματα της οποίας μπορούν να εκμεταλλευτούν τη θερμότητα του παραγόμενου ατμού χαμηλής πίεσης (LP).

7.4 ΤΡΙΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ

Στο τρίτο σενάριο παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο το μοντέλο που διατυπώθηκε πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να επιλύσουμε προβλήματα επιλογής διεργασιών στα οποία υπάρχει απαίτηση για παραγωγή κάποιας ποσότητας ενός από τα πιθανά προϊόντα της μονάδας. Έτσι υποθέτουμε ότι υπάρχουν λόγοι που υπαγορεύουν την παραγωγή αιθανόλης και μάλιστα αφού η ποσότητα αιθανόλης που παράγεται και από τις δυο διεργασίες στη μέγιστη δυναμικότητα τους είναι περίπου η ίδια (20 kt/y) θέτουμε ως όριο με κάποιο συνδυασμό των δυο διεργασιών να γίνει παραγωγή τουλάχιστον 10 kt/y αιθανόλης. Οπότε αφού η ποσότητα που παράγεται από τις δυο διεργασίες είναι περίπου η ίδια, ο απαραίτητος περιορισμός για την επίλυση του προβλήματος είναι το άθροισμα των ποσοστών συμμετοχής των διεργασιών παραγωγής αιθανόλης στο συνδυασμό διεργασιών που υλοποιούνται να είναι τουλάχιστον 0.5. Αυτός ο περιορισμός εισάγεται στο μοντέλο Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας και έτσι οι περιορισμοί των σχέσεων 5-2 αντικαθίστανται από τους περιορισμούς των σχέσεων 7-1.

$$\left. \begin{aligned}
 X_{1,i} &= 1 \\
 X_{2,i} + X_{3,i} + X_{4,i} + T_{1,i} &= 1 \\
 X_{5,i} + X_{6,i} + T_{2,i} &= 1 \\
 X_{7,i} + X_{8,i} + T_{3,i} &= 1 \\
 X_{4,i} + X_{6,i} &\geq 0.5
 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Σχέσεις μεταξύ} \\ \text{διεργασιών} \\ \text{, } \forall i \end{array} \quad (7.1)$$

Κατά τα άλλα το μοντέλο παραμένει όπως έχει διατυπωθεί ενώ τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα ίδια με αυτά του πρώτου σεναρίου. Οι διεργασίες που επιλέγεται να υλοποιηθούν είναι η Κλασμάτωση Βιομάζας με Οργανικά οξέα, η Καταλυτική Παραγωγή Ξυλιτόλης, η Παραγωγή Ιτακονικού Οξέος στο μισό της δυναμικότητας που έχει σχεδιαστεί, η Παραγωγή αιθανόλης από C-6 Σάκχαρα στο μισό της δυναμικότητας που έχει σχεδιαστεί και η Παραγωγή Πολυουρεθάνης, αυτή η επιλογή απεικονίζεται στην Εικόνα 7-5.

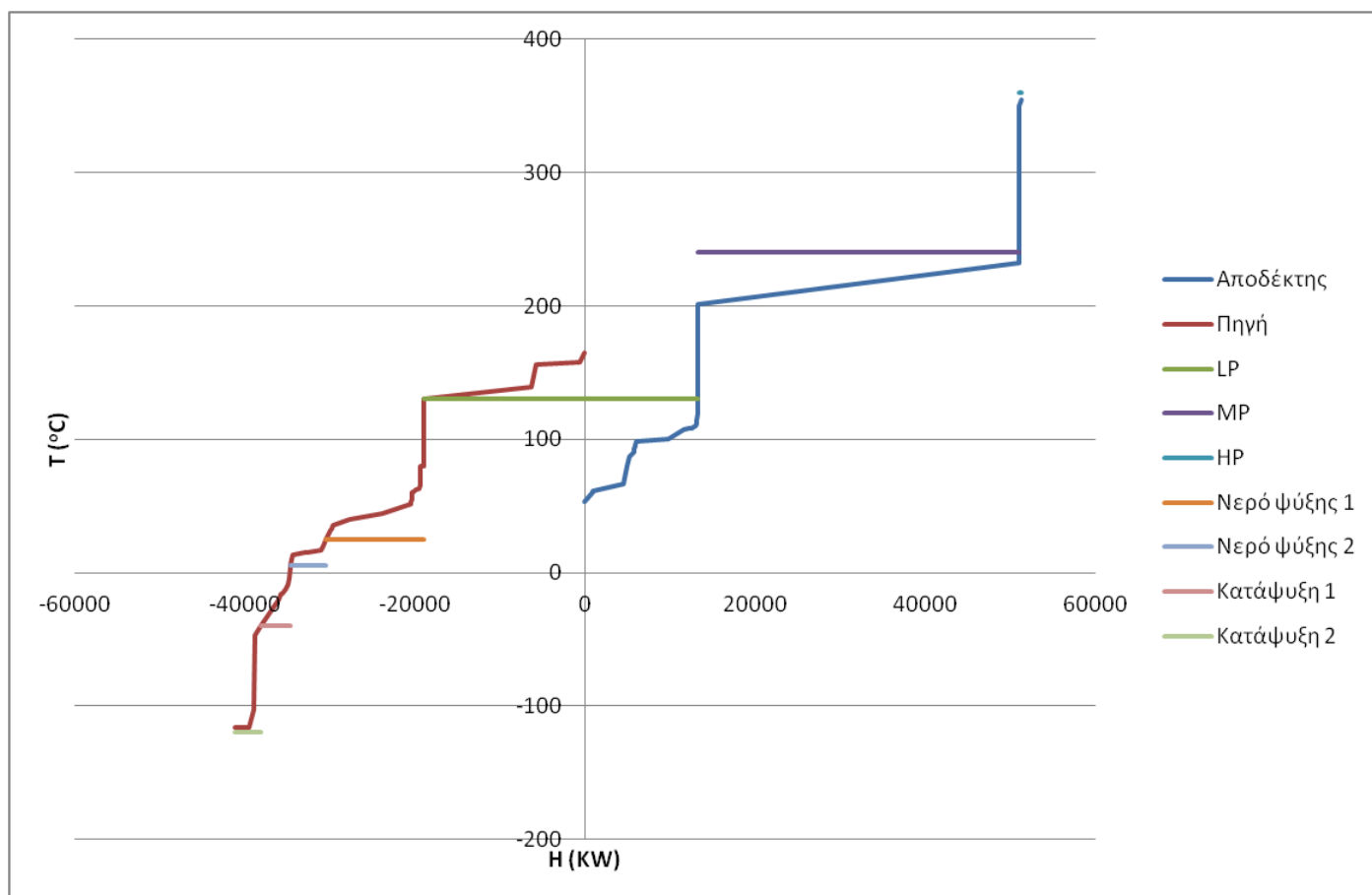


Εικόνα 7-5 Διεργασίες που επιλέγεται να υλοποιηθούν στα πλαίσια της Συνολικής Μονάδας για το τρίτο σενάριο

Η επιλογή βοηθητικών παροχών είναι η ίδια με αυτή του πρώτου σεναρίου ενώ τα κέρδη που προκύπτουν από τη λειτουργία της μονάδας όπως περιμέναμε είναι μειωμένα σε σχέση με αυτά του πρώτου σεναρίου και αυξημένα σε σχέση με αυτά του δεύτερου και ανέρχονται στα 88,732,000 €/y. Επιπλέον οι ενεργειακές απαιτήσεις της μονάδας, η εξοικονόμηση ενέργειας και ο τρόπος ολοκλήρωσης των διεργασιών διαφέρουν σε σχέση με το πρώτο σενάριο και το δεύτερο σενάριο και παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-6 και στο ΣΔΜ της Εικόνας 7-6.

Πίνακας 7-6 Συνολικές ενεργειακές ανάγκες για ξεχωριστή ολοκλήρωση , ολοκλήρωση σε Συνολική Μονάδα και εξοικονόμηση ενέργειας για το τρίτο σενάριο

| Προϊόν | Μαζική Παροχή [kt/y] | Συνολικές Ενεργειακές Ανάγκες για Ξεχωριστή Ολοκλήρωση [MW] | | Συνολικές Ενεργειακές Ανάγκες για Ολοκλήρωση σε Συνολική Μονάδα [MW] | | Εξοικονόμηση Ενέργειας [%] | |
|---------------------|----------------------|---|-------|--|-------|----------------------------|-------|
| | | θέρμανση | ψύξη | θέρμανση | ψύξη | θέρμανση | ψύξη |
| Καταλυτική Ξυλιτόλη | 29.38 | | | | | | |
| Ιτακονικό οξύ | 17.00 | 51.35 | 41.13 | 38.07 | 22.29 | 25.86 | 45.81 |
| Αιθανόλη | 10.08 | | | | | | |
| Πολυουρεθάνη | 156.80 | | | | | | |



Εικόνα 7-6 ΣΑΜ για το τρίτο σενάριο

Η παραγόμενη ποσότητα ατμού από τα ρεύματα των διεργασιών της μονάδας είναι η ίδια (18842 KW) καθώς και σε αυτή την περίπτωση υλοποιείται η διεργασία κλασμάτωσης βιομάζας, κάτι που υπαγορεύεται από τους περιορισμούς του προβλήματος. Από την άλλη η ποσότητα του παραγόμενου ατμού που προσφέρει θερμότητα στον αποδέκτη της μονάδας (13276 KW) είναι μικρότερη από ότι στο δεύτερο σενάριο και μεγαλύτερη από ότι στο πρώτο και αυτό γιατί η διεργασία παραγωγής αιθανόλης από C-6 σάκχαρα, τα ρεύματα της οποίας έχουν τη δυνατότητα να εκμεταλλευτούν ένα ποσό του παραγόμενου ατμού χαμηλής πίεσης (LP), υλοποιείται στο 50% της δυναμικότητας που είχε σχεδιαστεί αρχικά.

8. ΑΛΛΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

8.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το μοντέλο που περιγράφηκε στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της πιο προσοδοφόρας επιλογής διεργασιών που θα υλοποιηθούν στα πλαίσια της μονάδας. Όμως εκτός αυτού το μοντέλο αυτό περιγράφει την αλληλεπίδραση μεταξύ των διεργασιών μιας μονάδας σε ενεργειακούς όρους και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κάποιες τροποποιήσεις και στη λήψη άλλων αποφάσεων.

8.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΠΑΡΟΧΩΝ

Όπως είδαμε για την επιλογή διεργασιών ήμασταν υποχρεωμένοι να εξετάσουμε διαφορετικές περιπτώσεις σχετικά με το είδος των βοηθητικών παροχών που θα χρησιμοποιηθούν ώστε να μπορέσουμε να εκμεταλλευτούμε κάθε πιθανή δυνατότητα ενεργειακής ολοκλήρωσης. Έτσι σε περίπτωση που δεν μας ενδιαφέρει ο προσδιορισμός των διεργασιών που θα υλοποιηθούν αλλά ο βέλτιστος συνδυασμός παροχών που καλύπτει τις ανάγκες της μονάδας και προσφέρει τις μεγαλύτερες δυνατότητες ενεργειακής ολοκλήρωσης, μπορούμε να διατυπώσουμε ένα μοντέλο με αντίστοιχη λογική. Οι τροποποιήσεις που πρέπει να γίνουν στο μοντέλο για τη λήψη μιας τέτοιας απόφασης περιλαμβάνουν την απαλοιφή του δεύτερου τμήματος του μοντέλου αφού ο συνδυασμός των διεργασιών είναι γνωστός και ίδιος για όλους τους συνδυασμούς παροχών. Η επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού παροχών γίνεται όπως και σε αυτή την περίπτωση μέσω των τιμών της μεταβλητής απόφασης του τρίτου μοντέλου που διατυπώθηκε. Προφανώς το μοντέλο που περιγράφεται έχει σημαντικές διαφορές από αυτό που διατυπώθηκε όμως η λογική είναι κοινή καθώς χρησιμοποιούμε τα δεδομένα που προκύπτουν από την Ανάλυση Συνολικής Μονάδας για τη λήψη της βέλτιστης απόφασης σε οικονομικούς όρους. Μια τέτοια προσέγγιση έχει πολλά κοινά με τη μεθοδολογία που έχει προταθεί από τους Z. Shang και A. Kokóση οι οποίοι μοντελοποίησαν το πρόβλημα επιλογής των κατάλληλων επιπέδων ατμών σε μια Συνολική μονάδα με την χρήση ενός μοντέλου μεταφόρτωσης και δυο υποστηρικτικών μοντέλων για τον υπολογισμό της απόδοσης των ατμολεβήτων και των ατμοστροβίλων [12].

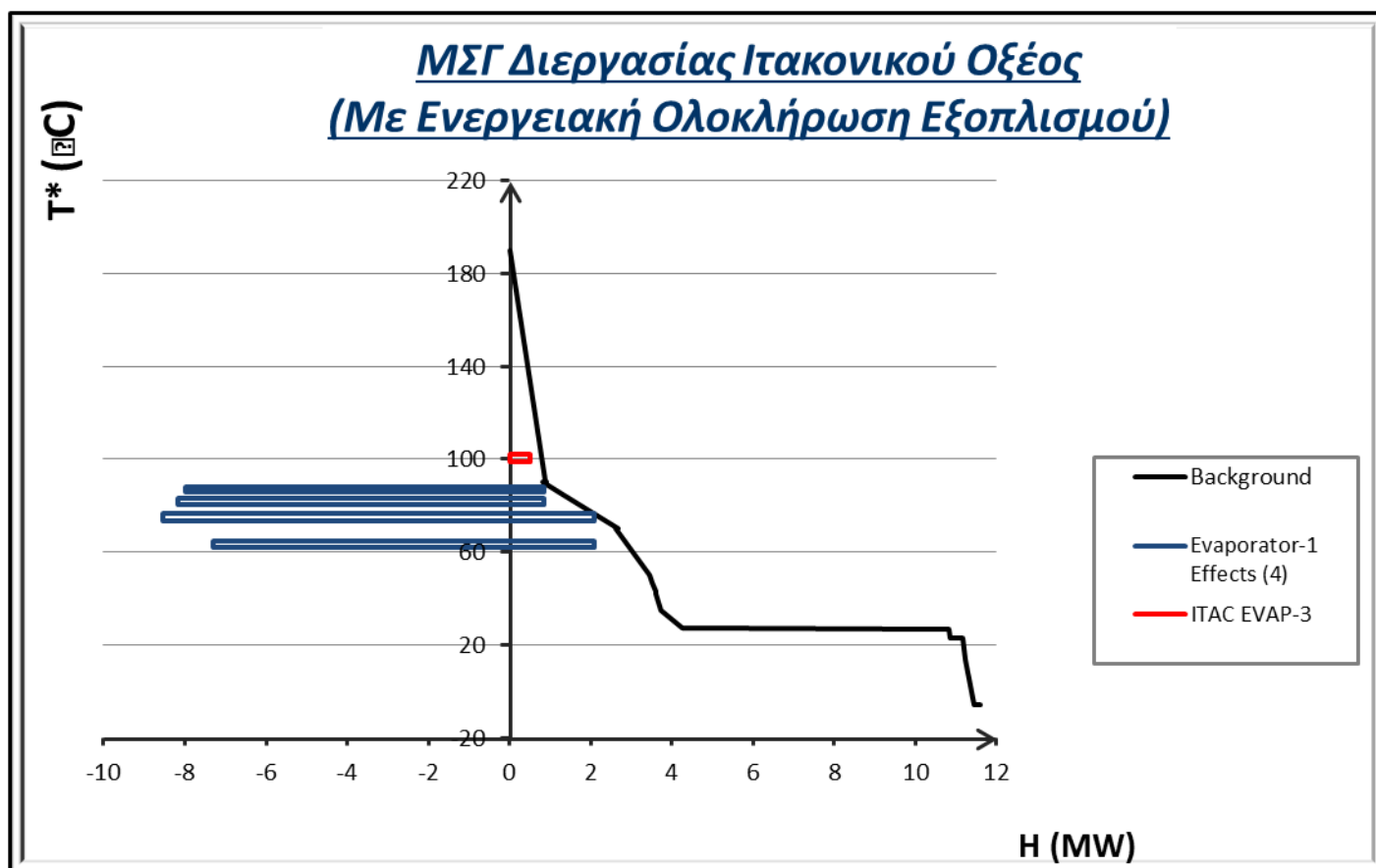
8.3 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΕΣ ΑΠΟΦΑΣΕΙΣ

Μια δεύτερη χρήση του μοντέλου που περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια και αξίζει να αναφερθεί είναι η δυνατότητα που μας δίνει για αξιολόγηση αλλαγών στον τρόπο σχεδιασμού των διεργασιών με κριτήριο τις επιπτώσεις τους στην Συνολική Μονάδα. Αυτές οι αποφάσεις έχουν να κάνουν κυρίως με το σχεδιασμό διατάξεων όπως αποστακτικές στήλες και εξατμιστήρες με σκοπό τη βέλτιστη ενεργειακή τους ολοκλήρωση. Τέτοιου είδους αποφάσεις συνήθως λαμβάνονται με την αξιοποίηση των δεδομένων που απορρέουν από το ΜΣΓ της διεργασίας έτσι ώστε να βρεθεί ένας τρόπος να ολοκληρωθούν αυτές οι διατάξεις κατά το δυνατόν με τα ρεύματα της διεργασίας. Ωστόσο μια τέτοια προσέγγιση πολλές φορές δεν μας οδηγεί στη λήψη της βέλτιστης απόφασης αν εξετάσουμε το σύστημα στα πλαίσια της Συνολικής Μονάδας. Αυτό συμβαίνει καθώς δεν εξετάζουμε τις πιθανές δυνατότητες έμμεσης ολοκλήρωσης αυτών των διατάξεων με ρεύματα άλλων διεργασιών. Έτσι γίνεται εμφανής η ανάγκη για την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας με την οποία θα γίνεται αξιολόγηση των σχεδιαστικών επιλογών για κάθε διεργασία στα πλαίσια της Συνολικής Μονάδας στην οποία μετέχει. Ένας τρόπος για να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα είναι να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο που διατυπώθηκε για κάθε διαφορετική περίπτωση που μας ενδιαφέρει και να επιλέξουμε εκείνη για την οποία η αντικειμενική συνάρτηση έχει μεγαλύτερη τιμή. Αυτή η διαδικασία προφανώς είναι αρκετά χρονοβόρα ειδικά στην περίπτωση που οι περιπτώσεις που θέλουμε να εξετάσουμε είναι πολλές, έτσι στο επόμενο στάδιο προτείνεται η τροποποίηση του μοντέλου με σκοπό την αυτοματοποίηση της διαδικασίας. Παρόλα αυτά στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αλλαγής σε μια από τις διεργασίες που εξετάσαμε η οποία αξιολογείται στα πλαίσια της Συνολικής Μονάδας και παρουσιάζει ενδιαφέρον.

Η διεργασία που επιλέχθηκε να μελετηθεί είναι η παραγωγή ιτακονικού οξέος, μια διεργασία που όπως είδαμε συμμετέχει στη λύση του προβλήματος επιλογής διεργασιών. Η επιλογή αυτή έγινε πρωτίστως γιατί υπάρχουν προοπτικές καλύτερης ενεργειακής ολοκλήρωσης αν εξετάσουμε το πρόβλημα στα πλαίσια της Συνολικής Μονάδας και δευτερευόντως γιατί η διεργασία συμμετέχει στη λύση οπότε τα αποτελέσματα της αλλαγής που κάνουμε θα γίνουν εμφανή στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση που κάνουμε κάποια σχεδιαστική αλλαγή σε μια διεργασία που δεν είναι μέρος της λύσης για να παρατηρήσουμε βελτίωση στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης θα πρέπει η αλλαγή να

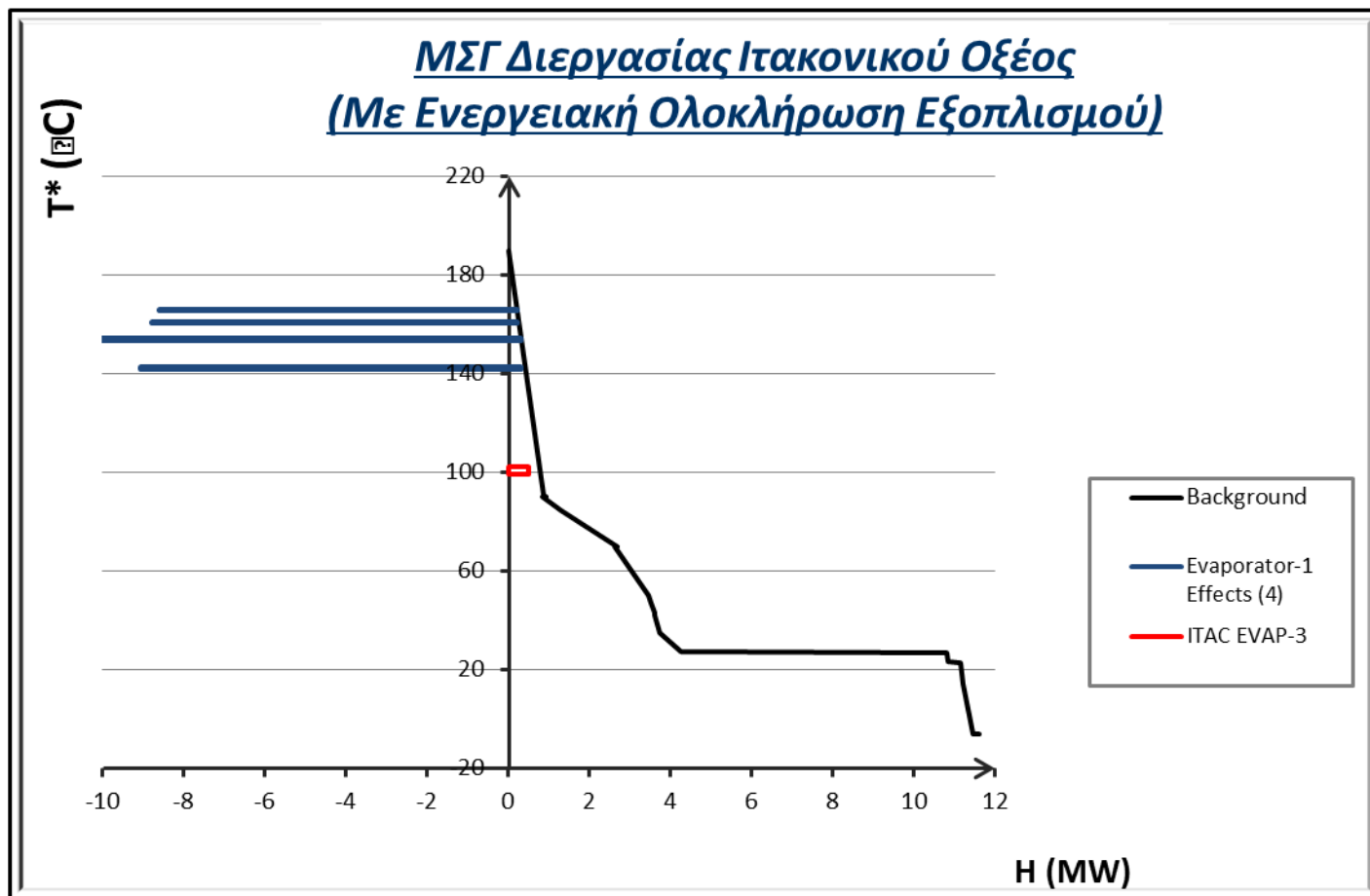
είναι ικανή να καταστήσει τη διεργασία μέρος της λύσης. Έτσι με σκοπό να αναδειχτεί η δυνατότητα για βελτιστοποίηση της ενεργειακής ολοκλήρωσης όταν αυτή εξετάζεται στα πλαίσια της συνολικής μονάδας επιλέχθηκε μια διεργασία που είναι μέρος της λύσης ώστε να μην υπάρχει η ανάγκη τα αποτελέσματα της αλλαγής να την τοποθετήσουν στη λύση του προβλήματος καθώς αυτό πιθανά να είναι αρκετά δύσκολο.

Η διάταξη της οποίας τα χαρακτηριστικά επιλέγουμε να τροποποιήσουμε είναι ο εξατμιστήρας τεσσάρων σταδίων, ο οποίος αναπαρίσταται με μπλε χρώμα στο ΜΣΓ της διεργασίας που φαίνεται στην Εικόνα 7-1. Ο συγκεκριμένος εξατμιστήρας έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί σε ένα θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 61.9 και 88.2 °C και όπως φαίνεται ένα ποσό της θερμότητας που απαιτεί παρέχεται από τα ρεύματα της διεργασίας.



Εικόνα 8-1 ΜΣΓ της παραγωγής Ιτακονικού Οξέος

Η αλλαγή που προτείνεται αφορά το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο θα λειτουργεί ο εξατμιστήρας, συγκεκριμένα εξετάζουμε την περίπτωση που ο εξατμιστήρας λειτουργεί μεταξύ 141.9 και 168.2°C, το ΜΣΓ σε αυτή την περίπτωση φαίνεται στην Εικόνα 7-2.



Εικόνα 8-2 ΜΣΓ της παραγωγής Ιτακονικού Οξέος με τις προτεινόμενες αλλαγές

Είναι προφανές ότι μια τέτοια αλλαγή δεν θα ήταν αποδεκτή αν την αξιολογούσαμε θεωρώντας τη διεργασία αποκομμένη από την υπόλοιπη μονάδα. Αυτό θα συνέβαινε καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του εξατμιστήρα η ενεργειακή του ολοκλήρωση με τα ρεύματα της διεργασίας γίνεται όλο και μικρότερη και η θερμή παροχή που θα καλύπτει τις ανάγκες του θα είναι μεγαλύτερης θερμοκρασίας άρα ακριβότερη. Ωστόσο εάν αυτή η αλλαγή αξιολογηθεί στα πλαίσια της Συνολικής Μονάδας παρατηρούμε ότι υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής ατμού μέσω της ψύξης του εξατμιστήρα και κατά συνέπεια ίσως η αλλαγή να καθίσταται βιώσιμη οικονομικά. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση της αλλαγής που προτείνεται δεν

αυξάνεται απλά το ποσό θερμότητας που πρέπει να προσφέρουμε στη διεργασία αλλά και η θερμοκρασία στην οποία αυτό πρέπει να προσφερθεί. Αυτό σημαίνει ότι η αυξημένη ζήτηση για θερμή παροχή θα πρέπει να καλυφθεί από μια θερμή παροχή υψηλότερου κόστους. Παράλληλα πρέπει να εξεταστεί αν ο ατμός που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άλλες διεργασίες ή θα πρέπει να εκτονωθεί σε κάποιο αμοστρόβιλο. Έτσι η αλλαγή αυτή πρέπει να αξιολογηθεί στα πλαίσια της Συνολικής Μονάδας ώστε να προσδιορίσουμε τα πιθανά της οφέλη.

Με σκοπό να ελέγξουμε την αλλαγή που προτείνεται χρησιμοποιούμε το μοντέλο που διατυπώθηκε αλλάζοντας στα δεδομένα εισόδου τις θερμοκρασίες των ρευμάτων που αλλάζουν. Το αποτέλεσμα που δίνει το μοντέλο είναι ο ίδιος συνδυασμός διεργασιών και βοηθητικών παροχών με αυτόν πριν τις αλλαγές, ωστόσο η τιμή που παίρνει η αντικειμενική συνάρτηση για αυτόν το βέλτιστο συνδυασμό αλλάζει καθώς ήταν 105,400,000 €/yr και μετά τις αλλαγές γίνεται 105,730,000 €/yr. Σύμφωνα λοιπόν με το μοντέλο που διατυπώσαμε αν προχωρήσουμε στην προτεινόμενη αλλαγή τα ετήσια κέρδη που αποφέρει η λειτουργία της βιομηχανικής μονάδας θα αυξηθούν κατά 330.000 €. Αυτή η πληροφορία μπορεί να αξιολογηθεί συνυπολογίζοντας το πιθανά αυξημένο κόστος του εξοπλισμού που θα επιτρέψει τη λειτουργία του εξατμιστήρα σε υψηλότερη θερμοκρασία και να πάρουμε την τελική απόφαση για την υλοποίηση ή όχι της προτεινόμενης αλλαγής. Γίνεται ωστόσο προφανές ότι με την αξιολόγηση στα πλαίσια της Συνολικής Μονάδας μια αλλαγή η οποία θα απορριπτόταν άμεσα μπορεί να αποδειχθεί συμφέρουσα και να βελτιώσει την απόδοση μιας βιομηχανικής μονάδας.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Μετά την ανάλυση του προβλήματος και της μεθοδολογίας επίλυσης του, καθώς και τη διατύπωση του μοντέλου και την εφαρμογή του στο πρόβλημα που εξετάσαμε μπορούμε να εξάγουμε σημαντικά συμπεράσματα και να κάνουμε προτάσεις για να βελτιωθεί το μοντέλο και γενικότερα ο τρόπος που αντιμετωπίζονται τα προβλήματα αυτής της μορφής.

Η σημαντικότερη ίσως συνεισφορά της προτεινόμενης μεθοδολογίας στον τομέα της ολοκλήρωσης διεργασιών είναι η δυνατότητα που μας δίνει για σύνθεση του Συνολικού Διαγράμματος Μονάδας και κατά συνέπεια βελτιστοποίηση της ολοκλήρωσης των διεργασιών στα πλαίσια μιας Συνολικής Μονάδας, σε περιπτώσεις που το ΣΔΜ δεν μπορεί να θεωρηθεί γνωστό λόγω αβεβαιότητας για τον βέλτιστο συνδυασμό διεργασιών. Επιπλέον η ανάγκη για μοντελοποίηση του τρόπου επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος υπαγορεύεται από τον πιθανά μεγάλο αριθμό πιθανών διεργασιών καθώς και από το γεγονός ότι οι συνδυασμοί τους είναι άπειροι αν θεωρήσουμε ότι ανταγωνιστικές διεργασίες μπορούν να υλοποιούνται ταυτόχρονα με οποιοδήποτε δυνατό συνδυασμό δυναμικοτήτων τους για την αξιοποίηση του ίδιου ενδιάμεσου προϊόντος.

Κατά το σχεδιασμό μιας βιομηχανικής μονάδας ένα από τα πιο σημαντικά στάδια είναι η επιλογή των καλύτερων διεργασιών για την επεξεργασία των πρώτων υλών και των ενδιάμεσων προϊόντων με σκοπό την παραγωγή των τελικών προϊόντων. Σε βιομηχανικές μονάδες των οποίων οι διεργασίες είναι ενεργοβόρες και κατά συνέπεια δικαιολογείται η ενεργειακή ολοκλήρωση των διεργασιών μεταξύ τους, πρέπει εκτός από όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους που επηρεάζουν την επιλογή διεργασιών να λάβουμε υπόψη μας και την εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνουμε μέσω της ολοκλήρωσης των διεργασιών σε μια Συνολική Μονάδα [13].

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η Ανάλυση Συνολικής Μονάδας να γίνει υποθέτοντας ότι η μεταφορά θερμότητας μεταξύ διεργασιών γίνεται έμμεσα δηλαδή χρησιμοποιώντας ένα ή περισσότερα μέσα μεταφοράς θερμότητας που στην προκειμένη περίπτωση είναι οι ατμοί που χρησιμοποιούνται στη μονάδα. Αυτή η επιλογή και εφόσον βρισκόμαστε στο στάδιο του σχεδιασμού της μονάδας οδήγησε στην ανάγκη για προσδιορισμό του συνδυασμού ατμών για τον οποίο ο βέλτιστος συνδυασμός διεργασιών αποφέρει τα περισσότερα κέρδη.

Για την επίλυση του προβλήματος έγινε η διατύπωση ενός μοντέλου που αποτελεί τη σύνθεση τριών διαδοχικών μοντέλων. Το πρώτο μοντέλο υπολογίζει την ανάγκη για βοηθητικές παροχές για κάθε διεργασία για κάθε πιθανό συνδυασμό βοηθητικών παροχών που εξετάζουμε, το δεύτερο μοντέλο προσδιορίζει για κάθε συνδυασμό βοηθητικών παροχών το βέλτιστο συνδυασμό διεργασιών κάνοντας χρήση της Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας [8] και το τρίτο μοντέλο επιλέγει το συνδυασμό παροχών για τον οποίο ο αντίστοιχος βέλτιστος συνδυασμός διεργασιών αποφέρει τα μέγιστα κέρδη.

Η εφαρμογή της μεθόδου που προτάθηκε έγινε για την περίπτωση οχτώ πιθανών διεργασιών ενός βιοδιυλιστηρίου για τις οποίες υπήρχαν επαρκή δεδομένα λόγω του ότι έχουν σχεδιαστεί και υλοποιηθεί σε πιλοτικό στάδιο [2]. Από αυτές τις διεργασίες επιλέγεται να υλοποιηθούν η Κλασμάτωση Βιομάζας με Οργανικά οξέα, η Καταλυτική Παραγωγή Ξυλιτόλης, η Παραγωγή Ιτακονικού Οξέος και η Παραγωγή Πολυουρεθάνης και μέσω της ολοκλήρωσης τους στα πλαίσια μιας Συνολικής Μονάδας επιτυγχάνεται εξοικονόμηση θερμής και ψυχρής παροχής κατά 18,99% και 42,30% αντίστοιχα.

Με τη χρήση του μοντέλου που διατυπώθηκε είναι δυνατή η επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού διεργασιών που θα υλοποιηθούν στα πλαίσια μια μονάδας μέσα από έναν μεγάλο αριθμό πιθανών διεργασιών για τις οποίες όμως πρέπει να υπάρχουν επαρκή δεδομένα. Ταυτόχρονα με την επιλογή διεργασιών γίνεται και η επιλογή των καλύτερων βοηθητικών παροχών που καλύπτουν με τον πιο οικονομικό τρόπο τις ενεργειακές ανάγκες των διεργασιών που υλοποιούνται και επιπλέον επιτρέπουν την εναλλαγή θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων αυτών των διεργασιών. Επιπλέον το μοντέλο που διατυπώθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση σχεδιαστικών αλλαγών με γνώμονα τις επιπτώσεις που έχουν αυτές οι αλλαγές στη Συνολική Μονάδα κάτι που επεκτείνει σημαντικά το πεδίο εφαρμογής του μοντέλου. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθοδολογίας που προτείνεται είναι ότι διατυπώνεται στη μορφή ενός μοντέλου το οποίο μεταφέρθηκε σε κώδικα H/Y κάτι που σημαίνει ότι οι υπολογισμοί που απαιτούνται μπορούν να γίνουν αυτόματα και όσο μεγάλο και περίπλοκο είναι το πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε να καταλήγουμε εύκολα και γρήγορα στη λύση.

Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι για την εφαρμογή της απαιτούνται πολλά δεδομένα για τις διεργασίες, οπότε αυτές πρέπει να βρίσκονται στο τελικό στάδιο σχεδιασμού τους. Επιπλέον για τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης έγινε χρήση πολλών οικονομικών στοιχείων για πολλά

από τα οποία για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής έγινε χρήση προσεγγιστικών σχέσεων ώστε να προσδιοριστούν. Έτσι συστήνεται συγκεκριμένα πιο ακριβής υπολογισμός του πάγιου κόστους των διεργασιών μέσω του υπολογισμού του σε διάφορες δυναμικότητες όπως περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες.

Επιπλέον μιας και ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της μεθοδολογίας που προτείνεται είναι ο υπολογισμός της εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνεται μέσω της ενεργειακής ολοκλήρωσης σε μια Συνολική Μονάδα και η χρήση αυτού του στοιχείου για την αξιολόγηση των διεργασιών που θα υλοποιηθούν το μοναδιαίο κόστος των παροχών είναι μια σημαντική παράμετρος. Όπως είναι γνωστό το μοναδιαίο κόστος κάθε βοηθητικής εξαρτάται εκτός από το είδος της και από την ποσότητα που πρέπει να παραχθεί, όμως στην παρούσα διπλωματική η ποσότητα που πρέπει να παραχθεί δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, οπότε οι υπολογισμοί αυτοί πρέπει να ενσωματωθούν στο μοντέλο. Έτσι συστήνεται η τροποποίηση του μοντέλου που διατυπώθηκε ώστε να εκτελείται παράλληλα με ένα μοντέλο προσομοίωσης του δικτύου βοηθητικών παροχών το οποίο θα υπολογίζει το μοναδιαίο κόστος αυτών των βοηθητικών παροχών ανάλογα με τα φορτία τους.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] **S. A. Papoulias, I. E. Grossmann**, 1983, *A Structural Optimization Approach in Process Synthesis - Part II: Heat Recovery Networks*, *Computers & Chemical Engineering*, 7(6), 707-721.
- [2] **M. E. Stefanakis, K. A. Pyrgakis, A. D. Mountraki, A. C. Kokossis**, 2013, *The Total Site Approach As a Synthesis Tool for the Selection of Valorization Paths in Lignocellulosic Biorefineries*, 2013 Annual Meeting, Conference Proceedings, p. 616.
- [3] **M. Bazaraa, J. Jarvis, H. Sherali**, 1990, *Linear Programming and Network Flows*, 2nd Edition, Wiley.
- [4] **Robin Smith**, 2005, *Chemical Process: Design and Integration*, 2nd Edition, Wiley.
- [5] **L.T. Biegler, I.E. Grossmann, A.W. Westerberg**, 1997, *Systematic Methods of Chemical Process Design*, 1st Edition, Prentice Hall.
- [6] **C.W. Hu, S. Ahmad**, 1994, *Total site heat integration using the utility system*, *Computers & Chemical Engineering*, 18(8), 729-742.
- [7] **Ian C. Kemp**, 2007, *Pinch Analysis and Process Integration, Second Edition: A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*, 2nd Edition, Butterworth-Heinemann.
- [8] **K. Raissi**, 1994, *Total Site Integration*, PhD Thesis, UMIST, UK.
- [9] **H.P Williams**, 1999, *Model Building in Mathematical Programming*, 4th Edition, John Wiley & Sons.
- [10] **M. S. Peters, K. D. Timmerhaus, R. E. West**, 2006, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, 5th Edition, McGraw-Hill.
- [11] **G. D. Ulrich, P. T. Vasudevan**, 2006, *How to Estimate Utility Costs*, *Chemical Engineering*, 66-69.
- [12] **Z. Shang, A. Kokossis**, 2004, *A transshipment model for the optimisation of steam levels of total site utility system for multiperiod operation*, *Computers & Chemical Engineering*, 28(9), 1673-1688.
- [13] **D. Koufalioulis, A. Nikolakopoulos, K. Pyrgakis, A. Kokossis**, 2014, *A Mathematical Decomposition for the Synthesis and the Application of Total Site Analysis on Multiproduct Biorefineries*, Submitted to FOCPD 2014.
- [14] **Mahmoud M. El-Halwagi**, 2006, *Process Integration, Volume 7 (Process Systems Engineering)*, 1st Edition, Academic Press.

- [15] **M. Bagajewicz, H. Roderer**, 2002, *Multiple Plant Heat Integration in a Total Site*, AIChE, 48, 2255-2270.
- [16] **H. Paul Williams**, 2009, *Logic and Integer Programming (International Series in Operations Research & Management Science)*, 2009 Edition, Springer.
- [17] **H. Becker, F. Maréchal**, 2012, *Energy integration of industrial sites with heat exchange restrictions*, Computers & Chemical Engineering, 37, 104–118

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. Δεδομένα Διεργασιών

Ειδική Θερμότητα Θερμών Ρευμάτων $FCPH_{hj}$ (kW/°C)

| | Διεργασίες j | | | | | | | | |
|-------------------|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| Θερμά ρεύματα h | 1 | 20637 | 4.7343 | 6.66 | 3.701107 | 83.20197 | 34.6798 | 4.15 | 1.725466 |
| | 2 | 87.61393 | 1.6 | 1.772939 | 4.092593 | 62.17391 | 8890 | 67.53846 | 253 |
| | 3 | 31.975 | 3.710714 | 4.139286 | 5693 | 65510 | 64.66667 | 875 | 1778 |
| | 4 | 24.79452 | 25915 | 16161 | 64.96774 | 3060 | 72.16667 | 5600 | 1746 |
| | 5 | 4.797784 | 88450 | 10670 | 38.82994 | 8.811224 | 10830 | - | 1696 |
| | 6 | 241.9471 | 91650 | 12490 | 1.192708 | 3.424658 | 103740 | - | - |
| | 7 | 20.75281 | 94830 | - | 7200 | 840 | 33250 | - | - |
| | 8 | 14748 | - | - | 7870 | 2.802632 | 3540 | - | - |
| | 9 | 367230 | - | - | 9960 | 750 | - | - | - |
| | 10 | 378300 | - | - | 21680 | 88210 | - | - | - |
| | 11 | 327900 | - | - | 56300 | 90050 | - | - | - |
| | 12 | 44770 | - | - | 98520 | 106480 | - | - | - |
| | 13 | 48150 | - | - | 16850 | 93870 | - | - | - |
| | 14 | 43750 | - | - | 1040 | 4000 | - | - | - |
| | 15 | 55260 | - | - | - | 5000 | - | - | - |
| | 16 | 52410 | - | - | - | - | - | - | - |

Ειδική Θερμότητα Ψυχρών Ρευμάτων $FCPC_{cj}$ (kW/°C)

| | Διεργασίες j | | | | | | | | |
|-------------------|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| Ψυχρά ρεύματα c | 1 | 26.81579 | 0.13 | 2.633842 | 0.685714 | 50.65714 | 3.257143 | 4.256923 | 1.089655 |
| | 2 | 1717.417 | 1.67 | 0.096471 | 8197 | 6600 | 23670 | 32.60308 | 4.815556 |
| | 3 | 11746 | 4.94 | 0.114118 | 7.5625 | 2.166667 | 53.08571 | 3.716923 | 512 |
| | 4 | 8726 | 40.54 | 6.596899 | 6.814469 | 5.172414 | 28490 | 5600 | 1778 |
| | 5 | 121.1863 | 0.34 | 5.867857 | 64 | 1.770833 | 52390 | - | 1746 |
| | 6 | 15.28667 | 5.267857 | 5159 | 7200 | 1060 | 70810 | - | 1696 |
| | 7 | 7.511429 | 5988 | 10670 | 7870 | 88210 | 30400 | - | - |
| | 8 | 7.511429 | 88450 | 12490 | 9960 | 90050 | 4850 | - | - |
| | 9 | 25.16473 | 91650 | - | 34270 | 106480 | - | - | - |
| | 10 | 64.06824 | 94830 | - | 47330 | 93870 | - | - | - |
| | 11 | 5.90885 | - | - | 93240 | 4000 | - | - | - |
| | 12 | 32.62436 | - | - | 16880 | 5000 | - | - | - |
| | 13 | 14.64032 | - | - | 1290 | - | - | - | - |
| | 14 | 27.93568 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 15 | 367230 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 16 | 378300 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 17 | 327900 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 18 | 44770 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 19 | 48150 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 20 | 43750 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 21 | 55260 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 22 | 52410 | - | - | - | - | - | - | - |

Θερμοκρασία Εισόδου Θερμών Ρευμάτων $TINH_{hj}$ (°C)

| | | Διεργασίες j | | | | | | | |
|-------------------|----|----------------|------|------|--------|-------|--------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Θερμά ρεύματα h | 1 | 95.1 | 77.1 | 90 | 77.1 | 90.6 | 90.6 | 94 | 93.5 |
| | 2 | 174.7 | 94 | 98.6 | 50 | 50 | 50 | 80 | 15 |
| | 3 | 95 | -2 | -2 | 23.1 | 27.1 | 50 | 80 | 98 |
| | 4 | 63.6 | 20.1 | 90.1 | 23 | 23.1 | 23 | 98.1 | 91.9 |
| | 5 | 76.1 | 89.6 | 82.3 | 91.8 | 190 | -93.1 | - | 79.7 |
| | 6 | 76.8 | 84.6 | 62.4 | 91.8 | 84.6 | 1.3 | - | - |
| | 7 | 71.7 | 58.9 | - | 81 | -5.9 | -106.3 | - | - |
| | 8 | 94.8 | - | - | 74 | 70 | -37 | - | - |
| | 9 | 192.1 | - | - | 67 | -5.9 | - | - | - |
| | 10 | 167.5 | - | - | -73.1 | 85.6 | - | - | - |
| | 11 | 148.9 | - | - | -102.9 | 80.6 | - | - | - |
| | 12 | 76.3 | - | - | -11.1 | 73.2 | - | - | - |
| | 13 | 69.9 | - | - | -11 | 61.9 | - | - | - |
| | 14 | 58.1 | - | - | 2 | 340.2 | - | - | - |
| | 15 | 54.5 | - | - | - | 99.1 | - | - | - |
| | 16 | 45.7 | - | - | - | - | - | - | - |

Θερμοκρασία Εισόδου Ψυχρών Ρευμάτων $TINC_{cj}$ (°C)

| | | Διεργασίες j | | | | | | | |
|-------------------|----|----------------|------|------|-------|-------|-------|-----|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Ψυχρά ρεύματα c | 1 | 20 | 25 | 25 | 35 | 35 | 35 | 35 | 6 |
| | 2 | 113.8 | 25 | 25 | 69.9 | 70 | 70 | 35 | 35 |
| | 3 | 114.7 | 35 | 25 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 |
| | 4 | 95 | 25 | 97.1 | 8.6 | 14 | 43 | 106 | 104 |
| | 5 | 30 | 25 | -10 | 39 | 42 | 100.1 | - | 96 |
| | 6 | 30 | -10 | 97.1 | 96 | 90 | 51.1 | - | 84.2 |
| | 7 | 25 | 34.9 | 88 | 80 | 88.2 | -8.5 | - | - |
| | 8 | 25 | 96.2 | 81 | 72 | 83 | 56.5 | - | - |
| | 9 | 60 | 89 | - | 111.8 | 76.6 | - | - | - |
| | 10 | 25 | 81.7 | - | 3.5 | 64.8 | - | - | - |
| | 11 | 69 | - | - | 12.2 | 344.8 | - | - | - |
| | 12 | 68.3 | - | - | 33 | 102.1 | - | - | - |
| | 13 | 110 | - | - | 91.8 | - | - | - | - |
| | 14 | 24.7 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 15 | 222.4 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 16 | 191.3 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 17 | 166.1 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 18 | 81.1 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 19 | 75.8 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 20 | 70.4 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 21 | 59.2 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 22 | 55.4 | - | - | - | - | - | - | - |

Θερμοκρασία Εξόδου Θερμών Ρευμάτων $TOUTH_{hj}$ (°C)

| | Διεργασίες j | | | | | | | | |
|-------------------|----------------|-------|------|------|-------|-------|--------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| Θερμά ρεύματα h | 1 | 95 | 15 | 70 | 50 | 50 | 50 | 80 | 13 |
| | 2 | 90 | -30 | -30 | 23 | 27 | 49.9 | 15 | 14.9 |
| | 3 | 75 | -30 | -30 | 23 | 27 | 23 | 79.9 | 97.9 |
| | 4 | 49 | 20 | 90 | 19.9 | 23 | 17 | 98 | 91.8 |
| | 5 | 40 | 89.5 | 82.2 | 23 | -6 | -93.2 | - | 79.6 |
| | 6 | 56 | 84.5 | 62.3 | 15 | 70 | 1.2 | - | - |
| | 7 | 45 | 58.8 | - | 80.9 | -6 | -106.4 | - | - |
| | 8 | 94.7 | - | - | 73.9 | -6 | -37.1 | - | - |
| | 9 | 192 | - | - | 66.9 | -6 | - | - | - |
| | 10 | 167.4 | - | - | -73.2 | 85.5 | - | - | - |
| | 11 | 148.8 | - | - | -103 | 80.5 | - | - | - |
| | 12 | 76.2 | - | - | -11.2 | 73.1 | - | - | - |
| | 13 | 69.8 | - | - | -11.1 | 61.8 | - | - | - |
| | 14 | 58 | - | - | 1.9 | 340.1 | - | - | - |
| | 15 | 54.4 | - | - | - | 99 | - | - | - |
| | 16 | 45.6 | - | - | - | - | - | - | - |

Θερμοκρασία Εξόδου Ψυχρών Ρευμάτων $TOUTC_{cj}$ (°C)

| | Διεργασίες j | | | | | | | | |
|-------------------|----------------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| Ψυχρά ρεύματα c | 1 | 115 | 35 | 97.1 | 70 | 70 | 70 | 100 | 35 |
| | 2 | 115 | 35 | 110 | 70 | 70.01 | 70.1 | 100 | 80 |
| | 3 | 115 | 40 | 110 | 43 | 47 | 70 | 100 | 35.1 |
| | 4 | 95.1 | 40 | 110 | 94.3 | 43 | 43.1 | 106.1 | 104.1 |
| | 5 | 110 | 40 | 18 | 92 | 90 | 100.2 | - | 96.1 |
| | 6 | 60 | 18 | 97.2 | 96.1 | 90.1 | 51.2 | - | 84.3 |
| | 7 | 60 | 35 | 88.1 | 80.1 | 88.3 | -8.4 | - | - |
| | 8 | 60 | 96.3 | 81.1 | 72.1 | 83.1 | 56.6 | - | - |
| | 9 | 111.6 | 89.1 | - | 111.9 | 76.7 | - | - | - |
| | 10 | 110 | 81.8 | - | 3.6 | 64.9 | - | - | - |
| | 11 | 182 | - | - | 12.3 | 344.9 | - | - | - |
| | 12 | 166 | - | - | 33.1 | 102.2 | - | - | - |
| | 13 | 172 | - | - | 91.9 | - | - | - | - |
| | 14 | 90 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 15 | 222.5 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 16 | 191.4 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 17 | 166.2 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 18 | 81.2 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 19 | 75.9 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 20 | 70.5 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 21 | 59.3 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 22 | 55.5 | - | - | - | - | - | - | - |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. Μεταφορά του μοντέλου στο GAMS

```
$offsymxref offsymlist
Option limrow=0, limcol=0, solprint=off;
*----- input data
SET H hot stream /1*16/
      C cold streams /1*22/
      S hot utilities /1*3/
      W cold utilities /1*7/
      K temperature intervals /1*40/
      J processes /1*8/
      I utility combinations /1*45/
      G need or surplus of utility /1*2/
      M intermediate products /1*3/

parameter FCPH(H,J) FCp of hot streams

parameter FCPC(C,J) FCp of cold streams

parameter TINH(H,J) inlet T of hot streams

parameter TOUTH(H,J) outlet T of hot streams

parameter TINC(C,J) inlet T of cold streams

parameter TOUTC(C,J) outlet T of cold streams

PARAMETER TINS(S,I) hot util temp

PARAMETER TINW(W,I) cold util temp

PARAMETER CS(S,I) hot utility cost

PARAMETER CW(W,I) cold utility cost

PARAMETER INC(J) annual income of process
```

PARAMETER INC2(M) annual income from sales of intermediate product

PARAMETER FC(J) annualized fixed cost of process

PARAMETER OC(J) annual operational cost of process

PARAMETER AS(S) availability of hot util

/ 1 INF
2 INF
3 INF /;

PARAMETER AW(W) availability of cold util

/ 1 INF
2 INF
3 INF
4 INF
5 INF
6 INF
7 INF /;

PARAMETER CS2(S, I);

LOOP (I,

CS2("1", I) = CS("2", I) + 0.75*(CS("1", I) - CS("2", I));

CS2("2", I) = CS("3", I) + 0.75*(CS("2", I) - CS("3", I));

CS2("3", I) = 0.75*CS("3", I);

);

**----- bounds for heat exchange (imposed and restricted matches)*

PARAMETER QLHC(H, C) Lower bound between hot and cold stream ;

PARAMETER QUHC(H, C) Upper bound between hot and cold stream ;

PARAMETER QLHW(H, W) Lower bound between hot stream and cold utility ;

PARAMETER QUHW(H, W) Upper bound between hot stream and cold utility ;

PARAMETER QLCS(C, S) Lower bound between cold stream and hot utility ;

PARAMETER QUCS(C, S) Upper bound between cold stream and hot utility ;

QLHC(H, C) = 0 ;

QUHC(H, C) = **INF** ;

QLHW(H, W) = 0;

QUHW(H, W) = **INF** ;

QLCS(C, S) = 0 ;

```

QUCS(C,S) = INF ;
*parameter evaluations & model definition and solution
*-----parameter evaluations
*--- temperature intervals
PARAMETER HK(H,K,J,I) nonzero (1) delements define set H(K)
HKP(H,K,J,I) nonzero (1) elements define set H'(K)
CK(C,K,J,I) nonzero (1) elements define set C(K)
SK(S,K,J,I) nonzero (1) elements define set S(K)
SKP(S,K,J,I) nonzero (1) elements define set S'(K)
WK(W,K,J,I) nonzero (1) elements define set W(K)
QH(H,K,J,I) heat contents of hot streams
QC(C,K,J,I) heat contents of cold streams
QHT(H,J) total heat content of hot stream
QCT(C,J) total heat content of cold stream
TH(K,J,I) interval temperature (hot)
TC(K,J,I) interval temperature (cold) ;
PARAMETERS IS(S,J,I) , IW(W,J,I) , IH(H,J,I) , IC(C,J,I) ;
* when these become 1, the corresponding stream inlet T
* has been considered for interval evaluations
IS(S,J,I)=0; IW(W,J,I)=0; IH(H,J,I)=0; IC(C,J,I)=0;
PARAMETER KM(J,I) actual temperature intervals ;
PARAMETERS END, AUX;
KM(J,I)=0;
*find min and max stream temperature
PARAMETERS HMAX(J) , HMIN(J) , CMAX(J) , CMIN(J) , TMAX(J) , TMIN(J) ;

loop (J,
HMAX(J) = SMAX(H,TINH(H,J)); CMAX(J) = SMAX(C,TOUTC(C,J));
HMIN(J) = SMIN(H,TOUTH(H,J)); CMIN(J) = SMIN(C,TINC(C,J));

* utilities above max or below min temperature do not define interval
loop (I,

TMAX(J) = MAX(HMAX(J),CMAX(J)) ; TMIN(J) = MIN(HMIN(J),CMIN(J)) ;
END=0; AUX=0;
IS(S,J,I) $ (TINS(S,I) GE TMAX(J)) = 1 ;
IW(W,J,I) $ (TINW(W,I) GE TMAX(J)) = 1 ;
IW(W,J,I) $ (TINW(W,I) LE TMIN(J))=1;

```

```

LOOP (K $ (NOT END),
AUX=MAX( SMAX (S $(NOT IS(S,J,I)), TINS(S,I)),
SMAX (H $(NOT IH(H,J,I)), TINH(H,J)),
SMAX (W $(NOT IW(W,J,I)), TINW(W,I)),
SMAX (C $(NOT IC(C,J,I)), TINC(C,J)),
TMAX(J), TMIN(J)
);
TMAX(J)=-400;
TH(K,J,I)=AUX;
TC(K,J,I)=TH(K,J,I);
IS(S,J,I) $(TINS(S,I) EQ AUX)=1;
IW(W,J,I) $(TINW(W,I) EQ TC(K,J,I))=1;
IH(H,J,I) $(TINH(H,J) EQ AUX)=1;
IC(C,J,I) $(TINC(C,J) EQ TC(K,J,I))=1;
IF ( (AUX EQ TMIN(J)),
END=1; KM(J,I)=ORD(K)-1;
);
);
*=== heat contents of streams
LOOP (K $ (ORD(K) LE KM(J,I)),
HK(H,K,J,I)=1 $( (TINH(H,J) GE TH(K,J,I)) AND (TOUTH(H,J) LT TH(K,J,I)));
HKP(H,K,J,I)=1 $(TINH(H,J) GE TH(K,J,I));
CK(C,K,J,I)=1 $( (TINC(C,J) LE TC(K+1,J,I)) AND (TOUTC(C,J) GT TC(K+1,J,I)))
OR
((TINC(C,J) EQ TMIN(J)) AND (ORD(K) EQ KM(J,I))));
SK(S,K,J,I)=1 $( (TINS(S,I) EQ TH(K,J,I)) OR
((TINS(S,I) GT TH(K,J,I)) AND (ORD(K) EQ 1)));
SKP(S,K,J,I)=1 $(TINS(S,I) GE TH(K,J,I));
WK(W,K,J,I)=1 $( (TINW(W,I) EQ TC(K+1,J,I)) OR
((TINW(W,I) LE TMIN(J)) AND (ORD(K) EQ KM(J,I))));
);
LOOP (K,
LOOP (H $ HK(H,K,J,I),
QH(H,K,J,I)=FCPH(H,J) *(TH(K,J,I)-TH(K+1,J,I));
IF ( ((TOUTH(H,J) GT TH(K+1,J,I)) OR
((TOUTH(H,J) GT TMIN(J)) AND (ORD(K) EQ KM(J,I)))),
QH(H,K,J,I)=FCPH(H,J) *(TH(K,J,I)-TOUTH(H,J));
);
);

```



```

);
LOOP (C $ CK(C,K,J,I),
QC(C,K,J,I)=FCPC(C,J)*(TC(K,J,I)-TC(K+1,J,I));
IF ((TOUTC(C,J) LT TC(K,J,I)), QC(C,K,J,I)=FCPC(C,J)*(TOUTC(C,J)-
TC(K+1,J,I)));
IF ( ((TOUTC(C,J) LT TC(K,J,I)) AND (ORD(K) EQ KM(J,I))),
QC(C,K,J,I)=FCPC(C,J)*(TOUTC(C,J)-TMIN(J)));
);
);
QHT(H,J) = FCPH(H,J) * ( TINH(H,J) - TOUTH(H,J) ) ;
QCT (C,J) = FCPC(C,J) * (TOUTC(C,J) - TINC(C,J) ) ;
);
);

```

* -----model

POSITIVE VARIABLES

RH(H,K,J,I) heat residual of hot stream H exiting interval K
RS(S,K,J,I) heat residual of hot utility S exiting interval K
QHC(H,C,K,J,I) heat exchange between hot H and cold C in interval K
QHW(H,W,K,J,I) heat exchange between hot H and cold util W in interval K
QSC(S,C,K,J,I) heat exchange between hot util S and cold C in interval K
QS(S,J,I) heating load for hot utility S
QW(W,J,I) cooling load for cold utility W
X(J,I) percentage of intermediate used in process J
T(M,I) percentage of intermediate product M getting sold
QWT(W,I) total heat load of cold utility W at total site ;

VARIABLE Z total utility-cost ;

VARIABLE Y total utility-cost ;

VARIABLE QST(S,I) total heat load of hot utility S at total site ;

VARIABLE WS;

sos1 VARIABLE QSTpn(S,I,G);

EQUATIONS

OBJ objective function for minimum utility consumption
OBJ1 objective function for total site analysis
OBJ2 objective function for
HBAL(H,K,J,I) hot stream HEAT BALANCES
CBAL(C,K,J,I) cold stream HEAT BALANCES
SBAL(S,K,J,I) hot utility HEAT BALANCES
WBAL(W,K,J,I) cold utility HEAT BALANCES

A1 (I)
 A2 (I)
 A3 (I)
 A4 (I)
 B1 (I)
 B2 (I)
 B3 (I)
 B4 (W, I)
 B5 (S, I)
 B6;

OBJ .. Z =E= **SUM** ((S, J, I), CS(S, I)*QS(S, J, I)) + **SUM** ((W, J, I),
 CW(W, I)*QW(W, J, I)) ;
 HBAL(H, K, J, I) \$ ((TINH(H, J) GE TH(K, J, I)) **AND** (ORD(K) LE KM(J, I))) ..
 RH(H, K, J, I) - (RH(H, K-1, J, I) \$ HKP(H, K-1, J, I))
 + **SUM** (C \$ CK(C, K, J, I), QHC(H, C, K, J, I))
 + **SUM** (W \$ WK(W, K, J, I), QHW(H, W, K, J, I)) =E= QH(H, K, J, I) ;
 RH.FX(H, K, J, I) \$ (ORD(K) EQ KM(J, I)) = 0 ;
 SBAL(S, K, J, I) \$ ((TINS(S, I) GE TH(K, J, I)) **AND** (ORD(K) LE KM(J, I))) ..
 RS(S, K, J, I) - (RS(S, K-1, J, I) \$ SKP(S, K-1, J, I))
 + **SUM** (C \$ CK(C, K, J, I), QSC(S, C, K, J, I))
 - (QS(S, J, I) \$ SK(S, K, J, I)) =E= 0 ;
 RS.FX(S, K, J, I) \$ (ORD(K) EQ KM(J, I)) = 0 ;
 CBAL(C, K, J, I) \$ CK(C, K, J, I) ..
SUM (H \$ HKP(H, K, J, I), QHC(H, C, K, J, I)) +
SUM (S \$ SKP(S, K, J, I), QSC(S, C, K, J, I)) =E= QC(C, K, J, I) ;
 WBAL(W, K, J, I) \$ WK(W, K, J, I) .. **SUM** (H \$ HKP(H, K, J, I), QHW(H, W, K, J, I)) =E=
 QW(W, J, I) ;
 QS.UP(S, J, I) \$ (AS(S) LT **INF**) =AS(S) ;
 QW.UP(W, J, I) \$ (AW(W) LT **INF**) =AW(W) ;

MODEL TRANS / OBJ, HBAL, SBAL, CBAL, WBAL /;

SOLVE TRANS MINIMIZING Z USING LP;

DISPLAY Z.L, RH.L, RS.L, QHC.L, QHW.L, QSC.L, QS.L, QW.L, TH, FCPH;

PARAMETERS

QSI (S, J, I)

QWI (W, J, I)

```

EE(J);

QSI(S,J,I)=QS.L(S,J,I);

QWI(W,J,I)=QW.L(W,J,I);

EE(J)=0.29*SUM(S,QSI(S,J,"1"));

A1(I) .. X("1",I) =E= 1;
A2(I) .. X("2",I)+ X("3",I) + X("4",I) + T("1",I) =E= 1;
A3(I) .. X("5",I) + X("6",I)+ T("2",I) =E= 1;
A4(I) .. X("7",I) + X("8",I)+ T("3",I) =E= 1;

B1(I) .. QST("1",I) =E= SUM(J, X(J,I)*QSI("1",J,I)) - SUM(J,
X(J,I)*QWI("5",J,I));
B2(I) .. QST("2",I) =E= SUM(J, X(J,I)*QSI("2",J,I)) - SUM(J,
X(J,I)*QWI("6",J,I));
B3(I) .. QST("3",I) =E= SUM(J, X(J,I)*QSI("3",J,I)) - SUM(J,
X(J,I)*QWI("7",J,I));
B4(W,I)$(ORD(W) LE 4) .. QWT(W,I) =E= SUM(J, X(J,I)*QWI(W,J,I));
QWT.FX(W,I)$(ORD(W) GE 5)= 0;
B5(S,I) .. QSTpn(S,I,"1")-QSTpn(S,I,"2") =E= QST(S,I);

OBJ1 .. Y =E= SUM(J,I), X(J,I)*INC(J))+SUM(M,I), T(M,I)*INC2(M)) -SUM(
(J,I), X(J,I)*FC(J))-SUM(J,I), X(J,I)*OC(J))-SUM(J,I), X(J,I)*EE(J)) -
SUM(S,I), QSTpn(S,I,"1")*CS(S,I))+SUM(S,I), QSTpn(S,I,"2")*CS2(S,I))-
SUM(W,I), QWT(W,I)*CW(W,I));
MODEL TSITE / A1,A2,A3,A4,B1,B2,B3,B4,B5,OBJ1 /;
SOLVE TSITE MAXIMIZING Y USING MIP;

PARAMETER
PROF(I);
PROF(I)= SUM(J, X.L(J,I)*INC(J))+ SUM(M, T.L(M,I)*INC2(M))- SUM(S,
QSTpn.L(S,I,"1")*CS(S,I))+SUM(S, QSTpn.L(S,I,"2")*CS2(S,I)) - SUM(W,
QWT.L(W,I)*CW(W,I)) - SUM(J, X.L(J,I)*FC(J))- SUM(J, X.L(J,I)*OC(J))- SUM
(J, X.L(J,I)*EE(J));

```

```
sos1 VARIABLE BS(I);  
B6 .. SUM(I,BS(I))=E= 1;  
OBJ2 .. WS =E= SUM(I, BS(I)*PROF(I));  
MODEL BSOL / B6, OBJ2 /;  
SOLVE BSOL MAXIMIZING WS USING MIP;
```