

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ: ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

# Διπλωματική Εργασία Της **ΜΑΡΓΑΡΙΤΑΣ ΑΘΑΝΑΣΙΑΣ** ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥΣ

Συστηματική Μεθοδολογία Μαθηματικού Προγραμματισμού για την ταυτόχρονη εξοικονόμηση νερού και ενέργειας σε ένα Βιομηχανικό Δίκτυο

> Επιβλέπων Καθηγητής ΑΝΤΩΝΗΣ ΚΟΚΟΣΗΣ

> > Αθήνα

Φεβρουάριος 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ: ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

# Διπλωματική Εργασία Της **ΜΑΡΓΑΡΙΤΑΣ ΑΘΑΝΑΣΙΑΣ** ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥΣ

Συστηματική Μεθοδολογία Μαθηματικού Προγραμματισμού για την ταυτόχρονη εξοικονόμηση νερού και ενέργειας σε ένα Βιομηχανικό Δίκτυο

Επιβλέπων: Αντώνης Κοκόσης, Καθηγητής Συνεπίβλεψη: Α. Νικολακόπουλο, ΕΔΙΠ Τριμελής Επιτροπή: Αντώνης Κοκόσης, Απόστολος Βλυσίδης, Χρήστος Αργυρούσης

Αθήνα

Φεβρουάριος 2019

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

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 ορισμένους ανθρώπους που βοήθησαν στην πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Αντώνη Κοκόση, για την πολύτιμη καθοδήγηση και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο. Ακόμη τον ευχαριστώ για τις πολύτιμες οδηγίες, συμβουλές και γνώσεις, αλλά και για το ενδιαφέρον του. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα κ. Αθανάσιο Νικολακόπουλο για τον χρόνο που αφιέρωσε και την αμέριστη βοήθεια του κατά τη διεκπεραίωση της εργασίας.

Είναι πολλοί οι φίλοι που με στήριξαν στις δύσκολες στιγμές και με βοήθησαν να συνεχίσω την πρόσπαθεια όχι μόνο για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας αλλά και σε όλα τα στάδια των σπουδών μου τα τελευταία χρόνια. Πρέπει να τιμήσω ιδιαίτερα όμως κάποια άτομα τα οποία ήταν δίπλα μου και με τους οποίους μοιράστηκα την κάθε στιγμή, όχι μόνο στη Σχολή αλλά και στη ζωή στην Αθήνα. Συνοδοιπόροι στην προσπάθεια, αλλά κυρίως οικογένεια. «Η οικογένεια της Αθήνας», όπως έχει μείνει στην καρδιά μου. Ευχαριστώ λοιπόν, την Ηρώ, τη Δανάη, τη Μαρία Χριστίνα, τη Χλόη, το Λάμπρο, τον Αντρέα, το Νικόλα και τον Παναγιώτη. Χωρίς αυτούς πιθανότατα οι γνώσεις που θα κέρδιζα να ήταν αρκετά λιγότερες. Αλλά το καλύτερο από όλα αυτά είναι η φιλία τους που θα κρατήσει για πάντα.

Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να εκφράσω προς την οικογένειά μου και κυρίως τους γονείς μου Χάρη και Άννα για την διαχρονική συμπαράστασή τους, την υλική και ηθική στήριξη για όλες τις επιλογές μου, την αδερφή μου Ελευθερία και τον αγαπημένο μου Νικόλα.

# Περιεχόμενα

П	ΕΡΙΛΗ	łΨH		i
A	BSTR	ACT		iii
1	Κεα	ράλαι	ο: Εισαγωγή	1
	1.1	Σκο	πός	3
2	Κεα	ράλαι	ο: Εξοικονόμηση Νερού και Ενέργειας	5
	2.1	Ολα	κλήρωση νερού	8
	2.1	.1	Μέθοδος Κόμβου Ανάσχεσης	8
	2.1	.2	Μοντελοποίηση Υπερδομών	13
	2.2	Ενε	ργειακή Ολοκλήρωση	14
	2.2	.1	Μέθοδος Κόμβου Ανάσχεσης	14
	2.2	.2	Μοντέλα Μεταφοράς	
	2.2	.3	Υπερδομή δικτύου εναλλακτών	
	2.3	Μα	θηματικός προγραμματισμός σχεδιαστικών προβλημάτων	32
	2.3	.1	Χαρακτηριστικά μαθηματικού προγραμματισμού	33
	2.3	.2	Ταξινόμηση των προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού	
	21	V_		
	2.4	YΠ	ροομες	41
3	2.4 Κεα	ν πε ράλαι	ροομες ο: Διαθέσιμες Τεχνολογίες και Προκλήσεις	41 43
3	2.4 Κεα 3.1	Υ Πε ράλαι Μελ	ροομες ο: Διαθέσιμες Τεχνολογίες και Προκλήσεις έτες για δίκτυα νερού και ενέργειας	41 43 43
3	2.4 Κεα 3.1 3.1	Υ Πε φάλαι Μελ .1	ροομες ο: Διαθέσιμες Τεχνολογίες και Προκλήσεις έτες για δίκτυα νερού και ενέργειας Γραφικές Μέθοδοι Κόμβου Ανάσχεσης	
3	2.4 Κεα 3.1 3.1 3.1	Υ Πε ράλαι Μελ .1 .2	ροομες ο: Διαθέσιμες Τεχνολογίες και Προκλήσεις έτες για δίκτυα νερού και ενέργειας Γραφικές Μέθοδοι Κόμβου Ανάσχεσης Μεθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού	
3	<ul> <li>Ζ.4</li> <li>Κεα</li> <li>3.1</li> <li>3.1</li> <li>3.1</li> <li>3.2</li> </ul>	Υ πε ράλαι Μελ .1 .2 Προ	ροομες ο: Διαθέσιμες Τεχνολογίες και Προκλήσεις έτες για δίκτυα νερού και ενέργειας Γραφικές Μέθοδοι Κόμβου Ανάσχεσης Μεθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού κλήσεις και εναλλακτική αντιμετώπιση	
3	<ul> <li>Ζ.4</li> <li>Κεα</li> <li>3.1</li> <li>3.1</li> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>Κεα</li> </ul>	Υ πε ράλαι Μελ .1 .2 Προ ράλαι	ροομες ο: Διαθέσιμες Τεχνολογίες και Προκλήσεις έτες για δίκτυα νερού και ενέργειας Γραφικές Μέθοδοι Κόμβου Ανάσχεσης Μεθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού Μεθοδολογίες και εναλλακτική αντιμετώπιση ο: Προτεινόμενη Μεθοδολογία	
3	<ul> <li>Ζ.4</li> <li>Κεα</li> <li>3.1</li> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>Κεα</li> <li>4.1</li> </ul>	Υ πε φάλαι Μελ .1 .2 Προ φάλαι Ενο	ροομες ο: Διαθέσιμες Τεχνολογίες και Προκλήσεις έτες για δίκτυα νερού και ενέργειας Γραφικές Μέθοδοι Κόμβου Ανάσχεσης Μεθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού Μεθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού Μεθοδολογίες και εναλλακτική αντιμετώπιση ο: Προτεινόμενη Μεθοδολογία λλακτικός Ενεργειακός Καταρράκτης	
3	<ul> <li>2.4</li> <li>Kεα</li> <li>3.1</li> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>Κεα</li> <li>4.1</li> <li>4.2</li> </ul>	Υ πε φάλαι Μελ .1 .2 Προ φάλαι Ενο Ανό	ροομες ο: Διαθέσιμες Τεχνολογίες και Προκλήσεις έτες για δίκτυα νερού και ενέργειας Γραφικές Μέθοδοι Κόμβου Ανάσχεσης Μεθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού Μεθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού Νεθοδολογίας που προτείνεται πτυξη μεθολογίας που προτείνεται	
3	<ul> <li>2.4</li> <li>Kεα</li> <li>3.1</li> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>Kεα</li> <li>4.1</li> <li>4.2</li> <li>4.3</li> </ul>	Υ πε ράλαι Μελ .1 .2 Πρα ράλαι Ενα Ανά Ανα	ροομες ο: Διαθέσιμες Τεχνολογίες και Προκλήσεις έτες για δίκτυα νερού και ενέργειας Γραφικές Μέθοδοι Κόμβου Ανάσχεσης Μεθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού Μεθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού Νεθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού Νεθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού Νεθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού Ναθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού Αυτική Επεξήγηση επιμέρους σταδίων	
3	<ul> <li>2.4</li> <li>Kεα</li> <li>3.1</li> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>Kεα</li> <li>4.1</li> <li>4.2</li> <li>4.3</li> <li>4.3</li> </ul>	Υ πε ράλαι Μελ .1 .2 Πρα ράλαι Ενα Ανό Ανο	ροομες	41 43 43 43 43 46 50 53 53 61 64 64
3	<ul> <li>2.4</li> <li>Kεα</li> <li>3.1</li> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>Kεα</li> <li>4.1</li> <li>4.2</li> <li>4.3</li> <li>4.3</li> <li>4.3</li> <li>4.3</li> </ul>	Υ πε ράλαι Μελ .1 .2 Πρα ράλαι Ενα Ανά Ανά .1	ροομες	41 43 43 43 43 46 50 53 53 61 64 64 64 73
3	<ul> <li>2.4</li> <li>Kεα</li> <li>3.1</li> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>Kεα</li> <li>4.1</li> <li>4.2</li> <li>4.3</li> <li>4.3</li> <li>4.3</li> <li>4.3</li> <li>4.3</li> <li>4.3</li> </ul>	Υ Πε ράλαι Μελ .1 .2 Πρα ράλαι Ενα Ανά Ανά .1 .2	ροομες ο: Διαθέσιμες Τεχνολογίες και Προκλήσεις έτες για δίκτυα νερού και ενέργειας Γραφικές Μέθοδοι Κόμβου Ανάσχεσης Μεθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού Μεθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού Νελήσεις και εναλλακτική αντιμετώπιση ο: Προτεινόμενη Μεθοδολογία ο: Προτεινόμενη Μεθοδολογία λακτικός Ενεργειακός Καταρράκτης λλακτικός Ενεργειακός Καταρράκτης 10 μεθολογίας που προτείνεται λυτική Επεξήγηση επιμέρους σταδίων 1° Στάδιο – Μοντέλο υπερδομής 2° Στάδιο – Εναλλακτικός Ενεργειακός Καταρράκτης 3° Στάδιο – Μεικτό Γραμμικό Μοντέλο Μεταφοράς	41 43 43 43 46 50 53 53 61 64 64 64 64 64 64 
3	<ul> <li>2.4</li> <li>Kεα</li> <li>3.1</li> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>Kεα</li> <li>4.1</li> <li>4.2</li> <li>4.3</li> <li>4.3</li> <li>4.3</li> <li>4.3</li> <li>Kεα</li> </ul>	Υ πε ράλαι Μελ .1 .2 Πρα ράλαι Ενα Ανά Ανά .1 .2 .3 ράλαι	ροσμες ο: Διαθέσιμες Τεχνολογίες και Προκλήσεις έτες για δίκτυα νερού και ενέργειας Γραφικές Μέθοδοι Κόμβου Ανάσχεσης Μεθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού οκλήσεις και εναλλακτική αντιμετώπιση ο: Προτεινόμενη Μεθοδολογία λλακτικός Ενεργειακός Καταρράκτης λλακτικός Ενεργειακός Καταρράκτης ττυξη μεθολογίας που προτείνεται λυτική Επεξήγηση επιμέρους σταδίων 1° Στάδιο – Μοντέλο υπερδομής 2° Στάδιο – Εναλλακτικός Ενεργειακός Καταρράκτης 3° Στάδιο – Μεικτό Γραμμικό Μοντέλο Μεταφοράς ο: Αποτελέσματα	41 43 43 43 43 46 50 53 53 61 64 64 64 64 64 82 82

	5.1.1	Πρώτη Μεθοδολογία	. 87
	5.1.2	Δεύτερη Μεθοδολογία	. 95
5	.2 Aπo	οτελέσματα Μεθοδολογίας που προτείνεται	102
	5.2.1	Παράδειγμα Savulescu και Smith [1]	102
	5.2.2	Σύγκριση Αποτελεσμάτων για παράδειγμα Savulescu et al. [1]	110
	5.2.3	Παράδειγμα Bagajewicz et al. [7]	113
	5.2.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων για παράδειγμα Bagajewicz et al. [7]	121
6	Κεφάλαι	ιο: Συμπεράσματα-Προτάσεις για το μέλλον	123
Βιβλ	λιογραφία	х	127
Παρ	οαρτηματ	α	131
А	Κώδικ	ας Gams	131

#### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την εξοικονόμηση νερού και ενέργειας σε ένα βιομηχανικό δίκτυο. Οι βιομηχανίες καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες νερού και ενέργειας στις διαδικασίες τους. Το δίκτυο που διαχειρίζεται τις ποσότητες αυτές συνήθως θεωρείται περιφερειακό ως προς τη λειτουργία των κύριων διεργασιών. Οι βοηθητικές παροχές χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση ή την ψύξη ρευμάτων της διεργασίας που χρησιμοποιείται στις βιομηχανικές διεργασίες. Επιπλέον, το νερό χρησιμοποιείται συχνά στην υποστήριξη παραγωγής ή στα δίκτυα βοηθητικών παροχών ως ατμός ή νερό ψύξης. Αυτό εξηγεί τη διασύνδεση του νερού και της ενέργειας και απεικονίζει την αναγκαιότητα της ταυτόχρονης διαχείρησής τους για τη βελτίωση τόσο της ενεργειακής απόδοσης αλλά και της απόδοσης των πόρων νερού στις βιομηχανικές διεργασίες. Υπάρχουν διάφορες μεθοδολογίες που ολοκληρώνουν το νερό και την ενέργεια ξεχωριστά, τόσο γραφικές όσο και μαθηματικού προγραμματισμού. Παρόλαυτά, από τα τέλη της δεκαετίας του '90 τα συγκεκριμένα προβλήματα αντιμετωπίζονται ταυτόχρονα. Είναι επιθυμητή λοιπόν η ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του νερού και της ενέργειας σε ένα δίκτυο διεργασιών που χρησιμοποιούν νερό.

Το σχεδιαστικό πρόβλημα επιλέχθηκε να αντιμετωπιστεί με έναν εναλλακτικό τρόπο σε σχέση με την κατεύθυνση της έρευνας τα τελευταία χρόνια. Πρίν τη διατύπωση και ανάπτυξη της μεθοδολογίας, γίνεται ανασκόπηση στις μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την ολοκλήρωση νερού και ενέργειας, όπως επίσης και στις μεθοδολογίες που απαντώνται στη βιβλιογραφία τα τελευταία χρόνια. Τα αποτελέσματα και συμπεράσματα που εξάγονται από αυτές αποτέλεσαν το κίνητρο για τη διαφορετική αντιμετώπιση και κατ' επέκταση την επιλογή των κατάλληλων εργαλείων για την επίλυση του προβλήματος.

Η προσέγγιση που αναπτύσσεται συνδυάζει τη θερμοδυναμική και το μαθηματικό προγραμματισμό. Εξελίσσει κλασικά μοντέλα που πραγματοποιούν ενεργειακή ολοκλήρωση για να τους δώσει τη δυνατότητα να συνδυαστούν με μοντέλα σχεδιασμού δικτύου νερού δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στη λογική πάνω στην οποία

δομείται η σχέση του νερού και της ενέργειας. Κατασκευάζεται λοιπόν μια συστηματική μεθοδολογία η οποία αποτελείται από τρία μοντέλα τα οποία λύνονται διαδοχικά. Στόχος είναι ο σχεδιασμός απλών μοντέλων τα οποία να έχουν τη δυνατότητα σύγκλισης σε βέλτιστες λύσεις με υπολογιστική ευκολία ενώ ταυτόχρονα να διατηρείται η λογική σχέση των δύο αντικειμένων ενδιαφέροντος κατά το σχεδιασμό. Το τελικό εργαλείο είναι σημαντικό να μπορεί να εφαρμόζεται για την αξιολόγηση σχεδιαστικών αποφάσεων από ένα σύνολο επιλογών στα πλαίσια μιας βιομηχανικής μονάδας. Η ανάπτυξη των μοντέλων και η επίλυση τους πραγματοποιείται στο εργαλείο GAMS (General Algebraic Modelling System) το οποίο είναι ένα υψηλού επιπέδου περιβάλλον μοντελοποίησης και επίλυσης για μαθηματικό προγραμματισμό και βελτιστοποίηση.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο εξελίχθηκε το κλασικό μοντέλο που χρησιμοποιείται και περιγράφεται η μεθοδολογία που προτείνεται για την αντιμετώπιση του προβλήματος εξοικονόμησης νερού και ενέργειας. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται οι μεθοδολογίες οι οποίες αναπτύχθηκαν πρίν την τελική μεθοδολογία και τα αποτελέσματα τους βοήθησαν στην ανάπτυξη της. Για την αξιολόγηση τους εφαρμόστηκε ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο παράδειγμα από τους Savulescu et al.[1]. Επιπλεόν, το ίδιο παράδειγμα χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας, παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο επιλύεται όπως και τα αποτελέσματα που προσλογίας.

Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αποτελέσματα ερευνητών που ασχολήθηκαν με το συγκεκριμένο παραδείγμα και αναδεικνύεται η δυνατότητα που προσφέρει η εξέλιξη κλασικών μοντέλων. Με την εξέλιξη κλασικών μοντέλων και τον συνδυασμό τους με δίκτυα νερού είναι δυνατόν να επιτευχθούν εξίσου καλά αποτελέσματα με μεγαλύτερη υπολογιστική ευκολία.

Λέξεις-Κλειδιά: ολοκλήρωση νερού και ενέργειας, ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση, δίκτυο διεργασιών, γραφικές, μεθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού, θερμοδυναμική, εξέλιξη κλασικών μοντέλων, λογική, συστηματική, σχεδιαστικές αποφάσεις

#### ABSTRACT

This diploma thesis deals with water and energy savings in an industrial network. Industries consume large amounts of water and energy in their processes. The network of these quantities is usually considered peripheral in the operation of the main processes. The energy is used to heat or cool the water used in industy. In addition, water is often used in production support or utility networks as vapor or cooling water. This explains the interconnection of water and energy and illustrates the necessity to address them simultaneously for the improvement of both water and energy efficiency of water resources in industrial processes.

There are various methodologies that integrate water and energy separately, both graphical and mathematical programming methodologies. However, since the late 1990s, this problem has been dealt with simultaneously. It is therefore desirable to minimize water and energy at the same time in a network of water-using processes.

The design problem has been chosen to be tackled in an alternative way in comparison to the direction of research in recent years. For the formulation and development of the methodology, firstly a review of the methodologies that integrate water and energy, as well as the methodologies encountered in the literature in recent years in presented. The results and conclusions drawn from these methodologies have been the motivation for addressing the problem differently and thus choosing the appropriate tools to solve the problem.

The approach developed combines thermodynamics and mathematical programming. The classic models that perform energy integration are evolved in order to interact with water networks, giving particular reference to the logic of trade-offs between water and energy. A systematic methodology is therefore being constructed which includes three consequent models. The aim is to design simple models that have the ability to converge in optimal solutions with computational

ease while maintaining the logical relationship between the two objectives. The final tool should evaluate design decisions from a set of options within an industrial unit. The models are developed and solved in the General Algebraic Modeling System (GAMS), which is a high-level modeling system for mathematical programming and optimization.

Chapter 4 presents how the classic model that performs energy integration has evolved and the methodology proposed to address the water and energy conservation problem. Chapter 5 presents the methodologies developed a priori of the final methodology and their results. For their evaluation, a widely used example by Savulescu et al. [1] was applied. In addition, the same example is used to evaluate the proposed methodology, while in the same chapter the results obtained are presented.

The results are compared with the ones of researchers who have dealt with the specific example. The development of classic models is reiterated. By developing classic models and combining them with water networks, it is possible to achieve equally good results with greater computational convenience.

Key words: integration of water and energy, simultaneous minimization, process network, graphical, mathematical programming methodologies, thermodynamics, evolution of classical models, logic, systematic, design decisions

#### ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Τυπικό σύστημα νερού και επεξεργασίας λυμάτων μιας βιομηχανίας	. 2
Εικόνα 2.1: Μορφή Προβλήματος Βελτιστοποίησης	33
Εικόνα 5.1: Περίληψη επίλυσης μοντέλου υπερδομής όπου το νερό και η ενέργεια	
ολοκληρώνονται ταυτόχρονα	91
Εικόνα 5.2: Μελέτες που χρησιμοποιούν το πρόβλημα των Savulescu et al	12

#### ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Σχεδιασμός δικτύου νερού με βάση τη μοντελοποίηση υπερδομής	. 14
Σχήμα 2.2: Ενεργειακός Καταρράκτης	. 19
Σχήμα 2.3: Ισοζύγιο θερμότητας σε ένα θερμοκρασιακό διάστημα	. 27
Σχήμα 3.1: Σχηματική απεικόνιση του συνδιαστικού προβλήματος δικτύου νερού και	
δικτύου εναλλακτών	. 47
Σχήμα 3.2: Απεικόνιση της μεθοδολογίας που χρησιμοποιούν οι Liao Z et al	. 48
Σχήμα 3.3: Απεικόνιση της υπερδομής που αναπτύσσουν οι Ahmetovic E.και Kravanja	а
Z. то 2013	. 49
Σχήμα 4.1 Δίκτυο Διεργασιών για παράδειγμα Savulescu et al	. 58
Σχήμα 4.2: Κλασικός Ενεργειακός καταρράκτης για παράδειγμα Savulescu et al	. 59
Σχήμα 4.3: Εναλλακτικός Ενεργειακός καταρράκτης για παράδειγμα Savulescu et al	. 59
Σχήμα 4.4: Σχηματική απεικόνιση της μεθοδολογίας που προτείνεται	61
Σχήμα 4.5: Διαγραμματική απεικόνιση δύο θερμοκρασιακών διαστημάτων όπου τα	
υπόλοιπα θερμότητας κατέρχονται από τον ενεργειακό καταρράκτη	. 79
Σχήμα 4.6: Συνολικό Ισοζύγιο Θερμότητας σε ένα θερμοκρασιακό διάστημα	. 79
Σχήμα 4.7: Συνολικό ισοζύγιο θερμότητας σε ένα θερμοκρασιακό διάστημα όπου	
συμμετέχουν και νέα αναμίξιμα ρεύματα	. 80
Σχήμα 5.1: Υπερδομή συστήματος διεργασιών για την ταυτόχρονη ολοκλήρωση νεροι	Ú
και ενέργειας	. 87
Σχήμα 5.2: Διαμορφώση δικτύου στο οποίο το νερό και η ενέργεια ολοκληρώνονται	
ταυτόχρονα	. 92
Σχήμα 5.3: Διαμορφώση δικτύου στο οποίο το νερό και η ενέργεια ολοκληρώνονται	
ταυτόχρονα	93
Σχήμα 5.4: Τελικό Δίκτυο Διεργασιών	. 96
Σχήμα 5.5: Δίκτυο υπερδομής στο οποίο με μπλέ χρώμα παρουσιάζονται τα ψυχρά	
ρεύματα και με κόκκινο χρώμα τα θερμά ρεύματα	. 97
Σχήμα 5.6: Ενεργειακός Καταρράκτης με μεταβλητές ροές	. 99
Σχήμα 5.7: Ισοζύγιο μάζας γύρω από τη διεργασία 1	104
Σχήμα 5.8: Ισοζύγιο μάζας γύω από τη διεργασία 2	104

Σχήμα 5.9: Ισοζύγιο μάζας γύρω από τη διεργασία 3	105
Σχήμα 5.10: : Ισοζύγιο μάζας γύρω από τη διεργασία 4	105
Σχήμα 5.11: Δίκτυο Αναμίξεων για μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας	105
Σχήμα 5.12: Ενεργειακός Καταρράκτης με μεταβλητές ροές	108
Σχήμα 5.13: Τελικό δίκτυο από Ahmetovic et al για το παράδειγμα των Savulescu και	
Smith	112
Σχήμα 5.14: Διαμόρφωση Δικτύου Νερού από την επίλυση του μη γραμμικού	
προβλήματος υπερδομής	114
Σχήμα 5.15: Αναμίξεις που επιλέγονται από τον εναλλακτικό ενεργειακό καταρράκτη τ	115
Σχήμα 5.16: Ενεργειακός Καταρράκτης με μεταβλητές ροές και αναμίξεις	119
Σχήμα 5.17: Δίκτυο των Bagajewicz et al	121

#### ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2.1: Διάγραμμα Κρεμμυδιού	6
Διάγραμμα 2.2: Μεταφορά μάζας ρυπαντή στο καθαρό νερό	9
Διάγραμμα 2.3: Περιορισμένο Προφίλ νερού	10
Διάγραμμα 2.4: (α) Διάγραμμα οριακών ροών διεργασιών , (β) Οριακή Σύνθετη Καμπά	ύλη
και ελαχιστοποίηση ροής νερού	11
Διάγραμμα 2.5: Η βάση της στρατηγικής σχεδιασμού του κόμβου ανάσχεσης	11
Διάγραμμα 2.6: Σχεδιαστικό Διάγραμμα Πλέγματος	12
Διάγραμμα 2.7: Τελικό Δίκτυο νερού	12
Διάγραμμα 2.8: Σύνθετη καμπύλη για δύο θερμά ρεύματα	16
Διάγραμμα 2.9: Σύνθετες καμπύλες για θερμά και ψυχρά ρεύματα με ελάχιστο	
θερμοκρασιακό διάστημα ΔTmin= 10	17
Διάγραμμα 2.10: Ο κόμβος ανάσχεσης χωρίζει το διάγραμμα σε πηγή θερμότητας και	
αποδέκτη θερμότητας	18
Διάγραμμα 2.11: Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα (ΜΣΓ)	18
Διάγραμμα 2.12: Μεταφορά θερμότητας διαμέσου ενός θερμοκρασιακού διαστήματος	
λόγω μετατόπισης θερμοκρασιών	19
Διάγραμμα 2.13: Υπολογισμός ψυχρών και θερμών φορτίων βοηθητικών παροχών ατ	τÓ
το Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα	20
Διάγραμμα 2.14: Συνολικό Διάγραμμα Μονάδας	21
Διάγραμμα 2.15: Διάγραμμα Πλέγματος	21
Διάγραμμα 2.16: Διάγραμμα μοντέλου μεταφοράς καθ'αναλογία του δικτύου ανάκτηση	IS
θερμόττητας	25
Διάγραμμα 2.17: Υπερδομή δικτύου εναλλακτών	30
Διάγραμμα 2.18: Στρατηγική Σύνθεσης Δικτύου εναλλακτών	32
Διάγραμμα 2.19: Περιοχή εφικτών λύσεων	34
Διάγραμμα 2.20: Χαρακτηριστικά μέγιστα και ελάχιστα μη γραμμικού προγραμματισμο	νÚ
	38
Διάγραμμα 3.1 : Δισδιάστατο διάγραμμα πλέγματος (TDGD)	45
Διάγραμμα 3.2: Σχεδιασμός Δικτύου	45

Διάγραμμα 4.1: Διαγραμματική απεικόνιση Μεθοδολογίας	64
Διάγραμμα 4.2: Επαναχρησιμοποίηση νερού από τη διεργασία i στη διεργασία ii	66
Διάγραμμα 4.3: Υπερδομή δικτύου διεργασιών	66
Διάγραμμα 4.4: Διαχωριστήρας Φρέσκου νερού	67
Διάγραμμα 4.5: Τελικός αναμικτήρας	67
Διάγραμμα 4.6: Ισοζύγιο γύρω από τη διεργασία i	68
Διάγραμμα 4.7: Αναμικτήρας πριν τη διεργασία i	68
Διάγραμμα 4.8: Διαχωριστήρας μετά τη διεργασία	69
Διάγραμμα 5.1: Πιθανά Σενάρια στους εναλλάκτες	88
Διάγραμμα 5.2: Διαγραμματική απεικόνιση Μεθοδολογίας	95
Διάγραμμα 5.3: Κατεύθυνση θερμών και ψυχρών ρευμάτων	102

#### ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

r $r$ $r$ $r$ $r$ $r$ $r$ $r$ $r$ $r$
στον ενεργειακό καταρράκτη και τα φορτία που εναλλάσσουν σε kW
Πίνακας 5.18: Εναλλάκτες για κάθε ζεύγος θερμών – ψυχρών ρευμάτων
Πίνακας 5.19: Χαρακτηρισμός ρευμάτων δικτύου σε θερμά ή ψυχρά ρεύματα
Πίνακας 5.20: Θερμοκρασίες εισόδου θερμών και ψυχρών ρευμάτων
Πίνακας 5.21: Θερμές θερμοκρασίες θερμοκρασιακών διαστημάτων
Πίνακας 5.22: Λόγοι ροών που υπολογίζονται
Πίνακας 5.23: Ροές ρευμάτων που αναμιγνύονται
Πίνακας 5.24: Ροές ρευμάτων που δεν αναμιγνύονται
Πίνακας 5.25: Θερμικά φορτία ρευμάτων που λαμβάνουν μέρος στον ενεργειακό
καταρράκτη
Πίνακας 5.26: Εξοικονομήσεις και βοηθητικές παροχές
Πίνακας 5.27: Συνολική Θερμότητα Θερμών και Ψυχρών ρευμάτων
Πίνακας 5.28: Ζεύγη Θερμών – Ψυχρών ρευμάτων που εναλλάσσουν θερμότητα 109
Πίνακας 5.29: Ζεύγος Θερμής Παροχής- Ψυχρού ρεύματος που εναλλάσσουν
Θεομότητα
Πίνακας 5.30: Υπόλοιπα Θερμότητας θερμών ρευμάτων
Πίνακας 5.30: Υπόλοιπα Θερμότητας θερμών ρευμάτων.       109         Πίνακας 5.31: Εναλλάκτες Θερμότητας.       109         Πίνακας 5.32: Δεδομένα Προβλήματος Bagajewicz et al. [7].       113         Πίνακας 5.33: Αποτελέσματα Υπερδομής.       114         Πίνακας 5.34: Αντιστοίχηση ρευμάτων επαναχρησιμοποίησης που επιλέγονται ανάλογα       116         Πίνακας 5.35: Λόγοι ροών ρευμάτων που αναμιγνύονται.       116         Πίνακας 5.36: Ροές ρευμάτων που αναμιγνύονται       117         Πίνακας 5.37: Ροές ρευμάτων που δεν αναμιγνύονται       117         Πίνακας 5.38: Θερμικά φορτία ρευμάτων που λαμβάνουν μέρος στον ενεργειακό       118
Πίνακας 5.30: Υπόλοιπα Θερμότητας θερμών ρευμάτων.       109         Πίνακας 5.31: Εναλλάκτες Θερμότητας.       109         Πίνακας 5.32: Δεδομένα Προβλήματος Bagajewicz et al. [7].       113         Πίνακας 5.33: Αποτελέσματα Υπερδομής.       114         Πίνακας 5.34: Αντιστοίχηση ρευμάτων επαναχρησιμοποίησης που επιλέγονται ανάλογα       116         Πίνακας 5.35: Λόγοι ροών ρευμάτων που αναμιγνύονται.       116         Πίνακας 5.36: Ροές ρευμάτων που αναμιγνύονται       117         Πίνακας 5.37: Ροές ρευμάτων που δεν αναμιγνύονται       117         Πίνακας 5.38: Θερμικά φορτία ρευμάτων που λαμβάνουν μέρος στον ενεργειακό       118         Πίνακας 5.39: Εξοικονομήσεις και βοηθητικές παροχές       120

### ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

#### Μοντέλο Υπερδομής

#### Σύνολα

*i* = αριθμός διεργασιών

#### Παράμετροι

 $t_i^{in} = Θ$ ερμοκρασία εισόδου για διεργασία i

 $t_i^{out} = Θ$ ερμοκρασία εξόδου για διεργασία i

 $c_i^{in,max}$  = Μέγιστη συγκέντρωση εισόδου για διεργασία i

c<sup>out,max</sup> = Μέγιστη συγκέντρωση εξόδου για διεργασία i

c<sup>out,env</sup> = οριακή συγκέντρωση περιβάλλοντος

*mc<sub>i</sub>*= συσσωρευμένη μάζα ρυπαντη

 $fw_i^{ini}$  = Το αρχικό φρέσκο νερό που απαιτείται από τη διεργασία i

fwt<sup>ini</sup> = Το συνολικό αρχικό φρέσκο νερό που απαιτείται από το σύστημα των διεργασιών

cp<sub>i</sub>= Θερμοχωρητικότητα ρευμάτων νερού

cp<sub>const</sub> = Θερμοχωρητικότητα φρέσκου νερού

#### Μεταβλητές

W<sup>s</sup> = Το ποσοστό εξοικονόμησης νερού

FW= Το φρέσκο νερό που εισέρχεται στο σύστημα των διεργασιών μετά την βελτιστοποίηση FWW = Το συνολικό νερό αποβλήτων που εξέρχεται από το σύστημα των διεργασιών μετά τη βελτιστοποίηση

FW<sup>in</sup> = Το φρέσκο νερό που εισέρχεται στη διεργασία i μετά τη βελτιστοποίηση

FWW<sub>i</sub><sup>out</sup> = Το φρέσκο νερό που εξέρχεται στη διεργασία i μετά τη βελτιστοποίηση

F<sup>reuse</sup> = Το νερό που επαναχρησιμοποιείται από τη διεργασία i στη διεργασία ii μετά τη βελτιστοποίηση

- F<sup>in</sup><sub>i</sub> = Η ροή εισόδου για κάθε διεργασία
- Fi<sup>out</sup>= Η ροή εξόδου για κάθε διεργασία
- Cin = Συγκέντρωση εισόδου της διεργασίας i
- C<sub>i</sub><sup>out</sup> = Συγκέντρωση εξόδου από τη διεργασία i.

#### Μοντέλα Μεταφοράς

#### Σύνολα

- h = Αριθμός θερμών ρευμάτων
- c = Aριθμός ψυχρών ρευμάτων
- s = Aριθμός θερμών παροχών
- w = Αριθμός ψυχρών παροχών
- *k* = θερμοκρασιακά διαστημάτα
- n = νέα θερμοκρασιακά διαστημάτα

#### Παράμετροι

k = αριθμός θερμοκρασιακών διαστημάτων
 nm = αριθμός νέων θερμοκρασιακών διαστημάτων
 kk<sub>n,k</sub> = Το θερμοκρασιακό διάστημα k στο οποίο περιλαμβάνεται το νέο θερμοκρασιακό διάστημα n

chc<sub>h,c,n</sub> = Οι λόγοι ροών μεταξύ ενός θερμού και ενός ψυχρού ρεύματος

- $cph_h = Θερμοχωρητικότητα θερμών ρευμάτων$
- cpc<sub>c</sub> = Θερμοχωρητικότητα ψυχρών ρευμάτων
- th<sub>h</sub><sup>in</sup> = θερμοκρασία εισόδου θερμού ρεύματος h
- $th_h^{out}=$ θερμοκρασία εξόδου θερμού ρεύματος h
- $tc_c^{in} = heta$ ερμοκρασία εισόδου ψυχρού ρεύματος c
- tc<sub>c</sub><sup>out</sup> = θερμοκρασία εξόδου ψυχρού ρεύματος c
- $ts_s^{in} =$  θερμοκρασία εισόδου θερμής παροχής s
- tw<sup>in</sup><sub>w</sub> = θερμοκρασία εισόδου ψυχρής παροχής w
- dt<sup>min</sup> =ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας
- t<sup>t</sup><sub>n</sub> = Θερμοκρασία t του θερμοκρασιακού στόχου n
- $t^h_k = \Theta \epsilon \rho \mu \eta$  Θερμοκρασία <br/>t του θερμοκρασιακού διαστήματος k
- $t_k^c$  = Ψυχρή Θερμοκρασία t του θερμοκρασιακού διαστήματος k
- $h_{\kappa} = \theta$ ερμό ρεύμα h το οποίο παρέχει θερμότητα στο θερμοκρασιακό διάστημα k
- $c_\kappa$  = ψυχρό ρεύμα c το οποίο παρέχει θερμότητα στο θερμοκρασιακό διάστημα k
- $s_{\kappa} = \theta$ ερμή παροχή s η οποία παρέχει θερμότητα στο θερμοκρασιακό διάστημα k
- *w<sub>κ</sub>* = ψυχρή παροχή w η οποία παρέχει θερμότητα στο θερμοκρασιακό διάστημα

h'<sub>κ</sub> = θερμό ρεύμα το οποίο παρέχει θερμότητα στο θερμοκρασιακό διάστημα h ή και σε υψηλότερο

s'<sub>κ</sub> = θερμή παροχή s η οποία παρέχει θερμότητα στο θερμοκρασιακό διάστημα k ή καις ε υψηλότερο

LU = Είναι μια σταθερή μεγάλη παράμετρος.

#### Συνεχείς Μεταβλητές

FH<sub>h</sub> = Η ροή του θερμού ρεύματος h

FC<sub>c</sub> = Η ροή του ψυχρού ρεύματος c

FHK<sub>h,k</sub> = Η ροή του h που εισέρχεται στο πρώτο θερμοκρασιακό διάστημα όπου η θερμοκρασία του h ισούται με τη θερμοκρασία του θερμοκρασιακού διαστήματος k

FHC<sub>h,c,n</sub> = Η ροή του h που θα αναμιχθεί με ένα ψυχρό ρεύμα C στο θερμοκρασιακό διάστημα N

FCK<sub>c,k</sub> = Η ροή του c που εισέρχεται στο πρώτο θερμοκρασιακό διάστημα όπου η θερμοκρασία του c ισούται με τη θερμοκρασία του θερμοκρασιακού διαστήματος k

FCH<sub>c,h,n</sub> = Η ροή του c που θα αναμιχθεί με ένα θερμό ρεύμα h στο θερμοκρασιακό διάστημα N

 $FM^m_{h,c,n}$  = Η ροή που προκύπτει μετά την ανάμιξη ενός θερμό με ένα ψυχρό ρεύμα

 $QM_{h,c,n}^m$  = Η θερμότητα του αναμίξιμου ρεύματος στο θερμοκρασιακό διάστημα Ν

QS<sub>S</sub> = Η συνολική θερμότητα που προσφέρει η θερμή παροχή s

QW<sub>w</sub> = Η συνολική θερμότητα που προσφέρει η ψυχρή παροχή w

QHC<sub>h,c,k</sub> = Η θερμότητα που εναλλάσσεται μεταξύ του θερμού h και του ψυχρού c στο θερμοκρασιακό διάστημα K

QHW<sub>h,w,k</sub> = Η θερμότητα που εναλλάσσεται μεταξύ του θερμού h και της ψυχρής παροχής w στο θερμοκρασιακό διάστημα K

QSC<sub>s,c,k</sub> = Η θερμότητα που εναλλάσσεται μεταξύ της θερμής παροχής s και του ψυχρού c στο θερμοκρασιακό διάστημα K

RM<sub>h,c,k</sub> = Το υπόλοιπο θερμότητας που προσφέρει το αναμίξιμο ρεύμα καθώς εξέρχεται από το θερμοκρασιακό διάστημα Κ

RH<sub>h,k</sub> = Το υπόλοιπο θερμότητας που προσφέρει το θερμό ρεύμα h καθώς εξέρχεται από το θερμοκρασιακό διάστημα K RS<sub>s,k</sub> = Το υπόλοιπο θερμότητας που προσφέρει η θερμή παροχή s καθώς εξέρχεται από το θερμοκρασιακό διάστημα Κ

*QH*<sup>T</sup><sub>h</sub> = Η συνολική θερμότητα που μπορεί να εναλλάξει το θερμό ρεύμα h

QHK<sub>h,k</sub> = Η θερμότητα που μπορεί να εναλλάξει το θερμό ρεύμα h στο θερμοκρασιακό διάστημα k

QC<sub>c</sub><sup>T</sup> = Η συνολική θεμρότητα που μπορεί να εναλλάξει το ψυχρό ρεύμα c στο θερμοκρασιακό διάστημα k

QCK<sub>c,k</sub> = Η θερμότητα που μπορεί να εναλλάξει το ψυχρό ρεύμα c στο θερμοκρασιακό διάστημα k

*QHCK*<sub>h,c,n</sub> = Θερμότητα αναμίξιμου ρεύματος

*QLHC*<sub>h,c,k</sub> = Κατώτερο όριο θερμότητας που μπορεί να εναλλαχθεί μεταξύ ενός θερμού και ενός ψυχρού ρεύματος

QLHW<sub>h,w,k</sub>= Κατώτερο όριο θερμότητας που μπορεί να εναλλαχθεί μεταξύ ενός θερμού ρεύματος και μιας ψυχρής παροχής

QLSC<sub>s,c,k</sub> = Κατώτερο όριο θερμότητας που μπορεί να εναλλαχθεί μεταξύ μιας θερμής παροχής και ενός ψυχρού ρεύματος

QUHC<sub>h,c,k</sub> = Ανώτερο όριο θερμότητας που μπορεί να εναλλαχθεί μεταξύ ενός θερμού και ενός ψυχρού ρεύματος

QUHW<sub>h,w,k</sub> = Ανώτερο όριο θερμότητας που μπορεί να εναλλαχθεί μεταξύ ενός θερμού και μιας ψυχρής παροχής

QUSC<sub>s,c,k</sub> = Ανώτερο όριο θερμότητας που μπορεί να εναλλαχθεί μεταξύ μιας θερμής παροχής και ενός ψυχρού ρεύματος

HC = Το σύνολο των εναλλακτών στους οποίους πραγματοποιείται εναλλαγή
 θερμότητας μεταξύ ενός θερμού ρεύματος και ενός ψυχρού ρεύματος

SC = Το σύνολο των εναλλακτών στους οποίους πραγματοποιείται εναλλαγή θερμότητας μεταξύ μιας θερμής παροχής και ενός ψυχρού ρεύματος HW = Το σύνολο των εναλλακτών στους οποίους πραγματοποιείται εναλλαγή θερμότητας μεταξύ ενός θερμού ρεύματος και μιας ψυχρής παροχής

NU = Το σύνολο των εναλλακτών στους οποίους πραγματοποιείται εναλλαγή θερμότητας

#### Δυαδικές Μεταβλητές

dhc11<sub>H,C,K</sub> = Είναι οι διαδικές μεταβλητές οι οποίες παίρνουν τιμή 1 στην περίπτωση y1<sub>h,c</sub> = Δυαδική μεταβλητή η οποία παίρνει τιμή 1 όταν ένα ζεύγος θερμού-ψυχρού ρεύματος επιτρέπεται να εναλλάξουν θερμότητα, εκφράζει την εγκατάσταση ενός εναλλάκτη

y2<sub>s,c</sub> = Δυαδική μεταβλητή η οποία παίρνει τιμή 1 όταν ένα ζεύγος θερμής παροχήςψυχρού ρεύματος επιτρέπεται να εναλλάξουν θερμότητα, εκφράζει την εγκατάσταση ενός εναλλάκτη

y3<sub>h,w</sub> = Δυαδική μεταβλητή η οποία παίρνει τιμή 1 όταν ένα ζεύγος θερμού ρεύματοςψυχρής παροχής επιτρέπεται να εναλλάξουν θερμότητα, εκφράζει την εγκατάσταση ενός εναλλάκτη

# 1 Κεφάλαιο: Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η επικρατούσα αντίληψη για το απεριόριστο του νερού ως μια χαμηλού κόστους πηγή πλέον έχει ξεπεραστεί. Η επίγνωση της επικινδυνότητας που αποσοβεί στο περιβάλλον η υπερεξαγωγή του νερού από υδατικές πηγές και το γεγονός ότι σε κάποιες περιοχές η χρήση νερού περιορίζεται επί νόμου, οδηγεί σε σκέψεις τόσο πολιτείες αλλά και επιστημονική κοινότητα. Η εύρεση μεθόδων και τεχνικών για ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης του πολύτιμου νερού τόσο στα αστικά συστήματα ύδρευσης όσο και σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις που μέχρι πρόσφατα χρησιμοποιούσαν ασύστολα νερό καθίσταται αναγκαία προϋπόθεση.

Ταυτόχρονα, η επιβολή όλο και πιο αυστηρών κανόνων για την απόρριψη υγρών στο περιβάλλον, έχει ανεβάσει εκθετικά τα κόστη επεξεργασίας των απορριμμάτων, απαιτώντας τεράστιες κεφαλαιουχικές δαπάνες. Σε μια βιομηχανική μονάδα όπου πραγματοποιείται μεγάλος αριθμός διεργασιών μεταξύ άλλων αντιδράσεις, υδρολύσεις, διαχωρισμοί, το νερό χρησιμοποιείται σε υγρή ή ατμώδη φάση είτε ως μέσο αντίδρασης είτε ως διαλύτης, καθιστώντας τις απαιτήσεις σε νερό γιγαντιαίες. Το νερό όπως και η ενέργεια είναι οι πιο σημαντικές πηγές για τη λειτουργία μιας βιομηχανικής μονάδας. Από τη διεξαγωγή των διεργασιών, την προεπεξεργασία πριν την είσοδο στις διεργασίες, τη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων για αποβολή στο περιβάλλον αλλά και το σύστημα βοηθητικών παροχών για αναγέννηση ατμού. Το κλειστό σύστημα μιας βιομηχανικής μονάδας παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.1, όπου το φρέσκο νερό που εισέρχεται από διάφορες πηγές τελικά αποβάλλεται στο περιβάλλον.



Εικόνα 1.1: Τυπικό σύστημα νερού και επεξεργασίας λυμάτων μιας βιομηχανίας

Αποδοτικές εξοικονομήσεις νερού επιτυγχάνονται μέσω επαναχρησιμοποίησης, αναγέννησης και ανακύκλωσης, ενώ η ανάγκη ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης νερού οδηγεί στην σύνθεση δικτύου νερού. Η σύνθεση ενός ολικού δικτύου νερού προϋποθέτει όχι μόνο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης νερού από τις διεργασίες, αλλά συνυπολογίζει επαναχρησιμοποίηση νερού τόσο ανάμεσα στις βασικές διεργασίες αλλά και στις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων, αναγέννηση σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων και ανακύκλωση όπου είναι εφικτό.

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 του νερού και της ενέργειας. Με αυτή τη διαδικασία ταυτοποιούνται δυνατότητες εξοικονόμησης οι οποίες μπορούν μετά από αξιολόγηση να χρησιμοποιηθούν ώστε μια χημική βιομηχανία να καταστεί βιώσιμη και αποδοτική.

#### 1.1 **Σκοπός**

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας συστηματικής μεθοδολογίας η οποία υλοποιείται με τη χρήση Η/Υ και ελαχιστοποιεί το απαιτούμενου φρέσκο νερό και την ενέργεια με σεβασμό στο θερμοδυναμικό πρόβλημα και στους περιορισμούς που το διέπουν.

Το πρόβλημα επιλύεται ντετερμινιστικά με τη χρήση θερμοδυναμικών μοντέλων τα οποία εγγυούνται μικρότερη πολυπλοκότητα σε σχέση με μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια. Επιπλέον για την επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού ελάχιστων βοηθητικών παροχών και νερού χρησιμοποιείται η διαμόρφωση του δικτύου νερού για την εξέλιξη των θερμοδυναμικών μοντέλων. Προτείνεται λοιπόν μια προσέγγιση επίλυσης του προβλήματος τόσο για τον βέλτιστο συνδυασμό του νερού και της ενέργειας αλλά και την εξαγωγή ενός δικτύου στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση του αριθμού εναλλακτών με τον οποίο είναι άρρηκτα συνδεδεμένα.

# 2 Κεφάλαιο:

## Εξοικονόμηση Νερού και Ενέργειας

Πρώτού ξεκινήσει ο σχεδιασμός μιας διεργασίας είναι ανάγκη να διατυπωθεί το σχεδιαστικό πρόβλημα. Το σχεδιαστικό πρόβλημα περιλαμβάνει το σύνολο των επιθυμητών στόχων σαν συνάρτηση των παραμέτρων, σταθερών ή μεταβλητών, που απαιτούνται για την ολιστική και όσο το δυνατόν πραγματική απεικόνιση του προβλήματος. Οι παράμετροι εξαρτώνται αρχικά από το είδος του επιθυμητού προϊόντος, τον τελικό στόχο και ακολούθως από τα απτά πειραματικά δεδομένα. Η ύπαρξη περιορισμών είναι συνήθως ο καθοριστικός παράγοντας δυσκολίας του προβλήματος.

Η αντιμετώπιση ενός συστήματος συνολικά με στόχο την καλύτερη αποδοτικότητα των διεργασιών είναι εγχείρημα ιδιαίτερα δύσκολο και προϋποθέτει τεράστια υπολογιστική ισχύ, χρόνο και ευρωστία υπολογισμών. Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού αβεβαιοτήτων που παρουσιάζονται στο περιβάλλον του προβλήματος, είναι λογικό πως το αρχικό σχεδιαστικό πρόβλημα είναι μερικώς ορισμένο. Ο ρόλος του σχεδιαστή είναι να διατυπώσει μια σειρά από εφικτές σχεδιαστικές επιλογές οι οποίες θα ελεγχθούν μέσω μηχανικών και οικονομικών μεθόδων ανάλυσης, διατηρώντας πάντα ισορροπία ανάμεσα στην ύπαρξη πολυάριθμων και επικίνδυνων ρίσκων.

Σε μια χημική διεργασία, η μετατροπή των πρώτων υλών στο επιθυμητό χημικό προϊόν συνήθως απαιτεί πολλά στάδια, στα οποία πραγματοποιούνται ενδιάμεσες μετατροπές και κατ' επέκταση ενδιάμεσα προϊόντα. Από τη στιγμή που τα επιμέρους στάδια έχουν καθοριστεί πρέπει να συνδυαστούν για την πραγματοποίηση της ολικής μετατροπής των πρώτων υλών.

Η φιλοσοφία της ιεραρχίας στο σχεδιασμό παρουσιάζεται συμβολικά με το «διάγραμμα κρεμμυδιού», όπου κάθε επίπεδο ξεκινώντας από το κέντρο προς τον

εξωτερικό «φλοιό» εκπροσωπεί κάθε στάδιο που πρέπει διαδοχικά να βελτιστοποιηθεί για την ολοκληρωμένη ανάλυση μιας διεργασίας. Στο Διάγραμμα 2.1 φαίνεται το «διάγραμμα κρεμμυδιού».



Διάγραμμα 2.1: Διάγραμμα Κρεμμυδιού

Από το Διάγραμμα 2.1, ο «φλοιός» που απασχολεί στην περίπτωση που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία είναι 2<sup>ος</sup>. Το συνολικό σύστημα αντιδραστήρων, διεργασιών διαχωρισμού και ανακυκλώσεων δίνει υπόσταση στο σύστημα θερμών και ψυχρών παροχών και κατ' επέκταση στο σχεδιασμό του δικτύου εναλλακτών. Τα θερμικά φορτία ρευμάτων που δε μπορούν να καλυφθούν μέσω ανάκτηση θερμότητας, απαιτούν εξωτερικές βοηθητικές παροχές (φούρνο, ατμός, αναγέννηση ατμού, κρύο νερό, ψυχρός αέρας).

Οι βιομηχανίες καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας και νερού στις διαδικασίες τους, οι οποίες συχνά θεωρούνται περιφερειακές ως προς τη λειτουργία των κύριων διεργασιών. Η ενέργεια χρησιμοποιείται για τη θέρμανση ή την ψύξη του νερού το οποίο χρησιμοποιείται στις βιομηχανικές διεργασίες. Επιπλέον, το νερό χρησιμοποιείται συχνά στις διεργασίες ή στο σύστημα βοηθητικών παροχών ως ατμός ή νερό ψύξης. Αυτό εξηγεί τη διασύνδεση του νερού και της ενέργειας και απεικονίζει την αναγκαιότητα της ταυτόχρονης
επεξεργασίας τους για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και της αποδοτικότητας των πόρων στις βιομηχανικές διεργασίες.

Για τη διατύπωση του προβλήματος που αναπτύσσεται είναι αναγκαίο πρώτα να γίνει μια ανασκόπηση στις μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την ολοκλήρωση νερού και ενέργειας. Καθώς το νερό και η ενέργεια σε ένα βιομηχανικό δίκτυο είναι αλληλένδετα, ενώ η ανάγκη ελαχιστοποίησης τους είναι πλέον επιτακτική, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες για τη μείωση τους αλλά και τη σύνθεση ενεργειακά αποδοτικών δικτύων νερού.

Παραδοσιακά χρησιμοποιούνται οι γραφικές μέθοδοι και ο μαθηματικός προγραμματισμός για την επίλυση των προβλημάτων που σχετίζονται με την ολοκλήρωση νερού και ολοκλήρωση ενέργειας, τόσο ξεχωριστά όσο και συνδιαστικά.

Το 1977, ο Bodo Linhoff, κατά τη διάρκεια του διδακτορικού του στο Πανεπιστήμιο του Leeds στην Μεγάλη Βρετανία, ανακάλυψε την ύπαρξη ενός κόμβου στην θερμική ολοκλήρωση των διεργασιών. Η ανακάλυψη αυτή έθεσε τη βάση για την τεχνική που είναι γνωστή ως ανάλυση του κόμβου ανάσχεσης (*Pinch Technology*). Ο Robin Smith, το 1994, εφάρμοσε τα συστήματα επαναχρησιμοποίησης νερού/αποβλήτων και πρότεινε μια γραφική μέθοδο βασισμένη στη μέθοδο του Linhoff η οποία αποτελείται από μια διαδικασία στοχοποίησης του νερού για υπολογισμό της ελάχιστης ποσότητας αυτού χωρίς την ανάγκη κατασκευής δικτύου διεργασιών.

Οι Manousiouthakis et al. το 1989 [2], ανέπτυξαν μια μεθοδολογία η οποία επιλύει το δίκτυο μάζας. Η έρευνά τους για τη σύνθεση δικτύων μάζας τους οδήγησε στη γραφική μέθοδο στοχοποίησης η οποία εκμεταλλεύεται την ιδέα της κατασκευής διαγράμματος μεταξύ της συσσωρευμένης μάζας που ανταλλάζεται και τις συγκέντρωσης για ένα σύνολο πλούσιων και αραιών ρευμάτων. Οι Wang και Smith το 1994 [3], [4], ασχολήθηκαν με την τεχνική των «μέγιστων κινητήριων δυνάμεων» και του «ελάχιστου αριθμού των παροχών νερού» ενώ πρότειναν μια επαναληπτική μεθοδολογία η οποία ελαχιστοποιεί τις ανακυκλώσεις και τις αναμίξεις σε ένα δίκτυο αλλά χέρει ιδιαίτερης δυσκολίας εφαρμογής σε μεγάλα συστήματα. Η γραφική μέθοδος ουσιαστικά χρησιμοποιείτο για τον υπολογισμό του ελάχιστου φρέσκου νερού και την κατανομή του στις διεργασίες του συστήματος. Λίγα χρόνια μετά, ονομάστηκε «κόμβος ανάσχεσης νερού» από τους Doyle et al. το 1996 [5]. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι η βασικότερη και πιο χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία για τον υπολογισμό του ελάχιστου φρέσκου νερού σε ένα δίκτυο διεργασιών. Πιο κάτω θα αναπτυχθεί εκτενώς καθώς χρησιμοποιείται και στη συγκεκριμένη εργασία.

Πιο κάτω παρουσιάζονται οι γραφικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ολοκλήρωση νερού και ενέργειας σε ένα δίκτυο διεργασιών, όπως επίσης και οι βασικότερες μεθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού για τον υπολογισμό του ενεργειακού στόχου αλλά και του στόχου νερού σε ένα δίκτυο διεργασιών που χρησιμοποιούν νερό.

## 2.1 Ολοκλήρωση νερού

## 2.1.1 Μέθοδος Κόμβου Ανάσχεσης

Η μέθοδος του κόμβου ανάσχεσης χωρίζεται σε δύο στάδια που περιλαμβάνουν τη στοχοποίηση του ελάχιστου νερού και το σχεδιασμό του δικτύου. Πρέπει να αναφερθεί ότι η διαδικασία ολοκλήρωσης του νερού δεν ασχολείται με το είδος των διεργασιών και με τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα, αλλά μόνο με τη σύνθεση του αποδοτικότερου δικτύου νερού συνδυάζοντας τις διεργασίες με γνώμονα τις προϋποθέσεις εισόδου και εξόδου τους.

Αποδοτικές εξοικονομήσεις νερού επιτυγχάνονται μέσω επαναχρησιμοποίησης, αναγέννησης και ανακύκλωσης, ενώ η ανάγκη ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης νερού οδηγεί στη σύνθεση του δικτύου. Η σύνθεση ενός δικτύου νερού προϋποθέτει όχι μόνο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης νερού από τις διεργασίες, αλλά συνυπολογίζει την επαναχρησιμοποίηση νερού μεταξύ των βασικών διεργασιών.

Η σύνθεση του δικτύου νερού πραγματοποιείται σε δύο περιπτώσεις: όταν τα μαζικά φορτία είναι σταθερά ή όταν οι ροές των ρευμάτων είναι σταθερές. Στις

αρχές της ανάπτυξης της τεχνικής του κόμβου ανάσχεσης, 1994 -2000, το νερό θεωρείτο ότι χρησιμοποιείται κυρίως ως μέσο διαχωρισμού μάζας για την απομάκρυνση μερικού φορτίου ακαθαρσιών από τα πλούσια ρεύματα των μονάδων. Το πρόβλημα αυτό αναφέρεται στα σταθερά φορτία και προϋποθέτει ότι το νερό εισέρχεται με μέγιστη συγκέντρωση και εξέρχεται με μέγιστη συγκέντρωση, ενώ οι ροές του νερού σε οποιοδήποτε σημείο μεταβάλλονται.

Από την άλλη, στη δεύτερη φάση ανάπτυξης τεχνικών για τη σύνθεση δικτύου, 2000 και μετά, το ενδιαφέρον μετατοπίστηκε στις ροές και πιο συγκεκριμένα στην προοπτική πηγών και αποδεκτών με τον περιορισμό των σταθερών ροών, όπου οι ροές είναι προσδιορισμένες ενώ οι συγκεντρώσεις μπορούν να πάρουν τιμές μεταξύ μέγιστών και ελάχιστων τιμών. Στην περίπτωση αυτή, πηγές είναι οι διεργασίες που παρέχουν νερό, ενώ αποδέκτες οι διεργασίες που καταναλώνουν νερό. Στο Διάγραμμα 2.2 παρουσιάζεται, η μαζική μεταφορά ρυπαντή στο νερό.



Διάγραμμα 2.2: Μεταφορά μάζας ρυπαντή στο καθαρό νερό

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σε περίπτωση που παρατηρηθεί μείωση στη ροή εισόδου μιας διεργασίας τότε η συγκέντρωση του ρεύματος εξόδου από τη διεργασία θα είναι μεγαλύτερη και θεωρείται ότι η ελάχιστη ροή εξόδου περιέχει τη μέγιστη συγκέντρωση ρυπαντή. Η μέγιστη συγκέντρωση εξόδου ρυθμίζεται για περιορισμούς ρύπανσης, σε περίπτωση διάβρωσης και μέγιστη διαλυτότητα του ρύπου.

Θέτοντας τις συγκεντρώσεις εισόδου στη μέγιστη τους τιμή δημιουργείται ένα προφίλ για το νερό που διαχωρίζει τις εφικτές συγκεντρώσεις και τις μη εφικτές. Μη εφικτές συγκεντρώσεις γιατί είναι ασύμφορο να επιτραπούν συγκεντρώσεις στο νερό μεγαλύτερες από τις μέγιστες. Αν γινόταν αυτό τότε για συγκέντρωση μεγαλύτερη της μέγιστης, εκτός του ότι η ρύπανση μπορεί να είναι αλόγιστη σε σημείο που δε θα είναι δυνατή η ρύθμιση της, η ροή του νερού θα υπολογίζεται ακόμα πιο μικρή. Η ροή του νερού που περιέχει τις μέγιστες συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου ονομάζεται περιορισμένο προφίλ νερού και παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2.3.



Διάγραμμα 2.3: Περιορισμένο Προφίλ νερού

Για να πραγματοποιηθεί μέγιστη επαναχρησιμοποίηση νερού σε ένα δίκτυο με βάση τη μέθοδο του κόμβου ανάσχεσης, δημιουργείται το γράφημα των διεργασιών, όπου στον κάθετο άξονα είναι η συγκέντρωση του ρυπαντή και στον οριζόντιο άξονα η μάζα του ρυπαντή. Το διάγραμμα των διεργασιών όπως εξάγεται από το βιβλίου του Robin Smith φαίνεται πιο κάτω [6]. Επίσης, με τη βοήθεια του διαγράμματος αυτού συντίθεται η οριακή σύνθετη καμπύλη που φαίνεται πιο κάτω.



Διάγραμμα 2.4: (α) Διάγραμμα οριακών ροών διεργασιών , (β) Οριακή Σύνθετη Καμπύλη και ελαχιστοποίηση ροής νερού

Για τον υπολογισμό της ελάχιστης ροής νερού, εφόσον το νερό εισάγεται καθαρό στις διεργασίες χωρίς συγκέντρωση ρυπαντή, όπως φαίνεται πιο στο Διάγραμμα 2.4(β), μέσω της ευθείας γραμμής που ξεκινάει από μηδενική συγκέντρωση ρυπαντή και ανεβαίνει μέχρι την οριακή σύνθετη καμπύλη προσδιορίζεται η ελάχσιτη ροή του νερού. Η κλίση της γραμμής αυτής είναι η τιμή του ελάχιστου νερού. Στο ίδιο διάγραμμα είναι εμφανές και ο κόμβος ανάσχεσης, που ουσιαστικά είναι το οριακό σημείο στο οποίο ακουμπούν οι δύο καμπύλες. Όπως είναι φανερό το διάγραμμα μπορεί να χωριστεί σε δύο περιοχές, την περιοχή πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης και την περιοχή κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης. Το ίδιο παρατηρείται στο Διάγραμμα 2.5.



Διάγραμμα 2.5: Η βάση της στρατηγικής σχεδιασμού του κόμβου ανάσχεσης

Οι περιοχές σχεδιασμού προσδιορίζονται με ευθείες γραμμές μεταξύ των κυρτών σημείων, για να προσδιοριστούν οι θύλακες του προβλήματος. Η βάση της

στρατηγικής του σχεδιασμού είναι να χρησιμοποιηθεί η ελάχιστη παροχή κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης ενώ μόνο η απαιτούμενη ποσότητα πάνω από αυτόν με το υπόλοιπο να εξάγεται από το σύστημα. Αφού στηθεί η βάση του σχεδιασμού, εξάγεται το σχεδιαστικό πλέγμα με τους κύριους αγωγούς νερού. Το σχεδιαστικό διάγραμμα φαίνεται πιο κάτω.



Διάγραμμα 2.6: Σχεδιαστικό Διάγραμμα Πλέγματος

Εφόσον εφαρμοστούν τα ισοζύγια μάζας για κάθε διεργασία, εξάγεται το τελικό δίκτυο όπως φαίνεται πιο κάτω:



Διάγραμμα 2.7: Τελικό Δίκτυο νερού

## 2.1.2 Μοντελοποίηση Υπερδομών

Στο πλαίσιο της σύνθεσης δικτύου νερού εκτός από τη μέθοδο του κόμβου ανάσχεσης χρησιμοποιείται και η μαθηματική βελτιστοποίηση υπερδομών. Υπάρχουν πολλά ζητήματα που πρέπει να συμπεριληφθούν στην ανάλυση του δικτύου νερού που δεν συμπεριλαμβάνονται ευχερώς χρησιμοποιώντας τη γραφική προσέγγιση, όπως οι απαγορευμένες αντιστοιχίσεις (π.χ. επειδή μπορεί να χρειαστεί μια μακρά διαδρομή σωλήνων), υποχρεωτικές αντιστοιχίσεις (π.χ. για λειτουργικότητα) και ζητήματα κόστους κεφαλαίου. Για την αντιμετώπιση όλων των περιπλοκών απαιτείται διαφορετική προσέγγιση από αυτήν που περιγράφηκε μέχρι τώρα. Η προσέγγιση σχεδιασμού που βασίζεται στη βελτιστοποίηση μιας υπερδομής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων.

Η μορφή του μαθηματικού προβλήματος μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική ανάλογα με το μοντέλο που χρησιμοποιείται. Εάν επιλεχθεί ένα μοντέλο βασισμένο στη σταθερή συγκέντρωση εξόδου τότε το μοντέλο αυτό θα είναι γραμμικό ενώ αν μεταβάλλονται τότε θα είναι μη γραμμικό. Η βελτιστοποίηση των μη γραμμικών προβλημάτων δεν είναι στην πραγματικότητα τόσο δύσκολη ενώ στην πράξη όσον αφορά τη μη γραμμικότητα, είναι δυνατόν να παρέχεται μια καλή αρχικοποίηση στο μη γραμμικό μοντέλο.

Η δυσκολία επίλυσης και η σύγκλιση σε τοπικά βέλτιστα οφείλεται στους διγραμμικούς όρους που εμφανίζονται στα ισοζύγια συστατικού στους αναμικτήρες εισόδου, όπου οι άγνωστες ροές πολλαπλασιάζονται με τις άγνωστες συγκεντρώσεις. Έχει αποδειχθεί από τους Savelski και Bagajewicz [7] πως στα προβλήματα ενός ρυπαντή η συγκέντρωση φτάνει το μέγιστο όριο της στο νερό στην έξοδο της διεργασίας. Παρόλαυτά, ο μη γραμμικός περιορισμός ισότητας στην είσοδο του αναμικτήρα διαμορφώνεται ως γραμμικός περιορισμός ανισότητας με την συγκέντρωση εξόδου να είναι σταθερή στη μέγιστη της τιμή. Τα πλεονεκτήματα της βελτιστοποίησης υπερδομών αναφέρονται κυρίως στη δυνατότητα αυτοματοποίησης για περίπλοκα προβλήματα, ενώ εξάγεται ένα δίκτυο και ένας στόχος και επιτρέπει να συμπεριληφθούν όλα τα είδη των περιορισμών και των δαπανών. Ένα μειονέκτημα είναι ότι δεν υπάρχει πλέον γραφική αναπαράσταση που να επιτρέπει εννοιολογικές γνώσεις.Το διάγραμμα της υπερδομής φαίνεται πιο κάτω.



Σχήμα 2.1: Σχεδιασμός δικτύου νερού με βάση τη μοντελοποίηση υπερδομής

# 2.2 Ενεργειακή Ολοκλήρωση

## 2.2.1 Μέθοδος Κόμβου Ανάσχεσης

Το πρόβλημα σύνθεσης δικτύου εναλλακτών είναι ένα από τα πιο ερευνούμενα θέματα στον κλάδο της ολοκλήρωσης διεργασιών καθώς τα τελευταία χρόνια πολλές είναι οι στρατηγικές επίλυσης που αναπτύχθηκαν αναφορικά με το θέμα αυτό.

Η σύνθεση ενός δικτύου εναλλακτών δεν είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση του πλήρη σχεδιασμού αλλά υπολογίζει ενεργειακούς στόχους για το δίκτυο εναλλακτών οι οποίοι αρωγούν στη λειτουργία του ολοκληρωμένου σχεδιασμού, ενώ αξιολογούν τη σχέση της ενέργειας με τα επενδυτικά κόστη του δικτύου. Δίνουν επίσης τη δυνατότητα παρακολούθησης διάφορων σχεδιαστικών επιλογών και βελτιωτικές προτάσεις για τις διαδικασίες αντίδρασης, διαχωρισμού και ανακυκλώσεων. Η ενεργειακή ολοκλήρωση αντιμετωπίζεται είτε γραφικά είτε μέσω μαθηματικής βελτιστοποίησης.

Κλασικά η αντιμετώπιση του προβλήματος της ενεργειακής ολοκλήρωσης μέσω του σχεδιασμού δικτύου εναλλακτών γίνεται γραφικά. Αρχικά, υπολογίζονται οι απαιτήσεις σε θερμές και ψυχρές παροχές και στη συνέχεια μέσω της μεθόδου του σχεδιαστικού κόμβου ανάσχεσης σχεδιάζεται ένα θερμοδυναμικά εφικτό διάγραμμα δικτύου στο οποίο υπολογίζεται ο ελάχιστος αριθμός εναλλακτών αυτού. Βελτιστοποίηση του εν λόγω διαγράμματος γίνεται με χαλάρωση κάποιων παραμέτρων δίνοντας τη δυνατότητα μεταφοράς θερμότητας μέσω βρόγχων και βοηθητικών διαδρομών διατηρώντας ενεργειακή ισορροπία κατά μήκος τους. Η ύπαρξη βρόγχων και βοηθητικών διαδρομών αυξάνει τους συνολικούς βαθμούς ελευθερίας του συστήματος. Ένας άλλος τρόπος είναι μέσω της ανακατασκευής του συστήματος που προκύπτει εξαιτίας της ανάγκης δραστικής ελάττωσης της ενεργειακής κατανάλωσης του συστήματος για διάφορους λόγους, όπως για παράδειγμα μετατροπή των προδιαγραφών του προϊόντος.

Πλέον πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι αυτή της μαθηματικής βελτιστοποίησης είτε της υπερδομής ενός συστήματος καθώς προσφέρει τη δυνατότητα γρηγορότερης επίλυσης και συνολικής απεικόνισης μεγάλων συστημάτων με περίπλοκους περιορισμούς είτε της εφοαρμογής θερμοδυναμικών μοντέλων ενεργειακού καταρράκτη. Παρόλα αυτά, το υπολογιστικό πρόβλημα είναι δύσκολα επιλύσιμο και είναι γεγονός πως ο σχεδιαστής δε λαμβάνει μέρος στη βελτιστοποίησης παρά μόνο στο σχεδιασμό του μοντέλου που θα βελτιστοποιηθεί, απέχοντας στο στάδιο της λήψης αποφάσεων.

Η γραφική μέθοδος στηρίζεται στη σχεδίαση σύνθετων καμπύλων. Οι σύνθετες καμπύλες αναφέρονται στα θερμά και ψυχρά ρεύματα. Θερμά ρεύματα θεωρούνται τα ρεύματα ενός συστήματος τα οποία προσφέρουν θερμότητα μειώνοντας τη θερμοκρασία τους, ενώ τα ψυχρά ρεύματα είναι αυτά που απορροφούν θερμότητα αυξάνοντας τη θερμοκρασία τους. Έστω ότι μία διεργασία έχει ένα σύνολο θερμών και ψυχρών ρευμάτων τα οποία προσδιορίζονται από τα

ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Σε ένα σύστημα διεργασιών θεωρείται ότι τα θερμά και ψυχρά ρεύματα ανταλλάσσουν θερμότητα μεταξύ τους.

Χωρίζοντας τα ρεύματα σε θερμά και ψυχρά ενώ ταυτόχρονα οι αλλαγές θερμοκρασίας για κάθε ρεύμα είναι γνωστές, φτιάχνονται δύο καμπύλες, μία για θερμά και μία για ψυχρά ανάλογα με τα θερμοκρασιακά διαστήματα που υπάρχουν ανάμεσα στα ρεύματα. Στο Διάγραμμα 2.8 παρουσιάζεται η σύνθετη καμπύλη για 2 θερμά ρεύματα σε διαγράμματα θερμοκρασίας-ενθαλπίας.



Διάγραμμα 2.8: Σύνθετη καμπύλη για δύο θερμά ρεύματα

Για τη σκιαγράφηση της εναλλαγής θερμότητας μεταξύ ψυχρών και θερμών ρευμάτων οι δύο καμπύλες σχεδιάζονται στο ίδιο διάγραμμα. Η θέση τους στο διάγραμμα εξαρτάται από το ελάχιστο θερμοκρασιακό διάστημα (ΔT<sub>min</sub>) το οποίο αποτελεί το δυναμικό εναλλαγής θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων των δύο καμπυλών. Στην περίπτωση που τα ρεύματα διαθέτουν οριακές θερμοκρασίες, πολύ ψηλές ή πολύ χαμηλές, και δεν υπάρχει δυνατότητα ανάκτησης τότε απαιτείται η χρήση βοηθητικών παροχών, ζεστού ατμού για θέρμανση και κρύο νερού για ψύξη.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι υπάρχει δυνατότητα οριζόντιας μετακίνησης των δύο καμπύλων λόγω δυνατότητας αλλαγής των ενθαλπιών των θερμών ρευμάτων, αυξάνοντας ή μειώνοντας το ελάχιστο θερμοκρασιακό διάστημα, αλλά ποτέ μηδενίζοντας το. Μηδενισμός του δεν επιτρέπει τη μεταφορά θερμότητας

μεταξύ θερμών και ψυχρών ρευμάτων καθώς δεν υπάρχει κινητήρια δύναμη για την εναλλαγή θερμότητας.

Επιπρόσθετα, η αύξηση του ΔΤ<sub>min</sub> απαιτεί μικρότερη επιφάνεια εναλλαγής και κατ' επέκταση μείωση στα πάγια κόστη των εναλλακτών. Παρόλα αυτά, η αύξηση του ΔΤ<sub>min</sub>, ταυτόχρονα μειώνει τη θερμότητα εναλλαγής. Είναι απαραίτητο λοιπόν να ταυτοποιηθούν οι κατάλληλοι συμβιβασμοί και το οικονομικά και ενεργειακά βέλτιστο ΔΤ<sub>min</sub>. Πιο κάτω φαίνεται το Διάγραμμα των σύνθετων καμπυλών.



Διάγραμμα 2.9: Σύνθετες καμπύλες για θερμά και ψυχρά ρεύματα με ελάχιστο θερμοκρασιακό διάστημα ΔTmin= 10

Το σημείο όπου οι καμπύλες βρίσκονται πιο κοντά ονομάζεται κόμβος ανάσχεσης και χωρίζει το σύστημα σε δύο υποσυστήματα που βρίσκονται σε θερμική ισορροπία με τις βοηθητικές παροχές. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2.10, τα θερμά ρεύματα ονομάζονται αποδέκτες θερμότητας (heat sink) ενώ τα ψυχρά πηγές θερμότητας. Το τμήμα των σύνθετων καμπύλων που βρίσκεται πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης είναι ο αποδέκτης θερμότητας, καθώς είναι το τμήμα στο οποίο η θερμή βοηθητική παροχή προσφέρει θερμότητα, με τα ρεύματα των θερμοκρασιών αυτών να αποτελούν αποδέκτες του θερμικού φορτίου που προσφέρει. Από την άλλη, το τμήμα κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης ονομάζεται πηγή θερμότητας και απεικονίζει τη θερμότητα που απομακρύνεται από τα ρεύματα προς στη ψυχρή βοηθητική παροχή.



Διάγραμμα 2.10: Ο κόμβος ανάσχεσης χωρίζει το διάγραμμα σε πηγή θερμότητας και αποδέκτη θερμότητας

Οι σύνθετες καμπύλες χρησιμοποιούνται για την εύρεση των ενεργειακών στόχων παρόλα αυτά δεν είναι κατάλληλες για την επιλογή των βοηθητικών παροχών. Μία άλλη απεικόνιση που παρουσιάζει καθαρά τις απαιτήσεις σε βοηθητικές παροχές είναι αυτή του Μεγάλου Σύνθετου Γραφήματος (ΜΣΓ) του οποίου η τυπική μορφή φαίνεται στο πιο κάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 2.11: Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα (ΜΣΓ)

Το Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα (ΜΣΓ) είναι η διαγραμματική απεικόνιση του Προβλήματος Πίνακα Καταρράκτη στον οποίο υπολογίζονται οι θερμότητες σε κάθε θερμοκρασιακό διάστημα και ο κόμβος ανάσχεσης. Ο αλγόριθμος επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος προϋποθέτει τη μετατόπιση των θερμοκρασιών των ρευμάτων, αρχικές και επιθυμητέ. Τα θερμά ρεύματα μετατοπίζονται κατά  $\Delta Tmin_2$  προς τα κάτω ενώ τα ψυχρά κατά  $\Delta Tmin_2$  προς τα πάνω. Έτσι, οι δύο καμπύλες αγκίζουν στο σημείο του κόμβου ανάσχεσης, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 2.12.



Διάγραμμα 2.12: Μεταφορά θερμότητας διαμέσου ενός θερμοκρασιακού διαστήματος λόγω μετατόπισης θερμοκρασιών

Εφόσον πραγματοποιηθούν ενεργειακά ισοζύγια σε κάθε μετατοπισμένο θερμοκρασιακό διάστημα υπολογίζονται τα πλεονάσματα ή ελλείμματα φορτίων που εξέρχονται από αυτά και σχεδιάζεται ο ενεργειακός καταρράκτης. Ένας ενεργειακός καταρράκτης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2 και όπως φαίνεται ξεκινάει από τις ψηλότερες θερμοκρασίες έχοντας στην κορυφή τη θερμή βοηθητική παροχή. Σε κάθε επίπεδο η πλεονασματική θερμότητα μεταφέρεται προς τα κάτω.



Σχήμα 2.2: Ενεργειακός Καταρράκτης

Τελικά, το μεγαλύτερο έλλειμμα που προκύπτει θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει το απαιτούμενο φορτίο της θερμής παροχής. Επαναλαμβάνεται ο καταρράκτης και στο επίπεδο που παρουσιάστηκε το μεγαλύτερο έλλειμμα, πλεόν μηδενίζεται. Το σημείο αυτό είναι ο κόμβος ανάσχεσης. Έτσι υπολογίζονται οι θερμές και ψυχρές παροχές που παρουσιάζονται ΜΣΓ και το σημείο του κόμβου ανάσχεσης.

Στο ΜΣΓ το σημείο τομής με τον άξονα των θερμοκρασιών είναι ο 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

είναι ο αποδέκτης θερμότητας, όπως και στις σύνθετες καμπύλες, 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 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 των θερμών παροχών, ενώ, αντίστοιχα, η οριζόντια απόσταση στην χαμηλότερη θερμοκρασία είναι η ελάχιστη ενέργεια που πρέπει να απομακρυνθεί από τα ρεύματα των ψυχρών παροχών.



Διαγραμμα 2.13: Υπολογισμος ψυχρων και θερμών φορτίων βοηθητικών παροχών από το Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα

Τα γραμμοσκιασμένα τμήματα του ΜΣΓ Διάγραμμα 2.13 ονομάζονται ενεργειακές τσέπες και είναι τμήματα στα οποία η ανάγκη για θερμότητα καλύπτεται μέσω εναλλαγής θερμότητα μεταξύ των ρευμάτων της διεργασίας.

Για περαιτέρω θερμοδυναμική ανάλυση μιας συνολικής μονάδας χρησιμοποιείται το Συνολικό Διάγραμμα Μονάδας (ΣΔΜ) στο οποίο υπάρχει καλύτερη συνολική εικόνα για τα απαιτούμενα θερμικά φορτία. Η κατασκευή του προϋποθέτει συνδυασμό των τμημάτων του αποδέκτη και της πηγής. Προστίθενται τα θερμικά φορτία στα θερμοκρασιακά διαστήματα που υπάρχει θερμοκρασιακή επικάλυψη μεταξύ των ρευμάτων των διεργασιών. Το Συνολικό Διάγραμμα Μονάδας φαίνεται στην Διάγραμμα 2.14.



Διάγραμμα 2.14: Συνολικό Διάγραμμα Μονάδας

Το αξιοσημείωτο με το ΣΔΜ είναι ότι δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού των στόχων κατανάλωσης και παραγωγής ατμών.

Εφόσον έχουν προσδιοριστεί οι ενεργειακοί στόχοι και ο προσδιορισμός του απαιτούμενου θερμικού φορτίου που θα χρησιμοποιηθεί από κάθε βοηθητική παροχή, παραμένει η ανάπτυξη του δικτύου των εναλλακτών. Η μέθοδος αποτελεί στρατηγική η οποία βασίζεται στο σχεδιασμό ενός διαγράμματος πλέγματος και χρησιμοποιεί κάποια επικουρικά κριτήρια στην ανάπτυξη του δικτύου. Το απλό διάγραμμα πλέγματος για 4 ρεύματα φαίνεται στο Διάγραμμα 2.15.



Διάγραμμα 2.15: Διάγραμμα Πλέγματος

Το σύστημα χωρίζεται στο σημείο του κόμβου ανάσχεσης χωρίζοντας το σύστημα σε υποσυστήματα τα οποία σχεδιάζονται ξεχωριστά ξεκινώντας από τον κόμβο ανάσχεσης καθώς αν γινόταν το αντίθετο, πιθανόν να χρειαστεί επανεξέταση των αρχικών ζευγών που εναλλάσσουν θερμότητα και είναι λογικό ότι κάτι τέτοιο είναι μπορεί να οδηγήσει σε παραβίαση του κόμβου ανάσχεσης ή του κριτηρίου του ΔT<sub>min</sub>. Θεωρείται ότι ο κόμβος ανάσχεσης είναι το πιο περιοριστικό σημείο του προβλήματος και ΔT<sub>min</sub> σημειώνεται μεταξύ όλων των ψυχρών και θερμών ρευμάτων γύρω από το σημείο αυτό, οπότε αρχικές αποφάσεις που παίρνονται στο σημείο αυτό συνήθως αποφεύγουν δυσκολίες που μπορεί να εμφανιστούν σε μετέπειτα στάδιο του σχεδιασμού.

Για την εφικτή εναλλαγή θερμότητας μεταξύ δύο ρευμάτων χρησιμοποιούνται περιορισμοί στις θερμοχωρητικότητες των ρευμάτων. Αρχικά, οι θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των θερμών και ψυχρών ρευμάτων πρέπει να αυξάνονται καθώς η ανάλυση απομακρύνεται από τον κόμβο ανάσχεσης ώστε να είναι εφικτή η εναλλαγή θερμότητας. Στην περίπτωση που η θερμοκρασιακή διαφορά μειώνεται είναι εύλογο ότι σε κάποιο σημείο θα τέμνονται μηδενίζοντας την κινητήριο δύναμη για την πραγματοποίηση της εναλλαγής. Οι κλήσεις των ρευμάτων είναι συνυφασμένες και ανάλογες με τις θερμοχωρητικότητες των ρευμάτων. Όσο αυξάνεται η θερμοχωρητικότητα ενός ρεύματος τόσο πιο απότομη είναι η κλήση της καμπύλης.

Άρα, στο υποσύστημα που βρίσκεται πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης πρέπει οι θερμοχωρητικότητες των θερμών ρευμάτων να είναι χαμηλότερες από αυτές των ψυχρών ώστε η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ ψυχρών και θερμών ρευμάτων να αυξάνεται και να καθιστά εφικτή την εναλλαγή θερμότητας. Αντίστοιχα, στο υποσύστημα που βρίσκεται κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης OI θερμοχωρητικότητες των θερμών ρευμάτων πρέπει να είναι μεγαλύτερες από αυτές των ψυχρών. Για τον ίδιο λόγο χρησιμοποιείται ο πίνακας των θερμοχωρητικοτήτων. Θερμές παροχές χρησιμοποιούνται μόνο στην περιοχή πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης για θέρμανση ψυχρών ρευμάτων με το ελάχιστο φορτίο που υπολογίστηκε από τις γραφικές μεθόδους ενώ ταυτόχρονα τα θερμά ρεύματα αποδίδουν θερμότητα στα ψυχρά ρεύματα ώστε να ψυχθούν στη θερμοκρασία του κόμβου ανάσχεσης. Το αντίθετο συμβαίνει κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης.

Στη συνέχεια, εφόσον το συνολικό πάγιο κόστος του δικτύου των εναλλακτών αναφέρεται κυρίως στον αριθμό των εναλλακτών που απαιτούνται, γίνεται προσπάθεια ελαχιστοποίησης του αριθμού τους για ελαχιστοποίηση του κόστους, μέσω μιας ευρετικής μεθόδου. Προϋποθέτει ότι μέγιστα δυνατά φορτία εναλλάσσονται μεταξύ δύο ρευμάτων ενώ η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι όλα τα ρεύματα να φτάσουν στις επιθυμητές θερμοκρασίες. Αν η ανάκτηση θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων του συστήματος έχει μεγιστοποιηθεί αλλά υπάρχει ακόμα ανάγκη για θέρμανση ή ψύξη τότε χρησιμοποιούνται τα φορτία των θερμικών και ψυχρών παροχών.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο ελάχιστος αριθμός εναλλακτών συμπίπτει με τον αριθμό που υπολογίζεται μέσω της πιο κάτω εξίσωσης:

$$N_{units} = (S-1)_{above \ pinch} + (S-1)_{below \ pinch}$$
(2.1)

Στην περίπτωση που δεν είναι εφικτή η εναλλαγή θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων τότε επιτρέπεται ο διαχωρισμός τους. Για να μπορεί να πραγματοποιηθεί ο διαχωρισμός αυτός είναι αναγκαίο να τηρούνται κάποια κριτήρια. Στην περιοχή πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης ο αριθμός των θερμών ρευμάτων πρέπει να είναι μικρότερος από τον αριθμό των ψυχρών, ενώ κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης ο αριθμός των θερμών ρευμάτων πρέπει να είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των ψυχρών. Αυτό ισχύει ώστε πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης τα θερμά ρεύματα να ψυχθούν στη θερμοκρασία του κόμβου ανάσχεσης μέσω ανάκτησης θερμότητας ενώ η θέρμανση των εν λόγω ψυχρών ρευμάτων μπορεί να καλυφθεί από τη θερμή βοηθητική παροχή.

Περαιτέρω ανάλυση του δικτύου μπορεί να πραγματοποιηθεί για επίτευξη ακόμα μεγαλύτερης ανάκτησης θερμότητας. Περαιτέρω ανάλυση μπορεί να γίνει στην επιφάνεια εναλλαγής και στο πάγιο κόστος με έλεγχο της κάθετης μεταφοράς θερμότητας διαμέσου διαστημάτων ενθαλπίας. Ακόμα, βελτιστοποίηση της δομής του δικτύου μπορεί να γίνει μέσω βρόγχων και βοηθητικών διαδρομών αυξάνοντας τους συνολικούς βαθμούς ελευθερίας του συστήματος για καλύτερο χειρισμό του κόστους του δικτύου.

### 2.2.2 Μοντέλα Μεταφοράς

Η ενεργειακή ολοκλήρωση εκτός απο γραφικά πραγματοποιείται και υπολογιστικά με τη χρήση της μαθηματικής βελτιστοποίησης. Τα μοντέλα που πρότειναν οι Papoulias και Grossmann το 1983 βασίζονται στον ενεργειακό καταρράκτη που παρουσιάστηκε πιο πάνω και στο διάγραμμα πλέγματος [8]. Ανέπτυξαν δύο μοντέλα, ένα γραμμικό και ένα μεικτό γραμμικό, όπου στο πρώτο υπολογίζεται το ελάχιστο κόστος των βοηθητικών παροχών και ο κόμβος ανάσχεσης, ενώ στο δεύτερο υπολογίζεται ο ελάχιστος αριθμός εναλλακτών. Τα μοντέλα αυτά αναφέρονται ως μοντέλα Μεταφοράς.

Το μοντέλο Μεταφοράς είναι το γνωστό μοντέλο που χρησιμοποιείται και στην επιχειρησιακή έρευνα για εύρεση του βέλτιστου τρόπου σύνδεσης δύο ή περισσότερων σημείων του συστήματος μέσα από τα υπάρχοντα εναλλακτικά κανάλια διασύνδεσης τους. Τα σημεία του συστήματος αναφέρονται σε κόμβους προσφοράς και κόμβους ζήτησης ενώ οι συνδέσεις μπορεί να είναι κόστος, απόσταση, χρονική διάρκεια κ.λ.π. Το προϊόν μεταφέρεται από την πηγή, εργοστάσιο, στα ενδιάμεσα σημεία, αποθήκες, και ακολούθως στον τελικό προορισμό, αγορά. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο η θερμότητα μεταφορτώνεται από τις πηγές (θερμά ρεύματα) στους προορισμούς (ψυχρά ρεύματα) με σκοπό να εξασφαλιστεί θερμοδυναμικά η δυνατότητα εναλλαγής θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων, αυτή η εναλλαγή γίνεται διαμέσου ενδιάμεσων σταθμών.

Στην περίπτωση του δικτύου εναλλαγής θερμότητας, η θερμότητα είναι το προϊόν που μεταφέρεται από θερμά ρεύματα διεργασιών και τις θερμές βοηθητικές παροχές στα κρύα ρεύματα και τις κρύες βοηθητικές παροχές μέσω θερμοκρασιακών διαστημάτων.

Στο Διάγραμμα 2.16 παρουσιάζεται διαγραμματικά το μοντέλο Μεταφοράς.



Διάγραμμα 2.16: Διάγραμμα μοντέλου μεταφοράς καθ΄ αναλογία του δικτύου ανάκτησης θερμόττητας

Είναι αξιοσημείωτο να αναφερθεί ότι ένα θερμό ρεύμα έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει θερμότητα σε ένα κρύο ρέυμα μόνο όταν το δεύτερο βρίσκεται σε θερμοκρασία χαμηλότερη της θερμοκρασίας εισόδου του πρώτου και αυτό συμβαίνει λόγω του ότι δε μπορεί να παραβιαστεί η κινητήρια δύναμη (2<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός Νόμος)

Επίσης, η θερμότητα μεταφέρεται από ένα θερμό ρεύμα υψηλής θερμοκρασίας σε ένα κρύο ρεύμα χαμηλότερης θερμοκρασίας μέσω υπολειπόμενων ροών θερμότητας από ένα διάστημα στο επόμενο. Η παραπάνω μεταφορά γίνεται και από μια αποθήκη σε άλλη.

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 –ΔTmin / 2 και + ΔTmin / 2 αντίστοιχα. Όπου ΔTmin είναι η ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας στην οποία θεωρούμε ότι συμβαίνει μεταφορά θερμότητας. Το ΔTmin εξαρτάται από τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται. 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.

#### Το γραμμικό μοντέλο Μεταφοράς

Το μοντέλο Μεταφοράς για την ελαχιστοποίηση του κόστους βοηθητικών παροχών είναι ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού το οποίο εφαρμόζεται για την εύρεση στόχων στα δίκτυα εναλλαγής θερμότητας. Η αναπαράσταση Μεταφοράς χρησιμοποιείται για την εισαγωγή μεταβλητών για όλες της ροές θερμότητας (από τις πηγές στις αποθήκες, από τις αποθήκες στους τελικούς προορισμούς και από αποθήκη σε αποθήκη), για όλα τα ισοζύγια ενέργειας γύρω από τις αποθήκες και να εξαχθεί τελικά το μοντέλο που ελαχιστοποιεί τις βοηθητικές παροχές και αναφέρεται στους περιορισμούς των ισοζυγίων ενέργειας.

Αφού κτιστεί το μοντέλο με όλους τους απαραίτητους δείκτες και τα απαραίτητα σύνολα ώστε να αποδίδονται τα συνολικά ισοζύγια ενέργειας αλλά και τα ισοζύγια για κάθε θερμοκρασιακό διάστημα, το μοντέλο Μεταφοράς παίρνει την πιο κάτω μορφή:

min 
$$utility \ cost = \sum_{i \in HU} c_i \sum_{k \in Ti} Q \cdot S_{ik} + \sum_{j \in CU} c_j \sum_{k \in Tj} Q \cdot W_{jk}$$
 (2.2)

**s.t.** 
$$R_k - R_{k-1} + \sum_{j \in CU_k} QW_{jk} - \sum_{i \in HU_k} QS_{ik} = \sum_{i \in HP_k} Q_{ik}^H - \sum_{j \in CP_k} Q_{jk}^C, \ k \in TI$$
 (2.3)

$$QS_{ik}, QW_{jk}, R_k \ge 0 , \quad k \in TI, i \in HU, j \in CU$$
(2.4)

$$R_0 = R_k = 0 \tag{2.5}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι γραμμική όπως και οι περιορισμοί. Έτσι, το πρόβλημα ελαχιστοποίησης του κόστους βοηθητικών παροχών είναι γραμμικό. Η

επίλυση του μοντέλου παρέχει τι βέλτιστες τιμές για τα φορτία των θερμών και ψυχρών βοηθητικών παροχών, όπως και τα υπόλοιπα θερμότητας που μεταφέρονται από αποθήκη σε αποθήκη *R*<sub>k</sub>. Κόμβος ανάσχεσης μπορεί να βρεθεί όταν κάποιο από τα υπόλοιπα ροών θερμότητας μηδενιστεί. Η ύπαρξη του κόμβου ανάσχεσης χρησιμοποιείται για την ευκολότερη λύση του προβλήματος εφόσον το σύστημα χωρίζεται σε υποσυστήματα, ένα πάνω και ένα κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης. Εάν υπάρχουν περισσότεροι από έναν κόμβο ανάσχεσης τότε το σύστημα χωρίζεται αντίστοιχα σε υποσυστήματα πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης, ανάμεσα σε συνεχείς κόμβους ανάσχεσης και κάτω από τον τελευταίο κόμβο ανάσχεσης. Η ύπαρξη πολλαπλών κόμβων ανάσχεσης επιτρέπει στα συστήματα που δημιουργούνται να αντιμετωπίζονται ανεξάρτητα καθώς έχει εξαχθεί η έμμεση παραδοχή ότι η θερμότητα δεν μπορεί να μεταφερθεί διαμέσου ενός κόμβου ανάσχεσης.

Οι απαραίτητοι δείκτες και μεταβλητές παρουσιάζονται πιο κάτω:



Σχήμα 2.3: Ισοζύγιο θερμότητας σε ένα θερμοκρασιακό διάστημα

Ο μεγαλύτερος παράγοντας που επηρεάζει την συνολική λειτουργία ενός συστήματος διεργασιών είναι στο σύστημα εναλλαγής θερμότητας. Η εναλλαγή της απαιτούμενης θερμότητας όλων των ρευμάτων διεργασιών έχει ως στόχο τη μείωση της κατανάλωσης σε θερμές και ψυχρές παροχές.

Στο γραμμικό μοντέλο μεταφοράς που παρουσιάστηκε πιο πάνω γίνεται υπόθεση ότι κάθε ρεύμα εναλλάσσει θερμότητα με οποιδήποτε άλλο αν αυτό είναι θεμροδυναμικά εφικτό και αυτό συμβαίνει γιατί δεν υπάρχει κανένας περιορισμός χετικά με το ποιά ρεύματα μπορούν να εναλλάξουν 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.

Οι αλλαγές που πραγματοποιούνται αναφέρονται στο συνολικό υπόλοιπο θερμότητας που κατέρχεται στον ενεργειακό καταρράκτη. Για το ανεπτυγμένο μοντέλο ορίζονται τα υπόλοιπα θερμότητας θερμών ρευμάτων και τα υπόλοιπα θερμότητας θερμών παροχών για κάθε θερμό ρεύμα και κάθε θερμή παροχή που συμμετέχει στο θερμοκρασιακό διάστημα ή στα θερμοκρασιακά διαστήματα με μεγαλύτερη θερμοκρασία. Ορίζονται επιπλέον μεταβλητές που να εκφράζουν τις εναλλαγές μεταξύ θερμών ρευμάτων με ψυχρά ρεύματα, θερμών ρευμάτων με ψυχρές παροχές και θερμών παροχών με ψυχρά ρεύματα.

Το ανεπτυγμένο μοντέλο μεταφοράς έχει την πιο κάτω μορφή:

min

$$utility \ cost = \sum_{i \in HU} c_i \ \sum_{k \in Ti} Q \cdot S_{ik} + \sum_{j \in CU} c_j \ \sum_{k \in Tj} Q \cdot W_{jk}$$
(2.6)

s. t.

$$_{i\epsilon HU}^{i\epsilon HU} = k\epsilon Ti \qquad j\epsilon CU \qquad k\epsilon Tj$$

$$RH_{hk} - RH_{hk-1} + \sum_{w} QHW_{hwk} - \sum_{c} QHC_{hck} = QH_{hk}, \quad k \in H'k \quad (2.7)$$

$$RS_{sk} - RS_{sk-1} + \sum_{c} QSC_{sck} = QS_{sk}, \quad s \in S'$$
(2.8)

$$\sum_{c} QHC_{hck} - \sum_{c} QHC_{hck} = QC_{ck} , \quad c \in Ck$$
(2.9)

$$\sum_{w} QHW_{hwk} = QW_{wk}, \qquad w \in Wk \tag{2.10}$$

$$RH_{hk}, RS_{sk}, QHC_{hck}, QHC_{hck}, QHW_{hwk}, QS_s, QW_s, R_k \ge 0$$
(2.11)

$$RH_{hO} = RS_{s0} = 0 (2.12)$$

$$RH_{hk} = RS_{sk} = 0 \tag{2.13}$$

#### Το μεικτό γραμμικό μοντέλο Μεταφοράς

Η λύση του γραμμικού μοντέλου μεταφοράς επιτυγχάνεται για διάφορα δίκτυα εναλλαγής θερμότητας. Χρήσιμο είναι όμως η εύρεση του δικτύου με τον ελάχιστο αριθμό εναλλακτών. Επίσης, ο αριθμός εναλλακτών εκπρωσοπεί το πάγιο κόστος του δικτύου οπότε είναι λογικό να επιζητείται ο ελάχιστος αριθμός εναλλακτών.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω Papoulias and Grossman (1983) πρότειναν ένα MILP μοντέλο μεταφοράς [8]. Το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται σε κάθε υποσύστημα του δικτύου.

Η βασική ιδέα του μοντέλου είναι η άμεση μοντελοποίηση της εναλλαγής θερμότητας μεταξύ θερμών και ψυχρών ρευμάτων που εναλλάσσουν θερμότητα όσον αφορά τη λύση του γραμμικού μοντέλου. Κάθε ζεύγος που εναλλάσει θερμότητα προϋποθέτει και την ύπαρξη ενός εναλλάκτη.

Το μοντέλο περιέχει συνεχείς και δυαδικές μεταβλητές. Οι δυαδικές μεταβλητές εκφράζουν την ύπαρξη ή μη ενός εναλλάκτη. Πιο κάτω φαίνεται η μορφή του μοντέλου αυτού.

min

$$HE = \sum_{h \in HP \cup HU} \sum_{c \in CP \cup CU} y_{hc}$$
(2.14)

$$QHC_{h,c} \leq y_{h,c} \cdot LU \tag{2.15}$$

$$Q_{hc} = \sum_{k \in P_k \cup CU_k} Q_{hck} \tag{2.16}$$

Οι στρατηγικές επίλυσης που αντιμετωπίζουν το πρόβλημα του νερού και της ενέργειας και οι οποίες βασίζονται στο σχεδιασμό του δικτύου εναλλακτών διαφέρουν από το κλασικό πρόβλημα σύνθεσης δικτύου εναλλακτών. Καθώς το αντικείμενο ενδιαφέροντος δεν είναι μόνο η ενέργεια αλλά προστίθεται και το νερό, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναπτυχθούν στρατηγικές επίλυσης που να συμπεριλαμβάνουν και τα δύο προϊόντα.

Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων ολοκλήρωσης πρέπει να διεξάγεται με ιδιαίτερη προσοχή δίνοντας βαρύτητα και στα δύο ώστε να αναπτυχθεί η κατάλληλη μεθοδολογία. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στην περίπτωση που το δίκτυο νερού εξάγεται μαζί με το δίκτυο εναλλακτών πρέπει να γίνει λόγος για επαναχρησιμοποιήσεις νερού που πραγματοποιούνται κάτω από την οπτική της μη ισοθερμοκρασιακής ανάμιξης. Η ταυτόχρονη αντιμετώπιση του νερού και της ενέργειας προϋποθέτει μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις, σε ένα δίκτυο νερού. Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές έρευνες σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο η μη ισοθερμοκρασιακή ανάμιξη επηρεάζει τη σύνθεση των δικτύων νερού και

εναλλακτών καθώς και το πως μπορούν να βοηθήσουν τον μαθηματικό προγραμματισμό για την εξαγωγή πιο απλοποιημένων και αποδοτικών μοντέλων.

#### 2.2.3 Υπερδομή δικτύου εναλλακτών

Η υπερδομή του δικτύου εναλλακτών είναι ένα μοντέλο που ανέπτυξαν οι Yee et al. το 1990 [9]. Για την ανάπτυξη της υπερδομής εμπνεύστηκαν από τις μελέτες των Floudas et al. [10] και Papoulias et al. [8]. Με στόχο να ξεπεράσουν τους περιορισμούς της διαδοχικής σύνθεσης δικτύου εναλλακτών που σχετίζεται κυρίως με τα διάφορα κόστη. Ο προσδιορισμός του επιπέδου ανάκτησης θερμότητας a priori αποφέρει αρνητικά αποτελέσματα όσον αφορά τους εναλλάκτες. Οι Floudas και Ciric [11] ανέπτυξαν ένα μοντέλο μεικτού μη γραμμικού προγραμματισμού το οποίο ταυτόχρονα βελτιστοποιεί την επιλογή των ζευγών που εναλλάσσουν θερμότητα αλλά και τη διαμόρφωση του δικτύου εναλλακτών. Το μοντέλο είναι μια υπερδομή η οποία μοιάζει με την υπερδομή των Floudas et al [10].

Το μοντέλο των Yee και Grossmann [9] είναι μια υπερδομή του δικτύου εναλλακτών σε στάδια και μοντελοποιείται σε ένα πρόβλημμα μεικτού μη γραμμικού προγραμματισμού ώστε να εξάγει το δίκτυο με το βέλτιστο κόστος. Στο πιο κάτω σχήμα παρουσιάζεται η διαγραμματική απεικόνιση της υπερδομής.



Διάγραμμα 2.17: Υπερδομή δικτύου εναλλακτών

Ο αριθμός των σταδίων που χρησιμοποιούνται είναι ίσος με τον μέγιστο αριθμό των θερμών ή ψυχρών ρευμάτων. Επίσης, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2.17, κάθε ρεύμα παροχής αντιμετωπίζεται ως ρεύμα διεργασίας με άγνωστη ροή, ενώ όπως είναι λογικό, τα ρεύματα παροχών τοποθετούνται στα άκρα κάθε συνόλου σταδίων. Τέλος, χρησιμοποιείται η υπόθεση της ισοθερμοκρασιακής ανάμιξης.

Ένα συνολικό ισοζύγιο εξάγεται για κάθε στάδιο και έτσι επιτυγχάνεται μείωση των μεταβλητών του προβλήματος καθώς δε χρειάζονται εξισώσεις ανάμιξης. Ο υπαρκτός χώρος του προβλήματος είναι γραμμικός καθώς εξαρτάται από γραμμικούς περιορισμούς. Μη γραμμικότητες παρουσιάζονται στην αντικειμενική συνάρτηση η οποία περιλαμβάνει όρους κόστους για τις επιφάνειες εναλλαγής, οι οποίες εκφράζονται σε όρους θερμοκρασίας σταδίου. Το μοντέλο που προκύπτει είναι μεικτό μη γραμμικό.

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, για τη μοντελοποίηση της υπερδομής γίνεται η υπόθεση της ισόθερμης ανάμιξης. Στις διαμορφώσεις όπου πραγματοποιούνται διαχωρισμοί ρευμάτων, η υπόθεση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε υπερκτίμηση της επιφάνειας εναλλαγής καθώς θα περιορίσει τις αντισταθμίσεις της επιφάνειας στους εναλλάκτες που συμμετέχουν στα σημεία διαχωρισμου των ρευμάτων. Επιπρόσθετα, η υπόθεση αυτή μπορεί να απομακρύνει από τη διαμόρφωση διαμορφώσεις του δικτύου που περιλαμβάνουν μη ισοθερμοκρασιακή ανάμιξη. Για την υπέρβαση του πιο πάνω περιορισμού εφαρμόζεται συγκεκριμένη στρατηγική επίλυσης. Αρχικά, επιλύεται το μεικτό μη γραμμικό μοντέλο ώστε να προκύψει μία βέλτιστη διαμόρφωση δικτύου, εάν η διαμόρφωση περιλαμβάνει διαχωρισμούς ρευμάτων τότε ένα υποβέλτιστο μη γραμμικό πρόβλημα το οποίο χρησιμοποιεί την προϋγούμενη διαμόρφωση, με μεταβλητές ροές και θερμοκρασίες επιλύεται ώστε να προσδιοριστούν οι βέλτιστες ροές και επιφάνειες εναλλαγής στους εναλλάκτες. Το δίκτυο που προκύπτει θεωρείται το τελικό δίκτυο το οποίο βελτιστοποιεί το κόστος. Πιο κάτω παρουσιάζεται η στρατηγική σύνθεσης του δικτύου εναλλακτών.



Διάγραμμα 2.18: Στρατηγική Σύνθεσης Δικτύου εναλλακτών

## 2.3 Μαθηματικός προγραμματισμός σχεδιαστικών προβλημάτων

Στα καθήκοντα των μηχανικών σημαντικό κομμάτι αποτελεί η λήψη αποφάσεων. Για την επίτευξη βιώσιμης ανάπτυξης είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός διεργασιών, προϊόντων και πολλών άλλων πολύπλοκων συστημάτων τα οποία πρέπει να τηρούν μία πληθώρα κριτηρίων ώστε να εναρμονίζονται με την έννοια της βιωσιμότητας. Για την επίτευξη του στόχου αυτού πρέπει να μπορούν να λαμβάνουν τις βέλτιστες αποφάσεις ανάμεσα από μια τεράστια γκάμα επιλογών που συνήθως τα αποτελέσματα αυτών χρίζουν αβεβαιότητας.

Τα προαναφερόμενα είναι προβλήματα με πολλές πτυχές και ευαίσθητους συμβιβασμούς μεταξύ διαφορετικών επιλογών. Υπάρχουν πολλά επίπεδα στα οποία η λήψη αποφάσεων είναι άκρως σημαντική, όπως ο σχεδιασμός εγκαταστάσεων, για την εύρεση του βέλτιστου μεγέθους και των λειτουργικών συνθηκών, η σύνθεση διεργασιών, ο υπολογισμός παραμέτρων, ο βέλτιστος έλεγχος και ο μοριακός σχεδιασμός.

Η σύνθεση διεργασιών στη θεωρία της οποίας βασίζεται και η συγκεκριμένη εργασία, αποτελεί τη μετατροπή μιας αφηρημένης περιγραφής σε κάτι πιο

συγκεκριμένο μέσω της εξέτασης εναλλακτικών λύσεων. Όπως είπε ο κύριος Χ.Α. Φλούδας: «Η σύνθεση διεργασιών αποτελεί τη συστημική ανάπτυξη του διαγράμματος ροής μιας διεργασίας στο οποίο οι διαθέσιμες πρώτες ύλες μετατρέπονται στα επιθυμητά προϊόντα και ταυτόχρονα τηρούνται κάποια κριτήρια όπως τα μέγιστα έσοδα ή ελάχιστα κόστη, ενεργειακή απόδοση, και καλή λειτουργικότητα».[12]

Η περιπλοκότητα των πιο πάνω προβλημάτων καθιστά σημαντική την κατανόηση της λήψης αποφάσεων και την αναγκαιότητα υιοθέτησης και ανάπτυξης συστηματικών εργαλείων για την επίλυσή τους. Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις όπως η ευρετική, η ιεραρχική λήψη αποφάσεων και η μαθηματική βελτιστοποίηση.

Η μαθηματική βελτιστοποίηση παίζει σημαντικό ρόλο στην λήψη αποφάσεων και μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση του σχεδιαστικού προβλήματος γιατί συνήθως η μετάφραση ενός προβλήματος στη μαθηματική γλώσσα προσπερνάει ασάφειες και δίνει συγκεκριμένο σκοπό.

## 2.3.1 Χαρακτηριστικά μαθηματικού προγραμματισμού

Αρχικά, πρέπει να αναφερθεί ότι ο όρος «προγραμματισμός» δεν έχει την έννοια του «προγραμματισμού ηλεκτρονικών υπολογιστών» αλλά αυτήν του «σχεδιασμού. Η μορφή του μαθηματικού προβλήματος αναγράφεται στην Εικόνα 2.1:

Minimise	$f(oldsymbol{x})$	Objective function
subject to	h(x) = 0	Equality Constraints
	$oldsymbol{g}(oldsymbol{x}) \leq 0$	Inequality Constraints
	$x\in X\subseteq \mathbb{R}^n$	

Εικόνα 2.1: Μορφή Προβλήματος Βελτιστοποίησης

Κάθε πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού αποτελείται από μεταβλητές, παραμέτρους, περιορισμούς και την αντικειμενική συνάρτηση. Οι μεταβλητές είναι τα δομικά στοιχεία του προβλήματος για τις οποίες θα προσδιοριστούν οι καλύτερες δυνατές τιμές. Για το λόγο αυτό συχνά αναφέρονται και ως μεταβλητές ελέγχου ή μεταβλητές απόφασης. Οι **παράμετροι** είναι τα δεδομένα του προβλήματος και συγκεκριμένα στη μοντελοποιημένη μορφή του προβλήματος είναι πραγματικοί αριθμοί. Οι **περιορισμοί** είναι οι σχέσεις 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. [13], [14]

Όπως φαίνεται στο πιο κάτω Διάγραμμα 2.19 η εφικτή περιοχή είναι το σύνολο των εφικτών λύσεων:



Διάγραμμα 2.19: Περιοχή εφικτών λύσεων

Η εφικτή λύση είναι η τιμή του διανύσματος των μεταβλητών η οποία ικανοποιεί τους περιορισμούς:

$$O\pi o lo \delta \eta \pi o \tau \varepsilon \ \{ x \in \mathbb{R}^n \ | \ h(x) = 0, \qquad g(x) \le 0 \}$$

$$(2.17)$$

Η βέλτιστη λύση είναι μία εφικτή λύση η οποία παρέχει βέλτιστη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση. Για ελαχιστοποίηση του προβλήματος, η βέλτιστη λύση είναι οποιοδήποτε:

$$x^* \epsilon F: f(x^*) \le f(x), \ \forall x \epsilon F$$
(2.18)

#### Τοπικό και ολικό βέλτιστο

Η λύση του μαθηματικού προγραμματισμού καταλήγει σε ένα βέλτιστο διάνυσμα των μεταβλητών που ικανοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση. Εάν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η ελάχιστη για όλες τις τιμές του διανύσματος των μεταβλητών στην εφικτή περιοχή τότε το βέλτιστο διάνυσμα θεωρείται παγκόσμιο βέλτιστο. Ενώ, εάν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ικανοποιείται για τις τιμές του διανύσματος που είναι γειτονικές του βέλτιστου τότε θεωρείται τοπικό βέλτιστο.

## Η έννοια της κυρτότητας

Η έννοια της κυρτότητας είναι σημαντική στα προβλήματα μαθηματικού προγραμματισμού καθώς μία κυρτή συνάρτηση διαθέτει ένα παγκόσμιο ελάχιστο. Πρέπει να σημειωθεί ότι η κυρτότητα είναι μία επαρκής κατάσταση για τη μοναδικότητα του βέλτιστου. Για να θεωρείται μία εφικτή περιοχή κυρτή τότε πρέπει οι περιορισμοί ισότητας h(x), να είναι γραμμικοί και οι ανισότητες g(x) να είναι κυρτές συναρτήσεις.

Μία συνάρτηση *f*(*x*) είναι κυρτή στην περιοχή R, αν και μόνο αν για κάποιο από τα δύο διαφορετικά *x*<sub>1</sub>, *x*<sub>2</sub> που βρίσκονται στην ίδια περιοχή ισχύει:

 $f(ax_1 + (1 - a)x_2) \le af(x_1) + (1 - a)f(x_2), \forall a \in [0,1]$  (2.19) Н тіо πάνω ανισότητα ονομάζεται ανισότητα του Jensen και στην πιο γενική της μορφή δηλώνει ότι ο κυρτός μετασχηματισμός ενός μέσου είναι μικρότερος ή ίσος με τον μέσο που εφαρμόζεται μετά τον κυρτό μετασχηματισμό.

Έλεγχος της κυρτότητας πραγματοποιείται μέσω της εύρεσης των παραγώγων δεύτερης τάξης καθώς είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με τις κυρτές ιδιότητες της. Ο πίνακας με τις παραγώγους δεύτερης τάξης της συνάρτησης f(x) ονομάζεται Χεσσιανός πίνακας και συμβολίζεται με H(x). Ο Χεσσιανός πίνακας είναι πάντα συμμετρικός.

$$H(x_{1}, x_{2}) = \nabla^{2} f(x_{1}, x_{2}) = \begin{bmatrix} \frac{\theta^{2} f(x_{1}, x_{2})}{\theta x_{1}^{2}} & \frac{\theta^{2} f(x_{1}, x_{2})}{\theta x_{1} \theta x_{2}} \\ \frac{\theta^{2} f(x_{1}, x_{2})}{\theta x_{1} \theta x_{2}} & \frac{\theta^{2} f(x_{1}, x_{2})}{\theta x_{2}^{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & 2H_{22} \end{bmatrix}$$
(2.20)

## 2.3.2 Ταξινόμηση των προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού

Ενώ η δομή των προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού διατηρούν τη μορφή που αναφέρθηκε πιο πάνω και συγκεκριμένα χρησιμοποιείται η σύμβαση της ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης, η μαθηματική δομή της αντικειμενικής συνάρτησης, η μαθηματική δομή της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο θα επιλυθεί το πρόβλημα». Όταν το πρόβλημα που βελτιστοποιείται είναι σχεδιαστικό τότε το μοντέλο της διεργασίας αποτελείται από εξισώσεις που εξάγονται από ισοζύγια μάζας και θεωρήματα ή εξισώσεις που συσχετίζονται με πειραματικά δεδομένα. Η περιπλοκότητα του μοντέλου και το απαιτούμενο επίπεδο λεπτομέρειας προσδιορίζουν το είδος των εξισώσεων που πρέπει να επιλυθούν [13] [14] [12].

Οι κύριες κατηγορίες προβλημάτων είναι:

- i. Γραμμικός προγραμματισμός (LP), όπου η αντικειμενική συνάρτηση f(x)είναι γραμμική και οι περιορισμοί h(x) και g(x) είναι γραμμικές συναρτήσεις.
- ii. Μη γραμμικός προγραμματισμός (NLP), όπου τουλάχιστον μία συνάρτηση του προβλήματος είναι μη γραμμική. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες μη γραμμικού προγραμματισμού και ανάλογες τεχνικές.
- iii. Μεικτός ακέραιος (γραμμικός ή μη γραμμικός) προγραμματισμός (MILP,
   MINLP), όπου τουλάχιστον ένα υποσύνολο του διανύσματος των μεταβλητών
   αποτελείται από δυαδικές ή ακέραιες μεταβλητές.

## Γραμμμικός Προγραμματισμός

Γραμμικός Προγραμματισμός είναι η διαδικασία εύρεσης μιας βέλτιστης λύσης μιας γραμμικής συνάρτησης, η οποία είναι συμβατή με ένα πεπερασμένο σύνολο γραμμικών ανισοτήτων. Ο γραμμικός προγραμματισμός ασχολείται με τη σχεδίαση των δραστηριοτήτων του συστήματος που περιγράφει για να προκύψει το άριστο αποτέλεσμα. 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 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.

Ακολούθως, είναι σημαντικό να εξεταστούν οι απαιτούμενες προϋποθέσεις για την εφαρμογή του γραμμικού προγραμματισμού σε ένα οποιοδήποτε πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού. Αυτές είναι που περιορίζουν γενικά το φάσμα των δυνατοτήτων εφαρμογής του γραμμικού προγραμματισμού και είναι η γραμμικότητα (αναλογικότητα και προσθετικότητα), η διαιρετότητα, η βεβαιότητα (προσδιοριστικότήτα) και η μονοδιάσταση.

## Μη γραμμικός Προγραμματισμός

Μη γραμμικός προγραμματισμός συναντάται όταν τουλάχιστον μία συνάρτηση του προβλήματος είναι μη γραμμική. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες μη γραμμικού προγραμματισμού και ανάλογες τεχνικές επίλυσης.

Ένα μη γραμμικό πρόβλημα χωρίς περιορισμούς ψάχνει το ελάχιστο μιας μη γραμμικής συνάρτησης f(x), n πραγματικών μεταβλητών  $x = (x_1, x_2, ..., x_n)$  και δηλώνεται όπως φαίνεται πιο κάτω:



Μη γραμμικά προβλήματα χωρίς περιορισμούς εμφανίζονται συχνά σε μερικές επιστήμες αλλά και σε μηχανικές εφαρμογές. Από ταυτόχρονη επίλυση μη γραμμικών εξισώσεων σε προβλήματα όπως η χημική ισορροπία μέχρι τον προσδιορισμό παραμέτρων και την ταυτοποίηση προβλημάτων.

Οι αναγκαίες συνθήκες βελτιστοποίησης που πρέπει να υπάρχουν αναφέρονται στο βέλτιστο σημείο, δηλαδή στο ελάχιστο, και είναι πρώτης και δεύτερης τάξης.

1<sup>ης</sup> τάξης συνθήκες:

Έστω ότι η f(x) είναι παραγωγίσιμη συνάρτηση στο  $R^n$  στο βέλτιστο σημείο και για τοπικό βέλτιστο  $x^*$  ισχύει:

$$\nabla f(x^*) = 0 \tag{2.21}$$

2<sup>ης</sup> τάξης συνθήκες:

Έστω ότι η f(x) είναι δύο φορές συνεχώς παραγωγίσιμη συνάρτηση στο  $R^n$  στο βέλτιστο σημείο και για τοπικό βέλτιστο ισχύουν τα ακόλουθα:

i. 
$$\nabla f(x^*) = 0$$

ii.

 $H(x^*) > 0$  και ημιπροσδιορισμένος;  $y^T H(x^*) y \ge 0, \forall y \in \mathbb{R}^n$ , τότε συνάρτηση f(x) παρουσιάζει τοπικό ελάχιστο στο  $x^*$ 

Μέσω του πιο κάτω γραφήματος είναι φανερό πως υπάρχει ανάγκη και για τις δύο αναγκαίες συνθήκες. Ο Χεσσιανός πίνακας πρέπει να είναι θετικά ορισμένος για όλα τα μη μηδενικά y.



Διαγραμμα 2.20: Χαρακτηριστικα μεγιστα και ελαχιστα μη γραμμικου προγραμματισμού

#### Μεικτός ακέραιος προγραμματισμός

Η γενική δομή ενός μεικτού ακέραιου προβλήματος δίνεται πιο κάτω:

$$\min_{x,y} \quad f(x,y) \tag{2.22}$$

s.t 
$$h(x, y) = 0$$
 (2.23)

$$g(x,y) \le 0 \tag{2.24}$$

$$x \in \mathbb{R}^n$$
 (2.25)

$$y \in \{0,1\}^q \tag{2.26}$$

η

Το διάνυσμα της μεταβλητής *x* αντιπροσωπεύει τις συνεχείς αποφάσεις (ροές, μεγέθη εξοπλισμού, πιέσεις, θερμοκρασία, ενθαλπίες) και το διάνυσμα των μεταβλητών *y* αντιπροσωπεύει τις διακριτές αποφάσεις, δηλαδή την ύπαρξη ή όχι των μονάδων διεργασιών.

## Μεικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός (MILP)

Ο MILP χρησιμοποιείται συχνά στο κομμάτι του σχεδιασμού και του προγραμματισμού αλλά και στην ανάθεση εργασιών. Πληθώρα αποδοτικών αλγορίθμων υπάρχουν οι οποίοι έχουν την δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων με εκατομμύρια δυαδικές μεταβλητές. Οι αλγόριθμοι MILP εγγυόνται την ταυτοποίηση της καλύτερης λύσης του προβλήματος. Η γενική δομή ενός προβλήματος MILP είναι η ακόλουθη:

$$\min_{x,y} \quad c_x^T x + c_y^T y \tag{2.27}$$

$$s.t \qquad Ax + By \le 0 \tag{2.28}$$

$$x \ge 0 \tag{2.29}$$

$$y \in \{0,1\}^q$$
 (2.30)

Για την επίλυση των προβλημάτων MILP έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής 4 μέθοδοι:

- i. Brute Force Approach
- ii. Relaxation and Rounding Approach
- iii. Branch-and-Bound Techniques
- iv. Cutting-Plane Algorithms

Η μέθοδος **Brute Force Approach** βασίζεται στην ολοκληρωμένη απαρίθμηση όλων των συνδυασμών των δυαδικών μεταβλητών. Όταν οι μεταβλητές καθοριστούν, τότε το πρόβλημα που απομένει είναι γραμμικό και μπορεί να επιλυθεί είτε με τη μέθοδο Simplex είτε με τη μέθοδο εσωτερικού σημείου. Το παγκόσμιο βέλτιστο προκύπτει μετά από σύγκριση των λύσεων του γραμμικού προγραμματισμού. Η μέθοδος **Relaxation and Rounding Approach** βασίζεται στη μετατροπή του προβλήματος από MILP σε LP μέσω «χαλάρωσης» ή αλλιώς αφαίρεσης των συνθηκών ακεραιότητας στις y μεταβλητές, επιτρέποντας τους έτσι να παίρνουν ελεύθερα τιμές μεταξύ 0 και 1, και καθιστώντας το πρόβλημα γραμμικό.

Η Branch-and-Bound techniques χρησιμοποιεί ως βασική ιδέα τη στρατηγική διαίρει και βασίλευε για τη λήψη αποφάσεων με παραγωγή μερικών λύσεων και ελαχιστοποίηση των μη υποσχόμενων περιοχών στο χώρο της λύσης. Στην περίπτωση που κάποιες δυαδικές μεταβλητές καθορίζονται, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί το πλεονέκτημα των ιδιοτήτων που προσφέρει το γεγονός αυτό για να εξερευνήσει τον χώρο επίλυσης.

Οι αλγόριθμοι **Cutting-Plane** ξεκινούν με τις γραμμικές «χαλαρώσεις» του πραγματικού προβλήματος και σταδιακά μειώνεται η «χαλαρότητα» με αύξηση των γραμμικών περιορισμών οι οποίοι στενεύουν την εφικτή περιοχή. Εφόσον έχει εισαχθεί ένας ικανοποιητικός αριθμός τε- ταγμένων ή τετμημένων γραμμών, η λύση του «χαλαρού» προβλήματος γίνεται ακέραιη και έτσι ίση με τη λύση του πραγματικού προβλήματος.

# Μεικτός ακέραιος μη γραμμικός προγραμματισμός (MINLP)

Πολλά φυσικά φαινόμενα και μονάδες επεξεργασίας περιγράφονται καλύτερα με μη γραμμικά μοντέλα, ενώ η δομή μοντέλων γενικού διαγράμματος διεργασιών ή δικτύων ειδικών μονάδων μπορούν χρήσιμα να παρουσιαστούν μέσω του γενικού MINLP.

Προβλήματα αυτού του τύπου αντιμετωπίζουν δύο ειδών δυσκολίες. Τη συνδυαστική φύση του προβλήματος που προκύπτει από την παρουσία των δυαδικών μεταβλητών και την παρουσία τοπικού ελαχίστου στην περίπτωση που οι μη γραμμικές εξισώσεις είναι μη κυρτές.

Για την επίλυση των προβλημάτων MILNP έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής 3 μέθοδοι:

i. Branch-and-Bound Approaches

- ii. Generalised Benders Decomposition (GBD)
- iii. Outer -Approximation algorithm

# 2.4 **Υπερδομές**

Στη σύνθεση διεργασιών λαμβάνονται κυρίως διακριτές αποφάσεις, άρα η αλγοριθμική απεικόνιση πρέπει να αντιπροσωπεύει μαθηματικά αυτές τις αποφάσεις. Για τη μοντελοποίηση τέτοιων συστημάτων είναι σημαντική η ταυτοποίηση όλων των πιθανών διαμορφώσεων του δικτύου. Μία υπερδομή είναι η απεικόνιση που περιέχει όλα τα εναλλακτικά σενάρια ενός προβλήματος. Η απεικόνιση γίνεται μέσω μοντέλου το οποίο συνδυάζει τα φυσικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος μέσω λογικών σχέσεων εκφρασμένα σε αλγεβρικές εξισώσεις. Για την εύρεση των βέλτιστων διακριτών και συνεχών αποφάσεων πρέπει να επιλυθεί το γενικό πρόβλημα.

Μια υπερδομή μπορεί να παραχθεί είτε για ομογενή είτε για ετερογενή συστήματα και γενικά βασίζεται στις γνώσεις διεργασιών, ευρετικών και θερμοδυναμικής. Ο σχηματισμός της υπερδομής πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή καθώς το βέλτιστο σημείο που θα βρεθεί καθορίζεται από τις εναλλακτικές που δόθηκαν στην υπερδομή. Η αποδοτικότητα των αλγορίθμων βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται είναι εξαιρετικά εξαρτημένη από την μαθηματική απεικόνιση της υπερδομής.

Μαθηματική μοντελοποίηση υπερδομής αποτελείται από προτεινόμενες λογικές σχέσεις, αλγεβρικές εξισώσεις, δυαδικές και ακέραιες μεταβλητές.
# 3 Κεφάλαιο:

Διαθέσιμες Τεχνολογίες και Προκλήσεις

## 3.1 Μελέτες για δίκτυα νερού και ενέργειας

Οι μελέτες που ασχολούνται με την ελαχιστοποίηση νερού και ενέργειας για την διαμόρφωση ενός ενιαίου δικτύου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αυτές που χρησιμοποιούν γραφικές μεθόδους κόμβου ανάσχεσης και στις μεθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού.

Οι μεθοδολογίες που αναπτύσσονται ασχολούνται με την εύρεση στρατηγικών επίλυσης οι οποίες συνδιάζουν υπάρχουσες τεχνολογίες για την ελαχιστοποίηση του νερού και της ενέργειας διαδοχικά ή ταυτόχρονα. Στις «διαδοχικές» μεθοδολογίες, πρώτα προσδιορίζεται η ελάχιστη κατανάλωση νερού, ενώ στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται ενεργειακή ολοκλήρωση και προσδιορίζεται το δίκτυο εναλλακτών. Οι «ταυτόχρονες» μεθοδολογίες, πραγματοποιούν ελαχιστοποίηση νερού και ενέργειας σε ένα στάδιο.

Στη συνέχεια γίνεται μία σύντομη παρουσίαση προγενέστερων μελετών με ιστορική σειρά ανάλογα με το είδος της μελέτης.

### 3.1.1 Γραφικές Μέθοδοι Κόμβου Ανάσχεσης

Δύο ερευνητικά κέντρα ξεκίνησαν να ασχολούνται με το συγκεκριμένο θέμα:

- 1. Texas A&M University
- 2. Το κέντρο ολοκλήρωσης διεργασιών του Πανεπιστημίου Μαντσεστερ Ινστιτούτο Επιστήμης και Τεχνολογίας (Savulescu and Smith, 1998) [15].

Αρχικά, ενώ για πολλά χρόνια δεν είχε παρατηρηθεί, έρευνες στο πρόβλημα κατανομής νερού οδήγησαν στην συνειδητοποίηση ότι η ενεργειακή ολοκλήρωση

επηρεάζει το συγκεκριμένο πρόβλημα και ίσως να αποτελεί το κλειδί στην επίλυση του. Προς τα τέλη της δεκαετίας του 90' η έρευνα των Savelski και Bagajewicz το 1997 [16] ασχολήθηκε με το πρόβλημα παρουσιάζοντας την ύπαρξη αντισταθμίσεων μεταξύ του νερού και της ενέργειας.

Στις αρχικές έρευνες που ασχολούνται με τη μη ισοθερμοκρασιακή ανάμιξη στη σύνθεση δικτύων νερού επισημάνθηκε η σημαντικότητα της ταυτόχρονης αντιμετώπισης του νερού και της ενέργειας. Πρώτη προσπάθεια σχεδιασμού ενός ενεργειακά αποδοτικού δικτύου νερού έγινε από τους Savulescu et al. το 1998 [15]. Παρουσίασαν για πρώτη φορά την εργασία τους στο αιτήσιο συνέδριο του οργανισμού AICHE με τίτλο "Simultaneous energy and water minimisation". Η δουλειά περιελάμβανε την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της ενέργειας και του νερού με τη χρήση των μεθόδων κόμβου ανάσχεσης.

Εισήγαγαν το δισδιάστατο διάγραμμα πλέγματος (TDGD) με στόχο να εξεταστεί η ταυτόχρονη επαναχρησιμοποίηση νερού και η ανάκτηση θερμότητας στο επίπεδο του σχεδιασμού. Ένα από τα σημαντικότερα συμπεράσματα που εξάχθηκε από τη συγκεκριμένη έρευνα ήταν το γεγονός ότι απαιτείται μια συστηματική μεθοδολογία ώστε το πρόβλημα ταυτόχρονης ελαχιστοποίησης του νερού και της ενέργειας να αντιμετωπιστεί. Και αυτό εξαιτίας των περίπλοκων αντισταθμίσεων που δημιουργούνται μεταξύ της κατανάλωσης νερού, της κατανάλωσης ενέργειας αλλά και της πολυπλοκότητας του σχεδιασμού.

Κάποια χρόνια αρχότερα οι ίδιοι εξέλιξαν την έρευνά τους συμβάλλοντας με δύο άρθρα στον τομέα της ταυτόχρονης ελαχιστοποίησης του νερού και της ενέργειας. Ασχολήθηκαν αρχικά με συστήματα στα οποία δεν επιτρέπεται επαναχρησιμοποίηση νερού [17] και στη συνέχεια με συστήματα που επιτρέπεται μέγιστη επαναχρησιμοποίηση [1]. Στις συγκεκριμένες μελέτες ερευνήθηκαν εξονυχιστικά η άμεση και έμμεση ανάκτηση θερμότητας.

Η μεθοδος που χρησιμοποιούν είναι διαδοχική, αποτελείται από το στάδιο της στοχοποίησης και απο το στάδιο του σχεδιασμού. Υπολογίζονται το ελάχιστο φρέσκο νερό και ο στόχος ελάχιστης κατανάλωσης βοηθητικών παροχών. Από την έρευνα, εξάγεται επίσης το συμπέρασμα ότι επιτρέποντας άμεση ανάκτηση

θερμότητας με ανάμιξη των ρευμάτων νερού μειώνεται ο αριθμός των εναλλακτών στο δίκτυο με την ενεργειακή κατανάλωση να αυξάνεται. Εν αντιθέσι, η έμμεση ανάκτηση θερμότητας μπορεί να ανακτήσει μεγαλύτερες ποσότητες θερμότητας καταλήγοντας όμως σε δίκτυο με περισσότερους εναλλάκτες. Πιο κάτω φαίνεται διαγραμματικά η μεθοδολογία που χρησιμοποιούν.



Διάγραμμα 3.2: Σχεδιασμός Δικτύου

Τα επόμενα χρόνια λίγες ήταν οι μελέτες που αντιμετώπισαν το νερό και την ενέργεια γραφικά. Προσπάθειες για βελτίωση των γραφικών μεθόδων οδήγησαν σε μεθόδους που βελτιώνουν το κομμάτι της απεικόνισης της σχέσης συγκεντρώσεων και θερμοκρασίας. Τέτοιες προσπάθειες είναι το διάγραμμα ζυγοσταθμικής ενέργειας και νερού από τους Leewongtanawit et al. το 2009 [18] και τα διαγράμματα Θερμοκρασίας –Συγκέντρωσης από τους Martínez-Patiño J et al. το 2011 [19]. Επίσης, το διάγραμμα θερμού πλεονάσματος [20] το 2009 και η υπέρμετρη καμπύλη μάζας και ενέργειας [21] το 2011.

#### 3.1.2 Μεθοδολογίες μαθηματικού προγραμματισμού

Οι μαθηματικές μεθοδολογίες βελτιστοποίησης που αναπτύσσονται βασίζονται γύρω από την ανάπτυξη των μοντέλων Μεταφοράς και την ανάπτυξη των υπερδομών του δικτύου νερού και του δικτύου εναλλακτών.

Το μαθηματικό πρόβλημα που αναπτύσσεται συνήθως αντιμετωπίζει το πρόβλημα είτε διαδοχικά, είτε ταυτόχρονα. Η γενική διαδοχική διαδικασία με τη χρήση των μοντέλων Μεταφοράς και της υπερδομής του δικτύου των διεργασιών χωρίζεται σε τρία στάδια. Πρώτα, ελαχιστοποιείται η κατανάλωση θερμών και ψυχρών παροχών μέσω του γραμμικού μοντέλου Μεταφοράς (LP) και στη συνέχεια μέσω ενός μεικτού γραμμικού μοντέλου (MILP) υπολογίζεται ο ελάχιστος αριθμός εναλλακτών με σταθερή τη λύση του LP. Στο τελευταίο στάδιο, εφαρμόζεται ένα μη γραμμικό μοντέλο (NLP) από το οποίο προκύπτει η τελική διαμόρφωση του δικτύου.

Η ταυτόχρονη διαδικασία είναι μη κυρτού μεικτού μη γραμμικού προγραμματισμού (MINLP), ενώ η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως η ελαχιστοποίηση του συνολικού ετήσιου κόστους του δικτύου, στο οποίο συμπεριλαμβάνεται το λειτουργικό και το πάγιο κόστος. Η επίλυση αυτού του είδους της υπερδομής είναι ιδιαίτερα σύνθετη και πολύπλοκη γι'αυτό απαιτεί τη χρήση καινοτόμων στρατηγικών επίλυσης.

Οι πρώτες μελέτες που έγιναν, όπως παρουσιάστηκαν στην πρώτη πλήρη βιβλιογραφική ανασκόπηση από τους Bagajewicz et al. [22], αποτελούνταν από ένα διαδοχικό πρόβλημα όπου το δίκτυο νερού και το δίκτυο εναλλακτών υπολογίζονταν το ένα μετά το άλλο, ενώ πιο μετά αναπτύχθηκαν μεθοδολογίες που ελαχιστοποιούσαν ταυτόχρονα την κατανάλωση νερού και ενέργειας. Στη συγκεκριμένη μελέτη, παρουσιάστηκαν μοντέλα τα οποία στοχοποιούσαν το ελάχιστο νερό και τις ελάχιστες ποσότητες παροχών. Συνήθως η θερμή παροχή ελαχιστοποιείται για σταθερή ποσότητα φρέσκου νερού η οποία υπολογίζεται στο στάδιο στοχοποίησης του νερού. Στη συνέχεια, ακολουθεί το στάδιο σχεδιασμού του δικτύου εναλλακτών. Η συγχώνευση των δύο σταδίων μέχρι τότε δεν ακολουθούσε κάποια συστηματική διαδικασία αλλά μπορούσε να παράγει λιγότερο περίπλοκες διαμορφώσης δικτύου σε σχέση με τους Savulescu et al. [1] στο ίδιο πρόβλημα.

Οι Bogataj M. et al. [23] το 2008, χρησιμοποίησαν τη διαμόρφωση της υπερδομής του δικτύου εναλλακτών του Yee και Grossmann [9] ενώ επιτρέπουν την ανάμιξη και το διαχωρισμό των ρευμάτων και κατ' επέκταση τη μη ισοθερμορκασιακή ανάμιξη για τη μείωση του αριθμού των εναλλακτών. Η μεθοδολογία αποτελείται από δύο στάδια, το μη γραμμικό (NLP) μοντέλο υπερδομής του δικτύου διεργασιών και το μοντέλο των Yee και Grossmann [9] στο οποίο επιτρέπονται οι αναμίξεις. Τα αποτελέσματα του πρώτου μοντέλου αποτελούν αρχικοποιήσεις για την επίλυση του συνδιαστικού μοντέλου WN + HEN (MINLP), ενώ χαρακτηρίζονται τα ρεύματα σε θερμά και ψυχρά. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση της μεθοδολογίας των Bogataj et al [23].



Σχήμα 3.1: Σχηματική απεικόνιση του συνδιαστικού προβλήματος δικτύου νερού και δικτύου εναλλακτών

Το 2009, οι Leewongtanawit και Kim [18], συνδίασαν τα μοντέλα υπερδομής του δικτύου νερού, τα μοντέλα Μεταφοράς και την υπερδομή του δικτύου εναλλακτών [9]. Το συνολικό πρόβλημα που επιλύουν είναι μεικτού μη γραμμικού προγραμματισμού (MINLP), το οποίο αποδομείται σε δύο υποπροβλήματα, ένα μεικτού γραμμικού προγραμματισμού (MILP) και ένα μη γραμμικό (NLP) τα οποία επιλύονται σε μια επαναληπτική διαδοχική διαδικασία. Τα μοντέλα αυτά, χρησιμοποιούν λογική για τον υπολογισμό του αριθμού των θερμών και ψυχρών ρευμάτων. Εφόσον ο αριθμός των ρευμάτων είναι προκαθορισμένος έτσι και το μέγεθος του προβλήματος.

Το 2011, οι Liao Z et al. [24], πρότειναν μια συστηματική προσέγγιση σε στάδια για τη σύνθεση του δικτύου νερού και ενέργειας ενώ χρησιμοποίησαν τη διαμόρφωση της υπερδομής του δικτύου εναλλακτών του Yee και Grossmann [9]. Αρχικά, προτείνει μια διαδικασία για τον χαρακτηρισμό των θερμών και και των ψυχρών ρευμάτων και στη συνέχεια ακολουθούν τα στάδια της στοχοποίησης και του σχεδιασμού. Στο στάδιο της στοχοποίησης τα ζεύγη θερμών και ψυχρών ρευμάτων που θα εναλλάξουν θερμότητα προσδιορίζονται από ένα μεικτό γραμμικό μοντέλο (MILP), το οποίο είναι το ανεπτυγμένο μοντέλο μεταφοράς το οποίο αντιμετωπίζει την άμεση εναλλαγή και την έμμεση εναλλακτών σε στάδια [9], στην οποία εφαρμόζεται η υπερδομή του δικτύου εναλλακτών σε στάδια [9], στην οποία εφαρμόζονται διαχωρισμοί και αναμίξεις. Το συνολικό πρόβλημα μορφοποιείται ως μεικτό μη γραμμικο (MINLP). Απεικόνιση της προσέγγισης που εφαρμόζεται, φαίνεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Απεικόνιση της μεθοδολογίας που χρησιμοποιούν οι Liao Z et al.

Το 2013, οι Ahmetovic E. και Kravanja Z. [25] ανέπτυξαν μια μεθοδολογία η οποία αποτελείται από ένα μοντέλο υπερδομής για την ταυτόχρονη αντιμετώπιση του νερού και της ενέργειας. Η υπερδομή συνδυάζει το δίκτυο νερού και το δίκτυο εναλλακτών συνδέοντας τα θερμά και τα ψυχρά ρεύματα. Το δίκτυο νερού αναπτύχθηκε ώστε να επιτρέπεται άμεση και έμμεση εναλλαγή θερμότητας, ενώ το φρέσκο νερό και το νερό αποβλήτων μπορούν να αναμιχθούν ή να διαχωριστούν. Το πρόβλημα που επιλύεται είναι μη κυρτό μεικτό μη γραμμικό (MINLP) στο οποίο ελαχιστοποιούνται τα ετήσια συνολικά κόστη. Στο Σχήμα 3.3 απεικονίζεται το σύστημα τεσσάρων διεργασιών όπως μοντελοποιείται από τους Ahmetovic E. και Kravanja Z.[25].



Σχήμα 3.3: Απεικόνιση της υπερδομής που αναπτύσσουν οι Ahmetovic Ε.και Kravanja Ζ. το 2013

Το 2015 οι Liu et al. [26] μοντελοποίησαν μια νέα διαδικασία η οποία ολοκληρώνει ταυτόχρονα το νερό και την ενέργεια. Αρχικά, αναπτύσσεται ένα διαζευκτικό μοντέλο για τον υπολογισμό της βέλτιστης διαμόρφωσης του δικτύου διεργασιών, όπου το νερό και η ενέργεια ολοκληρώνονται μαζί σε ένα στάδιο. Με βάση το πρώτο μοντέλο κατασκευάζεται ένα λεπτομερές δίκτυο εναλλακτών το οποίο ικανοποιεί τον ενεργειακό στοχο του πρώτου σταδίου. Η διαδικασία χρησιμοποιεί τη μη ισοθερμοκρασιακή ανάμιξη των ρευμάτων για την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του φρέσκου νερού και της ενέργειας. Το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση προβλημάτων μεγάλης κλίμακας, ενώ η πολυπλοκότητα του δικτύου εναλλακτών απλοποιείται με την εφαρμογή των διαζευτικών μεταβλητών.

# 3.2 Προκλήσεις και εναλλακτική αντιμετώπιση

Με βάση τα πιο πάνω είναι φανερό ότι οι περισσότερες μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν την τελευταία δεκαετία ασχολούνται με τις υπερδομές του δικτύου νερού και του δικτύου εναλλακτών. Πολλές από αυτές μπορούν να εφαρμοστούν σε μεγάλης κλίμακας προβλήματα, παρόλαυτά, δομούν ιδιαίτερα πολύπλοκα μοντέλα τα οποία απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ.

Τα μεικτά μη γραμμικά προβλήματα (MINLP) που αναπτύσσονται είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα καθώς περιλαμβάνουν μη γραμμικότητες σε συνδυασμό με δυαδικές μεταβλητές. Είναι συνεπώς, δύσκολα επιλύσιμα μοντέλα, τα οποία συνήθως καταλήγουν σε μη βέλτιστες λύσεις, κάποιες φορές ούτε σε τοπικές. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό λοιπόν, να αναπτυχθούν μοντέλα απλοποιημένα τα οποία να έχουν εφαρμογή σε μεγάλης κλίμακας προβλήματα.

Επιπρόσθετα, τα μοντέλα υπερδομών που χρησιμοποιούνται δεν επιτρέπουν στο σχεδιαστή να ελέγχει το αποτέλεσμα παρά μόνο να καθοδηγεί τη βελτιστοποίηση προς κάποια κατεύθυνση. Το αποτέλεσμα συνήθως είναι τυχαίο, καταλήγωντας σε μια πιθανή διαμόρφωση του δικτύου η οποία μπορεί να ικανοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια. Σχεδόν πάντα, υπάρχουν πολλές διαμορφώσεις ενός δικτύου που να ικανοποιούν τον ίδιο στόχο, το θέμα είναι να βρεθεί η βέλτιστη για το ζητούμενο. Οι υπερδομές δύσκολα μπορούν να δώσουν ένα λογικό αποτέλεσμα καθώς δεν έχουν τη δυνατότητα να παίρνουν αποφάσεις βασισμένες σε ποιοτικές εκτιμήσεις. Επίσης, συνήθως στην προσπάθεια απλοποίησης του μοντέλου γίνονται πολλές υποθέσεις οι οποίες περιορίζουν το πρόβλημα απομακρύνοντας το από πραγματικές συνθήκες. Είναι ανάγκη λοιπόν, να αναπτυχθούν ισχυρές και αποτελεσματικές στρατηγικές επίλυσης.

Οι ντετερμινιστικές μεθοδολογίες θα πρέπει να εξελιχθούν περαιτέρω. Όπως έχει πει και ο Jezowski [27] η χρήση διαδοχικών τεχνικών αποικοδόμησης ή ο συνδυασμός διάφορων μετα-ευρετικών διαδικασιών όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι δυνατόν να αποφέρουν ελπιδοφόρα αποτελέσματα. Είναι λογικό λοιπόν με βάση τα πιο πάνω, να αναπτυχθεί μια μεθοδολογία η οποία να συνδυάζει τη θερμοδυναμική με το μαθηματικό προγραμματισμό. Μια συστηματική μεθοδολογία που να ξεπερνάει τα λάθη των προηγούμενων προσεγγίσεων. Για την επίτευξη του στόχου αυτού επιλέγεται η ανάπτυξη μιας διαδοχικής μεθοδολογίας η οποία να περιλαμβάνει τα θερμοδυναμικά μοντέλα Μεταφοράς και την υπερδομή του δικτύου νερού. Τα μοντέλα αυτά στοχοποιούν την ενέργεια και το νερό ενω παραμένουν απλά. Με μια κατάλληλη στρατηγική θα μπορούσαν να παρέχουν πιο σωστά και λογικά αποτελέσματα.

Το πρόβλημα του νερού και της ενέργειας, λοιπόν, επιλέχθηκε να αντιμετωπιστεί με έναν εναλλακτικό τρόπο σε σχέση με την κατεύθυνση της έρευνας τα τελευταία χρόνια. Η προσέγγιση αυτή εξελίσσει τα κλασικά μοντέλα Μεταφοράς για να τους δώσει τη δυνατότητα να συνδυαστούν με τα δίκτυα νερού δίνοντας ιδιαίτερη μνεία στη λογική πάνω στη οποία δομείται η σχέση του νερού και της ενέργειας.

# 4 Κεφάλαιο:

# Προτεινόμενη Μεθοδολογία

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για την αντιμετώπιση του προβλήματος εξοικονόμησης νερού και ενέργειας.

#### 4.1 Εναλλακτικός Ενεργειακός Καταρράκτης

Όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 3.3 η μεθοδολογία συνδυάζει τη θερμοδυναμική με το μαθηματικό προγραμματισμό. Επιλέχθηκε ο συνδυασμός των θερμοδυναμικών μοντέλων Μεταφοράς και της υπερδομής του δικτύου νερού, για την επίτευξη του στόχου αυτού. Η προσέγγιση αυτή εξελίσσει τα κλασικά μοντέλα Μεταφοράς και παράλληλα τους δίνει τη δυνατότητα να συνδυαστούν με τα δίκτυα νερού δίνοντας ιδιαίτερη μνεία στη λογική πάνω στη οποία δομείται η σχέση του νερού και της ενέργειας.

Ο συμβατικός ενεργειακός καταρράκτης του γραμμικού μοντέλου Μεταφοράς δεν είναι κατάλληλος για την αντιμετώπιση του συνδιαστικού προβλήματος ενέργειας και νερού. Ουσιαστικά είναι ένα εργαλείο το οποίο πραγματοποιεί ενεργειακή ολοκλήρωση στα ρεύματα ενός δικτύου ελαχιστοποιώντας την απαιτούμενη ενέργεια. Πραγματοποιεί όλες τις απαραίτητες εναλλαγές θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων του δικτύου και ολοκληρώνει ενεργειακά τα ρεύματα με την προσθήκη απαραίτητων φορτίων βοηθητικών παροχών.

Στη συνέχεια, το μεικτό γραμμικό μοντέλο Μεταφοράς υπολογίζει τον ελάχιστο αριθμό εναλλακτών που θα εγκατασταθούν στο δίκτυο. Ο αριθμός αυτός εκπροσωπεί το σύνολο των ζευγών θερμών και ψυχρών ρευμάτων που εναλλάσσουν θερμότητα και υπολογίζονται στο γραμμικό μοντέλο Μεταφοράς. Με βάση τον κανόνα του Euler, ο ελάχιστος αριθμός εναλλακτών σε ένα δίκτυο ισούται με τον αριθμό των ρευμάτων που συμμετέχουν μειωμένος κατά ένα. Είναι φανερό λοιπόν, ότι ο αριθμός των εναλλακτών που προκύπτει είναι αρκετά μεγάλος.

Δεν υπάρχει κάποια αλληλεπίδραση των στοιχείων του νερού στα μοντέλα αυτά ώστε να παράγεται ένα δίκτυο το οποίο να πετυχαίνει ταυτόχρονα ελάχιστο νερό και ελάχιστη ενέργεια. Κάτι τέτοιο είναι αναγκαίο στο πρόβλημα που μαίνεται να ανιτμετωπιστεί στην εργασία αυτή. Άρα, είναι σημαντικό τα μοντέλα αυτά να εξελιχθούν ώστε να μπορούν να επικοινωνούν με το δίκτυο των διεργασιών που χρησιμοποιούν νερό.

Για τη δημιουργία επικοινωνίας μεταξύ της υπερδομής του δικτύου νερού και των μοντέλων Μεταφοράς παρατηρήθηκε ότι ένας παράγοντας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και αποτελεί το σύνδεσμο στην επικοινωνία αυτή, είναι οι ροές των θερμών και ψυχρών ρευμάτων που λαμβάνουν μέρος στο γραμμικό μοντέλο Μεταφοράς. Μέχρι στιγμής, τα ρεύματα αυτά, εισάγονται στον ενεργειακό καταρράκτη με γνωστές ροές, θερμοκρασίες και θερμοχωρητικότητες, όπως αυτές προκύπτουν από το δίκτυο του νερού. Είναι λογικό λοιπόν, μεταβάλλοντας τις ροές των ρευμάτων αυτών υπάρχει η δυνατότητα χειρισμού τους, όπως και δημιουργείται ο επιθυμητός τρόπος επικοινωνίας με το μοντέλο της υπερδομής.

Κάθε ρεύμα της υπερδομής του δικτύου νερού ανάλογα με τη θερμοκρασία που ξεκινάει και τη θερμοκρασία που φτάνει ως ρεύμα του δικτύου νερού, χαρακτηρίζεται ως θερμό ή ως ψυχρό ρεύμα. Άρα, εφόσον υπάρχει αντιστοιχία μεταξύ των ρευμάτων των δύο μοντέλων, είναι δυνατόν οι τιμές των ρευμάτων του τελικού δικτύου νερού να εισάγονται στο γραμμικό μοντέλο Μεταφοράς ως αρχικές τιμές για τα ρεύματα στα οποία αντιστοιχούν. Το σημαντικό είναι να διατηρείται ο στόχος του νερού που υπολογίζεται από το δίκτυο της υπερδομής. Το άρθοισμα των ρευμάτων που ισούνται με το συνολικό φρέσκο νερό πρέπει να περιορίζονται ώστε ο στόχος του νερού να παραμένει σταθερός. Ένα άλλο χαρακτηριστικό του δικτύου της υπερδομής που πρέπει να εισαχθεί στο γραμμικό μοντέλο Μεταφοράς είναι τα ισοζύγια μάζας για κάθε διεργασία που λαμβάνει μέρος.

Το τελευταίο χαρακτηριστικό είναι οι επαναχρησιμοποιήσεις. Άλλωστε, με βάση τη μελέτη των Savulescu και Smith το 2005 [1], συμπαιρένεται ότι με τη μη

ισοθερμοκρασιακή ανάμιξη ο αριθμός των εναλλακτών στο δίκτυο μειώνεται. Επιτρέποντας επαναχρησιμοποίηση ενός ρεύματος από μια διεργασία σε μια άλλη πραγματοποιούνται μη ισοθερμοκρασιακές αναμίξεις μεταξύ των ρευμάτων. Πρέπει λοιπόν με κάποιο τρόπο να επιτρέπονται μη ισοθερμοκρασιακές αναμίξεις στο γραμμικό μοντέλο Μεταφοράς.

Αναμιγνύοντας δύο ρεύματα στον ενεργειακό καταρράκτη του γραμμικού μοντέλου μεταφοράς, τα οποία εισάγονται στο μοντέλο αυτό με μια θερμοκρασία εισόδου ώστε να φτάσουν σε μια θερμοκρασία εξόδου, προκύπτει ένα αναμίξιμο ρεύμα του οποίου η θερμοκρασία θα είναι ανάμεσα στις θερμοκρασίες εισόδου των δύο ρευμάτων από τα οποία προήλθε. Το ρεύμα αυτό θα πρέπει στη συνέχεια να εισάγεται στον ενεργειακό καταρράκτη και να ολοκληρώνεται μέχρι να φτάσει στον τελικό θερμοκρασιακό του στόχο. Είναι σημαντικό να αναφερθεί στο σημείο αυτό ότι τα ρεύματα που θα αναμιχθούν στο γραμμικό μοντέλο Μεταφοράς πρέπει να έχουν την ίδια θερμοκρασία εξόδου. Εφόσον, κάθε ρεύμα της υπερδομής του δικτύου νερού ανάλογα με τη θερμοκρασία που ξεκινάει και τη θερμοκρασία που φτάνει ως ρεύμα του δικτύου νερού, χαρακτηρίζεται ως θερμό ή ως ψυχρό ρεύμα, είναι δυνατόν να βρεθούν τα ρεύματα που καταλήγουν στις ίδιες θερμοκρασίες. Επίσης, η συγκεκριμένη απόφαση είναι λογική καθώς δύο ρεύματα αναμιγνύονται πριν την είσοδό τους στον ενεργειακό καταρράκτη είναι εύλογο το νέο ρεύμα να κατευθύνεται προς μια θερμοκρασία ώστε να ολοκληρωθεί ενεργειακά, αλλιώς γίνεται αναφορά για δημιουργία νέων ρευμάτων τα οποία δεν έχουν κάποια σχέση με τα ρεύματα του δικτύου νερού.

Εφόσον πλεόν αποφασίστηκε η ανάμιξη ρευμάτων, είναι λογικό να αποφασιστεί πως θα γίνεται η ανάμιξη και κάτω από ποιά κριτήρια. Ένα κριτήριο που έχει ήδη αναφερθεί είναι η ανάμιξη των ρευμάτων που έχουν την ίδια θερμοκρασία εξόδου. Αναμιγνύοντας ρεύματα στον ενεργεικό καταρράκτη είναι πιθανό τα νέα αναμίξιμα ρεύματα που δημιουργούνται να έχουν θερμοκρασίες που βρίσκονται στο συνολικό θερμοκρασιακό εύρος του καταρράκτη. Όπως είναι γνωστό ο ενεργειακός καταρράκτης λειτουργεί με τη θεώρηση των θερμοκρασιακών διαστημάτων, ενώ όλα τα ρεύματα ανατίθενται στα θερμοκρασικά διαστήματα που συμμετέχουν ανάλογα με τη θερμοκρασία εισόδου και εξόδου τους. Για τα

αναμίξιμα ρεύματα πρέπει οι θερμοκρασίες στις οποίες εισάγονται στον ενεργειακό καταρράκτη να έχουν κάποια θέση ανάμεσα στα θερμοκρασιακά διαστήματα. Είναι λογικό λοιπόν οι θερμοκρασίες αυτές να χαρακτηρίζονται ανάλογα σε ποιο θερμοκρασιακό διάστημα βρίσκονται ώστε να μπορέσει να λειτουργήσει φυσιολογικά το μοντέλο. Αναμιγνύοντας όλα τα ρεύματα μεταξύ τους ανά δύο με λόγο ροών 1:1, μπορούν να βρεθούν κάποιες από τις θερμοκρασίες στις οποίες είναι πιθανό να εισάγονται τα αναμίξιμα ρεύματα. Στο σημείο αυτό, πρέπει να αναφερθεί ότι για την απλότητα του μοντέλου δεν επιλέγονται όλες οι πιθανές θερμορκασίες στις οποίες μπορούν να αναμιχθούν τα ρεύματα αλλά κάποιες οι οποίες φαινομενικά μπορούν να αποφέρουν καλά αποτελέσματα.

Εφόσον προσδιορισθούν οι θερμοκρασιακοί στόχοι για τα αναμίξιμα ρεύματα πρέπει να ερευνηθούν οι λόγοι ροών των ρευμάτων που αναμιγνύονται. Είναι φανερό ότι για την απλοποίηση του μοντέλου είναι πιο εύκολο να υπολογιστούν οι λόγοι ροών για αναμίξεις ανα δύο ρεύματα. Καθώς είναι γνωστές οι πιθανές θερμοκρασίες στις οποίες θα αναμιχθούν τα ρεύματα αλλά και οι θερμοκρασίες εισόδου των ρευμάτων, μπορούν να βρεθούν οι λόγοι ροών για όλες τις πιθανές αναμίξεις σε όλους τους θερμοκρασιακούς στόχους. Οι θερμοκρασιακοί στόχοι είναι οι θερμοκρασίας αταρράκτη αλλά και οι νέοι θερμοκρασιακών διαστημάτων του ενεργειακού καταρράκτη αλλά και οι νέοι θερμοκρασιακοί στόχοι που επιλέγονται, όπως επεξηγήθηκε πιο πάνω. Στην περίπτωση που επιτρέπονται οι αναμίξεις ανά δύο και πάνω ρεύματα τότε θα ήταν ιδιαίτερα δύσκολος και περίπλοκος ο σχεδιασμός καθώς για τον προσδιορισμό των λόγων ροών φοών θα έπρεπε να συμπεριληφθούν διάφοροι συνδιασμοί λόγων ροών περιπλέκοντας το σχεδιαστικό πρόβλημα. Σε

Τέλος, πρέπει να γίνει λόγος για το ποια ρεύματα αναμιγνύονται. Στον ενεργειακό καταρράκτη του γραμμικού μοντέλου Μεταφοράς λαμβάνουν μέρος θερμά και ψυχρά ρεύματα. Θα μπορούσε να δίνεται η δυνατότητα στα θερμά να αναμιγνύονται μεταξύ τους, στα ψυχρά να αναμιγνύονται μεταξύ τους αλλά και στα θερμά να αναμιγνύονται μεταξύ τους, στα ψυχρά. Στην παρούσα εργασία, επιλέγεται σε πρώτο στάδιο η ανάμιξη θερμών με ψυχρά ρεύματα. Αυτό αποφασίστηκε διότι καθώς αναμιγνύονται, προσεγγίζουν το θερμοκρασιακό τους στόχο. Ένα θερμό

ρεύμα θα ψυχθεί ενώ ένα ψυχρό ρεύμα θα θερμανθεί. Σε δεύτερο στάδιο, ανάλογα με τα αποτελέσματα των μοντέλων μπορεί να γίνει λόγος για ανάμιξη των θερμών μεταξύ τους και των ψυχρών μεταξύ τους. Παρόλαυτά, πρέπει να αναφερθεί ξανά ότι οι ροές των ρευμάτων που θα αναμιχθούν, εξαρτώνται από τους λόγους ροών αλλά και από τα ισοζύγια μάζας.

Καθώς πλέον εισάγονται όλα τα πιθανά σενάρια για τα ρεύματα που θα αναμιχθούν, πρέπει με κάποιο τρόπο να περιορίζονται οι δυνητικές αναμίξεις. Έτσι, προστίθενται στο μοντέλο περιοριστικές ανισοτικές εξισώσεις που περιλαμβάνουν δυαδικές μεταβλητές. Με την εισαγωγή των δυαδικών μεταβλητών για μη συμφέρουσες αναμίξεις, η βελτιστοποίηση θα μηδενίζει τις συγκεκριμένες μεταβλητές ενώ αν τελικά επιλέγονται, οι μεταβλητές θα παίρνουν μονάδα. Το γεγονός έχει επιπτώσεις στο είδος του μοντέλου, το οποίο από γραμμικό (LP) ανάγεται σε μεικτό γραμμικό μοντέλο (MILP).

Για την κατανόηση της καινοτομίας στον καταρράκτη θα χρησιμοποιηθεί ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο παράδειγμα που αναπτύχθηκε από τους Savulescu και Smith [1]. Θα παρουσιαστεί λοιπόν το δίκτυο νερού που προκύπτει από την πιο πάνω έρευνα και στη συνέχεια θα παρουσιαστεί η μορφή του κλασσικού ενεργειακού καταρράκτη και η μορφή του εναλλακτικού όπως προτείνεται στην παρούσα εργασία. Τα δεδομένα του προβλήματος αναγράφονται στον πιο κάτω πίνακα.

Διεργασία	Cin (ppm)	Cout (ppm)	Tin(°C)	Tout(°C)	Μαζικό Φορτίο (g/s)		
1	0	100	40	40	2		
2	50	100	100	100	5		
3	50	800	75	75	30		
4	400	800	50	50	4		
Τin φρέσκου νερού, Tin = 20 °C							
Τουt φρέσκου νερού, Tout = 20 ℃							

Πίνακας	4.1: Δεδομένα	Προβλήματος
---------	---------------	-------------

Το δίκτυο που προκύπτει από τη μελέτη των Savulescu et al. [23] φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα:



Σχήμα 4.1 Δίκτυο Διεργασιών για παράδειγμα Savulescu et al.

Τα ρεύματα που συμμετέχουν στην ενεργειακή ανάλυση αναγράφονται στον πιο κάτω πίνακα:

Πίνακας 4.2: Ρεύματα που συμμετέχουν στην ενεργειακή ανάλυση για το παράδειγμα των Savulescu et al.

Ρεύμα	Tin(°C)	Tout(°C)	Είδος
Φρέσκο Νερό → Δ1	20	40	Ψ1
Φρέσκο Νερό → Δ2	20	100	Ψ2
Φρέσκο Νερό → Δ3	20	75	Ψ3
Από Δ1 → Δ3	40	75	Ψ4
Από Δ1 → Δ4	40	50	Ψ5
Από Δ1 → Νερό Αποβλήτων	40	20	Θ1
Από Δ2 → Νερό Αποβλήτων	100	20	Θ2
Από Δ3 → Νερό Αποβλήτων	75	20	Θ3
Από Δ4 → Νερό Αποβλήτων	50	20	Θ4
Από Δ2 → Δ3	100	75	Θ5
Από Δ2 → Δ4	100	50	Θ6

Η μορφή του κλασσικού ενεργειακού καταρράκτη παρουσιάζεται στο πιο κάτω σχήμα:



Σχήμα 4.2: Κλασικός Ενεργειακός καταρράκτης για παράδειγμα Savulescu et al.

Ενώ στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η μορφή του εναλλακτικού ενεργειακού καταρράκτη:



Σχήμα 4.3: Εναλλακτικός Ενεργειακός καταρράκτης για παράδειγμα Savulescu et al.

Στον κλασικό ενεργειακό καταρράκτη τα ρεύματα εφόσον χαρακτηριστούν με βάση το είδος τους εισέρχονται στο καταρράκτη με γνωστές θερμοκρασίες, θερμοχωρητικότητες και ροές. Εν αντιθέσι, στον εναλλακτικό ενεργειακό καταρράκτη οι ροές είναι μεταβλητές και εφόσον ο στόχος του νερού πρέπει να είναι σταθερός, ορίζονται ανάλογα οι ροές ψυχρών ρευμάτων που αντιστοιχούν στα ρεύματα φρέσκου νερού.

Όπως είναι φανερό από τα πιο πάνω σχήματα, η εναλλακτική μεθοδολογία εγγυάται μέιωση του αριθμού των ρευμάτων που λαμβάνουν μέρος στον ενεργειακό καταρράκτη. Θεωρώντας σταθερό το φρέσκο νερό, όπως άλλωστε φαίνεται και στο Σχήμα 4.3, είναι πιθανό να επιλεχθούν οι κατάλληλες αναμίξεις ώστε κάποια ρεύματα να φτάσουν στο θερμοκρασιακό τους στόχο μέσω μη ισοθερμοκρασιακής ανάμιξης, ενώ εφόσον οι ροές είναι μεταβλητές, κάποια ρεύματα αποκλίνονται τελείως. Στον εναλλακτικό ενεργειακό καταρράκτη συμμετέχει ένα λιγότερο ψυχρό ρεύμα. Αυτό σημαίνει πως δεν υπάρχει λόγος ένα μέρος της Διεργασίας 1 να αναμιγνυέται στην είσοδο της Διεργασίας 3. Το τελικό δίκτυο που προκύπτει είναι διαφορετικό σε σχέση με το αρχικό που φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Μια ανάμιξη δεν πραγματοποιείται ενώ οι ροές είναι διαφορετικές.

Επιπρόσθετα, είναι φανερό ότι επιλέγονται οι κατάλληλοι λόγοι ροών ώστε να επιτυγχάνεται πλήρης ολοκλήρωση των ρευμάτων μέσω μη ισοθερμοκρασιακής ανάμιξης. Είναι γι'αυτό που στο Σχήμα 4.3 τα ρεύματα που αναμιγνύονται εισάγονται απευθείας στις διεργασίες.

Είναι λοιπόν ξεκάθαρο ότι με τις αλλαγές που εφαρμόστηκαν στον κλασικό ενεργειακό καταρράκτη υπάρχει επικοινωνία μεταξύ του δικτύου νερού και του γραμμικού μοντέλου Μεταφοράς.

Στη συνέχεια εκτυλίσσεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για την ελαχιστοποίηση του νερού και της ενέργειας σε ένα δίκτυο.

# 4.2 Ανάπτυξη μεθολογίας που προτείνεται

Η ολοκληρωμένη μεθοδολογία που αναπτύσσεται για την ελαχιστοποίηση του νερού και της ενέργειας παρουσιάζεται στο πιο κάτω Σχήμα.



Σχήμα 4.4: Σχηματική απεικόνιση της μεθοδολογίας που προτείνεται

Η μεθοδολογία, αναπτύσσει ένα πρόβλημα αποικοδόμησης το οποίο συνδυάζει την υπερδομή του δικτύου νερού, τον ενεργειακό καταρράκτη όπως αναπτύχθηκε πιο πάνω και το μεικτό γραμμικό μοντέλο Μεταφοράς. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η διαδοχική προσέγγιση επίλυσης διαφέρει από τα συνήθη προβλήματα αποικοδόμησης. Ο συνήθης τρόπος χρησιμοποιεί ως πρωταρχικό πρόβλημα το μοντέλο κλασσικού ενεργειακού καταρράκτη, από το οποίο εξάγεται ο ενεργειακός στόχος, ενώ ακολουθεί η υπερδομή του δικτύου. Η μορφή που αναπτύσσεται εδώ είναι η αντίστροφη. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.4, πρώτα επιλύεται η υπερδομή του δικτύου διεργασιών και όλα τα πιθανά ρεύματα του δικτύου νερού χαρακτηρίζονται με βάση το είδος τους. Στη συνέχεια επιλύεται ο εναλλακτικός ενεργειακός καταρράκτης και εφόσον υπολογιστεί η ελάχιστη παροχή, οι αναμίξεις και οι ροές των ρευμάτων, τα αποτελέσματα του ενεργειακού καταρράκτη εισάγονται στο μεικτό γραμμικό μοντέλο μεταφοράς όπου υπολογίζεται ο ελάχιστος αριθμός εναλλακτών.

Αρχικά, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, επιλύεται το μοντέλο της υπερδομής του δικτύου νερού. Τα δεδομένα του μοντέλου είναι οι μέγιστες συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου των διεργασιών όπως υπολογίζονται από το ελάχιστο προφίλ νερού, το μαζικό φορτίο του ρυπαντή και οι θερμοκρασίες λειτουργίας των διεργασιών. Η μοντελοποίηση της υπερδομής περιλαμβάνει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς μεταξύ των διεργασιών ώστε να επιτευχθεί η σύνθεση ενός δικτύου που ελαχιστοποιεί το νερό. Για το λόγο αυτό στην είσοδο και έξοδο κάθε διεργασίας τοποθετούνται κόμβοι στους οποίους υπολογίζονται οι ροές που είναι πιθανό να εισέρχονται και να εξέρχονται από τις διεργασίες. Έτσι, σε κάθε κόμβο εισάγονται ισοζύγια μάζας. Επίσης, καθώς οι συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου των διεργασιών θεωρούνται μεταβλητές, για διευκόλυνση της επίλυσης, οι συγκεντρώσεις εξόδου σταθεροποιούνται στις μέγιστες συγκεντρώσεις εξόδου. Η επίλυση προσδιορίζει το ελάχιστο νερό και όλες τις μεταβλητές που συμμετέχουν στην τελική διαμόρφωση του δικτύου.

Καθώς η ελάχιστη κατανάλωση νερού έχει υπολογιστεί, πρέπει να θεωρηθεί σταθερή στο δεύτερο στάδιο της ελαχιστοποίησης της ενέργειας. Για τη λειτουργία του εναλλακτικού ενεργειακού καταρράκτη πρέπει να είναι γνωστά τα θερμά και ψυχρά ρεύματα που συμμετέχουν. Καθώς στον καταρράκτη πραγματοποιείται ενεργειακή ολοκλήρωση των ρευμάτων του δικτύου νερού, πρέπει να γίνει αντιστοίχηση όλων των πιθανών ρευμάτων του δικτύου νερού ανάλογα με το είδος τους. Για παράδειγμα ένα ρεύμα το οποίο εξέρχεται από μια διεργασία που λειτουργεί στους 100 °C και θα εισαχθεί σε μια διεργασία που λείτουργεί στους 50°C, σημαίνει ότι θα ψυχθεί, άρα θεωρείται θερμό ρεύμα. Αντίστοιχα ένα ρεύμα φρέσκου νερού που εισέρχεται σε μια διεργασία η οποία λειτουργεί σε θερμοκρασία 40 °C, τότε το ρεύμα αυτό θεωρείται ψυχρό. Τα ρεύματα που αντιστοιχούν στα ρεύματα φρέσκου νέρου ορίζονται με βάση τη λύση της υπερδομής. Οι υπόλοιπες ροές είναι ελεύθερες να προσδιοριστούν και περιορίζονται από τα ισοζύγια μάζας. Στο μοντέλο αυτό, δίνεται η ευκαιρία στα θερμά ρεύματα να αναμιγνύονται με τα ψυχρά. Ο στόχος είναι να επιλέγονται οι κατάλληλες αναμίξεις οι οποίες θα προϋποθέτουν ότι τα ρεύματα δεν συμμετέχουν στον ενεργειακό καταρράκτη και έτσι να ελαχιστοποιείται ο ενεργειακός στόχος αλλά και ο αριθμός των εναλλακτών. Είναι εύλογο λοιπόν, οι αναμίξεις που πραγματοποιούνται να έχουν ως γνώμονα τη διαμόρφωση του δικτύου. Οι επαναχρησιμοποιήσεις που υπολογίζονται από το δίκτυο νερού είναι αυτές που ικανοποιούν τους περιορισμούς συγκεντρώσεων για κάθε διεργασία. Επίσης, για να δοθεί η δυνατότητα ανάμιξης, τα ρεύματα χωρίζονται πριν την είσοδου τους στον καταρράκτη, ένα μέρος εισέρχεται στον ενεργειακό καταρράκτη και ένα άλλο αναμιγνύεται με ένα ψυχρό ρεύμα. Το νέο ρεύμα που δημιουργείται ανάλογα με το ποιός είναι ο θερμοκρασιακός του στόχος μπορεί να διαγράφεται τελείως από τον ενεργειακό καταρράκτη, μπορεί να είναι ένα νέο θερμό ρεύμα ή ένα νέο ψυχρό ρεύμα. Η επίλυση δίνει την ελάχιστη ποσότητα βοηθητικών παροχών που απαιτούνται, τις ροές των ρευμάτων και τις θερμότητες που εναλλάσσουν τα ρεύματα κατά μήκος του ενεργειακού καταρράκτη.

Εφόσον υπολογιστούν όλες οι θερμότητες που εναλλάσσουν τα ρεύματα κατά μήκος του ενεργειακού καταρράκτη, εισάγονται στο μεικτό γραμμικό μοντέλο Μεταφοράς το οποίο υπολογίζει τον ελάχιστο αριθμό εναλλακτών. Κάθε ζεύγος ρευμάτων που εναλλάσσει θερμότητα προϋποθέτει και την εγκατάσταση ενός εναλλάκτη. Το τελικό δίκτυο που φαίνεται στο Σχήμα 4.4 είναι ο συνδυασμός των λύσεων των τριών μοντέλων. Οι στόχοι νερού και ενέργειας ικανοποιούνται, ενώ το δίκτυο διαμορφώνεται ανάλογα με τις αναμίξεις που υπολογίζονται από το τρίτο μοντέλο.

Πιο κάτω παρουσιάζεται το πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού που επιλύεται στα επιμέρους βήματα από τα οποία αποτελείται.



Διάγραμμα 4.1: Διαγραμματική απεικόνιση Μεθοδολογίας

# 4.3 Αναλυτική Επεξήγηση επιμέρους σταδίων

#### 4.3.1 1° Στάδιο – Μοντέλο υπερδομής

Αρχικά, το πρώτο μοντέλο είναι αυτό της υπερδομής του δικτύου των διεργασιών. Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή των εξοικονομήσεων πρώτα υπολογίζονται οι απαιτήσεις σε φρέσκο νερό για κάθε διεργασία πριν την μοντελοποίηση της υπερδομής όπου επιτρέπονται επαναχρησιμοποιήσεις.

Θεωρείται ότι κάθε διεργασία καλύπτεται με φρέσκο νερό, άρα στο ρεύμα εισόδου κάθε διεργασίας δεν επιτρέπεται συγκέντρωση ρυπαντή. Το ελάχιστο νερό υπολογίζεται από το περιοριστικό προφίλ νερού, όπου η συγκέντρωση εισόδου στις διεργασίες θεωρείται μηδενική ενώ η συγκέντρωση εξόδου μέγιστη. Με δεδομένα και σταθερά τα μαζικά φορτία ρυπαντή για κάθε διεργασία, υπολογίζεται το ελάχιστο φρέσκο νερό που εισέρχεται στο πιο πάνω σύστημα. Από την εξίσωση

(4.1), υπολογίζονται οι ροές φρέσκου νερού που απαιτούνται για κάθε διεργασία, από το περιοριστικό προφίλ νερού για μηδενική συγκέντρωση εισόδου.

$$fw_i^{ini} = \frac{mc_i}{c_i^{out,max}}, \forall i$$
(4.1)

Όπου *fw<sup>ini</sup>*, είναι η απαιτούμενη ροή φρέσκου νερού για τη διεργασία i, *mc<sub>i</sub>* είναι το μαζικό φορτίο του ρυπαντή που απομακρύνεται από τη διεργασία i μέσω του νερού, *c<sup>out,max</sup>* είναι η μέγιστη συγκέντρωση εξόδου από τη διεργασία i.

Ο υπολογισμός του ελάχιστου φρέσκου νερού υπολογίζεται από την εξίσωση (4.2). Όπως είναι φανερό, το συνολικό φρέσκο νερό είναι το άθροισμα των απαιτούμενων ροών φρέσκου νερού που εισέρχονται σε κάθε διεργασία.

$$fwt^{ini} = \sum_{i=1}^{No} fw_i^{ini} , \forall i$$
(4.2)

Όπου, *fwt<sup>ini</sup>* είναι η συνολική ποσότητα φρέσκου νερού που εισέρχεται στο σύστημα των διεργασιών.

Στην περίπτωση που αναπτύσσεται εδώ, θεωρείται ότι στα ρεύματα εισόδου περιέχεται έστω και μια μικρή ποσότητα ρυπαντή ώστε να επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση νερού. Η υπερδομή που κατασκευάζεται περιέχει όλα τα ισοζύγια μάζας γύρω από τις διεργασίες και τους κόμβους που δημιουργούνται.

Πρώτού ξεκινήσει η επεξήγηση της μοντελοποίησης της υπερδομής με επαναχρησιμοποίηση νερού, είναι σημαντικό να επισημανθούν κάποια πράγματα που θα βοηθήσουν στην κατανόηση των εξισώσεων. Αρχικά, το σύνολο των διεργασιών για το οποίο αναπτύσσεται η υπερδομή θα αντιπροσωπεύεται με το σύνολο i.

Για την προσομοίωση της κατεύθυνσης κάθε ρεύματος, δηλαδή από ποια διεργασία προσφέρεται ροή επαναχρησιμοποίησης για κάλυψη της ζήτησης σε μια άλλη διεργασία, θεωρείται ότι η διεργασία-δότης αναφέρεται πρώτη, ενώ η διεργασία-δέκτης δεύτερη. Με άλλα λόγια, στην περίπτωση που ένα μέρος του ρεύματος εξόδου από τη διεργασία 2 θα καλύψει μέρος της ζήτησης της διεργασίας 1, τότε το ρεύμα επαναχρησιμοποίησης συμβολίζεται με *F*<sup>reuse</sup>.

Καθώς γίνεται αναφορά στη διεργασία 1 (i=1), για την προσομοίωση του ρεύματος επαναχρησιμοποίησης εισάγεται ένα επιπλέον σύνολο στο ίδιο μέγεθος με το i και αυτό είναι το ii. Στη περίπτωση που αναφέρθηκε πιο πριν το ρεύμα επαναχρησιμοποίησης θα είναι *F*<sup>reuse</sup> όπου ii=2 και i=1. Στο Διάγραμμα 4.2, φαίνονται τα παραπάνω σχηματικά.



Διάγραμμα 4.2: Επαναχρησιμοποίηση νερού από τη διεργασία i στη διεργασία ii

Η υπερδομή του συστήματος τεσσάρων διεργασιών φαίνεται πιο κάτω στο Διάγραμμα 4.3



Διάγραμμα 4.3: Υπερδομή δικτύου διεργασιών

Ξεκινώντας από αριστερά προς δεξιά το νερό που εισέρχεται από την πηγή στο σύστημα διαχωρίζεται μέσω ενός διαχωριστήρα στις διεργασίες του συστήματος. Το συνολικό νερό που εισέρχεται αποτελεί το άθροισμα του φρέσκου νερού που απαιτείται στις επιμέρους διεργασίες. Σχηματική αναπαράσταση του διαχωριστήρα φαίνεται στο Διάγραμμα 4.4.



Διάγραμμα 4.4: Διαχωριστήρας Φρέσκου νερού

Το ισοζύγιο μάζας γύρω από αυτόν τον κόμβο:

$$FW = \sum_{i=1}^{No} FW_i^{in} , \forall i$$
(4.3)

Όπου *FW* είναι το φρέσκο νερό που εισέρχεται στο σύστημα των διεργασιών και *FW*<sub>i</sub><sup>in</sup> το φρέσκο νερό που εισέρχεται στη διεργασία i.

Αντίστοιχα, από τη δεξιά πλευρά του διαγράμματος υπάρχει ένας αναμικτήρας. Κάποιο ποσό από τις ροές εξόδου των διεργασιών καταλήγει στο ρεύμα αποβλήτων. Στον αναμικτήρα εισέρχονται όλα τα ρεύματα εξόδου των διεργασιών που προορίζονται για αποβολή στο περιβάλλον. Το ισοζύγιο στο σημείο αυτό απεικονίζεται στο Διάγραμμα 4.5.



Διάγραμμα 4.5: Τελικός αναμικτήρας

Το ισοζύγιο μάζας γύρω από αυτόν τον κόμβο:

$$FWW = \sum_{i=1}^{No} FWW_i^{out} , \forall i$$
(4.4)

Όπου FWW είναι το συνολικό ρεύμα νερού που εξέρχεται από το σύστημα των διεργασιών και το FWW<sub>i</sub><sup>out</sup> αντιπροσωπεύει τη ροή νερού που εξέρχεται από τη διεργασία i πρός αποβολή στο περιβάλλον.

Επίσης, στον κόμβο πρέπει να σχηματιστεί και το μερικό ισοζύγιο συστατικού, εφόσον στην έξοδο κάθε διεργασίας η συγκέντρωση ρυπαντή δεν είναι μηδενική.

Καθώς το σύστημα σχηματίζεται για ένα ρυπαντή, που συνήθως είναι το COD (χημικά απαιτούμενο οξυγόνο) το ισοζύγιο φαίνεται πιο κάτω:

$$FWW \cdot c^{out,env} = \sum_{i=1}^{No} FWW_i^{out} \cdot C_i^{out} , \forall i$$
(4.5)

Όπου *C<sub>i</sub><sup>out</sup>* είναι η συγκέντρωση εξόδου του ρυπαντή από τη διεργασία i και *c<sup>out,env</sup>* είναι η συνολική συγκέντρωση εξόδου του ρυπαντή από το σύστημα. Ακολούθως, σχηματίζονται τα ισοζύγια μάζας γύρω από κάθε διεργασία. Όπως φαίνεται και στο πιο κάτω Διάγραμμα 4.6.



Διάγραμμα 4.6: Ισοζύγιο γύρω από τη διεργασία i

Όπως φαίνεται από την εξίσωση (4.6) η ροή εισόδου σε κάθε διεργασία ισούται με τη ροή εξόδου:

$$F_i^{in} = F_i^{out} , \forall i$$
 (4.6)

Όπου F<sub>i</sub><sup>in</sup> είναι η ροή εισόδου στη διεργασία i και F<sub>i</sub><sup>out</sup> είναι η ροή εξόδου από τη διεργασία i.

Ενώ με βάση την ισχύ της πιο πάνω υπόθεσης και υποθέτοντας ότι η πυκνότητα του ρεύματος είναι  $\rho = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , το μαζικό φορτίο του ρυπαντή που απομακρύνεται από τη διεργασία i μέσω του νερού ισούται με :

$$mc_i = F_i^{in} \cdot \left(C_i^{out} - C_i^{in}\right), \forall i$$
(4.7)

Όσον αφορά τη ροή εισόδου σε κάθε διεργασία *F*<sup>in</sup>, είναι φανερό από το Διάγραμμα 4.7 ότι προκύπτει μετά από πιθανή ανάμιξη φρέσκου νερού και νερού επαναχρησιμοποίησης από τις υπόλοιπες διεργασίες. Πιο κάτω παρουσιάζεται διαγραμματικά η ανάμιξη που πραγματοποιείται πριν από κάθε διεργασία.



Διάγραμμα 4.7: Αναμικτήρας πριν τη διεργασία i

Το συνολικό ισοζύγιο γύρω από τον κόμβο ανάμιξης πριν από κάθε διεργασία i με βάση το Διάγραμμα 4.7 είναι:

$$F_i^{in} = FW_i^{in} + \sum_{ii=1}^{No} F_{i,ii}^{reuse} , \forall i$$
(4.8)

Όπου *FW*<sup>in</sup> αντιπροσωπεύει το φρέσκο νερό που εισέρχεται στη διεργασία i και *F*<sup>reuse</sup> είναι το ρεύμα επαναχρησιμοποίησης από τη διεργασία ii στη διεργασία i.

Το μερικό ισοζύγιο συστατικού για το σημείο ανάμιξης i:

$$F_i^{in} \cdot C_i^{in} = \sum_{ii=1}^{No} F_{ii,i}^{reuse} \cdot C_{ii}^{out}, \forall i, ii$$
(4.9)

Όπου C<sub>ii</sub><sup>out</sup> είναι η συγκέτρωση εξόδου από τη διεργασία ii.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου από τη διεργασία i πρέπει να είναι μικρότερες ή ίσες με τις μέγιστες συγκεντρώσεις που υπολογίζονται από το περιοριστικό προφίλ νερού.

$$C_i^{in} \le c_i^{in,max}$$
,  $\forall i$  (4.10)

$$C_i^{out} \le c_i^{out,max}, \forall i$$
 (4.11)

Η ροή εξόδου από κάθε διεργασία διαχωρίζεται ώστε ένα μέρος να επαναχρησιμοποιείται στις διεργασίες του συστήματος και το υπόλοιπο απομακρύνεται από το σύστημα των διεργασιών. Η έξοδος από κάθε διεργασία φαίνεται στο Διάγραμμα 4.8.



Διάγραμμα 4.8: Διαχωριστήρας μετά τη διεργασία

Το συνολικό ισοζύγιο γύρω από τον κόμβο διαχωρισμού μετά από κάθε διεργασία i:

$$F_i^{out} = \sum_{ii=1}^{No} F_{i,ii}^{reuse} + FWW_i^{out}, \forall i, ii$$
(4.12)

Όπου *FWW*<sub>i</sub><sup>out</sup> αντιπροσωπεύει το νερό που εξέρχεται από τη διεργασία i και εισέρχεται στο ρεύμα αποβλήτων και *F*<sub>i,ii</sub><sup>reuse</sup> είναι το ρεύμα επαναχρησιμοποίησης από τη διεργασία i στη διεργασία ii.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στο συγκεκριμένο πρόβλημα δεν επιτρέπονται ανακυκλώσεις γύρω από διεργασίες. Για να αποφευχθούν οι περιπτώσεις ανακυκλώσεων εισάγεται στο μοντέλο η πιο κάτω εξίσωση.

Για την αποφυγή ανακυκλώσεων:

Aν 
$$i = ii$$
, τότε  $F_{i,ii}^{reuse} = 0$ ,  $\forall$  i, ii (4.13)

Το ποσοστό εξοικονόμησης νερού υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{TFW^{ini} - FW}{TFW^{ini}} * 100 = W^s$$
(4.14)

Η αντικειμενική συνάρτηση σχηματίζεται ώστε να μεγιστοποιούνται οι εξοικονομήσεις.

Στις πιο πάνω εξισώσεις (4.1) - (4.14) εκτός από τις γνωστές παραμέτρους εμφανίζονται οι ακόλουθες μεταβλητές:

W<sup>s</sup> = Το ποσοστό εξοικονόμησης νερού

FW = Το φρέσκο νερό που εισέρχεται στο σύστημα των διεργασιών μετά την βελτιστοποίηση

FWW = Το συνολικό νερό αποβλήτων που εξέρχεται από το σύστημα των διεργασιών μετά τη βελτιστοποίηση

FW<sub>i</sub><sup>ini</sup> = Το αρχικό φρέσκο νερό που απαιτείται από τη διεργασία i

TFW<sup>ini</sup> = Το συνολικό αρχικό φρέσκο νερό που απαιτείται από το σύστημα των διεργασιών

FW<sup>in</sup> = Το φρέσκο νερό που εισέρχεται στη διεργασία i μετά τη βελτιστοποίηση

FWW<sub>i</sub><sup>out</sup> = Το φρέσκο νερό που εξέρχεται στη διεργασία i μετά τη βελτιστοποίηση
 F<sup>reuse</sup><sub>i,ii</sub> = Το νερό που επαναχρησιμοποιείται από τη διεργασία i στη διεργασία ii μετά τη βελτιστοποίηση

 $F_i^{in} = H$ ροή εισόδου για κάθε διεργασία

F<sub>i</sub><sup>out</sup> = Η ροή εξόδου για κάθε διεργασία

 $C_i^{in} = \Sigma$ υγκέντρωση εισόδου της διεργασίας i

 $C_i^{out} = \Sigma$ υγκέντρωση εξόδου της διεργασίας i

#### 4.3.1.1 Χαρακτηρισμός ρευμάτων – νέοι θερμοκρασιακοί στόχοι – λόγοι ροών

Ο εναλλακτικός ενεργειακός καταρράκτης χρειάζεται κάποιες παραμέτρους και κάποια συγκεκριμένα σύνολα ώστε να μπορεί να λειτουργήσει. Αυτά τα προαπαιτούμενα είναι τα αποτελέσματα του μοντέλου της υπερδομής. Τα προαπαιτούμενα σύνολα είναι ο αριθμός των ψυχρών και θερμών ρευμάτων, ενώ οι προαπαιτούμενες παράμετροι, οι αρχικές και τελικές θερμοκρασίες κάθε ρεύματος.

Για την αύξηση των δυνατοτήτων του μοντέλου θεωρείται ότι όλα τα πιθανά ρεύματα του δικτύου υπερδομής λαμβάνουν μέρος. Για το χαρακτηρισμό των ρευμάτων συγκρίνεται το σημείο εκκίνησης και το σημείο τερματισμού ενός ρεύματος. Κάθε διεργασία, λοιπόν, έχει ένα ρεύμα εισόδου που προέρχεται από φρέσκο νερό και ένα ρεύμα εξόδου που προορίζεται για αποβολή στο περιβάλλον. Το ρεύμα φρέσκου νερού θα θερμανθεί στη θερμοκρασία της διεργασίας ενώ το ρεύμα αποβλήτων θα ψυχθεί στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Άρα, συμπεραίνεται ότι σε κάθε διεργασία μπαίνει ένα ψυχρό ρεύμα και εξέρχεται ένα θερμό. Για ένα δίκτυο τεσσάρων διεργασιών υπάρχουν 4 θερμά και 4 ψυχρά. Όσον αφορά τα ρεύματα επαναχρησιμοποίησης, ο χαρακτηρισμός τους εξαρτάται από ποιά διεργασία ξεκινάνε και σε ποια καταλήγουν. Από την εξίσωση (4.15) προκύπτει ο αριθμός των θερμών ή ψυχρών ρευμάτων λόγο επαναχρησιμοποίησης.

$$N^{str} = \frac{n \cdot (n-1)}{2}$$
(4.15)

Όπου *n* είναι ο αριθμός των διεργασιών. Για 4 διεργασίες, ο αριθμός των θερμών ή ψυχρών ρευμάτων που προκύπτουν από τα ρεύματα επαναχρησιμοποίησης είναι 10. Οπότε, αν συμπεριληφθούν όλα τα πιθανά σενάρια, τότε δημιουργούνται 10 θερμά και 10 ψυχρά ρεύματα.

Πρέπει να αναφερθεί ότι οι κόμβοι ανάμιξης δεν τοποθετούνται πριν την είσοδο της διεργασίας αλλά ακριβώς στη είσοδο. Αυτό εξηγεί την πιο πάνω θεώρηση. Κάθε ρεύμα χαρακτηρίζεται με βάση το που ξεκινάει και το που φτάνει.

Επιπρόσθετα, επιτρέποντας μη ισοθερμορκασιακή ανάμιξη στον ενεργειακό καταρράκτη, δημιουργείται η δυνατότητα επιλογής των ρευμάτων που θα αναμιχθούν όπως και περιορισμό στο φρέσκο νερό μέσω των ψυχρών ρευμάτων που αντιστοιχούν στα ρεύματα του δικτύου. Το τελικό δίκτυο μετά την επίλυση της υπερδομής μπορεί επίσης να βοηθήσει μέσω των επαναχρησιμοποιήσεων. Οι επαναχρησιμοποιήσεις ουσιαστικά μπορούν να αποτελέσουν ενδεικτικές αναμίξεις, οι οποίες τηρούν τα όρια συγκεντρώσεων.

Επίσης, οι θερμοκρασίες στις οποίες εισάγονται τα νέα ρεύματα προδιορίζονται από πριν. Οι νέες θερμοκρασίες με τις οποίες εισάγονται στο μοντέλο μεταφοράς τα νέα ρεύματα δεν αποτελούν καινούρια θερμοκρασιακά διαστήματα αλλά θερμοκρασίες ενδιάμεσες, όπου οι θερμότητες των ρευμάτων προσδίδονται στο εν λόγω θερμοκρασιακό διάστημα στο οποίο κατατάσσονται για εναλλαγή θερμότητας.

Για την εύρεση των νέων θερμοκρασιών στις οποίες θα οδηγούνται τα νέα ρεύματα γίνεται συνδυασμός όλων των θερμών ρευμάτων με όλα τα ψυχρά. Εφόσον οι αρχικές θερμοκρασίες των ρευμάτων και οι θερμοκρασιακοί στόχοι είναι γνωστές, καθώς προκύπτουν από το μοντέλο της υπερδομής, βρίσκονται οι μέσες τιμές όλων των πιθανών συνδυασμών. Οι θερμοκρασίες που προκύπτουν από τις μέσες τιμές αποτελούν και τους νέους θερμοκρασιακούς στόχους. Ακολούθως, με τη βοήθεια του εργαλείου Matlab υπολογίζονται οι λόγοι ροών για τις αναμίξεις. Εφόσον οι αρχικές θερμοκρασίες των ρευμάτων και οι θερμοκρασιακοί στόχοι είναι γνωστά, υπολογίζονται οι λόγοι ροών για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς ρευμάτων οι οποίοι συνδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν την δυνατότητα να εισέρχονται σε όλους τους θερμοκρασιακούς στόχους. Εξάγεται λοιπόν πίνακας από το Matlab για τις αναμίξεις θερμών με ψυχρά ρεύματα. Οι πίνακες αυτοί χρησιμοποιούνται στα ισοζύγια μάζας για τα οποία

### 4.3.2 2° Στάδιο – Εναλλακτικός Ενεργειακός Καταρράκτης

Το δεύτερο μοντέλο, όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω είναι ένα πρόγραμμα βασισμένο στο γραμμικό μοντέλο Μεταφοράς που αναπτύχθηκε από τους Papoulias and Grossman το 1983 [8]. Το μοντέλο αυτό εξελίχθηκε ώστε να μπορεί να αντιμετωπίζει το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης ενέργειας σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση νερού. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να επισυμανθούν οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο μοντέλο.

- 1. Μεταβλητές ροές θερμών και ψυχρών ρευμάτων
- 2. Μη ισοθερμοκρασιακή ανάμιξη

Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική περιγραφή των εξισώσεων και παραμέτρων του μοντέλου.

Αρχικά, το θερμοκρασιακό εύρος του προβλήματος χωρίζεται σε *k* θερμοκρασιακά διαστήματα ανάλογα με τις θερμοκρασίες εισόδου των ρευμάτων και των παροχών που λαμβάνουν μέρος. Ο αριθμός των θερμοκρασιακών διαστημάτων συμβολίζεται με *km*. Επίσης, το σύνολο των νέων θερμοκρασιακών στόχων συμβολίζεται με *n*, ενώ ο αριθμός τους με *nm*. Οι νέοι θερμοκρασιακοί στόχοι, *nm*, αποτελούνται τόσο από τις θερμοκρασίες των *km* διαστημάτων αλλά και από τους νέους θερμοκρασιακούς στόχους. Έτσι, οι *nm* θερμοκρασιακοί στόχοι πρέπει να ανατεθούν στα *km* θερμοκρασιακά διαστήματα στα οποία βρίσκονται. Αυτό γίνεται ώστε τα νέα αναμίξιμα ρεύματα να εισάγονται σε θερμοκρασίες των νέων

θερμοκρασιακών στόχων ενώ τα ισοζύγια θερμότητας να πραγματοποιούνται στα km θερμοκρασιακά διαστήματα. Η παράμετρος που περιέχει την ανάθεση των nm διαστημάτων στα km είναι η kk<sub>n.k</sub>.

$$kk_{n,k} = 1, \forall (t_n^t \ge t_k^h) \kappa \alpha \iota (t_{n+1}^t < t_k^c)$$

$$(4.16)$$

kk<sub>n,k</sub> = Το θερμοκρασιακό διάστημα k στο οποίο περιλαμβάνεται το νέο θερμοκρασιακό διάστημα n

- t<sup>t</sup><sub>n</sub> = Θερμοκρασία t του θερμοκρασιακού στόχου n
- $t_k^h = \Theta$ ερμή Θερμοκρασία t του θερμοκρασιακού διαστήματος k

#### $t_k^c = \Psi$ υχρή Θερμοκρασία t του θερμοκρασιακού διαστήματος k

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι κάθε θερμοκρασιακό διάστημα χαρακτηρίζεται από την ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά. Κάθε ψυχρό ρεύμα που εισάγεται σε ένα θερμοκρασιακό διάστημα πρέπει να έχει ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά  $dt^{min}$  από το αντίστοιχο θερμό. Αυτό συμβαίνει για λόγους θερμοδυναμικής εφικτότητας της εναλλαγής θερμότητας. Είναι γι'αυτό που δημιουργούνται οι παράμετροι  $thk_k$  και  $tck_k$ , οι οποίοι εκφράζουν την θερμή και τη ψυχρή θερμοκρασία κάθε θερμοκρασιακού διαστήματος.

Εφόσον προσδιοριστεί ο αριθμός των θερμοκρασιακών διαστημάτων του συστήματος, τα ρεύματα ανατίθενται στα θερμοκρασιακά διαστήματα στα οποία λαμβάνουν μέρος. Για την ανάθεση των ρευμάτων σε διαστήματα εισάγονται οι ακόλουθες παράμετροι.

 $h_{\kappa} = \theta$ єрµо́ реúµа h то отоіо тарє́хеї θεрµо́тηта ото θεрµокраоїако́ біа́отпµа k  $c_{\kappa} = \psi$ υχρό ρεúµа c то отоіо тарє́хеї θεрµо́тпта ото θεрµокраоїако́ біа́отпµа k  $s_{\kappa} = \theta$ єрµή тароҳή s η отоіа тарє́ҳєї θεрµо́тпта ото θεрµокраоїако́ біа́отпµа k  $w_{\kappa} = \psi$ υχρή πароҳή w η отоіа тарє́ҳєї θερµо́тпта ото θερµокраоїако́ біа́отпµа  $h'_{\kappa} = \theta$ єрµо́ реúµа то отоіо тарє́ҳєї θεрµо́тпта ото θεрµокраоїако́ біа́отпµа h ή каї оє υψηλότερο s'<sub>κ</sub> = θερμή παροχή s η οποία παρέχει θερμότητα στο θερμοκρασιακό διάστημα k ή καις ε υψηλότερο

Η ανάθεση γίνεται με σύγκριση κάθε φορά της θερμοκρασίας εισόδου (*th*<sup>*in*</sup>, *tc*<sup>*in*</sup>) και εξόδου (*th*<sup>*out*</sup>, *tc*<sup>*out*</sup>) των ρευμάτων και των παροχών (*ts*<sup>*in*</sup>, *tw*<sup>*in*</sup>) με την αντίστοιχη θερμοκρασία του διαστήματος. Πιο κάτω φαίνεται πως γίνεται η ανάθεση των ρευμάτων και των παροχών στα θερμοκρασιακά διαστήματα.

$$h_k = 1, \forall (th_h^{in} \ge t_k^h) \kappa \alpha (th_h^{out} < t_k^h)$$

$$(4.17)$$

$$h'_{k} = 1, \forall (th_{h}^{in} \ge t_{k}^{h})$$

$$(4.18)$$

$$s_k = 1$$
,  $\forall (ts_s^{in} = t_k^h) \uparrow (ts_s^{in} > t_k^h) \kappa \alpha i (k = 1)$  (4.19)

$$s'_{k} = 1, \forall (ts_{s}^{in} \ge t_{k}^{h})$$

$$(4.20)$$

$$c_{k} = 1 , \forall (tc_{c}^{in} \le t_{k}^{c}) \kappa \alpha i (tc_{c}^{out} > t_{k+1}^{c}) \dot{\eta} (tc_{c}^{in} = t^{min}) \kappa \alpha i (k = km)$$
(4.21)

$$w_k = 1, \forall (tw_w^{in} \ge t_k^h) \kappa \alpha (tw_w^{in} < t_k^h)$$

$$(4.22)$$

Τα θερμά ρεύματα, όπως και τα ψυχρά, χωρίζονται πρωτού εισαχθούν στον ενεργειακό καταρράκτη. Ένα μέρος τους εισάγεται στο πρώτο θερμοκρασιακό διάστημα στο οποίο μπαίνουν, και ένα μέρος τους αναμιγνύεται με ένα ψυχρό ρεύμα. Το ίδιο γίνεται και για τα ψυχρά ρεύματα.

Τα συνολικά ισοζύγια των ρευμάτων αναγράφονται στις πιο κάτω εξισώσεις:

<u>Για τα θερμά:</u>

$$FH_{h} = \sum_{\substack{h_{k} \\ \forall th_{h}^{in} = t_{k}^{h}}}^{No} FHK_{h,k} + \sum_{\substack{n \in kk_{n,k} \\ \forall tc_{c}^{out} = th_{h}^{out}}}^{No} FHC_{h,c,n} \forall i$$
(4.23)

<u>Για τα ψυχρά:</u>

$$FC_{c} = \sum_{\substack{h_{k} \\ \forall \ tc_{c}^{in} = t_{k}^{h}}}^{No} FCK_{c,k} + \sum_{\substack{n \ \epsilon \ kk_{n,k} \\ \forall \ tc_{c}^{out} = t_{k}^{out}}}^{No} FCH_{c,h,n} \ \forall \ i$$
(4.24)

Οι όροι που εμπλέκονται στα συνολικάα ισοζύγια μάζας, όπως φαίνεται από τις εξισώσεις (4.23) και (4.24) είναι:

FH<sub>h</sub> = Η ροή του θερμού ρεύματος h

FC<sub>c</sub> = Η ροή του ψυχρού ρεύματος c

FHK<sub>h,k</sub> = Η ροή του h που εισέρχεται στο πρώτο θερμοκρασιακό διάστημα όπου η θερμοκρασία του h ισούται με τη θερμοκρασία του θερμοκρασιακού διαστήματος k

FHC<sub>h,c,n</sub> = Η ροή του h που θα αναμιχθεί με ένα ψυχρό ρεύμα C στο θερμοκρασιακό διάστημα N

FCK<sub>c,k</sub> = Η ροή του c που εισέρχεται στο πρώτο θερμοκρασιακό διάστημα όπου η θερμοκρασία του c ισούται με τη θερμοκρασία του θερμοκρασιακού διαστήματος k

FCH<sub>c,h,n</sub> = Η ροή του c που θα αναμιχθεί με ένα θερμό ρεύμα h στο θερμοκρασιακό διάστημα N

Η ροή που προκύπτει μετά την ανάμιξη ενός θερμού και ενός ψυχρού αναγράφεται πιο κάτω.

$$FM_{h,c,n}^{m} = \sum_{\substack{n \in kk_{n,k} \\ \forall tc_{c}^{out} = th_{b}^{out}}}^{No} FHC_{h,c,n} + \sum_{\substack{n \in kk_{n,k} \\ \forall tc_{c}^{out} = th_{b}^{out}}}^{No} FCH_{c,h,n}$$
(4.25)

 $FM_{h,c,n}^m = H$ ροή που προκύπτει μετά την ανάμιξη ενός θερμό με ένα ψυχρό ρεύμα

Για την εύρεση των ροών που αναμιγνύονται σημαντικό ρόλο παίζει ο λόγος ροών. Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω για κάθε ζεύγος που αναμιγνύεται ώστε να εισαχθεί σε ένα θερμοκρασιακό διάστημα υπολογίζονται οι λόγοι ροών. Οι λόγοι αυτοί περνούν ως παράμετροι στο μοντέλο από το Matlab. Για αναμίξεις μεταξύ θερμών και ψυχρών εξάγεται ο πίνακας *chc<sub>h,c,n</sub>* όπως και η αντίστοιχη παράμετρος στο μοντέλο GAMS. Πιο κάτω αναγράφονται οι εξισώσεις από τις οποίες προσδιορίζονται οι ροές των ρευμάτων που θα αναμιχθούν.

$$FHC_{h,c,n} = chc_{h,c,n} \cdot FCH_{c,h,n}, \qquad \forall \qquad (4.26)$$
$$tc_c^{out} = th_h^{out}$$

 $chc_{h,c,n} = Οι$  λόγοι ροών μεταξύ ενός θερμού και ενός ψυχρού ρεύματος

Για τα ρεύματα που είναι πιθανό να αναμιχθούν εισάγονται περιοριστικές εξισώσεις με τη βοήθεια των δυαδικών μεταβλητών. Πιο κάτω φαίνεται ο περιορισμός ανάμιξης ενός θερμού Η με ένα ψυχρό C.

$$FHC_{h,c,n} \le dhc_{h,c,n} \cdot LU, \quad \forall$$

$$tc_c^{out} = th_h^{out}$$

$$(4.27)$$

dhc<sub>h,c,n</sub> = Είναι οι διαδικές μεταβλητές οι οποίες παίρνουν τιμή 1 στην περίπτωση που πραγματοποιείται ανάμιξη μεταξύ ενός θερμού h με ένα ψυχρό c.

LU = Είναι μια σταθερή μεγάλη παράμετρος.

Κάθε πιθανή ροή διαθέτει τη δική της θερμότητα. Πιο κάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις από τις οποίες υπολογίζονται οι θερμότητες.

#### <u>Για τα θερμά ρεύματα:</u>

$$QH_h^T = FHK_{h,k} \cdot cph_h \cdot (th_h^{in} - th_h^{out})$$
(4.28)

$$QHK_{h,k} = FHK_{h,k} \cdot cph_h \cdot \left(t_k^h - t_{k+1}^h\right)$$
(4.29)

Ή σε περίπτωση που ισχύει:  $(th_h^{out} > t_{k+1}^h)$  ή  $(th_h^{out} > t^{min})$  και (k = km), τότε:

$$QHK_{h,k} = FHK_{h,k} \cdot cph_h \cdot \left(t_k^h - th_h^{out}\right)$$
(4.30)

Για τα ψυχρά ρεύματα:

$$QC_c^T = FCK_{c,k} \cdot cpc_c \cdot (tc_c^{in} - tc_c^{out})$$
(4.31)

$$QCK_{c,k} = FCK_{c,k} \cdot cpc_c \cdot (t_k^c - t_{k+1}^c)$$

$$(4.32)$$

Ή σε περίπτωση που ισχύει  $(tc_c^{out} < t_k^c)$ :

$$QCK_{c,k} = FCK_{c,k} \cdot cpc_c \cdot (tc_c^{out} - t_{k+1}^c)$$
(4.33)

 $\mathsf{H}\left(tc_{c}^{out} < TC_{K}\right) \kappa \alpha \iota \left(k = km\right),$ 

$$QCK_{c,k} = FCK_{c,k} \cdot cpc_c \cdot (tc_c^{out} - t^{min})$$
(4.34)

Στις εξισώσεις (4.28)-(4.34) εμφανίζονται οι μεταβλητές:

 $QH_{h}^{T} = H$  συνολική θερμότητα που μπορεί να εναλλάξει το θερμό ρεύμα h

QHK<sub>h,k</sub> = Η θερμότητα που μπορεί να εναλλάξει το θερμό ρεύμα h στο θερμοκρασιακό διάστημα k

QC<sub>c</sub><sup>T</sup> = Η συνολική θεμρότητα που μπορεί να εναλλάξει το ψυχρό ρεύμα c στο θερμοκρασιακό διάστημα k

QCK<sub>c,k</sub> = Η θερμότητα που μπορεί να εναλλάξει το ψυχρό ρεύμα c στο θερμοκρασιακό διάστημα k

Όσον αφορά τα ρεύματα που αναμιγνύονται η θερμότητα του κάθε ρεύματος που προορίζεται για ανάμιξη δεν είναι σημαντική. Σημαντική όμως είναι η θερμότητα του αναμήξιμου ρεύματος. Στην πιο κάτω εξίσωση φαίνεται η θερμότητα του αναμίξιμου ρεύματος.

$$QM_{h,c,n}^{m} = FM_{h,c,n}^{m} \cdot \frac{(cph_{h} + cpc_{c})}{2} \cdot t_{n}^{t}, \qquad \forall \ tc_{c}^{out} = th_{h}^{out}$$

$$(4.35)$$

Όπου  $QM^m_{h,c,n}$  η θερμότητα του ρεύματος ανάμιξης.

Θεωρούμε ότι ένα ψυχρό ρεύμα που εισέρχεται στον καταρράκτη στο θερμοκρασιακό διάστημα Κ μπορεί να εναλλάξει θερμότητα με ένα θερμό ρεύμα που εισέρχετε στο ίδιο θερμοκρασιακό διάστημα ή σε υψηλότερο. Αυτό συμβαίνει διότι τα θερμά ρεύματα μπορεί να εισέρχονται σε ένα θερμοκρασιακό διάστημα αλλά μέχρι να ολοκληρωθούν ενεργειακά στη θερμοκρασία εξόδου τους κατέρχονται τον ενεργειακό καταρράκτη μέσω των υπόλοιπων θερμότητας. Στο Σχήμα 4.5, παρουσιάζονται χαρακτηριστικά τα πιο πάνω:


Σχήμα 4.5: Διαγραμματική απεικόνιση δύο θερμοκρασιακών διαστημάτων όπου τα υπόλοιπα θερμότητας κατέρχονται από τον ενεργειακό καταρράκτη

Καθώς χρησιμοποιείται το ανεπτυγμένο μοντέλο Μεταφοράς θεωρείται ότι τα υπόλοιπα θερμότητας διαχωρίζονται σε υπόλοιπα θερμών ρευμάτων και υπόλοιπα θερμών παροχών. Στο Σχήμα 4.6, παρουσιάζεται το συνολικό ισοζύγιο θερμότητας σε ένα θερμοκρασιακό διάστημα όπως αναπτύσσεται στο ανεπτυγμένο μοντέλο Μεταφοράς.



Σχήμα 4.6: Συνολικό Ισοζύγιο Θερμότητας σε ένα θερμοκρασιακό διάστημα

Καθώς στο εναλλακτικό μοντέλο που προτείνεται επιτρέπονται οι αναμίξεις, θεωρείται πως ένα νέο ρεύμα που προκύπτει από ανάμιξη ενός θερμού και ενός ψυχρού ρεύματος λαμβάνει μέρος στο θερμοκρασιακό διάστημα. Καθώς για το νέο ρεύμα ισχύουν τα ίδια όπως με τα θερμά και ψυχρά, το μόνο που ενδιαφέρει στην περίπτωση αυτή είναι η θερμοκρασία που θα φτάσει. Όπως έχει αναφερθεί τα ρεύματα που επιτρέπεται να αναμιχθούν είναι αυτά που έχουν την ίδια θερμοκρασία εξόδου. Κατ' επέκταση, το νέο ρεύμα ολοκληρώνεται ενεργειακά όταν φτάσει στη θερμοκρασία εξόδου των ρευμάτων από τα οποία προκύπτει. Έτσι πιο κάτω παρουσιάζεται το συνολικό ισοζυγίο θερμότητας ενός θερμοκρασιακού διαστήματος όπου εισέρχονται νέα αναμίξιμα ρεύματα.



Σχήμα 4.7: Συνολικό ισοζύγιο θερμότητας σε ένα θερμοκρασιακό διάστημα όπου συμμετέχουν και νέα αναμίξιμα ρεύματα

Με βάση το Σχήμα 4.7 εξάγονται τα ισοζύγια θερμότητας:

Για τα θερμά ρεύματα:

$$QHK_{h,k} = RM_{h,c,k} - RM_{h,c,k-1} + RH_{h,k} - RH_{h,k-1} + \sum_{c \in c_k} QHC_{h,c,k} + \sum_{w \in w_k} QHW_{h,w,k}$$

$$+ \sum_{\forall \ t c_c^{out} = \ th_h^{out}} QM_{h,c,n}^m, \quad \forall \ h \in h_k, n \in kk_{n,k}$$

$$(4.36)$$

Για τα ψυχρά ρεύματα:

$$QCK_{c,k} = RM_{h,c,k} - RM_{h,c,k-1} + \sum_{h \in h'_k} QHC_{h,c,k} + \sum_{S \in S'_K} QSC_{s,c,k}$$

$$- + \sum_{\forall \ tc_c^{out} = \ th_h^{out}} QM_{h,c,n}^m , \quad \forall \ c \ \epsilon \ c_k, n \ \epsilon \ kk_{n,k}$$

$$(4.37)$$

Για θερμές παροχές:

$$QS_{S} = RS_{s,k} - RS_{s,k-1} + \sum_{c \in c_{k}} QSC_{s,c,k} , \quad \forall s \in s'_{k}$$

$$(4.38)$$

<u>Για ψυχρές παροχές:</u>

$$QW_w = \sum_{h \in h'_k} QHW_{h,w,k} , \quad \forall \ w \in w_k$$
(4.39)

Το μοντέλο πλέον γίνεται μεικτού-γραμμικού προγραμματισμού.

Στις εξισώσεις (4.36)-(4.39) εκτός από τις γνωστές παραμέτρους εμφανίζονται οι μεταβλητές του προβλήματος:

QS<sub>S</sub> = Η συνολική θερμότητα που προσφέρει η θερμή παροχή s

QW<sub>w</sub> = Η συνολική θερμότητα που προσφέρει η ψυχρή παροχή w

QHC<sub>h,c,k</sub> = Η θερμότητα που εναλλάσσεται μεταξύ του θερμού h και του ψυχρού c στο θερμοκρασιακό διάστημα K

QHW<sub>h,w,k</sub> = Η θερμότητα που εναλλάσσεται μεταξύ του θερμού h και της ψυχρής παροχής w στο θερμοκρασιακό διάστημα K

QSC<sub>s,c,k</sub> = Η θερμότητα που εναλλάσσεται μεταξύ της θερμής παροχής s και του ψυχρού c στο θερμοκρασιακό διάστημα K

RM<sub>h,c,k</sub> = Το υπόλοιπο θερμότητας που προσφέρει το αναμίξιμο ρεύμα καθώς εξέρχεται από το θερμοκρασιακό διάστημα Κ

RH<sub>h,k</sub> = Το υπόλοιπο θερμότητας που προσφέρει το θερμό ρεύμα h καθώς εξέρχεται από το θερμοκρασιακό διάστημα Κ

RS<sub>s,k</sub> = Το υπόλοιπο θερμότητας που προσφέρει η θερμή παροχή s καθώς εξέρχεται από το θερμοκρασιακό διάστημα Κ

Στο μοντέλο αυτό 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*<sub>h,c,k</sub>= 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:

$$QLHC_{h,c,k} \leq \sum_{K=1}^{KM} QHC_{h,c,k} \leq QUHC_{h,c,k}$$
(4.40)

Όπου τα *QLHC<sub>h,c,k</sub>* και *QUHC<sub>h,c,k</sub>* 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 πιο κάτω σχέσεις:

$$QLSC_{s,c,k} \leq \sum_{K=1}^{KM} QSC_{s,c,k} \leq QUSC_{s,c,k}$$
(4.41)

$$QLHW_{h,w,k} \leq \sum_{K=1}^{KM} QHW_{h,w,k} \leq QUHW_{h,w,k}$$
(4.42)

Όπου τα *QLSC<sub>s,c,k</sub>* και *QUSC<sub>s,c,k</sub>* είναι παράμετροι που αντιπροσωπεύουν τα κατώτερα και ανώτερα όρια εναλλαγής θερμότητας μεταξύ μιας θερμής παροχής και ενός ψυχρού ρεύματος, ενώ οι παράμετροι *QLHW<sub>h,w,k</sub>* και *QUHW<sub>h,w,k</sub>* αντιπροσωπεύουν τα κατώτερα και ανώτερα όρια εναλλαγής θερμότητας μεταξύ μιας ψυχρής παροχής και ενός θερμού ρεύματος.

### 4.3.3 3° Στάδιο – Μεικτό Γραμμικό Μοντέλο Μεταφοράς

Το πάγιο κόστος είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να υπολογιστεί σε ένα δίκτυο εναλλακτών. Μικρότερος αριθμός εναλλακτών προϋποθέτει και μικρότερο πάγιο κόστος. Στο συνολικό πάγιο κόστος συμπεριλαμβάνονται και τα κόστη των αγωγών για τέτοια δίκτυα. Στην παρούσα φάση όμως αυτό που ενδιαφέρει είναι η επίτευξη ενός δικτύου που να πετυχαίνει τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας με τον ελάχιστο αριθμό εναλλακτών.

Εφόσον λυθεί το μοντέλο του εναλλακτικού ενεργειακού καταρράκτη και υπολογιστούν όλες οι μεταβλητές μαζί με την ελάχιστη παροχή τότε οι λύσεις του μοντέλου εισάγονται στο μικτό γραμμικό μοντέλο Μεταφοράς όπου προσδιορίζεται ο ελάχιστος αριθμός εναλλακτών.

Το μοντέλο αυτό ουσιαστικά επιλέγει τους κατάλληλους συνδυασμούς οι οποίοι ικανοποιούν τη λύση του ενεργεικού καταρράκτη. Πιο κάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις του μοντέλου

Για εναλλαγές θερμότητας μεταξύ θερμών ρευμάτων με ψυχρά ρεύματα:

$$\sum_{k} (QHC_{h,c,k}) \leq y \mathbf{1}_{h,c} \cdot LU$$
(4.43)

$$\sum_{h,c} y \mathbf{1}_{h,c} = HC \tag{4.44}$$

Για εναλλαγές θερμότητας μεταξύ θερμών παροχών με ψυχρά ρεύματα:

$$\sum_{k} (QSC_{s,c,k}) \leq y 2_{s,c} \cdot LU$$
(4.45)

$$\sum_{s,c} y 2_{s,c} = SC \tag{4.46}$$

Για εναλλαγές θερμότητας μεταξύ θερμών ρευμάτων με ψυχρές παροχές:

$$\sum_{k} (QHW_{h,w,k}) \leq y \mathcal{B}_{h,w} \cdot LU \tag{4.47}$$

$$\sum_{h,w} y \mathcal{Z}_{h,w} = HW \tag{4.48}$$

Σύνολο εναλλακτών:

$$HC + SC + HW = NU \tag{4.49}$$

Η παράμετρος LU, είναι ένας μεγάλος σταθερός αριθμός που βοηθάει στην καθοδήγηση της βελτιστοποίησης. Οι μεταβλητές  $y1_{h,c}$ ,  $y2_{s,c}$ ,  $y3_{h,w}$  είναι δυαδικές μεταβλητές οι οποίες παίρνουν τιμές 0 ή 1.

Στις εξισώσεις (4.43)-(4.48) εμφανίζονται οι δυαδικές μεταβλητές:

y1<sub>h,c</sub> = Δυαδική μεταβλητή η οποία παίρνει τιμή 1 όταν ένα ζεύγος θερμού-ψυχρού ρεύματος επιτρέπεται να εναλλάξουν θερμότητα, εκφράζει την εγκατάσταση ενός εναλλάκτη  $y2_{s,c} = \Delta u \alpha \delta i \kappa \eta$  μεταβλητή η οποία παίρνει τιμή 1 όταν ένα ζεύγος θερμής παροχήςψυχρού ρεύματος επιτρέπεται να εναλλάξουν θερμότητα, εκφράζει την εγκατάσταση ενός εναλλάκτη

y3<sub>h,w</sub> = Δυαδική μεταβλητή η οποία παίρνει τιμή 1 όταν ένα ζεύγος θερμού ρεύματος-ψυχρής παροχής επιτρέπεται να εναλλάξουν θερμότητα, εκφράζει την εγκατάσταση ενός εναλλάκτη

Οι μεταβλητές:

*HC* = Το σύνολο των εναλλακτών στους οποίους πραγματοποιείται εναλλαγή θερμότητας μεταξύ ενός θερμού ρεύματος και ενός ψυχρού ρεύματος

SC = Το σύνολο των εναλλακτών στους οποίους πραγματοποιείται εναλλαγή θερμότητας μεταξύ μιας θερμής παροχής και ενός ψυχρού ρεύματος

HW = Το σύνολο των εναλλακτών στους οποίους πραγματοποιείται εναλλαγή θερμότητας μεταξύ ενός θερμού ρεύματος και μιας ψυχρής παροχής

NU = Το σύνολο των εναλλακτών στους οποίους πραγματοποιείται εναλλαγή θερμότητας

# 5 Κεφάλαιο:

Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση των μοντέλων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4.

Αρχικά, εφαρμόζεται το παράδειγμα των Savulescu και Smith [1] σε δύο τεχνικές οι οποίες αντιμετωπίζουν διαφορετικά το πρόβλημα και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τους. Το ίδιο παράδειγμα εφαρμόζεται στην προτεινόμενη μεθοδολογία και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της με τις προϋγούμενες μεθόδους αλλά και με μεθόδους που απαντώνται στη βιβλιογραφία.

Ακολούθως εφαρμόζεται ακόμα ένα παράδειγμα από τους Bagajewicz et al. [7] και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά των ίδιων αλλά και άλλων μεθοδολογιών της βιβλιογραφίας.

## 5.1 Μεθοδολογίες που αντιμετωπίζουν το πρόβλημα διαφορετικά

Αρχικά, το πρόβλημα νερού και ενέργειας αντιμετωπίστηκε ταυτόχρονα σε ένα στάδιο. Κατασκευάστηκε, λοιπόν, η υπερδομή του συστήματος των διεργασιών στην οποία υπολογίζονται οι μέγιστες εξοικονομήσεις σε νερό και ενέργεια που μπορούν να επιτευχθούν μέσω επαναχρησιμοποίησης νερού ανάμεσα στις διεργασίες και κατ' επέκταση μέσω άμεσης ανάκτησης θερμότητας. Στο πρόβλημα αυτό, εμπεριέχονται όλα τα πιθανά σενάρια επαναχρησιμοποίησης νερού και καλύπτονται όλες οι περιπτώσεις θερμικών φορτίων στους εναλλάκτες για την καθοδήγηση της βελτιστοποίησης σε κάθε περίπτωση. Η αντικειμενική συνάρτηση σχηματίζεται ώστε να μεγιστοποιούνται οι εξοικονομήσεις νερού και ενέργειας ανάλογα με ένα σταθμικό παράγοντα. Αναλύεται η εξάρτηση της ενέργειας και του

νερού αλλάζοντας κάθε φορά το σταθμικό παράγοντα. Το μοντέλο που αναπτύσσεται είναι ένα μη κυρτό μαθηματικό πρόβλημα μεικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού (MINLP).

Στη συνέχεια, έγινε συνδυασμός της θερμοδυναμικής με τον μαθηματικό προγραμματισμό. Το εργαλείο που πραγματοποιεί ενεργειακή ολοκλήρωση υπολογιστικά είναι το γραμμικό μοντέλο Μεταφοράς με τον κλασικό ενεργειακό καταρράκτη. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4, ο κλασικός ενεργειακός καταρράκτης δεν είναι ικανός να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της ενέργειας σε συνδυασμό με το νερό. Έτσι, εξελίχθηκε με την εισαγωγή των μεταβλητών ροών. Σε πρώτο στάδιο όμως, στον ενεργειακό καταρράκτη επιτρέπονταν μόνο οι μεταβλητές ροές και όχι οι αναμίξεις. Άρα, η δεύτερη προσπάθεια είναι ένα βήμα πιο κοντά στην τελική μεθοδολογία, όσον αφορά την καινοτομία που πραγματοποιήθηκε στον ενεργειακό καταρράκτη.

Τα δεδομένα του προβλήματος που εφαρμόζεται αναγράφονται στον πιο κάτω πίνακα.

Διεργασία	Cin (ppm)	Cout (ppm)	Tin(°C)	Tout(°C)	Μαζικό Φορτίο (g/s)		
1	0	100	40	40	2		
2	50	100	100	100	5		
3	50	800	75	75	30		
4	400	800	50	50	4		
Τin φρέσκου νερού, Tin = 20 °C							
Τουt φρέσκου νερού, Tout = 20 °C							

Πίνακας 5.1: Δεδομένα Προβλήματος Savulescu et al. [1]

## 5.1.1 Πρώτη Μεθοδολογία

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω το πρόβλημα πρώτα αντιμετωπίστηκε ταυτόχρονα σε ένα στάδιο. Πιο κάτω αναλύεται λεπτομερώς η μοντελοποίηση του προβλήματος της υπερδομής. Στο πρόβλημα εμπεριέχονται όλα τα πιθανά σενάρια επαναχρησιμοποίησης νερού και καλύπτονται όλες οι περιπτώσεις θερμικών φορτίων στους εναλλάκτες για την καθοδήγηση της βελτιστοποίησης σε κάθε περίπτωση. Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η υπερδομή του προβλήματος για ένα σύστημα τεσσάρων διεργασιών.



Σχήμα 5.1: Υπερδομή συστήματος διεργασιών για την ταυτόχρονη ολοκλήρωση νερού και ενέργειας

Το μοντέλο αποτελείται από εξισώσεις για το νερό και την ενέργεια. Οι εξισώσεις αυτές είναι τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Οι εξισώσεις που αφορούν το νερό είναι ίδιες με τις εξισώσεις της υπερδομής που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4. Αυτές είναι οι εξισώσεις (4.2) - (4.14).

Οι εξισώσεις που αφορούν την ενέργεια αντίστοιχα μοντελοποιούνται σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Για τη μοντελοποίηση των ισοζυγίων ενέργειας χρησιμοποιούνται οι θερμοκρασίες λειτουργίας κάθε διεργασίας.

Πιο κάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις που αφορούν την ενέργεια και χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση της υπερδομής του συστήματος.

$$Q_i^{ini} = F_i^{ini} \cdot \left( cp_i \cdot t_i^{in} - cp^{const} \cdot t^{env} \right), \forall i$$
(5.1)

$$TQ^{ini} = \sum_{i=1}^{No} Q_i^{ini} , \forall i$$
(5.2)

$$Q_{i}^{mix} = \sum_{ii=1}^{No} \frac{1000 \cdot F_{i,ii}^{reuse} \cdot cp_{ii} \cdot t_{ii}^{out}}{3600} + \frac{1000 \cdot FW_{i}^{in} \cdot cp^{const} \cdot t^{env}}{3600} , \forall i, ii$$
(5.3)

$$Q_{i}^{mix} = \frac{1000 \cdot F_{i}^{in} \cdot cp_{i}^{new} \cdot T_{i}^{new}}{3600}, \forall i, ii$$
(5.4)

$$Q_i^{ex} = \frac{1000 \cdot F_i^{in} \cdot (cp_i \cdot t_i^{in} - cp_i^{new} \cdot T_i^{new})}{3600}, \forall i, ii$$
(5.5)

Για τον υπολογισμό των εξοικονομήσεων πρέπει να αντιμετωπιστούν όλα τα πιθανά σενάρια ώστε να υπολογίζονται σωστά τα φορτία στους εναλλάκτες. Για τον έλεγχο των εξοικονομήσεων εισάγεται μια μεταβλητή η  $Q_i^{aux}$ , στην οποία υπολογίζονται οι εξοικονομήσεις ενεργειας και ανάλογα με κάποια κριτήρια η τιμή αυτή προσμετράται στην εξοικονόμηση. Το σενάρια που αντιμετωπίζονται αναγράφονται στο πιο κάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 5.1: Πιθανά Σενάρια στους εναλλάκτες

Τα πιθανά σενάρια που εμφανίζονται πιο πάνω αντιμετωπίζονται μέσω λογικών σχέσεων που περιέχουν δυαδικές μεταβλητές. Η εξίσωση υπολογισμού των εξοικονομήσεων αναγράφεται και πιο κάτω.

$$Q_i^{aux} = Q_i^{ini} - Q_i^{ex}, \forall i$$
(5.6)

Στην περίπτωση που  $Q_i^{aux} \ge 0$  με βάση τη εξίσωση (5.7) μπορεί να ισχύουν δύο πράγματα:

- i.  $Q_i^{ex} \ge 0$  και ταυτόχρονα  $Q_i^{ex} \le Q_i^{ini}$
- ii.  $Q_i^{ex} \leq 0$

Στην περίπτωση που Q<sub>i</sub><sup>ini</sup> ≤ 0 μπορεί να ισχύει:

i.  $Q_i^{ex} \ge 0$  και ταυτόχρονα  $Q_i^{ex} \ge Q_i^{ini}$ 

Για τον έλεγχο των 3 αυτών περιπτώσεων προστέθηκαν 3 συνεχείς μεταβλητές και 3 δυαδικές μεταβλητές που τις ελέγχουν.

Το σύνολο των εξισώσεων που προστέθηκαν για το σκοπό αυτό φαίνονται πιο κάτω:

$$Q_i^{aux} \ge (y1_i - 1) \cdot M, \quad \forall i$$
(5.7)

$$Q_i^{aux} \le y \mathbf{1}_i \cdot M, \quad \forall i$$
(5.8)

$$Qs1_i = y1_i \cdot Q_i^{aux}, \quad \forall i$$
(5.9)

$$Q_i^{aux} \ge (y2_i - 1) \cdot M, \quad \forall i$$
(5.10)

$$Q_i^{aux} \le y 2_i \cdot M, \quad \forall i$$
(5.11)

$$Qs2_i \ge (1 - y2_i) \cdot Q_i^{aux} , \quad \forall i$$
(5.12)

$$Q_i^{ex} \ge (y3_i - 1) \cdot M, \quad \forall i$$
(5.13)

$$Q_i^{ex} \le y 3_i \cdot M, \quad \forall i \tag{5.14}$$

$$Qs3_i = (1 - y3_i) \cdot Q_i^{ini}, \quad \forall i$$
 (5.15)

$$y1_i + (1 - y3_i) \le 1$$
,  $\forall i$  (5.16)

$$y1_i + (1 - y2_i) \le 1, \ \forall i$$
 (5.17)

Η εξοικονόμηση για κάθε διεργασία i προκύπτει από το άθροισμα των τριών μεταβλητών *Qs*1<sub>*i*</sub>, *Qs*2<sub>*i*</sub>, *Qs*3<sub>*i*</sub> και η συνολική εξοικονόμηση από το άθροισμα των επιμέρους εξοικονομήσεων για κάθε διεργασία.

$$Q_i^s = Qs1_i + Qs2_i + Qs3_i, \ \forall i$$
 (5.18)

$$TQ^{s} = \sum_{i=1}^{No} Q_{i}^{s}$$
(5.19)

Το ποσοστό της εξοικονόμησης νερού και ενέργειας υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{TQ^{ini} - TQ^s}{TQ^{ini}} * 100 = E^s$$
(5.20)

$$\frac{FW^{ini} - FW}{FW^{ini}} * 100 = W^s$$
(5.21)

Η αντικειμενική συνάρτηση σχηματίζεται ώστε να μεγιστοποιούνται οι εξοικονομήσεις ανάλογα με ένα σταθμικό παράγοντα. Στην περίπτωση αυτή είναι η παράμετρος α η οποία παίρνει τιμές από το 0 μέχρι το 1, ενώ κάθε φορά δίνεται διαφορετική βαρύτητα στις εξοικονομήσεις.

$$0 \le \alpha \le 1$$

$$z = a \cdot W^s + (a - 1) \cdot E^s$$
(5.22)

### 5.1.1.1 Επίλυση παραδείγματος Savulescu et al. [1]

Το πρόβλημα επιλύεται με τη χρήση διάφορων επιλυτών όπως BARON, COUENNE, KNITRO και SBB, οι οποίοι είναι κατάλληλοι για την επίλυση προβλημάτων μεικτού μη γραμμικού προγραμματισμού (MINLP). Ο COUENNE και ο SBB δεν καταλήγουν σε εφικτή λύση ενώ οι BARON και KNITRO παράγουν εφικτές λύσεις αλλά δεν είναι οι ίδιες κάθε φορά. Ο BARON γενικά καταλήγει σε καλύτερα αποτελέσματα από τον KNITRO, δηλαδή σε καλύτερες εξοικονομήσεις, ενώ το μέγεθος του κώδικα είναι 224 γραμμές. Από την επίλυση του BARON εξάγεται η περίληψη επίλυσης. Όπως φαίνεται πιο κάτω η διαδικασία ολοκληρώνεται κανονικά ενώ η κατάσταση του μοντέλου («model status») είναι «8 Integer Solution». Για κάθε είδος προβλήματος ο κάθε επιλυτής εξάγει κατάσταση της λύσης. Για προβλήματα μεικτου μη γραμμικού προγραμματισμου η κατάσταση του μοντέλου πρέπει να είναι «2 Locally Optimal», που αποδεικνύει οτι η τελική λύση ενός μη γραμμικού προβλήματος έχει βρεθεί και είναι η καλύτερη που υπάρχει ανάμεσα σε μια γειτονιά εφικτών λύσεων. Αυτό σημαίνει πως το μοντέλο κατέληξε σε λύση του προβλήματος, η οποία δεν είναι βέλτιση αλλά ικανοποιεί τις δυαδικές μεταβλητές.

Solu	tion Rep	ort			501	LVI	E toy_m	od	el	Us	Bil	ng	M	INLE	P 1	From	n 1	ine	367
		S	0	L	V	E	S	U	М	М	A	R	Y						
	MODEL	toy	m	ode	1				OB	JEO	T		E	Z	III	MIZE	7		
	SOLVER	BAR	NC						FR	MC	L	INF	2	367	7				
****	SOLVER	STAT	JS			1	Normal	C	omj	ple	et:	ior	1						
****	MODEL S	TATU	s			8	Intege	r	So.	Lut	:id	on							
****	OBJECTI	VE V	ALU	JE						90.	. 00	000	0						
RES	OURCE US	AGE,	LI	IMI	т			1	. 0	60	1	999	999	9999	9.0	000			
ITE	RATION C	OUNT	, 1	LIN	111	Г		0			1	999	999	9999	Э				
EVA	LUATION	ERRO	RS					0						0	D				

Εικόνα 5.1: Περίληψη επίλυσης μοντέλου υπερδομής όπου το νερό και η ενέργεια ολοκληρώνονται ταυτόχρονα

Αλλάζοντας τον παράγοντα α, παράλληλα αλλάζει και η βαρύτητα που δίνεται στο νερό και στην ενέργεια.

Όταν α=0 δίνεται βαρύτητα στη μεγιστοποίηση των ενεργειακών εξοικονομήσεων, ενώ όταν α=1 δίνεται βαρύτητα στη μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης νερού.

Στην περίπτωση που α=0 (z=max*E<sup>s</sup>*) η ενεργειακή εξοικονόμηση φτάνει το 25%, ενώ το δίκτυο νερού αλλάζει κάθε φορά επιτυγχάνοντας διαφορετικές εξοικονομήσεις στο νερό.

Πίνακας 5.2: Εξοικονομήσεις νερού και ενέργειας στο δίκτυο υπερδομής για a=0 ( Μέγιστη εξοικονόμηση Ενέργειας)

α	WS (%)	ES (%)
	12,752	25,152
0	16,7	25,152
	17,47	25,152

Το δίκτυο που προκύπτει φαίνεται πιο κάτω:



Σχήμα 5.2: Διαμορφώση δικτύου στο οποίο το νερό και η ενέργεια ολοκληρώνονται ταυτόχρονα

Στο Σχήμα 5.2, αναγράφονται οι τιμές των ροών που προκύπτουν. Στον πιο κάτω πίνακα αναγράφονται τα φορτία θερμικών παροχών στους εναλλάκτες πρίν και μετά την ολοκλήρωση. Στον εναλλάκτη του Σχήμα 5.2 που βρίσκεται μετά τον τελικό αναμικτήρα, απαιτείται ψυχρή παροχή.

Είσοδος Διεργασίας	Αρχικές απαιτήσεις στους εναλλάκτες (kW)	Απαιτήσεις στους εναλλάκτ307ες μετά την επίλυση (kW)		
1	307	307		
2	4352	4352		
3	2101	500		
4	133	0		

Πίνακας 5.3: Θερμικα	ά φορτία στοι	ις εναλλακτες πριν	/ και μετά την	ν ολοκλήρωση
----------------------	---------------	--------------------	----------------	--------------

Στην περίπτωση που μεγιστοποιείται το νερό α=1 (z=maxWS), η ενεργειακή εξοικονόμηση μεγιστοποιείται ή φτάνει το 20%, όπως φαίνεται από τον πιο κάτω πίνακα:

Πίνακας 5.4: Εξοικονομήσεις νερού και ενέργειας στο δίκτυο υπερδομής για α=1 ( Μέγιστη εξοικονόμηση Νερού)

α	WS (%)	ES (%)
1	20	6.7

Το δίκτυο που προκύπτει φαίνεται πιο κάτω:



Σχήμα 5.3: Διαμορφώση δικτύου στο οποίο το νερό και η ενέργεια ολοκληρώνονται ταυτόχρονα

Στο Σχήμα 5.3, αναγράφονται οι τιμές των ροών που προκύπτουν. Στον πιο κάτω πίνακα αναγράφονται τα φορτία θερμικών παροχών στους εναλλάκτες πρίν και μετά την ολοκλήρωση.

Είσοδος Διεργασίας	Αρχικές απαιτήσεις στους εναλλάκτες (kW)	Απαιτήσεις στους εναλλάκτες μετά την επίλυση (KW)
1	307	307
2	4352	5165
3	2101	500
4	133	0

Πίνακας 5.5: Θερμικά φορτία στους εναλλακτες πριν και μετά την ολοκλήρωση

'Οπως είναι φανερό, το δίκτυο που σχηματίζεται για μέγιστη εξοικονόμηση νερού επιτυγχάνει μικρότερη εξοικονόμηση ενέργειας. Πρέπει να αναφερθεί, επίσης, ότι και στις δύο περιπτώσεις ο αριθμός των εναλλακτών ήταν μικρός.

Ακόμα, ελέγχονται οι ενδοιάμεσες τιμές της παραμέτρου α. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πιο κάτω πίνακα.

Πίνακας	5.6: Εξοικονομήσεις	Νερού και Ενέργε	α για ενδιάμεσες	τιμές του	σταθμικού	παράγοντα α

α	WS(%)	ES(%)
0.1	12,752	25
0.2	16,7	20
0.3	17,47	17,8
0.4	20	15,3

0.5	20	11
0.6	20	9,4
0.7	20	8,5
0.8	20	6.7
0.9	20	6.7

Συμπερασματικά, υπάρχουν πολλά δίκτυα που πετυγχαίνουν μέγιστο νερό. Η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης εκφράζει την εξάρτηση μεταξύ του νερού και της ενέργειας. Μεγιστοποιώντας την ενέργεια ελαττώνεται το νερό, ενώ ελαχιστοποιώντας την ενέργειας το μεγιστοποιείται το νερό. Είναι όμως φανερό, ότι καθώς υπάρχουν περιορισμοί στις συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου από κάθε διεργασία, στο νερό δίνεται μεγαλύτερη έμφαση κατά τη βελτιστοποίηση. Ενώ όσον αφορά τα δίκτυα που προκύπτουν κάθε φορά, εκτός από αυτά που παρουσιάστηκαν πιο πάνω, για ενδοιάμεσες τιμές του σταθμικού παράγοντα το δίκτυο που προκύπτει είναι το ίδιο. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η βελτιστοποίηση ικανοποιεί έναν από τους δύο στόχους που στην προκείμενη περίπτωση είναι το νερό. Επιλέγεται μια διαμόρφωση του δικτύου για το στόχο αυτό, δηλαδή υπολογίζονται οι εξοικονομήσεις ενέργειας που εφόσον η διαμόρφωση έχει προυπολογιστεί, είναι συγκεκριμένες.

Οι μη γραμμικότητες και οι δυαδικές μεταβλητές του μοντέλου το καθιστούν μη κυρτό και δύσκολα επιλύσιμο. Οι επιλυτές δυσκολεύονται να ξεφύγουν από μια περιοχή λύσεων που αφορά τη διαμόρφωση του δικτύου, καταλήγωντας πάντα στο ίδιο. Εφαρμογές του επιλυτή BARON που χρησιμοποιούνται για εύρεση επιπλέον διαμορφώσεων, δεν απέφεραν κάποιο διαφορετικό αποτέλεσμα.

Το σημαντικό είναι ότι γίνεται κατανοητή η προτίμηση του νερού ένταντι στην ενέργεια, όσον αφορά τα μοντέλα υπερδομών.

# 5.1.2 Δεύτερη Μεθοδολογία

Η δεύτερη προσπάθεια, αναπτύσσει την ίδια διαδοχική διαδικασία που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4 με τη διαφορά ότι στον ενεργειακό καταρράκτη δεν επιτρέπονται οι αναμίξεις των ρευμάτων.

Πρώτα, επιλύεται το μοντέλο της υπερδομής όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4. Το δεύτερο μοντέλο είναι το γραμμικό μοντέλο Μεταφοράς, μόνο που στην περιπτώση που αναπτύσσεται εδώ οι ροές είναι μεταβλητές και δεν επιτρέπονται αναμίξεις. Τα ρεύματα του τελικού δικτύου της υπερδομής εισάγονται στο γραμμικό μοντέλο Μεταφοράς με τον ίδιο τρόπο όπως προϋγουμένως.

# 5.1.2.1 Επίλυση παραδείγματος Savulescu et al. [1]

Η μεθοδολογία που επιλύεται παρουσιάζεται στο πιο κάτω διάγραμμα στα επιμέρους στάδια από τα οποία αποτελείται:



Διάγραμμα 5.2: Διαγραμματική απεικόνιση Μεθοδολογίας

Το μη γραμμικό πρόβλημα επιλύεται με τον επιλυτή BARON και η λύση του είναι η καλύτερη που υπάρχει ανάμεσα σε μια γειτονιά εφικτών λύσεων. Το γραμμικό πρόβλημα επιλύεται με τη χρήση του επιλυτή CPLEX και καταλήγει σε βέλτιστη λύση, όπως και το μεικτό γραμικό πρόβλημα (MILP).

Τα αποτελέσματα του μη γραμμικού (NLP) αναγράφονται στους πιο κάτω πίνακες:

Πίνακας 5.7: Εξοικονίμηση νερού και κατανάλωση νερού

WS (%)	TFWinit (tn/h)	FW (tn/h)	FWW (tn/h)
20	112.5	90	90

Πίνακας 5.8: Ροές φρέσκου νερού, ροές εισόδου, εξόδου, και συγκεντρώσεις για κάθε διεργασία

Alcovertie	Fwin	Fwinit	Fin	Fwwout	Cin	Cout
Διεργασία	(tn/h)	(tn/h)	(tn/h)	(tn/h)	(ppm)	(ppm)
1	20	20	20	4.275	0	100
2	50	50	65.725	40.010	24	100
3	20	37.5	40	35.714	50	800
4	0	5	10	10	400	800

Πίνακας 5.9: Ροές επαναχρησιμοποίησης

Διεργασία/Διεργασία	1	2	3	4
1	-	15.725	-	-
2	-	-	20	5.714
3	-	-	-	4.286
4	-	-	-	-

Πιο κάτω παρουσιάζεται το δίκτυο που προκύπτει μετά τη βελτιστοποίηση.



Σχήμα 5.4: Τελικό Δίκτυο Διεργασιών

Στη συνέχεια, γίνεται αντιστοίχηση των αποτελεσμάτων του δικτύου του πιο πάνω σχήματος με τα θερμά και ψυχρά ρεύματα που ολοκληρώνονται στο γραμμικό μοντέλο.

Πιο κάτω παρουσιάζονται διαγραμματικά τα θερμά και τα ψυχρά ρεύματα που λαμβάνουν μέρος στα θερμοδυναμικά μοντέλα μεταφοράς.



Σχήμα 5.5: Δίκτυο υπερδομής στο οποίο με μπλέ χρώμα παρουσιάζονται τα ψυχρά ρεύματα και με κόκκινο χρώμα τα θερμά ρεύματα

Στον πιο κάτω πίνακα γίνεται αντιστοίχηση των ρευμάτων του δικτύου ανάλογα με το είδος τους.

Ρεύμα	Θερμά	Ρεύμα	Ψυχρά
1	$Fwwout_1 \rightarrow$ FH1	1	$Fwin_1 \rightarrow FC1$
2	$Fwwout_2 \rightarrow FH_2$	2	$Fwin_2 \rightarrow FC2$
3	$Fwwout_3 \rightarrow FH_3$	3	$Fwin_3 \rightarrow FC_3$
4	$Fwwout_4 \rightarrow FH4$	4	$Freuse_{1,2} \rightarrow FC_5$
5	$Freuse_{2,3} \rightarrow FH6$		
6	$Freuse_{2,4} \rightarrow FH_7$		
7	$Freuse_{3,4} \rightarrow FH9$		

Πίνακας 5.10: Αντιστοίχηση ρευμάτων δικτύου σε θερμά και ψυχρά

Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του Γραμμικού Μοντέλου Μεταφοράς. Αρχικά, στον Πίνακα 5.11 παρουσιάζονται τα θερμοκρασιακά διαστήματα που προκύπτουν και τα θερμικά φορτία των θερμών και ψυχρών ρευμάτων.

Θερμοκρασιακό	$T_{hot}(K)$	$T_{hot}(K)$					Θερμικά	Φορτία	(kW)				
Διάστημα	373	363	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	C1	C2	C3	C4
1				4283			2141	612			5333	853	1670
	348	338											
2				4283	3828			612	460		5333	2133	1670
	323	313											
3				1713	1531	425				853	2133	853	668
	313	303											
4			182	1713	1531	425				1280	3200	1280	
	298	288											

#### Πίνακας 5.11: Θερμικά Φορτία θερμών και ψυχρών ρευμάτων



## Ο Ενεργειακός καταρράκτης φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα:

Σχήμα 5.6: Ενεργειακός Καταρράκτης με μεταβλητές ροές

Τα αναλυτικά αποτελέσματα του γραμμικού μοντέλου αναγράφονται στους Πίνακες που ακολουθούν:

Εξοικονόμηση Ενέργειας	Συνολικές Ενεργειακές απαιτήσεις	Βοηθητικές Παροχές	Θερμές Παροχές	Ψυχρές Παροχές
91 %	13786 kW	1222 kW	822 kW	460

Πίνακας 5.12: Μέγιστη εξοικονόμηση Ενέργειας και φορτία βοηθητικών παροχών που απαιτούνται

#### Πίνακας 5.13: Συνολικές Θερμότητες Θερμών και Ψυχρών ρευμάτων

Θερμό Ρεύμα	Συνολική Θερμότητα Θερμού ρεύματος kW	Ψυχρό Ρεύμα	Συνολική Θερμότητα ψυχρού ρεύματος kW
1	182	1	2133
2	11992	2	16000
3	6890	3	5120
4	850	4	4010
5	2141		
6	1224		
7	460		

Πίνακας 5.14: Ζευγάρια Θερμών Παροχών – Ψυχρών Ρευμάτων που εναλλάσσουν θερμότητα στον ενεργειακό καταρράκτη και τα φορτία που εναλλάσσουν σε kW

Θερμή Παροχή	Ψυχρό Ρεύμα	Θερμοκρασιακό διάστημα 1
1	2	439
1	4	383

Πίνακας 5.15: Ζευγάρι Ψυχρής Παροχής – Θερμού ρεύματος που εναλλάσσουν θερμότητα στον ενεργειακό καταρράκτη και τα φορτία που εναλλάσσουν σε kW

Ψυχρή Παροχή	Θερμό Ρεύμα	Θερμοκρασιακό διάστημα
		4
1	2	460

Πίνακας 5.16: Υπολοιπόμενα Θερμότητας Θερμών ρευμάτων στον Ενεργειακό καταρράκτη

Θεομό Ρεύμα	Θερμοκρασιακό διάστημα
σερμοτευμα	2
2	171
6	612

Θερμό	Ψυχρό	Θερμοκρασιακό Διάστημα			α
		1	2	3	4
1	2				182
2	2	4293	1505	1030	1253
2	3	-	2133	853	-
2	4	-	474	-	-
3	1	-	-	429	855
3	2	-	3828	1103	676
4	1	-	-	425	425
5	2	-	-	-	630
5	3	-	-	-	1280
5	4	1287	1197	668	-
6	2	611	-	-	-
7	2	-	460	-	_

Πίνακας 5.17: Ζευγάρια Θερμών και Ψυχρών ρευμάτων που εναλλάσσουν θερμότητα στον ενεργειακό καταρράκτη και τα φορτία που εναλλάσσουν σε kW

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται πιο πάνω αναφέρονται στη μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας το δίκτυο της υπερδομής. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα του γραμμικού μοντέλου εισάγονται στο μεικτό γραμμικό μοντέλο (MILP) για την εύρεση του ελάχιστου αριθμού εναλλακτών.

Στον πιο κάτω πίνακα παρουσιάζονται τα ζεύγη θερμών και ψυχρών ρευμάτων τα οποία κατοχυρώνουν και τον αριθμό των εναλλακτών. Ο τελικός αριθμός που προκύπτει είναι 12.

Θερμό/Ψυχρό	1	2	3	4
1		HX		
2		HX	HX	HX
3	HX	HX		
4	HX			
5		HX	HX	HX
6		HX		
7		HX		

Πίνακας 5.18: Εναλλάκτες για κάθε ζεύγος θερμών – ψυχρών ρευμάτων

# 5.2 Αποτελέσματα Μεθοδολογίας που προτείνεται

## 5.2.1 Παράδειγμα Savulescu και Smith [1]

Τα αποτελέσματα του μη γραμμικού (NLP) είναι τα ίδια όπως αυτά που παρουσιάστηκαν στους Πίνακες 5.7 – 5.9. Το δίκτυο που προκύπτει είναι το ίδιο. Παρόλαυτά, αυτή τη φορά οι ροές επαναχρησιμοποίησης δεν εισάγονται στον εναλλακτικό ενεργειακό καταρράκτη. Οι ροές φρέσκου νερού που υπολογίστηκαν για κάθε διεργασία μαζί με τα ισοζύγια μάζας γύρω από κάθε διεργασία, είναι αυτά που εισάγονται στο μοντέλο. Η διαμόρφωση του δικτύου είναι αυτή που βοηθά στην καλύτερη επιλογή αναμίξεων. Οι επαναχρησιμοποιήσεις που υπολογίζονται τηρούν τους περιορισμούς συγκέντρωσης στο δίκτυο του νερού οπότε είναι λογικό να επηρεάζουν σχετικά με την επιλογή των αναμίξεων.

Με βάση την εξίσωση (4.15) υπολογίζεται ο αριθμός των θερμών και ψυχρών ρευμάτων. Στον εναλλακτικό ενεργειακό καταρράκτη συμμετέχουν 10 θερμά και 10 ψυχρά ρεύματα.



Πιο κάτω φαίνεται το διάγραμμα των ρευμάτων:

Διάγραμμα 5.3: Κατεύθυνση θερμών και ψυχρών ρευμάτων

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η αντιστοίχιση των ρευμάτων θερμών ή ψυχρών με τη θέση τους στο μοντέλο της υπερδομής του Σχήμα 5.4.

Ρεύμα	Θερμά	Ψυχρά
1	$Fwwout_1 \rightarrow FH1$	$Fwin_1 \rightarrow FC1$
2	$Fwwout_2 \rightarrow FH2$	$Fwin_2 \rightarrow FC2$
3	$Fwwout_3 \rightarrow FH3$	$Fwin_3 \rightarrow FC3$
4	$Fwwout_4 \rightarrow FH4$	$Fwin_4 \rightarrow FC4$
5	$Freuse_{2,1} \rightarrow FH5$	$Freuse_{1,2} \rightarrow FC5$
6	$Freuse_{2,3} \rightarrow FH6$	$Freuse_{1,3} \rightarrow FC6$
7	$Freuse_{2,4} \rightarrow FH7$	$Freuse_{1,4} \rightarrow FC7$
8	$Freuse_{3,1} \rightarrow FH8$	$Freuse_{3,2} \rightarrow FC8$
9	$Freuse_{3,4} \rightarrow FH9$	$Freuse_{4,2} \rightarrow FC9$
10	$Freuse_{4,1} \rightarrow FH10$	$Freuse_{4,3} \rightarrow FC10$

Πίνακας 5.19: Χαρακτηρισμός ρευμάτων δικτύου σε θερμά ή ψυχρά ρεύματα

Στον Πίνακα 5.20 αναγράφονται οι θερμοκρασίες εισόδου των ρευμάτων ενώ στον Πίνακα 5.21 οι νέοι θερμοκρασιακοό στόχοι.

Πίνακας 5.20: Θερμοκρασίες εισόδου θερμών και ψυχρών ρευμάτων

Ρεύμα	TINH (H)	TINC (C)
1	313	298
2	373	298
3	348	298
4	323	298
5	373	313
6	373	313
7	373	313
8	348	323
9	348	348
10	323	323

Θερμοκρασιακό Διάστημα	TH(K)
1	373
2	360.5
3	348
4	343
5	335.5
6	330
7	323
8	318
9	313
10	310.5
11	305.5
12	298

Πίνακας 5.21: Θερμές θερμοκρασίες θερμοκρασιακών διαστημάτων

Στη συνέχεια προστίθενται τα ισοζύγια μάζας γύρω από τις διεργασίες ενώ κάθε ισοζύγιο παρουσιάζεται διαγραμματικά κάτω από κάθε εξίσωση:

#### Διεργασία 1:



Σχήμα 5.7: Ισοζύγιο μάζας γύρω από τη διεργασία 1

#### <u>Διεργασία 2:</u>

$$FC_{2} + FC_{5} + FC_{8} + FC_{9} = FH_{2} + FH_{5} + FH_{6} + FH_{7}$$

$$(5.24)$$

Σχήμα 5.8: Ισοζύγιο μάζας γύω από τη διεργασία 2

#### Διεργασία 3:

$$FC_{3} + FC_{6} + FC_{10} + FH_{6} = FH_{3} + FH_{8} + FH_{9} + FC_{8}$$
(5.25)

Σχήμα 5.9: Ισοζύγιο μάζας γύρω από τη διεργασία 3

### Διεργασία 4:

$$FH_7 + FH_9 + FC_4 + FC_7 = FC_9 + FC_{10} + FH_4 + FH_{10}$$
(5.26)

Σχήμα 5.10: : Ισοζύγιο μάζας γύρω από τη διεργασία 4

Τα αποτελέσματα του ενεργειακού καταρράκτη φαίνονται πιο κάτω. Αρχικά στο Σχήμα 5.11 παρουσιάζονται οι αναμίξεις που πραγματοποιούνται.



Σχήμα 5.11: Δίκτυο Αναμίξεων για μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας

Όπως είναι φανερό, επιλέγονται αναμίξεις στην είσοδο των διεργασιών 3 και 4. Στην είσοδο της διεργασίας 3, αναμιγνύεται το ρεύμα φρέσκου νερού με ρεύμα επαναχρησιμοποίησης από τη διεργασία 2, και στην είσοδο της διεργασίας 4, αναμιγνύεται ρεύμα επαναχρησιμοποίησης από τη διεργασία 2 και από τη διεργασία 1. Στον Πίνακας 5.22, παρουσιάζονται οι λόγοι ροών και τα θερμοκρασιακά διαστήματα στα οποία αναμιγνύονται τα ρεύματα.

Οι ροές των ρευμάτων που αναμιγνύονται και των αναμίξιμων ρευμάτων παρουσιάζονται στον πιο κάτω πίνακα.

#### Πίνακας 5.22: Λόγοι ροών που υπολογίζονται

$chc11_{H,C,K}$		Θερμοκρασιο	ικό διάστημα
Θερμά ρεύματα	Ψυχρά ρεύματα	2	3
H <sub>6</sub>	<i>C</i> <sub>3</sub>	2.2	-
H <sub>7</sub>	<i>C</i> <sub>7</sub>	-	0.2

Πίνακας 5.23: Ροές ρευμάτων που αναμιγνύονται

Θερμό	Ψυχρό	Θερμοκρασιακό	FHC <sub>h,c,n</sub>	FCH <sub>c,hn</sub>	$FM_{h,c,n}^m$
ρεύμα	Ρεύμα	Διάστημα			
H <sub>6</sub>	<i>C</i> <sub>3</sub>	2	44	20	64
H <sub>7</sub>	<i>C</i> <sub>7</sub>	3	8,333	1,667	10

Οι ροές των ρευμάτων που δεν αναμιγνύονται και εισέρχονται στον ενεργειακό καταρράκτη αναγράφονται στον επόμενο πίνακα. Τα ρεύματα αυτά είναι τα ψυχρά ρεύματα φρέσκου νερού που εισέρχονται στις διεργασίες 1 και 2 και τα θερμά ρεύμα αποβλήτων που εξέρχονται από όλες τις διεργασίες.

Πίνακας 5.24: Ροές ρευμάτων που δεν αναμιγνύονται

FHK <sub>h,k</sub>		FCK <sub>c,k</sub>	
$FHK_{1,k}$	11,667	$FCK_{1,k}$	20
FHK <sub>2,k</sub>	4,333	$FCK_{2,k}$	50
FHK <sub>3,k</sub>	64		
FHK <sub>4,k</sub>	10		

Στον Πίνακας 5.25, παρουσιάζονται τα θερμικά φορτία των ρευμάτων που λαμβάνουν μέρος στο ενεργειακό καταρράκτη Πίνακας 5.25: Θερμικά φορτία ρευμάτων που λαμβάνουν μέρος στον ενεργειακό καταρράκτη

Θερμοκρασιακό	$T_{hot}(K)$	$T_{cold}(K)$			Θερμικά (	Φορτία (kW)		
Διάστημα	373	363	H1	H2	H3	H4	C1	C2
1				464				5333
	348	338						
2				464	6861			5333
	323	313						
3				185	2744	425	853	2133
	313	303						
4			496	185	2744	425	1280	3200
	298	288						



## Ο Ενεργειακός καταρράκτης φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα:

Σχήμα 5.12: Ενεργειακός Καταρράκτης με μεταβλητές ροές

Τα ρεύματα εφόσον ολοκληρωθούν μέσω της μη ισοθερμοκρασιακής ανάμιξης όπως είναι λογικό «διαγράφονται» από τον ενεργειακό καταρράκη, με άλλα λόγια δεν συμμετέχουν. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζονται οι μέγιστες εξοικονομήσεις.

Τα αναλυτικά αποτελέσματα του μοντέλου αναγράφονται στους Πίνακες που ακολουθούν:

Πίνακας	5.26:	Εξοικοι	νομήσεις	και	βοηθητικές	παροχές
---------	-------	---------	----------	-----	------------	---------

Εξοικονόμηση	Βοηθητικές	Θερμές	Ψυχρές
Ενέργειας	Παροχές	Παροχές	Παροχές
81,1%	3139 kW	3139 kW	0

#### Πίνακας 5.27: Συνολική Θερμότητα Θερμών και Ψυχρών ρευμάτων

Ρεύμα	Συνολική Θερμότητα Θερμού ρεύματος kW	Ρεύμα	Συνολική Θερμότητα ψυχρού ρεύματος kW
1	496	1	2133
2	1298	2	15999
3	12349		
4	850		

Πίνακας 5.28: Ζεύγη Θερμών – Ψυχρών ρευμάτων που εναλλάσσουν θερμότητα

Θερμό	Ψυχρό	Θερμοκρασιακό Διάστημα			
		1	2	3	4
1	2				496
2	2	464	464	185	185
3	1	-	-	853	1280
3	2	-	6861	1891	1464
4	2	-	-	242	608

Πίνακας 5.29: Ζεύγος Θερμής Παροχής- Ψυχρού ρεύματος που εναλλάσσουν Θερμότητα

Θερμή Παροχή	Ψυχρό Ρεύμα	Θερμοκρασιακό διάστημα
		1
1	2	3139

Πίνακας 5.30: Υπόλοιπα Θερμότητας θερμών ρευμάτων

Θερμό Ρεύμα	Θερμοκρασιακό διάστημα		
	2	3	
4	-	183	

Τα αποτελέσματα του μεικτού γραμμικού μοντέλου (MILP) φαίνονται πιο κάτω. Ο τελικός αριθμός που προκύπτει είναι 5.

Πίνακας	5.31:	Εναλλάκτες	Θερμότητας
	0.0	=	

Θερμό/Ψυχρό	1	2
1		HX
2		HX
3	HX	HX
4		HX

## 5.2.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων για παράδειγμα Savulescu et al. [1]

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν πιο πάνω στο σημείο αυτό θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου και των μεθόδων που αναπτύχθηκαν στη βιβλιογραφία.

Αρχικά, πρέπει να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των Savulescu και Smith καθώς ήταν αυτοί που καθιέρωσαν το συγκεκριμένο παράδειγμα από το 2005 και μετά. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα δεδομένα του Πίνακας 4.1 δομούν ένα μικρό πρόβλημα το οποίο αποτελείται από τέσσερις διεργασίες με ανάγκες σε πλούσια ή αραιά ρεύματα εισόδου, συσσωρευμένη μάζα ρυπαντή στην έξοδο κάθε διεργασίας, ενώ λειτουργούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Το συγκεκριμένο παράδειγμα έχει χρησιμοποιηθεί σε πάνω από 35 δημοσιεύσεις με το οποίο αξιολογούν τα αποτελέσματά τους.

Όπως προαναφέρθηκε η μεθοδολογία που χρησιμοποιούν είναι γραφικής επίλυσης. Καταλήγουν σε ένα δίκτυο που καναναλώνει 90 kg/s φρέσκο νερό, 4265 kW θερμών παροχών και 485 kW ψυχρών παροχών. Επίσης, ο ελάχιστος αριθμός εναλλακτών είναι τρείς, και επιπλεόν απαιτούνται ένας θερμαντήρας και ένας ψυκτήρας.

Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας που παρουσιάστηκαν στη συγκεκριμένη εργασία, όσον αφορά το νερό, καταναλώνονται 90 kg/s και κατ' επέκταση οι εξοικονομήσεις είναι οι ίδιες, με διαφορές στη διαμόρφωση του δικτύου. Τα φορτία βοηθητικών παροχών που απαιτούνται είναι 3139 kW για θερμών παροχών ενώ δεν απαιτούνται φορτία ψυχρών παροχών. Ο αριθμός των εναλλακτών είναι 5 ενώ απαιτείται και ένας θερμαντήρας.

Είναι φανερό ότι τα αποτελέσματα είναι αρκετά κοντά. Όσον αφορά τον αριθμό των εναλλακτών η διαφορά οφείλεται στο ότι τα ρεύματα αποβλήτων δεν αναμιγνύονται σε ένα ρεύμα στο μοντέλο μεταφοράς, όπως γίνεται στην περίπτωση των Savulescu et.al [1]. Έτσι, κάθε ρεύμα που εξάγεται απαιτείται να ψυχθεί ξεχωριστά, προσθέτωντας έτσι επιπλέον εναλλάκτες στο δίκτυο. Πρέπει να

αναφερθεί όμως ότι στην περίπτωση ανάμιξης των ρευμάτων αποβλήτων τότε θα χρειαζόταν ένας εναλλάκτης και ένας θερμαντήρας στο τελικό δίκτυο.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της ταυτόχρονης αντιμετώπισης με υπερδομή και της διαδοχικής αντιμετώπισης με απλουστευμένα μοντέλα, στην πρώτη περίπτωση επιτυγχάνεται η μέγιστη εξοικονόμηση νερού ενώ μικρή εξοικονόμηση στην ενέργεια. Είναι φανερό ότι δίνεται βαρύτητα κυρίως στο νερό καθώς πρώτα επιλέγονται οι επαναχρησιμοποιήσεις και στη συνέχεια υπολογίζονται τα φορτία στους εναλλάκτες. Δεν υπάρχει κάποια λογική πάνω στην οποία επιλέγονται οι κατάλληλες επαναχρησιμοποιήσεις ώστε να ελαχιστοποιείται και το νερό και η ενέργεια. Οι περιοριστικές σχέσεις στους εναλλάκτες δεν είναι αρκετές ώστε να δίνεται έμφαση και στην ενέργεια. Το μοντέλο που επιλύεται είναι μη κυρτο μεικτό μη γραμμικό καθιστώντας τη λύση τοπική και κυρίως τυχαία. Η διαμόρφωση που προκύπτει είναι μια πιθανή η οποία ικανοποιεί τους περιορισμούς του προβλήματος. Το μοντέλο δεν είναι σε θέση να επιλέξει την κατάλληλη διαμόρφωση από μόνο του.

Στη δεύτερη περίπτωση της διαδοχικής εξοικονόμησης, επιτυγχάνεται η ελάχιστη κατανάλωση νερού και ενέργειας στα δύο πρώτα μοντέλα, αλλά ο αριθμός των εναλλακτων είναι ιδιαίτερα μεγάλος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι επιτυγχάνονται όλοι οι πιθανοί συνδιασμοί θερμών και ψυχρών ρευμάτων που εναλλάσσουν θερμότητα για την ελαχιστοποίηση των βοηθητικών παρόχων, χωρίς να λαμβάνεται υπόψην ο αριθμός των εναλλακτών και το πάγιο κόστος που αυξάνεται με την προσθήκη τους. Ενώ η μεθοδολογία προσφέρει τη δυνατότητα επικοινωνίας του μοντέλου της υπερδομής με το γραμμικό μοντέλο παραμόρφωσης, παρόλαυτά, τα ρεύματα του δικτύου νερού ολοκληρώνονται ενεργειακά χωρίς να τηρείται το αρχικό δίκτυο που προκύπτει. Το αποτέλεσμα του γραμμικού μοντέλου απέχει κατά πολύ από την αρχική διαμόρφωση του δικτύου.

Στη συνέχεια, θα ήταν εύλογο να γίνει σύγκριση με μια μεθοδολογία που χρησιμοποιεί τη μέθοδο της υπερδομή του δικτύου εναλλακτών. Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω οι μελέτες που αξιολογούν τις μεθοδολογίες τους με βάση το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι πάρα πολλές. Στην πιο κάτω εικόνα, η οποία εξάχθηκε από τη δημοσίευση των Ahmetovic et. al. [29] παρουσιάζονται κάποιες μελέτες οι οποίες χρησιμοποιούν το συγκεκριμένο παράδειγμα μαζί με τα αποτελέσματά τους.

Method proposed by the authors	FW (kg/s)	HU (kW)	CU (kW)	Equipment requirements (/)
Savulescu et al. [13]	90	4265	485	3 Heat exchangers, 1 heater, 1 cooler
Xiao et al. [25]	90	3780	0	3 Heat exchangers, 2 heaters
Polley et al. [27]				
Case a	90	3780	0	3 Heat exchangers, 2 heaters
Case b	90	3780	0	3 Heat exchangers, 3 heaters
Case c	90	3780	0	4 Heat exchangers, 4 heaters
Martínez-Patiño et al. [31]	90	3780	0	3 Heat exchangers, 1 heater
Dong et al. [21]	90	3780	0	4 Heat exchangers, 1 heater
Bagajewicz et al. [11]	90	3780	0	3 Heat exchangers, 1 heater
Bogataj and Bagajewicz [15]	90	3780	0	3 Heat exchangers, 1 heater
Leewongtanawit and Kim [24]	90	3780	0	3 Heat exchangers, 1 heater
Liao et al. [28]				
Case a	90	3780	0	3 Heat exchangers, 1 heater
Case b	90	3780	0	4 Heat exchangers, 1 heater
This paper				
Case a	90	3780	0	3 Heat exchangers, 1 heater
Case b	90	3780	0	2 Heat exchangers, 1 heater
Case c	90	3780	0	1 Heat exchanger, 1 heater

Εικόνα 5.2: Μελέτες που χρησιμοποιούν το πρόβλημα των Savulescu et al.

Με βάση τον πίνακα της Εικόνα 5.2 και πιο συγκεκριμένα τα αποτελέσματα των Ahmetovic et. al [28] οι οποίοι εφαρμόζουν μια μεθοδολογία που χρησιμοποιεί μοντέλα υπερδομών του δικτύου εναλλακτών, επιτυγχάνουν την ελαχιστοποίηης του φρέσκου νερού στα 90 kg/s, ενώ στο δίκτυό τους απαιτούνται 3780 kW θερμή παροχή και μηδενική ψυχρή παροχή. Στο τελικό τους δίκτυο απαιτείται επίσης μόνο ένας εναλλάκτης και ένας θερμαντήρας. Είναι φανερό, λοιπόν, ότι με την εξέλιξη των μοντέλων μεταφοράς είναι δυνατόν να επιτευχθούν πολύ καλά αποτελέσματα με υπολογιστική ευκολία σε σχέση με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται. Το δίκτυο στο οποίο καταλήγουν οι Ahmetovic et. al [28], φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



Σχήμα 5.13: Τελικό δίκτυο από Ahmetovic et al για το παράδειγμα των Savulescu και Smith

Όπως φαίνεται στο πιο πάνω σχήμα, οι αναμίξεις που επιλέγονται στην είσοδο των διεργασιών 3 και 4 είναι ίδιες με αυτές που επιλέγονται από τον εναλλακτικό ενεργειακό καταρράκτη που αναπτύσσεται στην εργασία αυτή. Οι ροές των ρευμάτων που αναμιγνύονται παρόλαυτά είναι διαφορετικές. Στην περίπτωση αυτή για μείωση των βοηθητικών παροχών και των εναλλακτών του δικτύου η υπερδομή του δικτύου εναλλακτών επιλέγει θέρμανση του νερού και στη συνέχεια ανάμιξη, το ίδιο ισχύει και για το ρεύμα αποβλήτων, το οποίο ψύχεται μέχρι ένα σημείο και στη συνέχεια εναλλάσσει θερμότητα. Το μοντέλο που χρησιμοποιούν οι Ahmetovic et al. όπως άλλωστε είναι φανερό και από το Σχήμα 3.3 είναι αρκετά περίπλοκο και μεγάλο σε μέγεθος καθώς εμπεριέχει πάρα πολλές μεταβλητές και εξισώσεις λόγο του μεγάλου αριθμού κόμβων που υπάρχουν.

Η μεθοδολογία που προτείνεται πετυγχαίνει πολύ καλύτερες εξοικονομήσεις ενέργειας και καλό αριθμό εναλλακτών που όπως φαίνεται με περαιτέρω εξέλιξη είναι δυνατόν να επιτυγχάνει ακόμα μικρότερο αριθμό. Η απλότητά της σε σύγκριση με σύγχρονες μεθοδολογίες είναι αυτή που κατοχυρώνει λύσεις που είναι πιο κοντά στο βέλτιστο.

## 5.2.3 Παράδειγμα Bagajewicz et al. [7]

Τα δεδομένα του προβλήματος αναγράφονται στον πιο κάτω πίνακα:

Διεργασία	Cin (ppm)	Cout (ppm)	Tin(°C)	Μαζικό Φορτίο (g/s)	
1	25	80	40	2.0	
2	25	90	100	2.88	
3	25	200	80	4.0	
4	50	100	60	3.0	
5	50	800	50	30.0	
6	400	800	90	5.0	
7	400	600	70	2.0	
8	0	100	50	1.0	
Τin φρέσκου νερού, Tin = 20 °C					
Τουt φρέσκου νερού, Tout = 30 °C					

Πίνακας 5.32: Δεδομένα Προβλήματος Bagajewicz et al. [7]

Το μη γραμμικό πρόβλημα της υπερδομής έχει μικρό μέγεθος και λύνεται εύκολα όπως στο παράδειγμα των Savulescu et al. [1]. Το ελάχιστο φρέσκο νερό υπολογίζεται 125,9 kg/s.

Αναλυτικά αποτελέσματα για το νερό παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.33.

Διεργασία	Αρχικό απαιτούμενο νερό (kg/s)	Νερό που απαιτείται μετά τη βελτιστοποίηση (kg/s)	Εξοικονομήσεις νερού σε κάθε διεργασία (%)	Συνολικές Εξοικονομήσεις
1	25	26,263	-5	Αρχικό συνολικό απαιτούμενο νερό (kg/s)
2	32	32,190	0	164
3	20	16,508	17	Ελάχιστο νερό που απαιτείται (kg/s)
4	30	25,982	13	125,9
5	37,5	15	60	Εξοικονόμηση
6	6,250	0	100	
7	3,333	0	100	23%
8	10	10	0	

Πίνακας 5.33: Αποτελέσματα Υπερδομής

Η διαμόρφωση του δικτύου παρουσιάζεται στο πιο κάτω Σχήμα 5.14:



Σχήμα 5.14: Διαμόρφωση Δικτύου Νερού από την επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος υπερδομής

Οι ροές επαναχρησιμοποίησης που υπολογίζονται κατά την επίλυση του μη γραμμικού μοντέλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.10, δεν σταθεροποιούνται στον
εναλλακτικό ενεργειακό καταρράκτη. Οι ροές φρέσκου νερού που υπολογίστηκαν για κάθε διεργασία μαζί με τα ισοζύγια μάζας γύρω από κάθε διεργασία, είναι αυτά που θεωρούνται σταθερά στο μεικτό γραμμικό μοντέλο. Η διαμόρφωση του δικτύου είναι αυτή που βοηθά στην καλύτερη επιλογή αναμίξεων. Οι επαναχρησιμοποιήσεις που επιλέγονται τηρούν τους περιορισμούς συγκέντρωσης στο δίκτυο του νερού οπότε είναι λογικό κάποιες από αυτές να επηρεάζουν την επιλογή των αναμίξεων στον εναλλακτικό καταρράκτη.

Ο αριθμός των θερμών και ψυχρών ρευμάτων που συμμετέχουν στο μεικτό γραμμικό μοντέλο (MILP) υπολογίζονται όπως πριν από την υπερδομή του δικτύου νερού. Υπολογίζονται 35 θερμά και 35 ψυχρά ρεύματα. Τα ψυχρά ρεύματα που αντιστοιχούν στο φρέσκο νερό ορίζονται ώστε να σταθεροποιείται ο στόχος του νερού ενώ όλα τα υπόλοιπα είναι μεταβλητα και εξαρτημένα από τα ισοζύγια μάζας για κάθε διεργασία.

Τα αποτελέσματα του ενεργειακού καταρράκτη φαίνονται πιο κάτω. Αρχικά στο Σχήμα 5.15 φαίνονται οι αναμίξεις που πραγματοποιούνται.



Σχήμα 5.15: Αναμίξεις που επιλέγονται από τον εναλλακτικό ενεργειακό καταρράκτη

Οι αναμίξεις που παρουσιάζονται στο πιο πάνω σχήμα, αντιστοιχούνται ανάλογα με το είδος τους.

Ρεύμα Επαναχρησιμοποίησης	Θερμό/ Ψυχρό
Freuse <sub>2,1</sub>	FH <sub>9</sub>
Freuse <sub>2,3</sub>	FH <sub>10</sub>
Freuse <sub>2,4</sub>	$FH_{11}$
Freuse <sub>3,7</sub>	FH <sub>19</sub>
Freuse <sub>5,7</sub>	<i>FC</i> <sub>26</sub>
Freuse <sub>7,6</sub>	<i>FC</i> <sub>30</sub>

Πίνακας 5.34: Αντιστοίχηση ρευμάτων επαναχρησιμοποίησης που επιλέγονται ανάλογα με το είδος τους

Από τα 35 θερμά και 35 ψυχρά ρεύματα, τελικά στο μεικτό γραμμικό μοντέλο συμμετέχουν 9 θερμά και 8 ψυχρά ρεύματα. Όσον αφορά τα ρεύματα που συμμετέχουν τελικά στον ενεργειακό καταρράκτη παραμένει να εξεταστούν οι λόγοι ροών και οι θερμοκρασίες στις οποίες αναμιγνυόνται τα ρεύματα. Οι λόγοι ροών παρουσιάζονται στον πιο κάτω πίνακα:

Πίνακας 5.35: Λόγοι ροών ρευμάτων που αναμιγνύονται

chc11 <sub>H,C,K</sub>		Θερμοκ	ρασιακό διάς	στημα
Θερμά ρεύματα	Ψυχρά ρεύματα	3	6	7
H <sub>9</sub>	<i>C</i> <sub>1</sub>	-	-	0.33
<i>H</i> <sub>10</sub>	<i>C</i> <sub>3</sub>	-	-	2.6
H <sub>11</sub>	<i>C</i> <sub>4</sub>	-	1.52	-
H <sub>19</sub>	C <sub>26</sub>	0.5	-	-

Οι ροές των ρευμάτων που αναμιγνύονται και των αναμίξιμων ρευμάτων παρουσιάζονται στον πιο κάτω πίνακα.

Αναμίξιμο	Θερμό	Ψυχρό	Θερμοκρασιακό	FHC <sub>h,c,n</sub>	FCH <sub>c,h,n</sub>	FHCK <sub>h,c,n</sub>
Ρεύμα	ρεύμα	Ρεύμα	Διάστημα	(kg/s)	(kg/s)	(kg/s)
1	$H_9$	<i>C</i> <sub>1</sub>	7	8.66	20	28.66
2	$H_{10}$	<i>C</i> 3	7	6.34	16.507	22.848
3	$H_{11}$	<i>C</i> <sub>4</sub>	6	17	25.982	42.982
4	<i>H</i> <sub>19</sub>	<i>C</i> <sub>26</sub>	3	14.507	7.25	21.752

Από τους πιο πάνω πίνακες παρατηρείται ότι δεν επιτυγχάνουν όλα τα αναμίξιμα ρεύματα να φτάσουν στους θερμοκρασιακούς τους στόχους με τη μη ισοθερμοκρασιακή ανάμιξη. Το 2° και 3° ρεύμα θα έπρεπε να αναμιγνύονται σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Οι λόγοι ροών λοιπόν που επιλέγονται δεν είναι οι κατάλληλοι για την ολοκλήρωση αυτών των ρευμάτων. Τα ρεύματα αυτά συμμετέχουν στον ενεργειακό καταρράκτη μαζί με τα υπόλοιπα που δεν αναμιγνύονται.

Οι ροές των ρευμάτων που δεν αναμιγνύονται και εισέρχονται στον ενεργειακό καταρράκτη καταγράφονται στον επόμενο πίνακα.

	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,		
FHK1 <sub>H,K</sub>	Kg/s	FCK1 <sub>C,K</sub>	Kg/s
<i>FHK</i> 1 <sub>1,K</sub>	35,02	$FCK1_{2,K}$	32.19
FHK1 <sub>4,K</sub>	42.98	$FCK1_{5,K}$	15
<i>FHK</i> 1 <sub>5,K</sub>	15	$FCK1_{8,K}$	10
FHK1 <sub>6,K</sub>	21.75	$FCK1_{30,K}$	21,75
FHK1 <sub>8,K</sub>	10		

Πίνακας 5.37: Ροές ρευμάτων που δεν αναμιγνύονται

Στον Πίνακας 5.38, παρουσιάζονται τα θερμικά φορτία των ρευμάτων που λαμβάνουν μέρος στο ενεργειακό καταρράκτη

Θερμοκρασιακό	$T_{hot}(K)$	$T_{hot}(K)$					Θερμικ	κά Φορτία (Ι	kW)				
Διάστημα	373	363	H1	H4	H5	H6	H8	C2	C5	C8	C30	M1	M2
1											1827		
	262	252											
2		303				929		1373			1827	959	
	353	343											
3		0-0				929		1373			1827	959	
	3/3	333											
4	545					929		1373				959	1805
	222	222											
5		323		1826		929		1373	640	426		959	1805
	222	212											
6	525	515		1826	637	929	425	1373	640	640		959	1805
	313	303											
7		200	1400	1000	607	020	405	0747	640	050		1010	
1	293	283	1400	1020	037	929	420	2141	040	000		1919	

Πίνακας 5.38: Θερμικά φορτία ρευμάτων που λαμβάνουν μέρος στον ενεργειακό καταρράκτη



Ο Ενεργειακός καταρράκτης φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα:

Σχήμα 5.16: Ενεργειακός Καταρράκτης με μεταβλητές ροές και αναμίξεις

Τα ρεύματα εφόσον ολοκληρωθούν μέσω της μη ισοθερμοκρασιακής ανάμιξης όπως είναι λογικό «διαγράφονται» από τον ενεργειακό καταρράκη, με άλλα λόγια δεν συμμετέχουν. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.16 πραγματοποιούνται τέσσερις αναμίξεις. Τα δύο από τα τέσσερα νέα ρεύματα ολοκληρώνονται πλήρως μέσω της μη ισοθερμοκρασιακής ανάμιξης, ενώ τα υπόλοιπα εισέρχονται στον ενεργειακό καταρράκτη. Καθώς οι θερμοκρασίες ανάμιξης τους είναι πιο χαμηλές από τον θερμοκρασιακό στόχο τους, τα ρεύματα αυτά θεωρούνται ψυχρά και χρειάζονται περαιτέρω θέρμανση. Οι αρχικές απαιτήσεις σε θερμή παροχή ήταν 9427,353 kW και σε ψυχρή παροχή 7505,472 kW.

Οι βοηθητικές παροχές που υπολογίζονται αναγράφονται στον Πίνακα 5.39:

Εξοικονόμηση	Βοηθητικές	Θερμές	Ψυχρές
Ενέργειας	Παροχές	Παροχές	Παροχές
69 %	5290 kW	5290 kW	0

Πίνακας 5.39: Εξοικονομήσεις και βοηθητικές παροχές

Τα αποτελέσματα του μεικτού γραμμικού μοντέλου (MILP) φαίνονται πιο κάτω. Ο τελικός αριθμός που προκύπτει είναι 8.

Πίνακας	5.40:	Εναλλάκτες	Θερμότητας
---------	-------	------------	------------

Θερμό/Ψυχρό	2	5	8
1			HX
4	HX	HX	HX
5			HX
6	HX	HX	
8		HX	

## 5.2.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων για παράδειγμα Bagajewicz et al. [7]

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στα υποκεφάλαιο 5.2.4 θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα μεθόδων που αναπτύχθηκαν στη βιβλιογραφία.

Αρχικά, πρέπει να αναφερθεί ότι το δεύτερο παράδειγμα που επιλύεται περιλαμβάνει μεγαλύτερο αριθμό διεργασιών σε σχέση με το προϋγούμενο παράδειγμα.

Πρώτα, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των Bagajewicz et al. [7] καθώς ήταν αυτοί που εφάρμοσαν το συγκεκριμένο παράδειγμα το 2002. Το ελάχιστο νερο που επιτυγχάνουν είναι 125,94 kg/s, ελάχιστη θερμή παροχή 5289,6 kW και 12 εναλλάκτες. Το δίκτυο στο οποίο καταλήγουν φαίνεται πιο κάτω.



Σχήμα 5.17: Δίκτυο των Bagajewicz et al.

Από την άλλη, οι Liao et al. [24], πετυγχαίνουν ελάχιστο νερό 127.713 kg/s, ελάχιστη θερμή παροχή 5363,94 kW και 4 εναλλάκτες. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προτεινόμενη μεθοδολογία είναι πολύ κοντά στα αποτελέσματα των υπόλοιπων μεθοδολογιών. Στο παράδειγμα αυτό είναι φανερό

ότι ο εναλλακτικός ενεργειακός καταρράκτης λειτουργεί αποδοτικά ακόμα και σε σύστημα περισσότερων διεργασιών επιτυγχάνοντας καλά αποτελέσματα.

# 6 Κεφάλαιο:

Συμπεράσματα-Προτάσεις για το μέλλον

Μετά την ανάλυση του προβλήματος και της μεθοδολογίας επίλυσης του, καθώς και την εφαρμογή του στο πρόβλημα που εξετάσαμε μπορούμε να εξάγουμε σημαντικά συμπεράσματα και να κάνουμε προτάσεις για να βελτιωθεί το μοντέλο. Τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας συνοψίζονται παρακάτω.

Αρχικά, αναπτύχθηκε μια συστηματική μεθοδολογία η οποία χρησιμοποιεί απλά θερμοδυναμικά μοντέλα και την υπερδομή του δικτύου νερού. Εξελίχθηκαν τα κλασικά θερμοδυναμικά μοντέλα Μεταφοράς ώστε να δέχονται μεταβλητές ροές και αναμίξεις ρευμάτων. Καθιερώθηκε η επικοινωνία μεταξύ ενός μοντέλου υπερδομής και των θερμοδυναμικών μοντέλων. Η προσέγγιση είναι απλή και περιλαμβάνει μη γραμμικά μοντέλα (NLP) και μεικτά γραμμικά μοντέλα (MILP). Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι οι λύσεις είναι υποδεέστερες άλλων μεθόδων στα συγκεκριμένα προβλήματα που επιλύθηκαν. Παρόλαυτά, παρατηρήθηκε ότι με εξαντλητική εισαγωγή συνδιασμών στο μοντέλο είναι δυνατόν να βελτιωθούν οι λύσεις.

Το υπολογιστικό όφελος που προκύπτει από την χρήση μεικτών γραμμικών μοντέλων είναι τεράστιο καθώς υπάρχουν επιλυτές που μπορούν να συγκλίνουν σε βέλτιστες λύσεις σχετικά εύκολα, και κατ' επέκταση το μικρό μέγεθος του μοντέλου, με 6000 μεταβλητές το καθιστά πολύ απλό συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους που χρησιμοποιούν τις υπερδομές του δικτύου εναλλακτών.

Ακόμη, επιβεβαιώθηκε ότι η ταυτόχρονη αντιμετώπιση του προβλήματος ελαχιστοποίησης του νερού και της ενέργειας σε ένα στάδιο δεν μπορεί να αποφέρει σημαντικές εξοικονομήσεις και στα δύο καθώς δεν υπάρχουν περιορισμοί που να καθοδηγούν τη βελτιστοποίηση προς μέγιστη εξοικονόμηση

ενέργειας. Οι περιορισμοί συγκεντρώσεων και τα ισοζύγια μάζας είναι αυτά που υπερισχύουν. Η σταθμική αντικειμενική συνάρτηση δεν είναι αρκετή για την επίτευξη του επιθυμητού στόχου. Η διαδοχική ελαχιστοποίηση με απλουστευμένα μοντέλα, ελαχιστοποιεί το νερό αλλά ελαχιστοποιεί την ενέργεια χωρίς να τηρείται η διαμόρφωση του δικτύου. Το γραμμικό μοντέλο Μεταφοράς πραγματοποιεί όσες πιο πολλές εναλλαγές θερμότητας μεταξύ θερμών και ψυχρών ρευμάτων, προσθέτοντας εναλλάκτες χωρίς να τηρείται κάποιος περιορισμός στο πάγιο κόστος ή στη διαμόρφωση του δικτύου νερού.

Η μελέτη αποδεικνύει ότι με τον κατάλληλο συνδυασμό απλών εργαλείων είναι δυνατόν να δημιουργηθεί μια μεθοδολογία για την ελαχιστοποίηση του νερού και της ενέργειας όπως και να επιτευχθεί μικρός αριθμός εναλλακτών στο τελικό δίκτυο που συνεπάγεται χαμηλά πάγια κόστη.

Τέλος, τα θέματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης συνοψίζονται στη συνέχεια.

- Θα ήταν εύλογο να επιτρέπονται αναμίξεις μεταξύ θερμών και αναμίξεις μεταξύ ψυχρών ρευμάτων καθώς όπως αποδεικνύεται από τα αποτελέσματα στην περίπτωση ανάμιξης των θερμών ρευμάτων αποβλήτων θα μπορούσε να μειωθεί περαιτέρω ο αριθμός των εναλλακτών.
- Μελλοντική μελέτη για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας για την εξαγωγή διαγραμμάτων αντισταθμίσεων μεταξύ ελάχιστου νερού, ελάχιστης ενέργειας και ελάχιστου αριθμού εναλλακτών.
- Σημαντικό θα ήταν να εφαρμοστούν τα δεδομένα μιας πραγματικής βιομηχανίας ώστε να αναλυθούν τα περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας και νερού σε αυτήν.
- Να χρησιμοποιηθούν θερμά ρεύματα που εξέρχονται από διεργασίες ως θερμές παροχές για περαιτέρω μείωση των βοηθητικών παροχών.
- 5. Το πρόβλημα αυτό αναπτύσσεται για ένα ρυπαντή κάτι που είναι αρκετά μακριά από τις πραγματικές συνθήκες μιας βιομηχανίας, άρα η ανάπτυξη του μοντέλου για πολλούς ρυπαντές θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη.

## Βιβλιογοαφία

- [1] L. Savulescu, J. K. Kim, and R. Smith, "Studies on simultaneous energy and water minimisation Part II: Systems with maximum re-use of water," *Chem. Eng. Sci.*, 2005.
- [2] M. M. El-Halwagi and V. Manousiouthakis, "Automatic synthesis of massexchange networks with single-component targets," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 45, no. 9, pp. 2813–2831, Jan. 1989.
- [3] Y. P. Wang and R. Smith, "Wastewater minimisation," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 49, no. 7, pp. 981–1006, Apr. 1994.
- [4] Y.-P. Wang and R. Smith, "Design of distributed effluent treatment systems," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 49, no. 18, pp. 3127–3145, Sep. 1994.
- [5] S. J. Doyle and R. Smith, "Targeting Water Reuse with Multiple Contaminants," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 75, no. 3, pp. 181–189, Aug. 1997.
- [6] R. Smith, Chemical process design and integration, 2<sup>nd</sup>, John Wiley & Sons, 2005.
- [7] M. Bagajewicz, H. Rodera, M. Savelski, and M. Bagajewicz, "Energy efficient water utilization systems in process plants," 2002.
- [8] S. A. Papoulias and I. E. Grossmann, "A structural optimization approach in process synthesis—II," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 7, no. 6, pp. 707–721, Jan. 1983.
- [9] T. F. Yee and I. E. Gnossmannt, "T. F. YEE and I. E. GnossMaNNt Department of Chemical Engineering, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213, U.S.A.," vol. 14, no. 10, pp. 1165–1184, 1990.
- [10] C. A. Floudas and A. R. Clrlc, "Automatic Synthesis of Optimum Heat Exchanger Network Configurations," vol. 32, no. 2, pp. 276–290, 1986.
- [11] A. R. Ciric and C. A. Floudas, "Retrofitting Heat Exchanger Networks: A Two Stage Approach," in *Design Theory '88*, New York, NY: Springer New York, 1989, pp. 265–285.
- [12] C. A. Floudas, *Nonlinear and mixed-integer optimization : fundamentals and applications*. Oxford University Press, 1995.

- [13] C. S. Adjiman, "Advanced Process Optimisation," no. January, 2017.
- [14] C. S. Adjiman, I. P. Androulakis, and C. A. Floudas, "Global optimization of MINLP problems in process synthesis and design," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 21, pp. S445–S450, May 1997.
- [15] S. R. Savulescu, L. E., "Simultaneous energy and water minimisation," 1998.
- [16] M. J. Bagajewicz, M. Rivas, and M. J. Savelski, "A robust method to obtain optimal and sub-optimal design and retrofit solutions of water utilization systems with multiple contaminants in process plants," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 24, no. 2–7, pp. 1461–1466, Jul. 1997.
- [17] L. Savulescu, J.-K. Kim, and R. Smith, "Studies on simultaneous energy and water minimisation—Part I: Systems with no water re-use," *Chem. Eng. Sci.*, 2005.
- [18] B. Leewongtanawit and J.-K. Kim, "Improving energy recovery for water minimisation," *Energy*, vol. 34, no. 7, pp. 880–893, Jul. 2009.
- [19] J. Martínez-Patiño, M. Picón-Núñez, L. M. Serra, and V. Verda, "Design of water and energy networks using temperature-concentration diagrams," *Energy*, vol. 36, no. 6, pp. 3888–3896, Jun. 2011.
- [20] Z. A. Manan, S. Y. Tea, and S. R. W. Alwi, "A new technique for simultaneous water and energy minimisation in process plant," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 87, no. 11, pp. 1509–1519, Nov. 2009.
- [21] S. R. Wan Alwi, A. Ismail, Z. A. Manan, and Z. B. Handani, "A new graphical approach for simultaneous mass and energy minimisation," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 6–7, pp. 1021–1030, May 2011.
- [22] M. Bagajewicz, "A review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants," vol. 24, pp. 2093–2113, 2000.
- [23] M. Bogataj and J. Bagajewicz, "Design of non-isothermal Process Water Networks," no. 2000, pp. 377–382, 2007.
- [24] Z. Liao, G. Rong, J. Wang, and Y. Yang, "Systematic Optimization of Heat-Integrated Water Allocation Networks," pp. 6713–6727, 2011.
- [25] E. Ahmetovi and Z. Kravanja, "Simultaneous synthesis of process water and heat exchanger networks," vol. 57, pp. 236–250, 2013.
- [26] Z. Liu and Y. Luo, "Simultaneous Integration of Water and Energy in Heat-Integrated Water Allocation Networks," vol. 61, no. 7, pp. 2202–2214, 2015.
- [27] J. Jeżowski, "Review of Water Network Design Methods with Literature Annotations," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 49, no. 10, pp. 4475–4516, May 2010.
- [28] E. Ahmetović and Z. Kravanja, "Simultaneous synthesis of process water and heat exchanger networks," *Energy*, 2013.

## Παραρτηματα

Α Κώδικας Gams

## Μοντέλο Υπερδομής

-11		Tin_K(i) 'Inlet temperature of process i in Kelvin '
<pre>\$title toy_model</pre>		Tout_K(i) 'Outlet temperature of process i in Kelvin '
Option limrow=o, limcol=o;		Q_HX_init(i) ' the initial heat duties for HX i '
Sets		TQ_HX_init ' the total initial heat duties '
i number of using processes /1*4/		Qww_CX_init
alias(i,ii)		TQww_CX_init
*option iterlim = 99999999;		Fw_init(i)
*option Reslim = 99999999;		Total_FWinitial ' max water consumption prior to integration in t/h'
option nlp = baron ;		**** Coefficients for Cp calculation (source: Daubert and Danner 1989)
*Input Parameters		alfa / 278370 /
parameters Cinmax(i) /\$include Cinmax.txt/ ;		bita /-2090.1 /
parameters Coutmax(i) /\$include Coutmax.txt/ ;		gamma /8.115 /
parameters Mc(i) /\$include MC.txt/ ;		delta /-0.014106 /
parameters Tp_in(i) /\$include Tp_in.txt/ ;		epsilon /0.0000093701/ ;
<pre>parameters Tp_out(i) /\$include Tp_out.txt/ ;</pre>		***************************************
		$Fw_i(i) = Mc(i) / Coutmax(i);$
Parameters		Total_FWinitial = sum(i, Fw_init(i));
cp(i)		$Tin_K(i) = Tp_in(i) + 273.15;$
Ce_limit ' Environmental discarge limit Ce in pp	m'/99999/	$Tout_K(i) = Tp_out(i) + 273.15;$
M ' A large fixed flowrate of water for integ	er constrain' / 9999999 /	Tenv20_K = Tenv20 + 273.15;
cp_const ' heat capacity in (kJ/kg*K) '	/4.216620/	Tenv30_K = Tenv30 + 273.15;
Tenv20 'Environmental Temperature limit'	/20/	
Tenv30 ' Environmental Temperature limit'	/30/	cp(i)=(alfa + (bita * Tin_K(i)) + (gamma * (Tin_K(i)*Tin_K(i))) + (delta * (Tin_K(i)*Tin_K(i)*Tin_K(i))) + (epsilon*
Tenv20_K		(Tin_K(i)*Tin_K(i)*Tin_K(i)*Tin_K(i))))/(18.01528*1000);

Tenv30\_K

Q\_HX\_init(i) = 1000\*Fw\_init(i)\*(cp(i)\*Tin\_K(i) cp\_const\*Tenv20\_K)/3600 ;

TQ\_HX\_init = sum(i, Q\_HX\_init(i));

Qww\_CX\_init(i) = 1000\*Fw\_init(i)\*(cp(i)\*Tout\_K(i)cp\_const\*Tenv30\_K)/3600 ;

TQww\_CX\_init = sum(i, Qww\_CX\_init(i));

### Variables

FW 'freshwater flowrate for the system'

Fwin(i) 'freshwater flowrate entering process i'

FWW 'wastewater flowrate'

Fin(i)

Fout(i)

Fwwout(i) 'water flowrate from operation i to wastewater stream'

Freuse(i,ii) 'reuse flowrate from operation i to operation ii'

Freuse(ii,i) 'reuse flowrate from operation ii to operation i'

Cwwout(i) 'concentration of contaminant in outlet stream of operation i to wastewater stream'

Cout(i) 'concentration of contaminant in outlet stream of operation i'

Cin(i) 'concentration of contaminant in inlet stream of operation i'

Coutenv 'concentration of contaminant in wastewater stream dicharged in the environment'

Ws 'Total water savings'

z 'total water and energy savings' ;

Positive Variables FWW, Fwin, Fwwout, Freuse, Cwwout, Cout, Cin, Coutenv;

### Equations

objective	'total water and energy savings'
freshwater	'define objective function'
wastewater	'wastewater flow'
contaminant_waste	'Total flow of contaminants in wastewater'
contaminant_removed(i) operation i '	'Mass of contaminants removed by water in
mass_balance_operation(i	)
inletflow_operation(i)	'Inlet flow for process i'
contaminantmass_inlet(i)	'Mass contaminant entering operation i'
outletflow_operation(i)	'Outlet flow from process i'
No_inter_P_recycle(i,ii)	'Forbit recycle streams'
maxin_constraint(i)	'Maximum inlet constraint for operation i'
maxout_constraint(i)	'Maximum outlet constraint for operation i'
Discharge_limit_constrain concentration'	t 'constraint for the maximum discharge
water_savings	'water savings' ;
freshwater	FW =e= sum(i,Fwin(i));
wastewater	<pre>FWW =e= sum(i,Fwwout(i)) ;</pre>
contaminant_waste Fwwout(i)*Cout(i)) ;	FWW*Coutenv =e= sum(i,
contaminant_removed(i) .	. Mc(i) =e= Fin(i)*(Cout(i)-Cin(i)) ;
mass_balance_operation(i	) Fin(i) =e= Fout(i) ;
inletflow_operation(i)	<pre>Fwin(i) =e= Fin(i) - sum(ii,Freuse(ii,i)) ;</pre>

contaminantmass_inlet(i) Fin(i) Freuse(ii,i)*Cout(ii)) ;	*Cin(i)=e= sum(ii,	
outletflow_operation(i) Fout(i);	=e= sum(ii, Freuse(i,ii))+ Fwwout(i)	Sets
No_inter_P_recycle(i,ii) Freuse(	i, ii)\$(ord(i) eq ord(ii)) =e= o; H	H hot s
maxin_constraint(i) Cin(i) =	=l= Cinmax(i);	C cold s
maxout_constraint(i) Cout(i)	=l= Coutmax(i);	5 hot ut
Discharge_limit_constraint Coute	nv =l= Ce_limit ;	W cold
water_savings Ws =e= (( FW)/Total_FWinitial)*100;	Total_FWinitial-	X /1*50
objective $z = e = Ws$ ;	k	KM old
*initialisations	*	*Input P
Cin.l(i) = Cinmax(i);	P	paramet
Cout.l(i) = Coutmax(i);	p	paramet
Coutenv.l = Ce_limit;	p	paramet
Cout.fx(i) = Coutmax(i);	p	paramet
*FW.fx = 90 ;	p	paramet
	P	paramet
Model toy model /all/ :	*	* INCLU
Solve toy model using nln maximize z :	F	paramet
	\$	GDXIN
display EW/   EW/W/   Ewin   Ew init Fin	\$	LOAD
Mal Total EW/initial Cin L Court	an TO HV init :	GDXIN
ws.i, iotai_rwiiittiai, Ciii.i , Cout.i,	ср, т <u>q_п</u> л_ши ; F	Paramet
	-	

## Μοντέλο Μεταφοράς

stream /1\*10/ stream /1\*10/ tilities /1\*1/ utilities /1\*1/ ;0/ Temperature Intervals / 1\*50 / ; Parameters ters TINH(H) / \$inlude TINH.txt/ ; ters TOUTH(H) /\$include TOUTH.txt/ ; ters CPH(H) /\$include CPH.txt/ ; ters TINC(C) /\$include TINC.txt/ ; ters TOUTC(C) /\$include TOUTC.txt/ ; ters CPC(C) /\$include CPC.txt/ ; JDE FROM MATLAB ters chc11(H,C,K) chc11.gdx chc11 ter TINS(S) inlet temperature of hot utility streams /1 523 /; PARAMETER TINW(W) cold util temp /1 293 /; PARAMETER CS(S) hot utility cost /1 50 / ;

PARAMETER AW(W) availability of cold util / 1 INF /; PARAMETER DT minimum T approach ; DT =10 ; Parameter N /5/; \*Old Temperature Intervals parameters THM(KM) /\$include THM.txt/ ; parameters TCM(KM) /\$include TCM.txt/ ; \*new Temperature Intervals parameters TC1(K) /\$include dataTC.txt/ ; parameters TH1(K) /\$include dataTH.txt/ ; \*=== Presence of streams at each interval *\*find min and max stream temperature* PARAMETERS HMAX, HMIN, CMAX, CMIN, TMAX, TMIN; HMAX = SMAX(H,TINH(H)); CMAX = SMAX(C,TOUTC(C)); HMIN = SMIN(H,TOUTH(H)); CMIN = SMIN(C,TINC(C));TMAX = MAX(HMAX,CMAX); TMIN = MIN(HMIN,CMIN); Parameters HKM(H,KM), CKM(C,KM), SKM(S,KM), WKM(W,KM); LOOP (KM \$ (ORD(KM) LT N), HKM(H,KM)=1 \$((TINH(H) GE THM(KM)) AND (TOUTH(H) LT THM(KM))); CKM(C,KM)=1 \$(((TINC(C) LE TCM(KM)) AND (TOUTC(C) GT TCM(KM+1))) OR ((TINC(C) EQ TMIN) AND (ORD(KM) EQ N))); SKM(S,KM)=1 \$((TINS(S) EQ THM(KM)) OR ((TINS(S) GT THM(KM)) AND (ORD(KM) EQ 1)));

PARAMETER CW(W) cold utility cost/1 20 /;

PARAMETER AS(S) availability of hot util/ 1 INF /;

WKM(W,KM)=1 \$((TINW(W) EQ TCM(KM+1)) OR ((TINW(W) LE TMIN) AND (ORD(KM) EQ N))); ); \* Grouping new intervlas to old intervals Parameter KK(K,KM); LOOP( KM \$ (ORD(KM) LT N), LOOP(K \$ (ord(K) LT KN), KK(K,KM) \$ (( TH1(K) LE THM(KM)) AND (TC1(K) GE (THM(KM+1)))) = 1; ); ); PARAMETER DTH(H,KM), DTC(C,KM); LOOP (K \$ (ord(KM) LE N), LOOP (H HK(H, KM), DTH(H,KM)=CPH(H)\*(THM(KM)-THM(KM+1)); IF (((TOUTH(H) GT THM(KM+1)) OR ((TOUTH(H) GT TMIN) AND (ORD(KM) EQ N))), DTH(H,KM)=CPH(H)\*(THM(KM)-TOUTH(H)); ); ); LOOP (C  $\$  CKM(C,KM), DTC(C,KM) = CPC(C)\*(TCM(KM)-TC(KM+1));IF ((TOUTC(C) LT TCM(KM)), DTC(C,K) = CPC(C)\*(TOUTC(C) -TCM(KM+1))); IF ( ((TOUTC(C) LT TC(KM)) AND (ORD(K) EQ N)), DTC(C,K)=CPC(C)\*(TOUTC(C)-TMIN));

);

);

\*\*======== Mass balances for new hot and new cold streams

variables for hot streams

**Positive Variables** 

FH(H) Flowrate of hot stream H

FHK1(H,KM) Flowrate of hot stream H that enters the initial temperature interval

FHC(H,C,K) Flowrate of hot stream H that mixes with a cold stream C in order to enter a lower temperature interval

FC(C) Flowrate of cold stream C

FCK1(C,KM) Flowrate of cold stream C that enters the initial temperature interval

FCH(C,H,K) Flowrate of cold stream C that mixes with a hot stream H in order to enter a lower temperature interval

\*\* ========= Total Mass Balances for HOT streams

### Equations

TotalFH1 Total mass balance of hot streams H ;

TotalFH1(H).. FH(H) =E= sum(K \$ ((ord(KM) lt N) and (TINH(H) EQ THM(KM))), FHK1(H,KM)) +

sum ((C,K) \$ ((TOUTH(H) EQ TH(K)) AND (TOUTH(H) EQ TOUTC(C))) ,
FHC(H,C,K));

\*\* ========= Total Mass Balances for COLD streams

Equations

+

TotalFC1 Total mass balance of cold streams C ;

TotalFC1(C).. FC(C) =E= sum(K \$ (TINC(C) EQ THM(KM)), FCK1(C,KM))

MIXHC(H,C,K) ((TOUTH(H) EQ TH(K)) AND (TOUTH(H) EQ TOUTC(C))).. FHCK(H,C,K) =E= FHC(H,C,K) + FCH(C,H,K);

\*\* Equations that combine flowrates which are present in the above balances

sum ((H,K) \$((TOUTC(C) EQ TH(K)) AND (TOUTH(H) EQ TOUTC(C))) ,

Equations

FCH(C,H,K));

Equations

MIXHC ;

**Positive Variables** 

hch11 The ratio between the flowrates of H and C that mix in order to enter an intermediate interval;

hc11(H,C,K) \$ (ord(K) LE KN).. FHC11(H,C,K) \$ (TINC(C) LT TH1(K)) =E=

(chc11(H,C,K) \* FCH11(C,H,K)) \$ (TINC(C) LT TH1(K)) ;

FHCK(H,C,K) Flowrate of mixing stream between H and C;

\*\* ALLOWING OR PERMITTING THE EXISTENCE OF STREAMS

binary variables dhc11(H,C,K);

Parameter LU / 9999999 / ;

ExistenceofHC11 Allowing or permitting the creation of a match between H and C stream through logic constraints

ExistenceofHC11(H,C,K) \$ (ord(K) LE KN).. (FHC11(H,C,K) - dhc11(H,C,K) \* LU) \$ (TINC(C) LT TH1(K)) =L= 0 ;

\*Mass balances for process streams for calculating flowrates

Equations

FLOWP1

FLOWP2

FLOWP3

FLOWP4;	FIN_FIX2 $Fin("2") = E = FH("2") + FH("6") + FH("7");$
FLOWP1 $FH("5")+FH("8")+FH("10")+FC("1") = E = FC("5")+FC("6")$	FIN_FIX3 $Fin("3") = E = FC("3") + FH("6");$
+FC("7")+FH("1");	FIN_FIX4 $Fin("4") = E = FH("7") + FC("7");$
+FH("6")+FH("7");	
FLOWP3 FC("3")+FC("6")+FC("10")+FH("6") =E= FH("3")+FH("8")	Variables
+FH("9")+FC("8");	QHK1(H,KM)
FLOWP4 $FC("4")+FC("7")+FH("7")+FH("9")=E=$ FC("0")+FC("10")+FH("4")+FH("10"):	QCK1(C,KM)
* Data from nln model correspondance of water streams wastewater streams	QM(H,C,K) ;
and reuse streams with hot and cold streams	Equations
*allowing heat integration to network streams	heatofHk1 Heat content of H entrering th 1st interval of the stream;
Equations	heatofCk1 Heat content of C entrering th 1st interval of the stream
FREUSE_RESTRICT1(i,ii)	heatmixHC Heat content of mixing stream;
FREUSE_RESTRICT2(i,ii)	heatofHk1(H, K) \$ HKM(H,KM) QHK1(H,KM) =E= FHK1(H,KM) * DTH(H,KM) ;
FREUSE_RESTRICT3(i,ii)	heatofCk1(C, K) \$ CKM(C,KM) QCK1(C,KM) =E= FCK1(C,KM) * DTC(C,KM)
FREUSE_RESTRICT4(i,ii) ;	heatmixHC(H,C,K) \$ (TOUTH(H) EQ TOUTC(C)) QM(H,C,K)= FHCK(H,C,K)
FREUSE_RESTRICT1(i,ii) Fwin.l("1") = $E = FC("1")$ ;	* ((CPC(C)+CPH(H))/2) * TH1(K) ;
FREUSE_RESTRICT2(i,ii) Fwin.l("2") = $E = FC("2")$ ;	Positive Variables
FREUSE_RESTRICT3(i,ii) Fwin.l("3") = $E = FC("3")$ ;	QHT(H) total heat contents of hot process streams
FREUSE_RESTRICT4(i,ii) Fwin.l("4") = $E = FC("4")$ ;	QCT(C) total heat contents of cold process streams ;
Equations	Equations
FIN_FIX1	HEATcalcH
FIN_FIX2	HEATcalcC ;
FIN_FIX3	HEATcalcH(H) QHT(H) =E= sum(KM, QHK1(H,KM));
FIN_FIX4 ;	HEATcalcC(C) $QCT(C) = E = sum(KM, QCK1(C, KM));$
FIN_FIX1 $Fin("1") = E = FH("1") + FC("7");$	

\*Heat balances for temperature intervals

### Positive Variables

QHC(H,C,KM) exchange of heat of hot streams and cold streams at intervals QSC(S,C,KM) exchange of heat of hot utilities and cold streams at intervals QHW(H,W,KM) exchange of heat of hot streams and cold utilities at intervals

RH(H,KM) heat residual of hot streams exiting intervals

RM(H,C,K) heat residual of mixing stream exiting intervals

RS(S,KM) heat residual of hot utilities exiting intervals ;

Equations

HBAL(H,KM) hot stream HEAT BALANCES

CBAL(C,KM) cold stream HEAT BALANCES

SBAL(S,KM) hot utility HEAT BALANCES

WBAL(W,KM) cold utility HEAT BALANCES ;

RH.FX(H,KM)\$ (ORD(KM) EQ N) = 0;

RS.FX(S,KM)\$ (ORD(KM) EQ N) = 0;

$$\begin{split} & \text{SBAL}(S,\text{KM}) \$ (\text{SKM}(S,\text{KM}) = 1) .. & \text{RS}(S,\text{KM}) - \text{RS}(S,\text{KM}-1) \$ (\text{SKM}(S,\text{KM}-1)=1) \\ & + \sup(\texttt{C}\$ (\text{CKM}(C,\text{KM}), \texttt{QSC}(S,\text{C},\text{KM})) - \texttt{QS}(S) \$ (\text{SKM}(S,\text{KM})=1) = \texttt{e} = \texttt{0}; \end{split}$$

WBAL(W,KM) \$ (WKM(W,KM) = 1) .. sum(H\$(HKM(H,KM)=1), QHW(H,W,KM)) - QW(W) =e= o; QS.UP(S) \$(AS(S) LT INF)=AS(S); QW.UP(W) \$(AW(W) LT INF)=AW(W);

\*imposed and restricted matches

Equations

hclIMPOSE(H,C) imposed match between hot and cold stream

hcRESTRICT(H,C) restriction between hot and cold stream

hwIMPOSE(H,W) imposed match between hot stream and cold utility

hwRESTRICT(H,W) restriction between hot stream and cold utility

cslIMPOSE(C,S) imposed match between cold stream and hot utility

csRESTRICT(C,S) restriction between cold stream and hot utility ;

$$\label{eq:limbox} \begin{split} & \text{hclIMPOSE(H,C) $$ QLHC(H,C) ..} & \text{QLHC(H,C) =} l = sum(K $((ord(K) le KM) and CK(C,K)), QHC(H,C,K)); \end{split}$$

hcRESTRICT(H,C)\$ (QUHC(H,C) lt inf) .. QUHC(H,C) =G= sum(K \$((ord(K) le KM) and CK(C,K)), QHC(H,C,K));

$$\label{eq:linear} \begin{split} hwIMPOSE(H,W) \ \$ \ QLHW(H,W) \ .. & QLHW(H,W) = l = \ sum(K \ \$((ord(K) \ le \ KM) \ and \ WK(W,K)), \ QHW(H,W,K)); \end{split}$$

hwRESTRICT(H,W) \$ (QUHW(H,W) lt inf) .. QUHW(H,W) =G= sum(K \$((ord(K) le KM) and WK(W,K)), QHW(H,W,K));

 $cslIMPOSE(C,S) \ \$ \ QLCS(C,S) .. \qquad QLCS(C,S) = l = \ sum(K \ \$((ord(K) \ le \ KM) \ and \ CK(C,K)), \ QSC(S,C,K));$ 

csRESTRICT(C,S) \$ (QUCS(C,S) lt inf) .. QUCS(C,S) =g= sum(K \$((ord(K) le KM) and CK(C,K)), QSC(S,C,K));

MODEL Exp\_Trans\_LP /ALL/;

SOLVE Exp\_Trans\_LP minimize UTILITY using MIP;

Display EnergySavings.l, UTILITY.L, UTILITYcost.l, KM, TH, TC, TMIN, HK, HKP, CK, SK, SKP, WK, RH.L, RS.L, QHC.L, QHW.L, QSC.L, QS.L, QW.L, FH.L, FHK1, FC.L, FCK1, FHCK.L, QHK1.L, QCK1.L, QHT.L, QCT.L;

\*Define MILP WITH FIXED HEAT EXCHANGES

\*MINIMUM HEAT EXCHANGERS

parameter LU large number / 9999999999999/;

binary variable y1(H,C), y2(S,C), y3(H,W) ;

variable TQHC(H,C), TQSC(S,C), TQHW(H,W)

variable NU, HC,SC,HW;

Equations

numofmatchesHC

numofmatchesSC

numofmatchesHW

binarylimitHC

binarylimitSC

binarylimitHW

minmatchesHC

minmatchesSC

minmatchesHW

NUMofMATCHES ;

numofmatchesHC(H,C).. TQHC(H,C) =e= sum(K, QHC.l(H,C,K)) - LU \* y1(H,C);

binarylimitHC(H,C).. sum(K, QHC.l(H,C,K)) - LU \* y1(H,C) =L= o ;

numofmatchesSC(S,C)..TQSC(S,C) =  $e = sum(K, QSC.l(S,C,K)) - LU * y_2(S,C)$ ;

```
binarylimitSC(S,C).. sum(K, QSC.l(S,C,K)) - LU * y2(S,C) =L= 0 ;
```

numofmatchesHW(H,W).. TQHW(H,W) =e= sum(K, QHW.l(H,W,K)) - LU \*
y3(H,W);
binarylimitHW(H,W).. sum(K, QHW.l(H,W,K)) - LU \* y3(H,W) =L= o;
minmatchesHC.. sum((H,C), y1(H,C)) =e= HC;
minmatchesSC.. sum((S,C), y2(S,C)) =e= SC;
minmatchesHW.. sum((H,W), y3(H,W)) =e= HW;
NUMofMATCHES.. HC+SC+HW =E= NU;
OPTION MIP = CPLEX;
MODEL Exp\_MIP /ALL /;
SOLVE Exp\_MIP minimize NU using MIP;