



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ II:

ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΛΙΓΝΟΚΥΤΤΑΡΙΝΟΥΧΟΥ
ΒΙΟΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ

ΣΤΕΦΑΝΑΚΗ ΜΙΧΑΗΛ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ: 05107613

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΚΟΚΟΣΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μελέτη αποτελεί τη διπλωματική μου εργασία στα πλαίσια των σπουδών μου στο τμήμα Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ, υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Αντώνιου Κοκόση, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες, τόσο για την ανάθεση, όσο και για την αμέριστη βοήθειά του κατά την διεκπεραίωσή της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Κώστα Πυργάκη, για τον χρόνο που αφιέρωσε, τις πολύτιμες συμβουλές και την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Οφείλω επίσης, να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Κατερίνα Μουντράκη, για τη συνεισφορά των αρχείων προσομοίωσης, χωρίς τα οποία θα ήταν αδύνατη η συλλογή δεδομένων για την εργασία. Τέλος, ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη οφείλω στην σύζυγό μου, για την αμέριστη συμπαράσταση και την υπομονή της κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην ανάλυση των ενεργειακών απαιτήσεων ενός υπο μελέτη λιγνοκυτταρινούχου βιοδιυλιστηρίου και στην ανάπτυξη μεθοδολογίας για την αξιολόγηση και επιλογή των διεργασιών που εξασφαλίζουν τη μέγιστη ενεργειακή εξοικονόμηση εάν ολοκληρωθούν συνολικά. Τα τελικά προϊόντα που θα παραχθούν είναι θέμα επιλογής, που καθορίζεται από την εξασφάλιση της βιωσιμότητας του βιοδιυλιστηρίου. Για το λόγο αυτό, απαιτείται μια μεθοδολογία που θα ανιχνεύει όλα τα πιθανά μονοπάτια παραγωγής και θα αξιολογεί το καθένα από αυτά ως προς τις ενεργειακές τους απαιτήσεις σε θερμή και ψυχρή παροχή. Η βέλτιστη λύση που επιλέγεται είναι το μονοπάτι που έχει τις ελάχιστες απαιτήσεις θερμής και ψυχρής παροχής και παρουσιάζει μέγιστη ανάκτηση θερμότητας από την ολοκλήρωση των ανεξάρτητων διεργασιών του ως μια συνολική Μονάδα.

Το βιοδιυλιστήριο που εξετάζεται έχει τροφοδοσία 18,75 tn/h ξηρής λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας και αποτελείται από τη κεντρική διεργασία (Κλασμάτωση Βιομάζας με Οργανικά Οξέα) που παράγει τρία ενδιάμεσα προϊόντα - λιγνίνη, C5 και C6 σάκχαρα - και από διεργασίες που συνδέονται με αυτήν και μετατρέπουν τα ενδιάμεσα σε τελικά προϊόντα, τα οποία είναι: οι PF Ρητίνες και η Πολυουρεθάνη από τη λιγνίνη, η Αιθανόλη και η Ξυλιτόλη (με βιοτεχνολογική και καταλυτική διεργασία) από τα C5 σάκχαρα, και το Ιτακονικό Οξύ και η Αιθανόλη από τα C6 σάκχαρα. Η προσομοίωση των διεργασιών γίνεται στο Aspen Plus V7.2, προκειμένου να εκτιμηθούν οι απαιτήσεις των διεργασιών αυτών σε θερμή και ψυχρή παροχή. Μετά την εξαγωγή των δεδομένων γίνεται ενεργειακή ολοκλήρωση κάθε διεργασίας χωριστά με τη μέθοδο του Κόμβου Ανάσχεσης, σχεδιάζοντας κατάλληλα τα ενεργοβόρα συστήματα διαχωρισμού (αποστακτικές στήλες και εξατμιστήρες), ώστε να είναι δυνατή η ολοκλήρωσή τους με τα ρεύματα των διεργασιών, και υπολογίζεται η ελάχιστη απαίτηση θερμής και ψυχρής παροχής. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε χρησιμοποιεί ως εργαλείο την Ανάλυση Συνολικής Μονάδας, με βαθμό ελευθερίας τον αριθμό των διεργασιών που θα υλοποιηθούν στη συνολική Μονάδα. Ανιχνεύοντας όλα τα επιτρεπτά μονοπάτια παραγωγής, γίνεται υπολογισμός των αναγκών θερμής και ψυχρής παροχής για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των διεργασιών που βρίσκονται σε κάθε μονοπάτι, ολοκληρωμένες πλέον ως ενιαίες Μονάδες.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, ολοκληρώνοντας τις διεργασίες των μονοπατιών σε συνολικές Μονάδες, μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση που κυμαίνεται από 63,9 έως 83,3 % για την θερμή παροχή και 70,9 έως 84,4 % για την ψυχρή παροχή. Η βέλτιστη ενεργειακά επιλογή είναι το μονοπάτι “Κλασμάτωση Βιομάζας – βιοΞυλιτόλη – Ιτακονικό Οξύ – PF Ρητίνες” με εξοικονόμηση θερμής και ψυχρής παροχής κατά 83,3% και 84,4 % αντίστοιχα. Οι αρχικές ανάγκες του μονοπατιού αυτού υπολογίστηκαν σε 226,44 MW θερμής παροχής και 228,59 MW ψυχρής παροχής, ενώ η τελική λύση που προτείνεται απαιτεί 37,83 MW και 35,75 MW θερμής και ψυχρής παροχής αντίστοιχα.

Λέξεις – Κλειδιά : Βιοδιυλιστήριο, Λιγνοκυτταρινούχο, Ενεργειακή Ολοκλήρωση, Κόμβος Ανάσχεσης, Ανάλυση Συνολικής Μονάδας.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to analyse the energy demands of an under study lignocellulosic biorefinery and to develop a methodology for the selection of valorization paths which ensure maximum energy savings when integrated as total sites. The final products are a matter of choice, determined by the objective for sustainability of the biorefinery. Therefore, a methodology, able to detect all possible production paths and evaluate their energy demands, is required. The optimum solution is the path with minimum energy demands of hot and cold utility and maximum energy recovery by integrating all plants into a total Site.

The studied biorefinery has a feed of 18,75 tn/h dry lignocellulosic biomass and consists of a main plant that produces three chemical intermediates – lignin, C5 and C6 Sugars – and other plants that are branched to convert the intermediates to the final products, which are Lignin based PF Resins and Polyurethane, C5 Sugar based Ethanol and Xylitol (biological and catalytic process) and C6 Sugar based Itaconic Acid and Ethanol. All processes are simulated in Aspen Plus V7.2 in order to evaluate hot and cold utility demands. When data are extracted, each process is integrated independently using Pinch Analysis, making necessary modifications to all energy intensive separation units (distillation columns, evaporators) in order to integrate them with process streams, and minimum hot and cold utility demands are calculated. The methodology developed uses Total Site Analysis as a synthesis tool, while the number of processes, which constitute the total site, is a degree of freedom. After detecting all feasible production paths, minimum hot and cold utility demands are calculated for all possible process integration scenarios, considering them as total sites.

The results indicate that, by integrating all the processes in a total site, there are energy savings in a range of 63,9 to 83,3 % and 70,9 to 84,4 % of Heating and Cooling Duties, respectively. The optimum solution refers to the path “Organosolv – bio-Xylitol – Itaconic Acid – PF Resins” which has max energy savings of 83,3 and 84,4 % of Heating and Cooling Duties, respectively. The initial needs of this path were calculated to be 226,44 MW and 228,59 MW of hot and cold utility, respectively, while the corresponding values of the final solution are 37,83 MW and 35,75 MW.

Keywords : Biorefinery, Lignocellulosic, Energy Integration, Pinch Analysis, Total Site Analysis

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	ΓΕΝΙΚΑ	1
1.2	ΣΚΟΠΟΣ	1
1.3	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	2
2	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ	2
2.1	ΓΕΝΙΚΑ	2
2.2	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΟΜΒΟΥ ΑΝΑΣΧΕΣΗΣ	3
2.2.1	<i>Σύνθετα Γραφήματα και Κόμβος Ανάσχεσης</i>	<i>3</i>
2.2.2	<i>Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα.....</i>	<i>5</i>
2.2.3	<i>Ολοκλήρωση Αντιδραστήρων.....</i>	<i>7</i>
2.2.4	<i>Ολοκλήρωση Αποστακτικών Στηλών</i>	<i>9</i>
2.2.4.1	Γενικά.....	9
2.2.4.2	Εφαρμογή Μεθόδου Κόμβου Ανάσχεσης	9
2.2.4.3	Αλλαγή της Πίεσης Λειτουργίας της Αποστακτικής στήλης.....	12
2.2.4.4	Σχεδιαστικές επιλογές για την ολοκλήρωση αποστακτικής στήλης	13
2.2.4.5	Απόσταξη Πολλαπλών Βαθμίδων (multi-effect distillation)	14
2.2.5	<i>Ολοκλήρωση Εξατμιστήρων</i>	<i>21</i>
2.2.6	<i>Εξαγωγή Δεδομένων.....</i>	<i>24</i>
2.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ	26
3	ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΛΙΓΝΟΚΥΤΤΑΡΙΝΟΥΧΟΥ ΒΙΟΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟΥ	29
3.1	ΓΕΝΙΚΑ	29
3.2	ΤΟ ΒΙΟΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ	30
3.3	ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΚΛΑΣΜΑΤΩΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΟΞΕΑ	32
3.4	ΞΥΛΙΤΟΛΗ	33
3.5	ΒΙΟ-ΑΙΘΑΝΟΛΗ	35
3.6	ΙΤΑΚΟΝΙΚΟ ΟΞΥ	36
3.7	ΡΗΤΙΝΕΣ ΦΑΙΝΟΛΗΣ – ΦΟΡΜΑΛΔΕΪΔΗΣ (PF ΡΗΤΙΝΕΣ)	38
3.8	ΠΟΛΥΟΥΡΕΘΑΝΗ (PU)	39
4	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΤΟΥ ΒΙΟΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟΥ.....	39
4.1	ΓΕΝΙΚΑ	39
4.2	ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΚΛΑΣΜΑΤΩΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΟΞΕΑ	40
4.2.1	<i>Απαιτήσεις σε Θερμή και Ψυχρή Παροχή</i>	<i>40</i>

4.2.2	Ενεργειακή Ολοκλήρωση.....	42
4.3	ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΞΥΛΙΤΟΛΗΣ	49
4.3.1	Απαιτήσεις σε Θερμότητα και Ψυχρή Παροχή	49
4.3.2	Ενεργειακή Ολοκλήρωση.....	50
4.4	ΒΙΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΞΥΛΙΤΟΛΗΣ	53
4.4.1	Απαιτήσεις σε Θερμότητα και Ψυχρή Παροχή	53
4.4.2	Ενεργειακή Ολοκλήρωση.....	55
4.5	ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟ-ΑΙΘΑΝΟΛΗΣ ΜΕ Α΄ ΥΛΗ ΣΑΚΧΑΡΑ C-5.....	59
4.5.1	Απαιτήσεις σε Θερμότητα και Ψυχρή Παροχή	59
4.5.2	Ενεργειακή Ολοκλήρωση.....	60
4.6	ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟ-ΑΙΘΑΝΟΛΗΣ ΜΕ Α΄ ΥΛΗ ΣΑΚΧΑΡΑ C-6.....	64
4.6.1	Απαιτήσεις σε Θερμότητα και Ψυχρή Παροχή	64
4.6.2	Ενεργειακή Ολοκλήρωση.....	65
4.7	ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΙΤΑΚΟΝΙΚΟΥ ΟΞΕΟΣ	67
4.7.1	Απαιτήσεις σε Θερμότητα και Ψυχρή Παροχή	67
4.7.2	Ενεργειακή Ολοκλήρωση.....	69
4.8	ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΗΤΙΝΩΝ ΦΑΙΝΟΛΗΣ – ΦΟΡΜΑΛΔΕΪΔΗΣ (PF ΡΗΤΙΝΕΣ)	72
4.8.1	Απαιτήσεις σε Θερμότητα και Ψυχρή Παροχή	72
4.8.2	Ενεργειακή Ολοκλήρωση.....	74
4.9	ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΟΛΥΟΥΡΕΘΑΝΗΣ	76
4.9.1	Απαιτήσεις σε Θερμότητα και Ψυχρή Παροχή	76
4.9.2	Ενεργειακή Ολοκλήρωση.....	77
5	ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΣΤΟ ΒΙΟΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟ	80
5.1	ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ	80
5.2	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΒΙΟΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟΥ	83
5.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ	85
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	99
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	101
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. Μεγάλα Σύνθετα Γραφήματα Συνολικών Μονάδων.....	105
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας	129

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η ολοκλήρωση διεργασιών είναι σήμερα ένα σημαντικό κομμάτι της μηχανικής διεργασιών, που άρχισε να αναπτύσσεται συστηματικά από τα τέλη της δεκαετίας του '70. Ο όρος ολοκλήρωση διεργασιών περιλαμβάνει την ανάλυση, τη σύνθεση ή/και τον επανασχεδιασμό μονάδων παραγωγής, με βάση τις θεμελιώδεις αρχές της θερμοδυναμικής και τη προσέγγιση της έννοιας του ενοποποιημένου συστήματος. Οι στόχοι της ολοκλήρωσης διεργασιών είναι η εξορθολογισμένη χρήση πρώτων υλών και ενέργειας, καθώς και η ελαχιστοποίηση παραγωγής τοξικών εκπομπών και αποβλήτων. Οι στόχοι αυτοί συμβάλλουν στη βιωσιμότητα της χημικής βιομηχανίας λόγω της εξοικονόμησης που επιτυγχάνεται με την ορθή χρήση των πρώτων υλών και της ενέργειας (1).

1.2 Σκοπός

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση των ενεργειακών αναγκών ενός λιγνοκυτταρινούχου βιοδιυλιστηρίου, εξετάζοντας όλες τις πιθανές διεργασίες που μπορούν να υλοποιηθούν μέσα σε μια τέτοια βιομηχανική μονάδα, με σκοπό την μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας που μπορεί να προκύψει από την ολοκλήρωση των διεργασιών σε ευρύτερα σχήματα συνολικών Μονάδων (total Sites).

Τα βιοδιυλιστήρια αποτελούν μια πιθανή λύση στο πρόβλημα της μείωσης των αποθεμάτων πετρελαίου, καθώς η τροφοδοσία τους είναι λιγνοκυτταρινούχος βιομάζα που υπάρχει διαθέσιμη σε μεγάλες ποσότητες ανά τον κόσμο. Τα βιοκαύσιμα που παράγονται, μαζί με άλλα προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας, μπορούν να εξασφαλίσουν την βιωσιμότητα ενός τέτοιου εγχειρήματος και να μετριάσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση πετρελαιοειδών προϊόντων.

Ένα βιοδιυλιστήριο μεγάλης δυναμικότητας είναι εξαιρετικά ενεργοβόρο και μπορεί να περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό διεργασιών που μετασχηματίζουν τη βιομάζα σε τελικά προϊόντα. Κάθε τέτοια διεργασία μπορεί να λειτουργήσει ανεξάρτητα από τις άλλες, όμως η εξοικονόμηση ενέργειας μεγιστοποιείται όταν οι διεργασίες αυτές ολοκληρώνονται ενεργειακά μεταξύ τους ως συνολικές Μονάδες. Προκειμένου λοιπόν, να είναι βιώσιμο ένα βιοδιυλιστήριο, πρέπει να σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να είναι ενεργειακά αποδοτικό.

1.3 Μεθοδολογία

Στη παρούσα εργασία γίνεται άμεση ενεργειακή ολοκλήρωση των διεργασιών ενός βιοδιυλιστηρίου, θεωρώντας όμως ότι οι διεργασίες αυτές βρίσκονται υπό μελέτη και η επιλογή διεργασιών που θα υλοποιηθούν μέσα στα όρια του βιοδιυλιστηρίου θα γίνει με την συνολική ενεργειακή ανάλυση της εγκατάστασης. Οι υπόλοιπες διεργασίες θα έχουν τη δυνατότητα να υλοποιηθούν και σε χώρους έξω από τα όρια του βιοδιυλιστηρίου, επιτρέποντας τη δημιουργία μονάδων μεγαλύτερης δυναμικότητας, με τροφοδοσία κάποιου ενδιάμεσου προϊόντος από περισσότερα από ένα βιοδιυλιστήρια.

Η παραγωγή των διαφόρων προϊόντων απαιτεί τον σχεδιασμό ξεχωριστών διεργασιών που τροφοδοτούνται με άύλη τα ενδιάμεσα προϊόντα της κεντρικής διεργασίας του βιοδιυλιστηρίου. Μελετώντας όλες τις πιθανές διεργασίες που μπορούν να ενταχθούν στη παραγωγική διαδικασία, διαμορφώνεται ένας αριθμός πιθανών “μονοπατιών” που συνδέει τις επιλεγθείσες διεργασίες. Με ενεργειακή ολοκλήρωση του κάθε μονοπατιού χωριστά και με βαθμό ελευθερίας τον αριθμό των διεργασιών του μονοπατιού που ολοκληρώνονται άμεσα μεταξύ τους, επιλέγεται η βέλτιστη λύση που δίνει την μέγιστη ανάκτηση θερμότητας.

Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την ενεργειακή ανάλυση και την ολοκλήρωση των ανεξάρτητων διεργασιών και της συνολικής εγκατάστασης, είναι η μέθοδος του Κόμβου Ανάσχεσης (Pinch Analysis) και η Ανάλυση Συνολικής Μονάδας (Total Site Analysis), τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το HINT Version 2.2 για την εφαρμογή της μεθόδου του Κόμβου Ανάσχεσης, το MS Excel 2007 για την γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων και το Aspen Plus V7.2 για την εξαγωγή των ενεργειακών δεδομένων από τα μοντέλα προσομοίωσης των διεργασιών του βιοδιυλιστηρίου.

2 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

2.1 Γενικά

Η ενεργειακή ολοκλήρωση αποτελεί ένα πολύ σημαντικό στάδιο κατά τον σχεδιασμό διεργασιών και συστημάτων. Πραγματοποιείται έπειτα από τον αρχικό σχεδιασμό μίας διεργασίας, και οδηγεί στην ουσιαστική βελτιστοποίησή της από ενεργειακή και επομένως, οικονομική σκοπιά. Η ενεργειακή ολοκλήρωση συνίσταται στην ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ των διαφόρων ρευμάτων και εξοπλισμών της

διεργασίας, όπου είναι δυνατόν, προκειμένου να εξυπηρετηθούν ανάγκες θέρμανσης, ψύξης, κάλυψης των απαιτούμενων φορτίων αναβραστήρων, συμπυκνωτήρων κτλ., με τελικό στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας.

Το βασικό πρόβλημα κατά την ενεργειακή ολοκλήρωση είναι η ανάπτυξη ή ο επανασχεδιασμός ενός δικτύου εναλλακτών θερμότητας, με το οποίο θα μεταφέρεται η πλεονάζουσα ενέργεια από ένα σύνολο θερμών ρευμάτων της διεργασίας σε ένα άλλο σύνολο ψυχρών ρευμάτων της ίδιας διεργασίας. Με τον τρόπο αυτό γίνεται ανάκτηση της θερμότητας από τα θερμά ρεύματα και έτσι έχουμε ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης θερμών (π.χ ατμός) και ψυχρών παροχών (π.χ. νερό ψύξης). Για την επίλυση του προβλήματος αναπτύχθηκε και χρησιμοποιείται η μεθοδολογία του Κόμβου Ανάσχεσης.

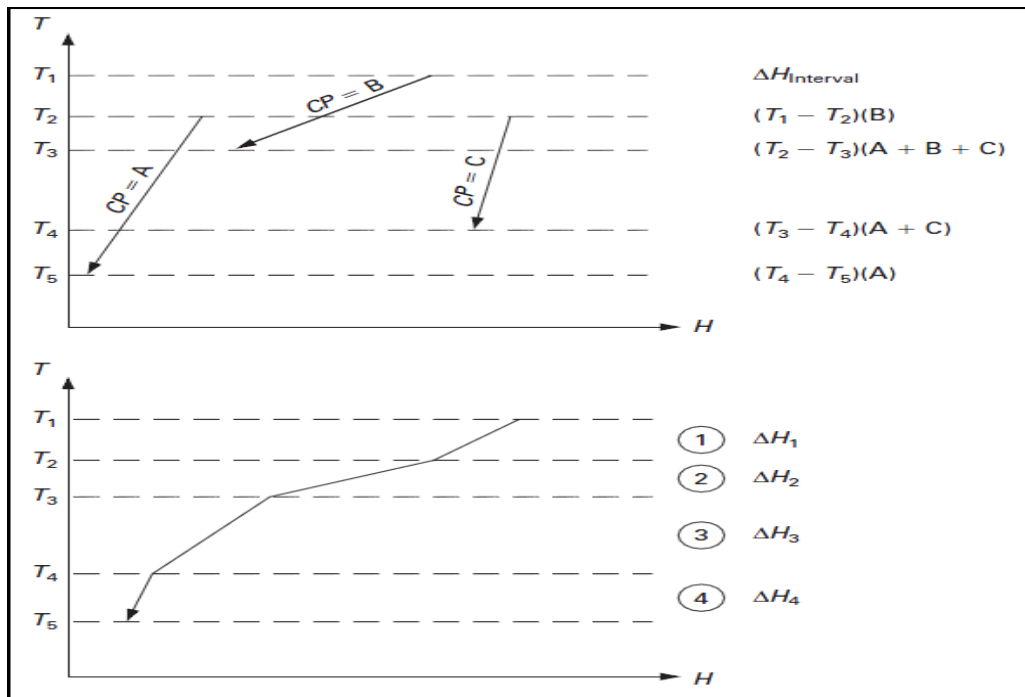
2.2 Μεθοδολογία Κόμβου Ανάσχεσης

2.2.1 Σύνθετα Γραφήματα και Κόμβος Ανάσχεσης

Μία πολύ σημαντική μέθοδος ενεργειακής ολοκλήρωσης και βελτιστοποίησης ενός συστήματος, αποτελεί η ανάλυση κόμβου ανάσχεσης. Η ανάλυση του κόμβου ανάσχεσης (pinch analysis) σε μία διεργασία, οδηγεί στον προσδιορισμό των απόλυτων θερμοδυναμικών στόχων του συστήματος, δηλαδή στο μέγιστο ποσό της ενεργειακής εξοικονόμησης που μπορεί να επιτευχθεί, εφόσον τα συστήματα ανάκτησης θερμότητας, ψύξης και θέρμανσης σχεδιαστούν σωστά.

Πρώτο βήμα στην ανάλυση κόμβου ανάσχεσης αποτελεί η εξαγωγή από την διεργασία των ψυχρών και θερμών ρευμάτων, δηλαδή των ρευμάτων που θερμαίνονται και ψύχονται αντίστοιχα. Στα ρεύματα αυτά δεν θα πρέπει να πραγματοποιείται αλλαγή της σύστασης, παρά μόνο της θερμοκρασίας τους. Η μεταβολή της ενθαλπίας των ρευμάτων κατά την εναλλαγή θερμότητας υπολογίζεται από την σχέση $\Delta H = m \cdot c_p \cdot \Delta T$, όπου m η μαζική παροχή του ρεύματος, c_p η θερμοχωρητικότητα του υπό σταθερή πίεση και ΔT η μεταβολή της θερμοκρασίας. Συνήθως, χρησιμοποιείται το μέγεθος $CP = c_p \cdot m$ (σε kW/K ή αντίστοιχες μονάδες).

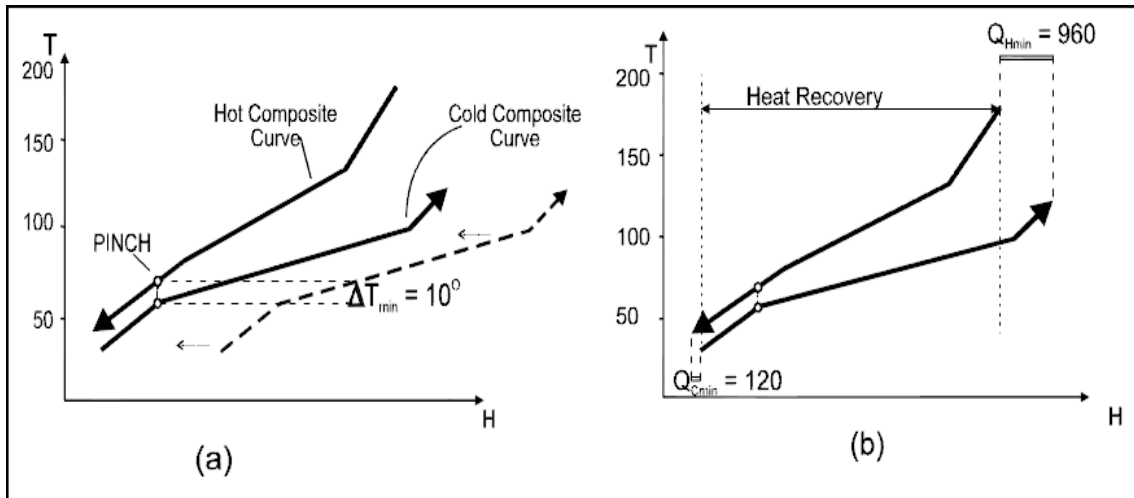
Τα εξαγόμενα ρεύματα μπορούν να παρασταθούν σε διαγράμματα θερμοκρασίας-ενθαλπίας με ευθείες γραμμές και κλίση τους ίση με $\Delta T / \Delta H = 1 / CP$.



ΣΧΗΜΑ 2-1 Κατασκευή καμπύλης θερμών ρευμάτων (2)

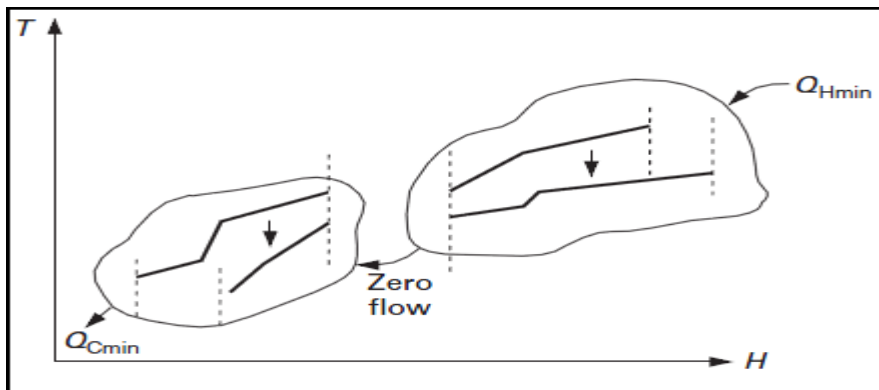
Στην συνήθη περίπτωση που υπάρχουν πολλά θερμά και ψυχρά ρεύματα, η κλίση τους στο θερμοκρασιακό διάστημα που επικαλύπτονται είναι το άθροισμα των επιμέρους κλίσεων. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζονται συνολικά για την διεργασία δύο καμπύλες, μία για τα ψυχρά και μία για τα θερμά ρεύματα, με την δεύτερη να βρίσκεται πάνω από την πρώτη στο διάγραμμα. Η θέση των καμπυλών στο διάγραμμα T-H δεν είναι προκαθορισμένη, αφού δεν μας ενδιαφέρουν συγκεκριμένες τιμές ενθαλπίας, αλλά συγκεκριμένα ΔH . Έτσι οι καμπύλες αυτές μπορούν να μετακινούνται αριστερά δεξιά στο διάγραμμα. Αφού επιλεγεί η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά για την εναλλαγή θερμότητας, οι καμπύλες προσεγγίζονται, μέχρι το πιο κοντινό τους σημείο να απέχει στον άξονα της θερμοκρασίας ΔT_{\min} . Το σημείο αυτό ονομάζεται **κόμβος ανάσχεσης** της διεργασίας (pinch), και το διάγραμμα των ρευμάτων ονομάζεται Σύνθετο Γράφημα.

Στο Σύνθετο Γράφημα (ΣΓ) η οριζόντια απόσταση στο κάτω μέρος της καμπύλης των θερμών ρευμάτων, από την καμπύλη των ψυχρών ρευμάτων, αντιστοιχεί στην ελάχιστη απαιτούμενη ψυχρή παροχή της διεργασίας. Αντίστοιχα, η οριζόντια απόσταση μεταξύ του πάνω μέρους της καμπύλης των ψυχρών ρευμάτων, από την καμπύλη των θερμών ρευμάτων, προσδιορίζει την ελάχιστη απαίτηση θερμής παροχής στην διεργασία. Ένα παράδειγμα Σύνθετου Γραφήματος με ελάχιστες απαιτήσεις ψυχρής παροχής 120 kW και θερμής παροχής 960 kW, δίνεται παρακάτω:



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2-1 Παράδειγμα Σύνθετου Γραφήματος (3)

Ο κόμβος ανάσχεσης χωρίζει το Σύνθετο Γράφημα της διεργασίας σε δύο τμήματα. Πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης εισέρχεται μόνο θερμότητα από θερμή παροχή, ενώ κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης δεν έχουμε είσοδο αλλά απόδοση ενέργειας στην ψυχρή παροχή. Επομένως πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης έχουμε δεξαμενή ενέργειας (sink) και κάτω απ'το κόμβο ανάσχεσης έχουμε πηγή ενέργειας (source). Επομένως, δεν πραγματοποιείται μεταφορά ενέργειας μέσα από το κόμβο ανάσχεσης, οι θερμές παροχές βρίσκονται πάντα πάνω απ'αυτόν και οι ψυχρές κάτω από αυτόν. Τα συμπεράσματα αυτά δίνονται σχηματικά στο επόμενο σχήμα (2).



ΣΧΗΜΑ 2-2 Ροή Ενέργειας στη Διεργασία, πάνω και κάτω απ'το Κόμβο Ανάσχεσης

2.2.2 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα

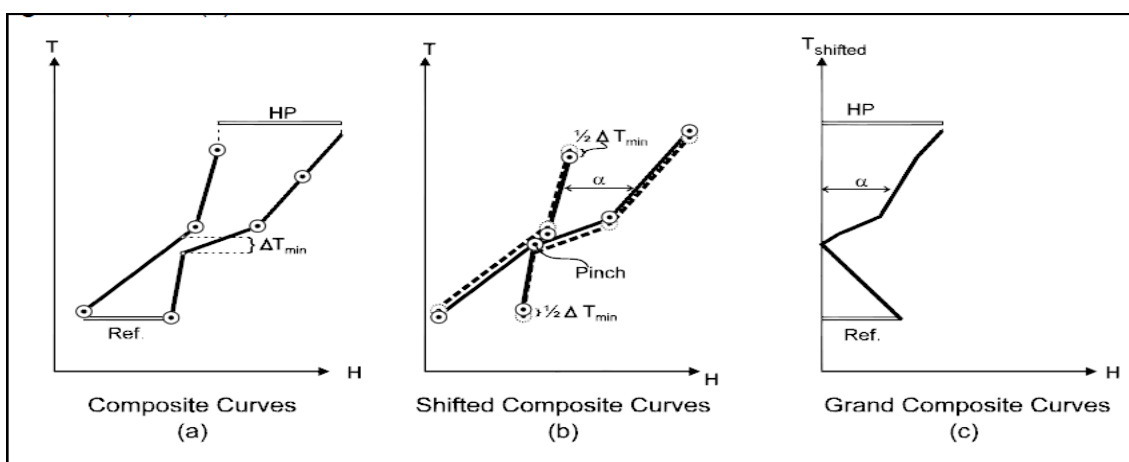
Ο υπολογισμός των θερμοδυναμικών στόχων της διεργασίας, δηλαδή των ελάχιστων απαιτούμενων θερμών και ψυχρών παροχών, μπορεί να γίνει και υπολογιστικά με βάση τον Αλγόριθμο Πίνακα Προβλήματος, που θα περιγραφεί

παρακάτω, και αποδίδει τα ίδια αποτελέσματα με αυτά που προκύπτουν από την κατασκευή του Σύνθετου Γραφήματος.

Αρχικά, για να εξασφαλιστεί ότι όλα τα ρεύματα ικανοποιούν τον περιορισμό του ΔT_{min} για την ανταλλαγή θερμότητας, αυξάνεται η θερμοκρασία των ψυχρών ρευμάτων, και αντίστοιχα μειώνεται των θερμών ρευμάτων, κατά $\Delta T_{min}/2$. Στην συνέχεια καταστρώνεται ένας πίνακας όπου σε κάθε θερμοκρασιακό εύρος που επικαλύπτονται ή όχι, θερμά και ψυχρά ρεύματα, υπολογίζεται το συνολικό ΔH αφαιρώντας από την ενθαλπία των θερμών ρευμάτων την αντίστοιχη των ψυχρών. Επομένως προκύπτει ένα ενεργειακό περιεχόμενο για κάθε θερμοκρασιακό διάστημα. Θετικό ενεργειακό περιεχόμενο θεωρείται ότι αποδίδεται σε ψυχρή παροχή, ενώ αντίστοιχα αρνητικό ενεργειακό περιεχόμενο προσλαμβάνεται από θερμή παροχή.

Στην συνέχεια, το ενεργειακό περιεχόμενο ενός θερμοκρασιακού διαστήματος προστίθεται στο αντίστοιχο ενεργειακό περιεχόμενο του αμέσως επόμενου θερμοκρασιακού διαστήματος. Μετά το πέρας της διαδικασίας αυτής, προστίθεται στο ενεργειακό φορτίο κάθε θερμοκρασίας, που χωρίζει το ολικό θερμοκρασιακό διάστημα σε επιμέρους τμήματα, η απόλυτη τιμή της μεγαλύτερης αρνητικής τιμής που προέκυψε. Έτσι προκύπτει ο ενεργειακός καταρράκτης, όπου το ενεργειακό φορτίο της κορυφής του αντιστοιχεί στις ελάχιστες ανάγκες θερμής παροχής και το αντίστοιχο ενεργειακό φορτίο του πυθμένα του, στις ελάχιστες απαιτήσεις ψυχρής παροχής της διεργασίας.

Η γραφική απεικόνιση του ενεργειακού καταρράκτη (Πίνακα Προβλήματος) ονομάζεται Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα (ΜΣΓ) της διεργασίας.



ΣΧΗΜΑ 2-3 Κατασκευή Μεγάλου Σύνθετου Διαγράμματος (3)

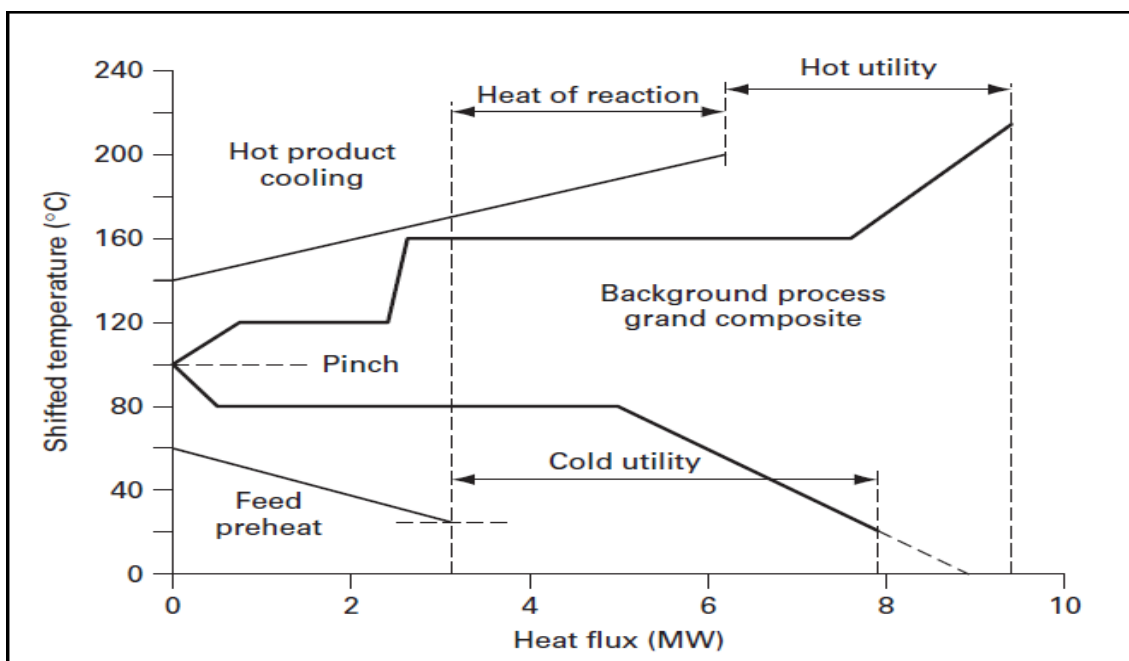
Το ΜΣΓ αντιπροσωπεύει την διαφορά μεταξύ της διαθέσιμης από θερμές παροχές θερμότητας και της θερμότητας που απαιτείται από τα ψυχρά ρεύματα, αναλογικά με το κόμβο ανάσχεσης, σε συγκεκριμένη προσαρμοσμένη θερμοκρασία, είναι δηλαδή γράφημα της απαίτησης παροχής με την προσαρμοσμένη θερμοκρασία. Η οριζόντια απόσταση από το γράφημα στην κορυφή του, αντιπροσωπεύει την απαιτούμενη ελάχιστη θερμή παροχή, ενώ η αντίστοιχη απόσταση στο τέλος του γραφήματος, αντιπροσωπεύει την απαιτούμενη ψυχρή παροχή. Το σημείο που το ΜΣΓ αγγίζει τον κάθετο άξονα αντιστοιχεί στον κόμβο ανάσχεσης της διεργασίας.

Το ΜΣΓ μας επιτρέπει ακόμα να εξετάσουμε εάν υπάρχει δυνατότητα να ολοκληρωθεί ενεργειακά και εξοπλισμός της διεργασίας, όπως αποστακτικές στήλες, εξατμιστήρες κτλ. Ο εξοπλισμός ολοκληρώνεται είτε πάνω, είτε κάτω από το pinch καθώς δεν επιτρέπεται μεταφορά ενέργειας μέσα από το pinch. Συνήθως το φορτίο του εξοπλισμού συμβολίζεται με ένα κουτί, ή διαδοχικά κουτιά, εάν η διεργασία γίνεται σε διαδοχικά στάδια (π.χ εξατμιστήρες στην σειρά). Θα πρέπει το κουτί, που το μήκος του αντιπροσωπεύει το φορτίο του και το ύψος τα θερμοκρασιακά του όρια, να χωρά στο ΜΣΓ κάτω ή πάνω από το pinch. Διαφορετικά απαιτείται αλλαγή των συνθηκών λειτουργίας του, ή η χρησιμοποίηση διαδοχικών σταδίων στην διεργασία, προκειμένου να αλλάξει το σχήμα του κουτιού (αλλαγή του φορτίου του) και να χωρέσει στο ΜΣΓ. Η ενέργεια που αντλεί ο εξοπλισμός από την διεργασία, αποδίδεται μετά το πέρας της λειτουργίας του στα ψυχρά ρεύματα για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών. Επομένως με την ενεργειακή ολοκλήρωση του εξοπλισμού επιτυγχάνεται 100% ενεργειακή εξοικονόμηση ως προς την λειτουργία του.

2.2.3 Ολοκλήρωση Αντιδραστήρων

Ο αντιδραστήρας είναι η καρδιά της διεργασίας και συνήθως οι συνθήκες λειτουργίας του αντιδραστήρα επιλέγονται αρχικά κατά την ανάπτυξη του διαγράμματος ροής της διεργασίας, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση, η επιθυμητή εκλεκτικότητα και οι προδιαγραφές του προϊόντος. Κατά την ενεργειακή ολοκλήρωση με εφαρμογή της μεθοδολογίας του κόμβου ανάσχεσης, μικρές αλλαγές στις συνθήκες λειτουργίας του αντιδραστήρα (εφόσον μπορούν να γίνουν) μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικά ενεργειακά οφέλη. Η σωστή ολοκλήρωση ενός εξώθερμου

αντιδραστήρα είναι πάνω απ'το κόμβο ανάσχεσης, ενώ ένας ενδόθερμος αντιδραστήρας πρέπει να ολοκληρώνεται κάτω απ'το κόμβο ανάσχεσης.



ΣΧΗΜΑ 2-4 Ορθή ολοκλήρωση εξώθερμου αντιδραστήρα πάνω απ'το Κόμβο Ανάσχεσης

Πηγή: Kemp, Ian C., "Pinch Analysis and Process Integration", p.221, ICHIME, 2nd ed., ELSEVIER, 2007.

Συχνά, η θερμότητα που απορροφάται ή εκλύεται σε μια χημική αντίδραση, επηρεάζει τη θερμοκρασία των προϊόντων της αντίδρασης. Λόγω της διαφορετικής θερμοκρασίας και σύστασης του ρεύματος τροφοδοσίας με το ρεύμα προϊόντων, θεωρούμε δύο ξεχωριστά ρεύματα για την ενεργειακή ολοκλήρωση. Το ρεύμα τροφοδοσίας που έχει ως τελική θερμοκρασία τη θερμοκρασία εισόδου στον αντιδραστήρα, και το ρεύμα προϊόντων με αρχική θερμοκρασία τη θερμοκρασία του αντιδραστήρα (για CSTR) ή τη θερμοκρασία εξόδου απ'τον αντιδραστήρα (για PFR). Ανάλογα, εάν ο αντιδραστήρας πρέπει να παραμένει σε σταθερή θερμοκρασία, τότε αυτό γίνεται με θερμή ή ψυχρή παροχή ή με ολοκλήρωση με την υπόλοιπη διεργασία (πάνω απ'το ΚΑ για εξώθερμους αντιδραστήρες και κάτω απ'το ΚΑ για ενδόθερμους αντιδραστήρες). Στην περίπτωση αυτή η ενέργεια που απορροφάται ή εκλύεται απ'τον αντιδραστήρα μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα θερμό ή ψυχρό ψευδορεύμα σταθερής ή περίπου σταθερής (-0.1 °C) θερμοκρασίας.

2.2.4 Ολοκλήρωση Αποστακτικών Στήλων

2.2.4.1 Γενικά

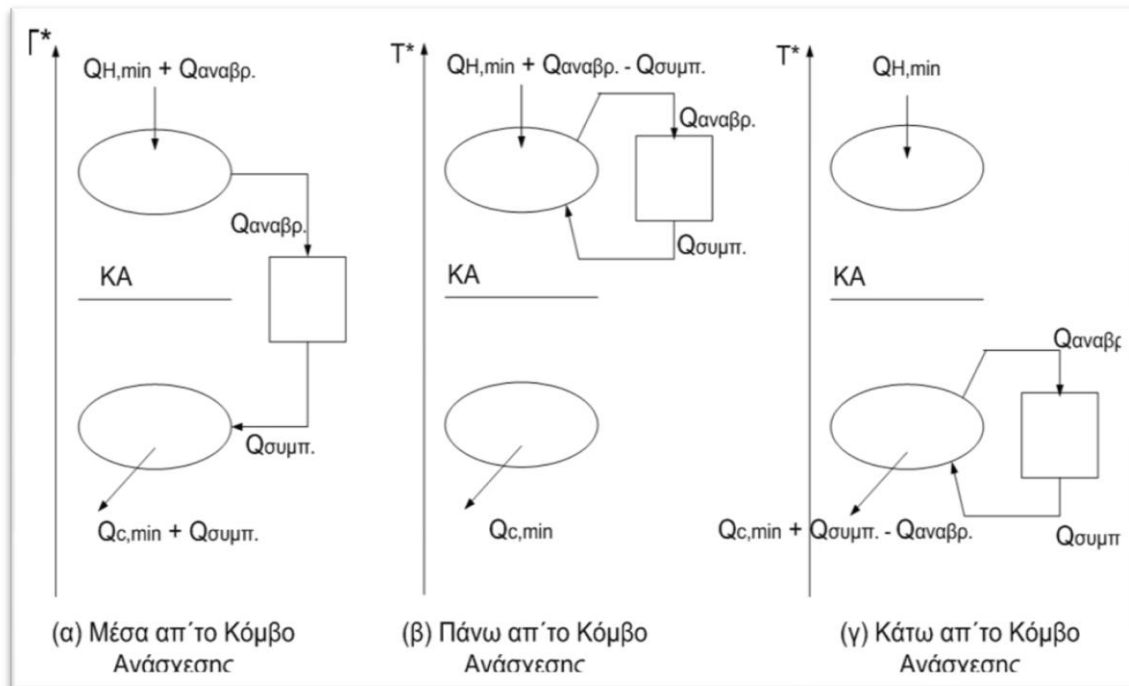
Τα κυρίαρχα θερμικά και ψυκτικά φορτία που σχετίζονται με την αποστακτική στήλη είναι εκείνα του αναβραστήρα και του συμπυκνωτήρα. Συνήθως, υπάρχουν και άλλα ενεργειακά φορτία που απαιτούνται για θέρμανση ή ψύξη της τροφοδοσίας και των προϊόντων, όμως αυτά είναι πολύ μικρότερα σε σχέση με τη λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης που συμβαίνει στον αναβραστήρα και το συμπυκνωτήρα.

Οι διεργασίες αλλαγής φάσης στον αναβραστήρα και το συμπυκνωτήρα, κανονικά, λαμβάνουν χώρα σε ένα εύρος θερμοκρασιών. Όμως, για πρακτικούς λόγους, θεωρείται ότι η θερμότητα στον αναβραστήρα πρέπει να μεταφέρεται σε μια θερμοκρασία μεγαλύτερη απ'το σημείο δρόσου των ατμών που εξέρχονται απ'τον αναβραστήρα, ενώ αντίστοιχα η θερμότητα που απάγεται απ'τον συμπυκνωτήρα πρέπει να απάγεται σε θερμοκρασία μικρότερη απ'το σημείο βρασμού του υγρού. Ως εκ τούτου, κατά το προκαταρκτικό σχεδιασμό, θεωρείται ότι ο αναβραστήρας και ο συμπυκνωτήρας λειτουργούν σε σταθερές θερμοκρασίες. Για τις θερμοκρασίες αυτές ισχύει ότι $T_{\text{αναβρ.}} > T_{\text{συμπ.}}$.

2.2.4.2 Εφαρμογή Μεθόδου Κόμβου Ανάσχεσης

Εάν θεωρήσουμε μια απλή αποστακτική στήλη, τότε αυτή μπορεί να ολοκληρωθεί σε διάφορα σημεία, σε σχέση με το Κόμβο Ανάσχεσης της διεργασίας. Η διεργασία διαχωρισμού της αποστακτικής στήλης απαιτεί παροχή θερμότητας στον αναβραστήρα ($Q_{\text{αναβρ.}}$) σε θερμοκρασία $T_{\text{αναβρ.}}$ (ψυχρό ρεύμα) και απορρίπτει θερμότητα από το συμπυκνωτήρα ($Q_{\text{συμπ.}}$) σε θερμοκρασία $T_{\text{συμπ.}}$ (θερμό ρεύμα). Επειδή ισχύει ότι $T_{\text{αναβρ.}} > T_{\text{συμπ.}}$, τα δύο αυτά ρεύματα δεν μπορούν να ολοκληρωθούν μεταξύ τους.

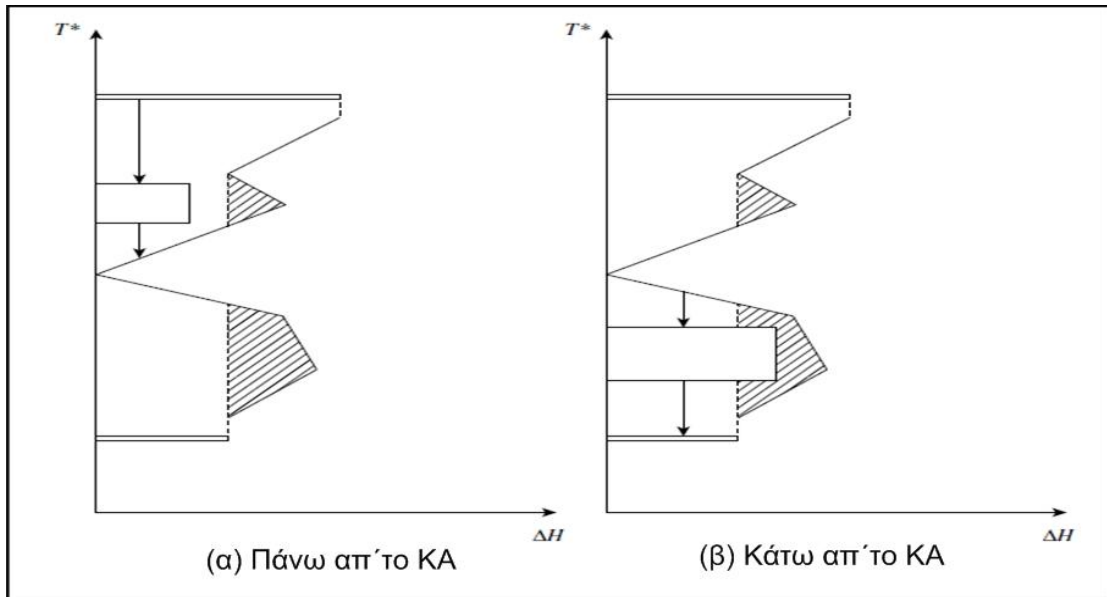
Επομένως, υπάρχουν μόνο δύο πιθανοί τρόποι ενεργειακής ολοκλήρωσης της αποστακτικής στήλης με την υπόλοιπη διεργασία, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, είτε μέσα απ'το κόμβο ανάσχεσης είτε εκτός του κόμβου ανάσχεσης (πάνω ή κάτω απ'αυτόν). Η ενεργειακή εξοικονόμηση προκύπτει όταν η στήλη ολοκληρώνεται εξ'ολοκλήρου είτε πάνω είτε κάτω απ'το κόμβο ανάσχεσης. Όταν ολοκληρώνεται πάνω απ'το κόμβο ανάσχεσης έχουμε εξοικονόμηση της συνολικής απαιτούμενης θερμής παροχής (μειώνεται κατά $Q_{\text{συμπ.}}$) ενώ όταν ολοκληρώνεται κάτω απ'το κόμβο ανάσχεσης έχουμε εξοικονόμηση της συνολικής απαιτούμενης ψυχρής παροχής (μειώνεται κατά $Q_{\text{αναβρ.}}$).



ΣΧΗΜΑ 2-5 Πιθανές Θέσεις Ολοκλήρωσης Αποστακτικής Στήλης

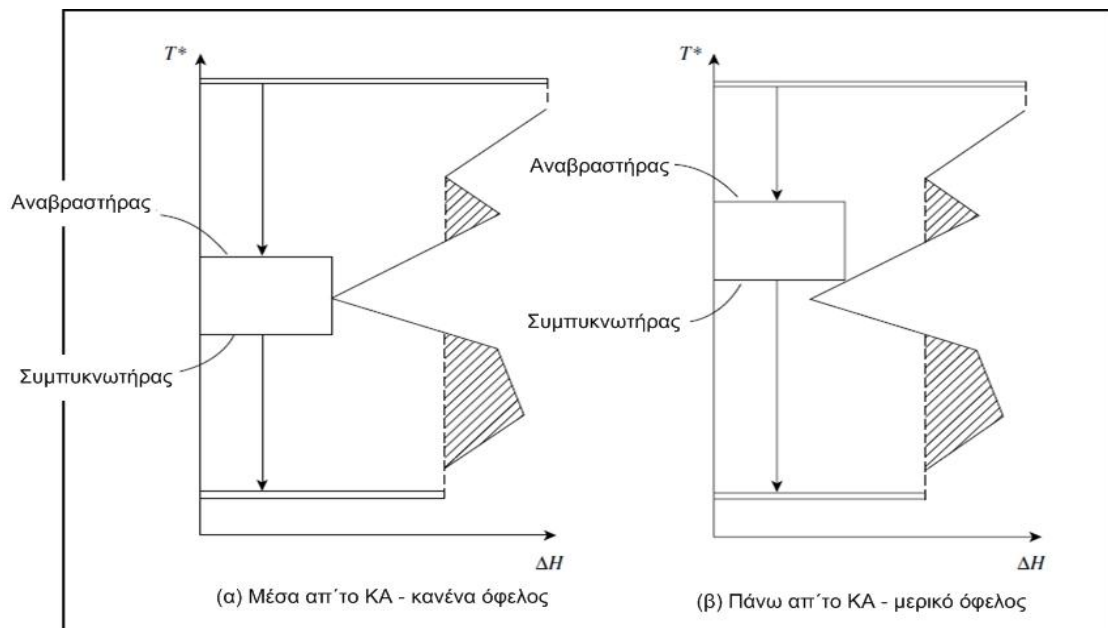
Συνήθως ισχύει ότι $Q_{\text{αναβρ.}} = Q_{\text{συμπ.}}$. Άρα εάν ολοκληρωθεί η στήλη μέσα απ’ το κόμβο ανάσχεσης δεν προκύπτει κανένα ενεργειακό όφελος, ενώ η ολοκλήρωσή της πάνω ή κάτω απ’ το κόμβο ανάσχεσης επιφέρει μείωση της απαιτούμενης θερμής ή ψυχρής παροχής κατά $Q_{\text{αναβρ.}}$ και $Q_{\text{συμπ.}}$ αντίστοιχα, δηλαδή λειτουργούμε την αποστακτική στήλη χωρίς επιπλέον ενεργειακή κατανάλωση.

Προκειμένου να εκτιμήσουμε εάν μπορεί να ολοκληρωθεί σωστά η αποστακτική στήλη με την υπόλοιπη διεργασία, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε το Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα. Η στήλη μπορεί να παρασταθεί ως ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο (κουτί), του οποίου οι δύο πλευρές αντιστοιχούν στις θερμοκρασίες του αναβραστήρα και του συμπυκνωτήρα, ενώ το μήκος του (κατά τον άξονα ΔH) αντιπροσωπεύει το θερμικό φορτίο της στήλης. Η ιδανική ολοκλήρωση μιας αποστακτικής στήλης, χρησιμοποιώντας το Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα, προκύπτει όταν όλο το “κουτί” χωράει μέσα στο ΜΣΓ, είτε πάνω απ’ το κόμβο ανάσχεσης είτε κάτω απ’ αυτόν.



ΣΧΗΜΑ 2-6 Ενεργειακή Ολοκλήρωση Αποστακτικής Στήλης

Επίσης, υπάρχει η πιθανότητα να χωράει ένα μέρος απ'το κουτί μέσα στο ΜΣΓ, που σημαίνει ότι μπορεί να ολοκληρωθεί μονάχα ένα μέρος της αποστακτικής στήλης. Εάν το θερμοκρασιακό εύρος του κουτιού που αναπαριστά την αποστακτική στήλη, περιλαμβάνει τη θερμοκρασία του κόμβου ανάσχεσης, τότε δεν μπορεί να γίνει ενεργειακή ολοκλήρωση και να έχουμε εξοικονόμηση ενέργειας.

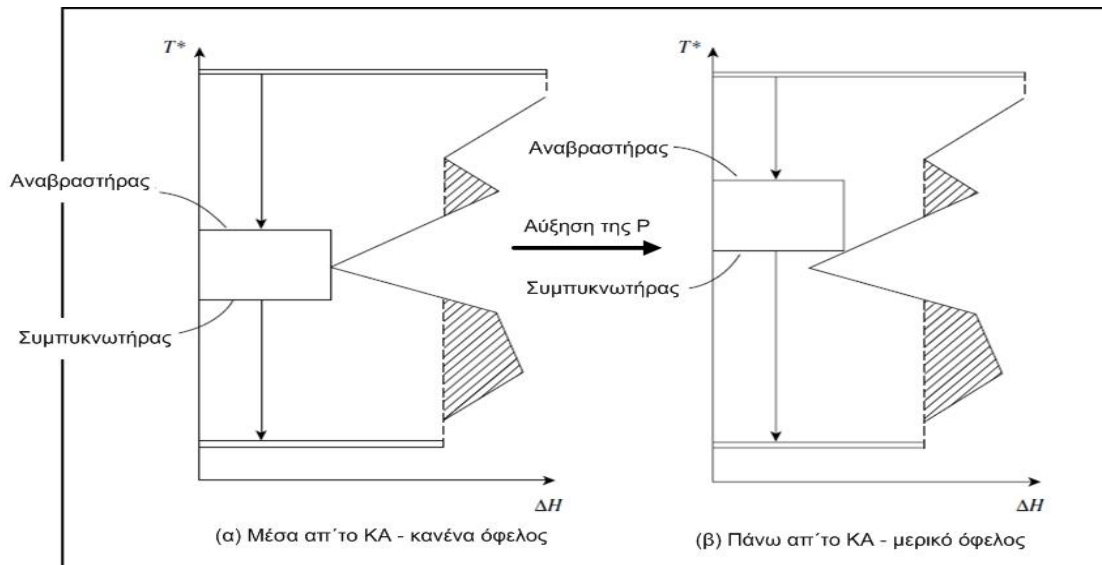


ΣΧΗΜΑ 2-7 Ενεργειακή Ολοκλήρωση Αποστακτικής Στήλης (α) χωρίς ενεργειακό όφελος (β) με μερικό ενεργειακό όφελος

Η παραπάνω γραφική μέθοδος διευκολύνει την οπτικοποίηση του προβλήματος ώστε να καταλήξουμε γρήγορα σε πιθανές λύσεις και αποτελέσματα. Για παράδειγμα, ολοκληρώνοντας τη στήλη πάνω απ'το κόμβο ανάσχεσης, παρατηρούμε ότι ο αναβραστήρας πρέπει να παίρνει θερμότητα απ'τη θερμή παροχή της διεργασίας (ατμός) ενώ ο συμπυκνωτήρας να ολοκληρώνεται με τα ρεύματα της διεργασίας. Αντίστοιχα, ολοκληρώνοντας τη στήλη κάτω απ'το κόμβο ανάσχεσης, παρατηρούμε ότι ο αναβραστήρας πρέπει να ολοκληρώνεται με τα ρεύματα της διεργασίας, ενώ ο συμπυκνωτήρας να δίνει θερμότητα στη ψυχρή παροχή της διεργασίας (νερό ψύξης). Τέλος, για τις περιπτώσεις κατά τις οποίες το κουτί της στήλης δεν χωράει στο ΜΣΓ, αναζητούμε πιθανές τροποποιήσεις των λειτουργικών παραμέτρων (πίεση, λόγος αναρροής) ώστε να μετακινηθεί το κουτί σε καταλληλότερη θέση ως προς το κόμβο ανάσχεσης της διεργασίας και να έχουμε επιτυχημένη ενεργειακή ολοκλήρωση.

2.2.4.3 Αλλαγή της Πίεσης Λειτουργίας της Αποστακτικής στήλης

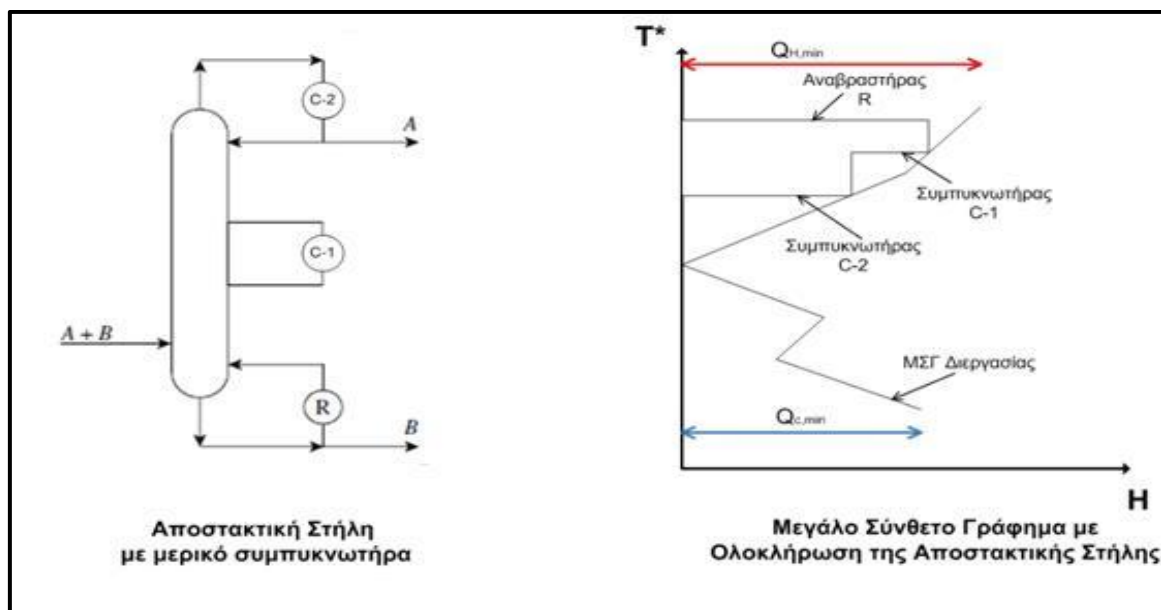
Όταν μια αποστακτική στήλη ολοκληρώνεται μέσα απ'το κόμβο ανάσχεσης, άρα χωρίς ενεργειακό όφελος, τότε είναι δυνατόν αλλάζοντας τη πίεση λειτουργίας της, να επιτευχθεί κατάλληλη ολοκλήρωση πάνω ή κάτω απ'το κόμβο. Όμως, καθώς αλλάζει η πίεση, το σχήμα του “κουτιού” αλλάζει και αυτό διότι αλλάζει η θερμοκρασιακή διαφορά του αναβραστήρα και του συμπυκνωτήρα, καθώς και η σχετική πτητικότητα των συστατικών του μίγματος. Επομένως, αλλάζει το ύψος και το πλάτος του κουτιού καθώς αυξάνεται ή μειώνεται η πίεση λειτουργίας. Επιπλέον, αλλάζουν και οι ενεργειακές ανάγκες των ρευμάτων τροφοδοσίας και προϊόντων της στήλης, άρα θα αλλάξει σχήμα, έστω και λίγο, και το Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα της διεργασίας. Επειδή όμως οι διαφορές αυτές θα είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις λανθάνουσες αλλαγές φάσεις στον αναβραστήρα και το συμπυκνωτήρα, μπορούν να αγνοηθούν. Διαφορετικά, θα πρέπει να ακολουθηθεί μία επαναληπτική μέθοδος που θα προσδιορίζει τη βέλτιστη πίεση λειτουργίας.



ΣΧΗΜΑ 2-8 Αύξηση Πίεσης Λειτουργίας Αποστακτικής Στήλης

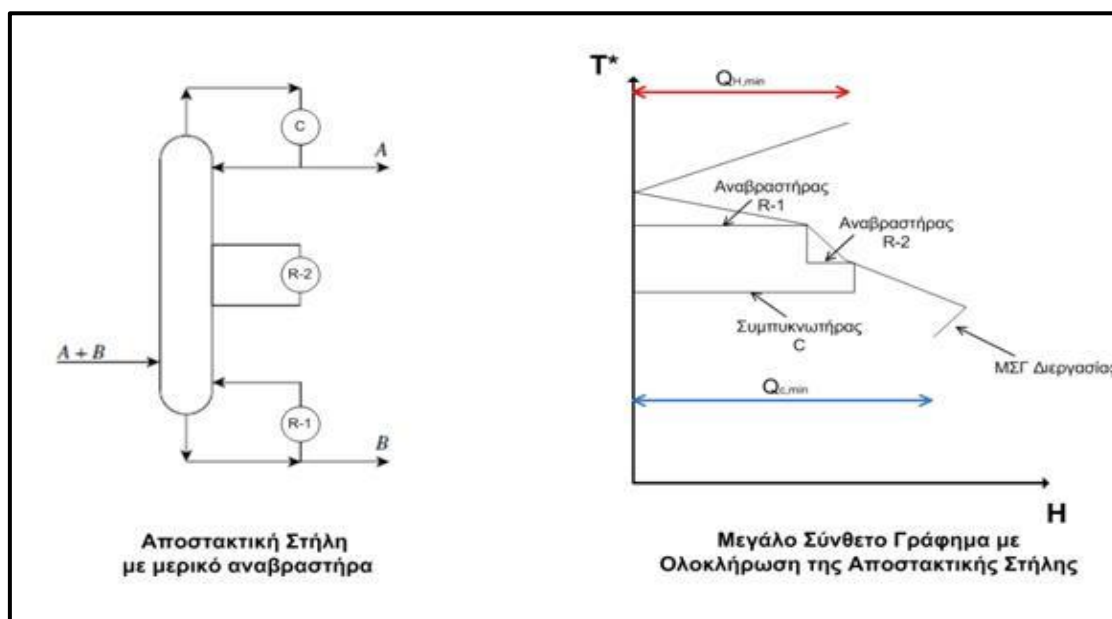
2.2.4.4 Σχεδιαστικές επιλογές για την ολοκλήρωση αποστακτικής στήλης

Μια σχεδιαστική επιλογή που μπορεί να αξιολογηθεί κατά την ενεργειακή ολοκλήρωση μιας αποστακτικής στήλης, εφόσον το “κουτί” της δεν χωράει ολόκληρο μέσα στο Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα, είναι η χρήση ενός μερικού συμπυκνωτήρα. Με τον τρόπο αυτό η θερμότητα απάγεται σε δύο θερμοκρασιακά επίπεδα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, κάνοντας έτσι ευκολότερη την ενεργειακή ολοκλήρωση όλου του φορτίου του συμπυκνωτήρα με την υπόλοιπη διεργασία.



ΣΧΗΜΑ 2-9 Επανασχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης - Χρήση Μερικού Συμπυκνωτήρα

Με ανάλογη προσέγγιση, μπορούμε να εξετάσουμε τη χρησιμοποίηση ενδιάμεσων μερικών αναβραστήρων, ώστε μέρος της θερμότητας που απαιτείται για το διαχωρισμό, να παρέχεται σε ένα ενδιάμεσο σημείο της στήλης, σε χαμηλότερη θερμοκρασία τέτοια ώστε να διευκολύνεται η ενεργειακή ολοκλήρωση. Η χρήση ενός τέτοιου μερικού αναβραστήρα φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



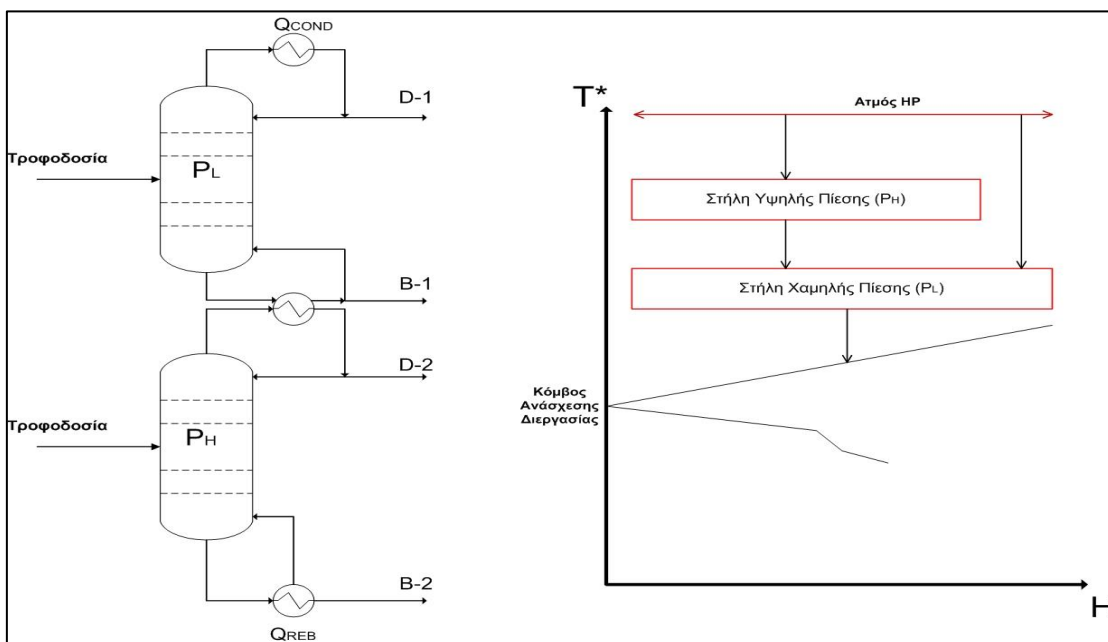
ΣΧΗΜΑ 2-10 Επανασχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης - Χρήση Μερικού Αναβραστήρα

2.2.4.5 Απόσταξη Πολλαπλών Βαθμίδων (multi-effect distillation)

Όταν δεν υπάρχουν περιθώρια ολοκλήρωσης της αποστακτικής στήλης με τη διεργασία αλλάζοντας μόνο τη πίεση λειτουργίας ή την αναρροή, τότε εξετάζονται διάφορες άλλες σχεδιαστικές επιλογές, όπως είναι αυτή της παράλληλης απόσταξης με δύο ή περισσότερες στήλες. Η Απόσταξη σε Πολλαπλές Βαθμίδες (Multi-Effect Distillation) όπως ονομάζεται, θεωρείται ως μία μέθοδος μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας σε αποστακτικές στήλες. Ειδικότερα, κατά την ενεργειακή ολοκλήρωση διεργασιών μπορεί να υπάρξει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, η οποία μπορεί να δικαιολογήσει το πάγιο κόστος που θα απαιτηθεί για την εγκατάσταση περισσότερων στηλών αντί μίας αποστακτικής στήλης.

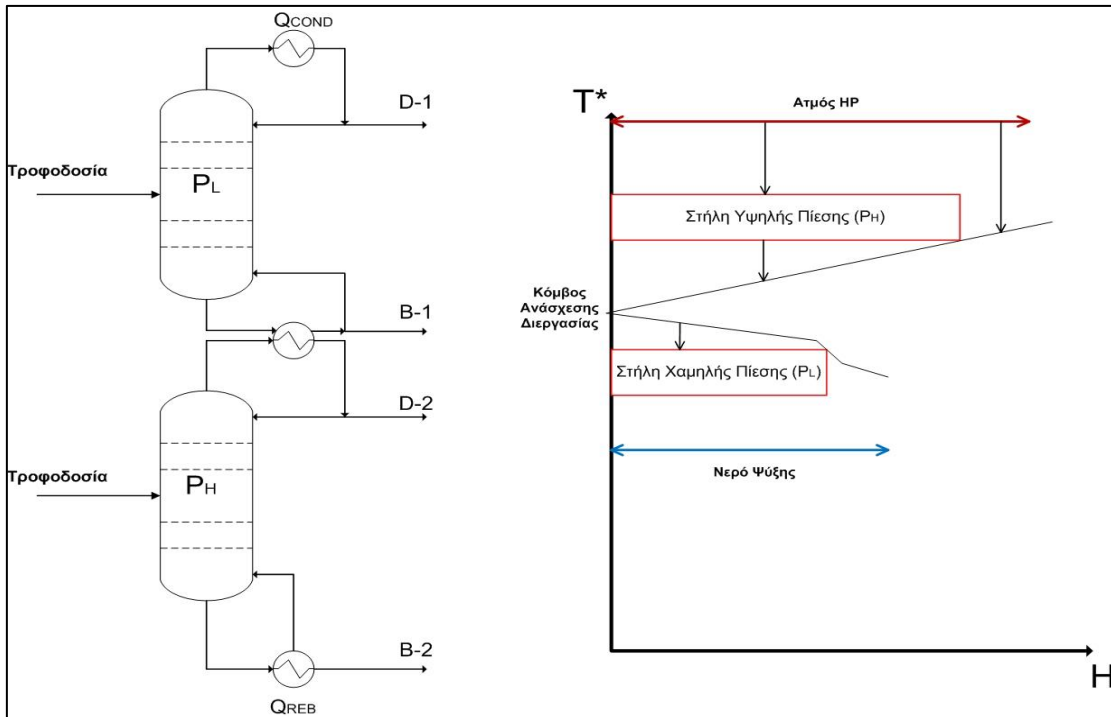
Οι αποστακτικές στήλες που αποτελούν τις βαθμίδες μιας διεργασίας απόσταξης λειτουργούν σε διαφορετικές πιέσεις έτσι ώστε τα θερμοκρασιακά όρια λειτουργίας να επιτρέπουν την μεταξύ τους ενεργειακή ολοκλήρωση. Δηλαδή, για ένα

σύστημα παράλληλης απόσταξης με δύο στήλες, οι ατμοί που εξέρχονται απ'τη κορυφή της στήλης υψηλής πίεσης συμπυκνώνονται και μεταφέρουν τη θερμότητα συμπύκνωσης στον αναβραστήρα της στήλης χαμηλής πίεσης, όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα. Έτσι, θερμότητα απαιτείται μόνο για τη λειτουργία του αναβραστήρα της στήλης υψηλής πίεσης και ψύξη μόνο για τη λειτουργία του συμπυκνωτήρα της στήλης χαμηλής πίεσης.



ΣΧΗΜΑ 2-11 Αποστακτική Στήλη με δύο βαθμίδες πάνω απ'το Κόμβο Ανάσχεσης

Η χρήση τέτοιων σχεδιαστικών επιλογών περιορίζεται από την ενδεχόμενη θερμική διάσπαση των προϊόντων, που καθιστά απαγορευτική την εφαρμογή σχετικά υψηλών πιέσεων. Επίσης, πρέπει να εξετάζεται το είδος της θερμής παροχής που θα χρησιμοποιηθεί, διότι μπορεί να έχουμε ως αποτέλεσμα εξοικονόμηση ποσού ενέργειας, όμως εάν ανέβουμε σε θερμοκρασιακά επίπεδα που απαιτούν ακριβότερη θερμή παροχή (πχ ατμό πολύ υψηλής πίεσης) τότε ουσιαστικά δεν υπάρχει κανένα όφελος. Επίσης, όπως προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου του Κόμβου Ανάσχεσης, εάν η ενέργεια μεταφέρεται μέσα από το κόμβο, τότε η ενεργειακή ολοκλήρωση αυτών των δύο στηλών μαζί (thermal coupling) δεν έχει κανένα νόημα (Linnhoff et al, 1983) αφού μπορούν να ολοκληρωθούν με τα ρεύματα της διεργασίας και να λειτουργούν αυτόνομα.



ΣΧΗΜΑ 2-12 Αποστακτική Στήλη με Δύο Βαθμίδες πάνω και κάτω απ'το Κόμβο Ανάσχεσης

Τα συστήματα απόσταξης πολλαπλών βαθμίδων μπορούν να έχουν διαφορετικές διατάξεις και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με:

- Τη κατεύθυνση της ροής της τροφοδοσίας σε σχέση με τη βαθμίδα της πίεσης, οπότε έχουμε διπλής τροφοδοσίας, τροφοδοσίας προς τα εμπρός, τροφοδοσίας προς τα πίσω και διάφορες παραλλαγές αυτών.

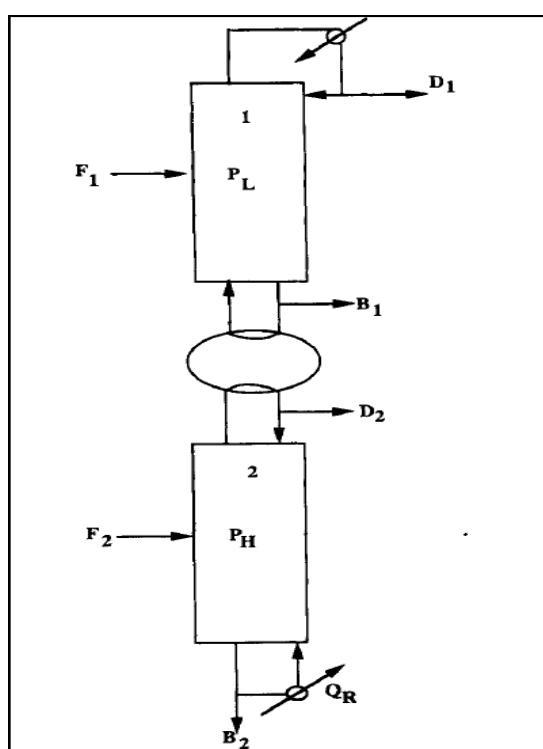
- Τη κατάσταση της τροφοδοσίας. Μπορεί να έχουμε μόνο υγρή τροφοδοσία όπου χρησιμοποιούνται στήλες απογύμνωσης, μόνο αέρια τροφοδοσία όπου χρησιμοποιούνται στήλες εμπλουτισμού ή να έχουμε είτε υγρή είτε αέρια τροφοδοσία.

- Το βαθμό διαχωρισμού σε κάθε βαθμίδα. Η κάθε στήλη - βαθμίδα μπορεί να κάνει είτε πλήρη διαχωρισμό και να παράγει έτοιμα προϊόντα, είτε να κάνει ημιτελή διαχωρισμό και το ρεύμα πυθμένα ή κορυφής ή και τα δύο να οδηγούνται σε άλλη βαθμίδα για τον τελικό διαχωρισμό. Κάθε ημιτελής διαχωρισμός είναι ένας βαθμός ελευθερίας για τον σχεδιαστή της διεργασίας.

- Το ποσό του κάθε συστατικού στη τροφοδοσία. Τα συστήματα αυτά δεν είναι κατάλληλα για τροφοδοσίες με μεγάλη συγκέντρωση στο πιο πτητικό συστατικό ή στο λιγότερο πτητικό συστατικό ή σε σχεδόν ισομοριακά μίγματα.

➤ Το βαθμό ολοκλήρωσης των βαθμίδων. Όλα τα συστήματα αυτά είναι ολοκληρωμένα με το να συμπυκνώνουν τους ατμούς του αποστάγματος μιας στήλης υψηλής πίεσης στον αναβραστήρα μιας άλλης στήλης που λειτουργεί σε χαμηλότερη πίεση. Οι βαθμίδες μπορούν να ολοκληρώνονται με τροφοδοσία προς τα εμπρός ή με τροφοδοσία προς τα πίσω, είτε των ρευμάτων πυθμένα είτε των ρευμάτων κορυφής.

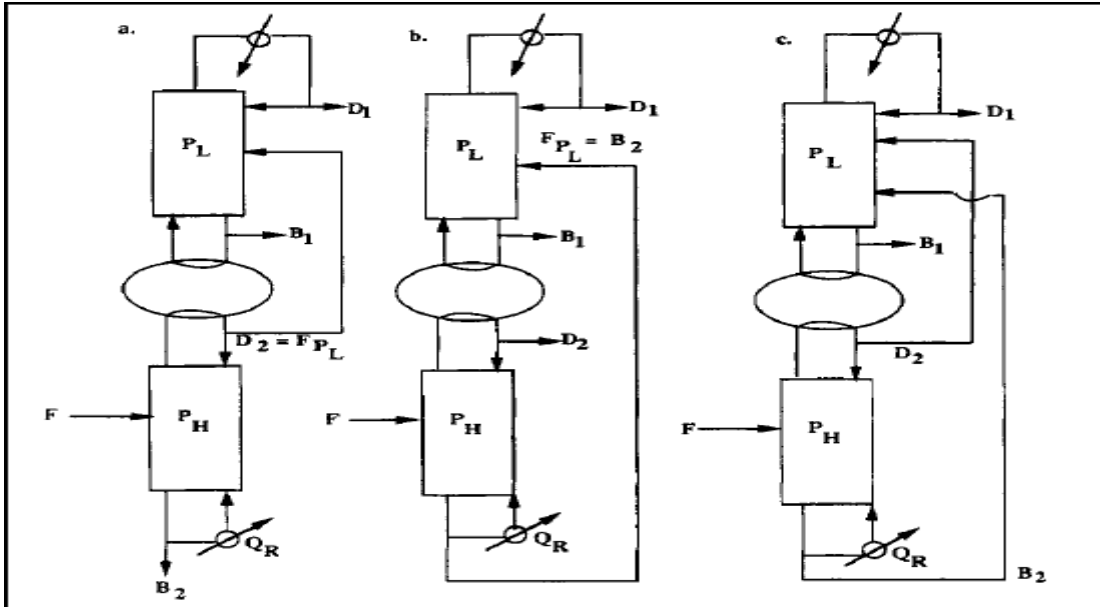
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα ροής για μερικές διαφορετικές εκδοχές συστημάτων απόσταξης πολλαπλών βαθμίδων (4).



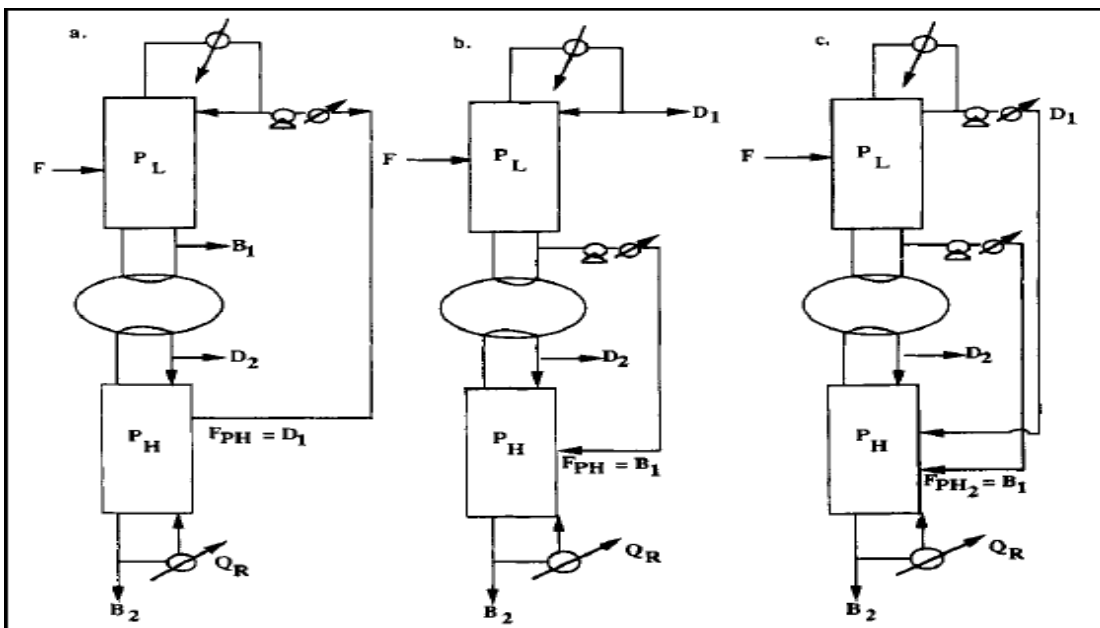
ΣΧΗΜΑ 2-13 Παράλληλη απόσταξη διπλής τροφοσίας, όπου και οι δύο στήλες κάνουν πλήρη διαχωρισμό

Η παράλληλη απόσταξη δύο βαθμίδων έχει το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης ανά βαθμίδα και έχει μελετηθεί περισσότερο από όλα τα υπόλοιπα ανάλογα συστήματα. Γενικά απαιτεί περισσότερους δίσκους ανά βαθμίδα λόγω του πλήρη διαχωρισμού που λαμβάνει χώρα σε κάθε στήλη, όμως η τροφοδοσία μοιράζεται στις δύο βαθμίδες και έτσι οι διάμετροι των στηλών μειώνονται με αποτέλεσμα ο συνολικός όγκος διαχωρισμού να είναι περίπου ίδιος με τον αντίστοιχο όγκο μίας στήλης που θα έκανε τον ίδιο διαχωρισμό (5).

Στα συστήματα με τροφοδοσία προς τα εμπρός, το ρεύμα της τροφοδοσίας εισάγεται πρώτα στη στήλη υψηλής πίεσης, ενώ στα συστήματα με τροφοδοσία προς τα πίσω το ρεύμα της τροφοδοσίας εισάγεται πρώτα στη στήλη χαμηλής πίεσης. Το ρεύμα που συνδέει τις δύο στήλες μπορεί να είναι το ρεύμα κορυφής, το ρεύμα πυθμένα ή και τα δύο.

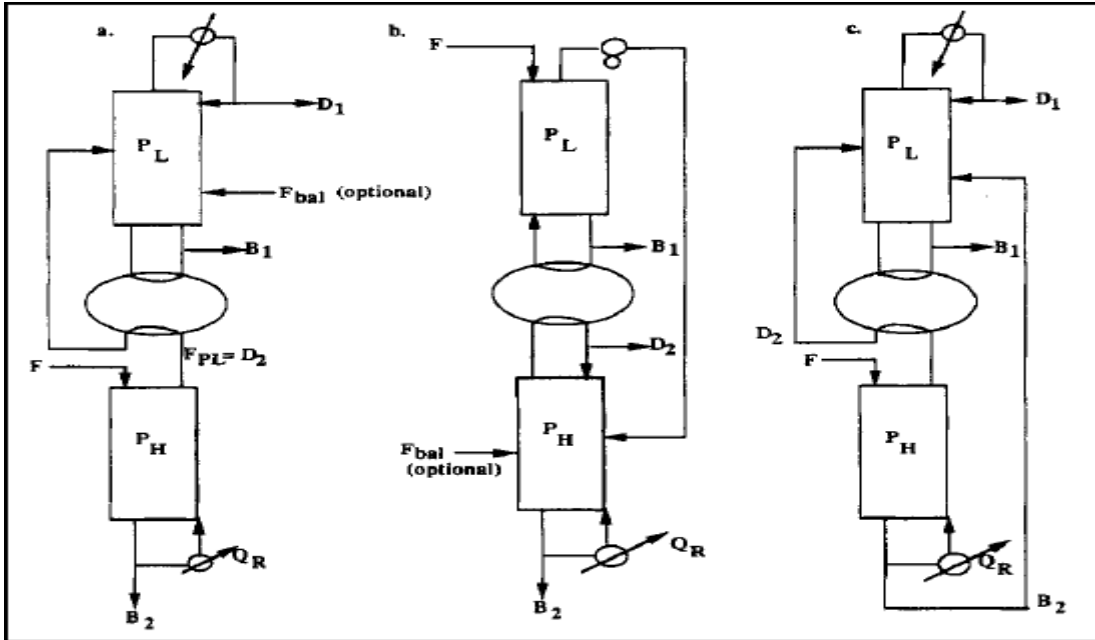


ΣΧΗΜΑ 2-14 Τροφοδοσία προς τα εμπρός. (α) Δύο προϊόντα πυθμένα, (β) Δύο προϊόντα κορυφής, (γ) Ένα προϊόν κορυφής και ένα προϊόν πυθμένα

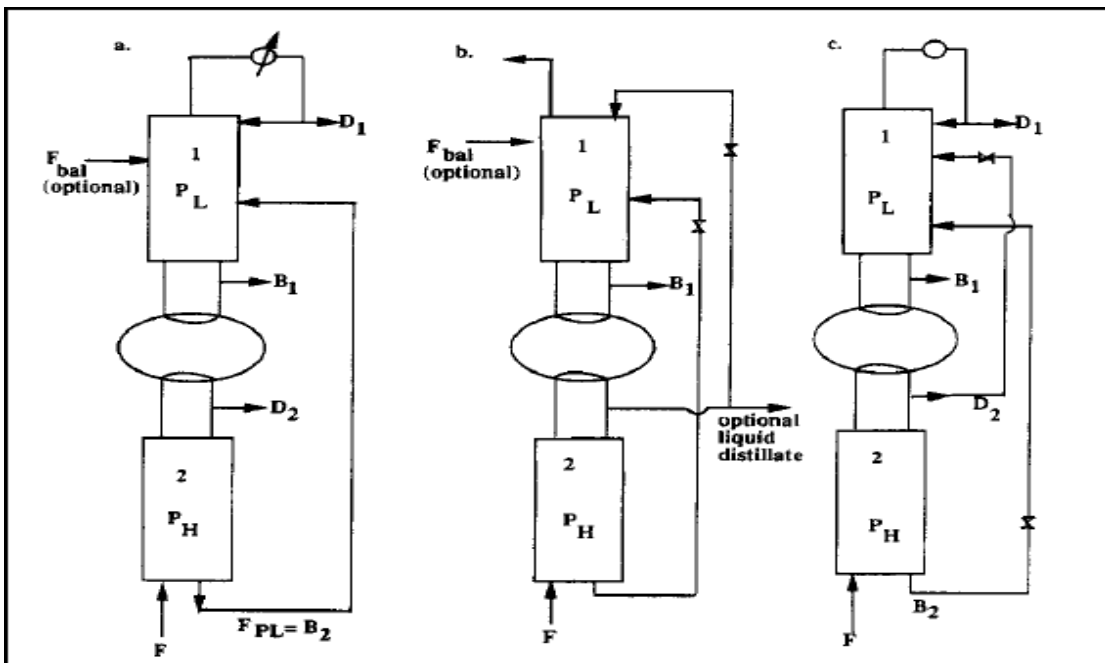


ΣΧΗΜΑ 2-15 Τροφοδοσία προς τα πίσω με χρήση αντλιών. (α) Δύο προϊόντα πυθμένα, (β) Δύο προϊόντα κορυφής, (γ) Ένα προϊόν κορυφής και ένα προϊόν πυθμένα

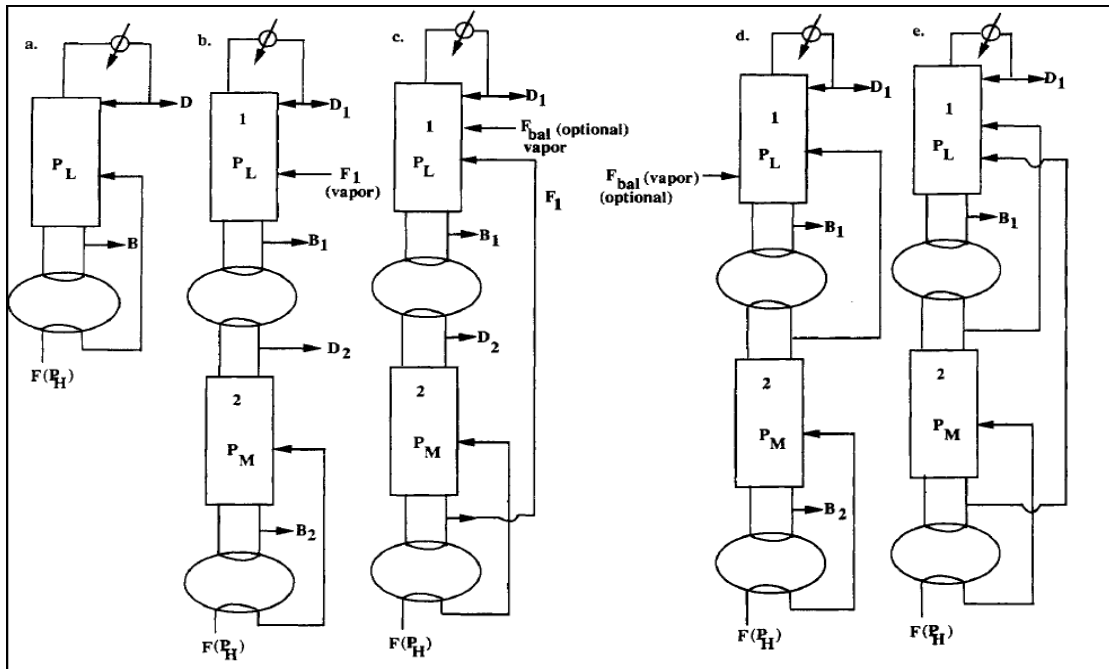
Κάθε διάγραμμα ροής προσφέρει διαφορετικά πλεονεκτήματα και πρέπει να χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένες τροφοδοσίες προκειμένου να είναι ανταγωνιστικό.



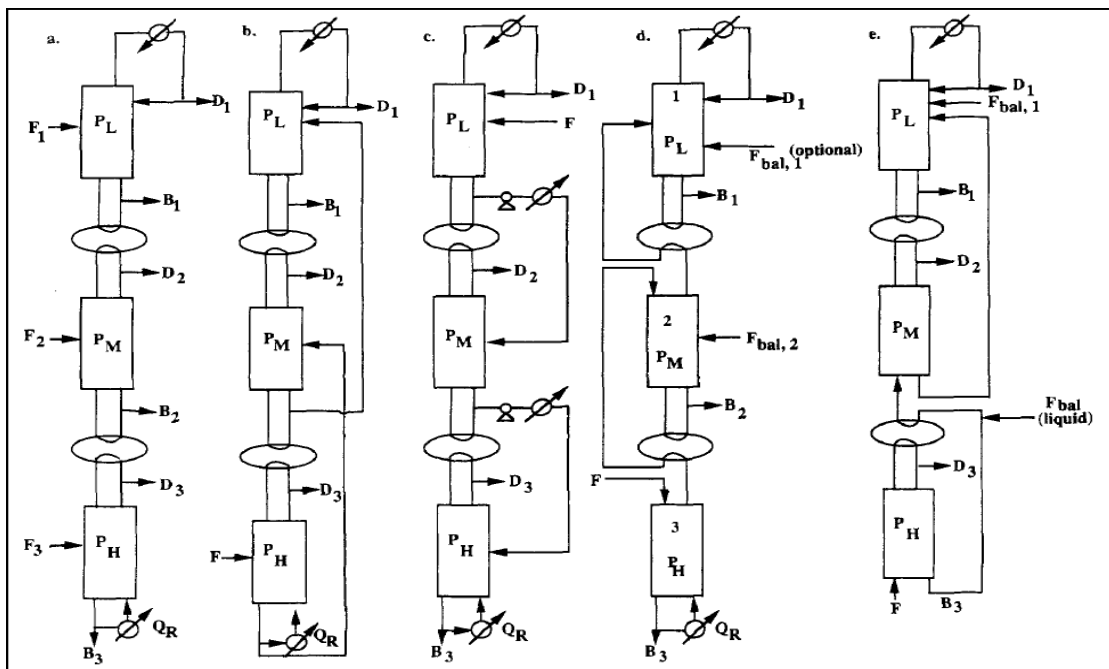
ΣΧΗΜΑ 2-16 Συστήματα με απογυμνωτές για υγρή τροφοδοσία. (α) Τροφοδοσία προς τα εμπρός, (β) Τροφοδοσία προς τα πίσω, (γ) Μερικός διαχωρισμός, τροφοδοσία εμπρός



ΣΧΗΜΑ 2-17 Συστήματα με στήλες εμπλουτισμού για αέρια τροφοδοσία. (α) Τροφοδοσία προς τα εμπρός, (β) Σύστημα διαχωρισμού αερίων, (γ) Μερικός διαχωρισμός με τροφοδοσία προς τα εμπρός.



ΣΧΗΜΑ 2-18 Αέρια Τροφοσία υψηλής πίεσης για παροχή θερμότητας στον αναβραστήρα. (α) Μία βαθμίδα, (β) Δύο βαθμίδες και διπλή τροφοδοσία, (γ) Δύο βαθμίδες και τροφοδοσία προς τα εμπρός του πυθμένα, (δ) Δύο βαθμίδες και τροφοδοσία προς τα εμπρός του αποστάγματος, (ε) Δύο βαθμίδες με τροφοδοσία προς τα εμπρός και μερικό διαχωρισμό.



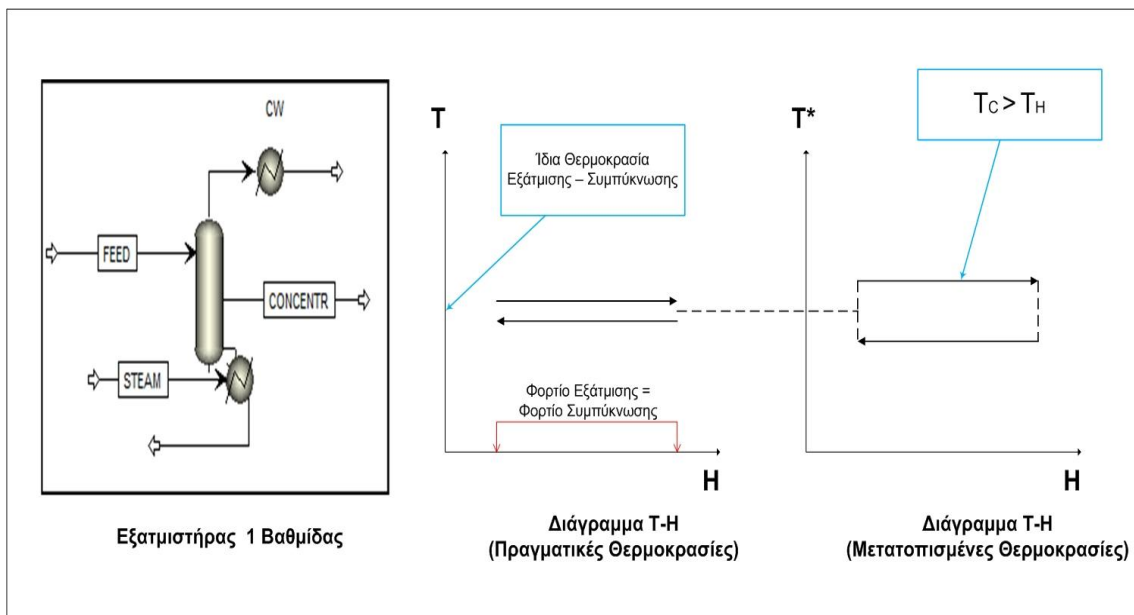
ΣΧΗΜΑ 2-19 Συστήματα τριών βαθμίδων. (α) Τροφοδοσία και πλήρης διαχωρισμός σε όλες τις στήλες, (β) Τροφοδοσία προς τα εμπρός των πυθμένων, (γ) Τροφοδοσία προς τα πίσω των ρευμάτων κορυφής, (δ) Τροφοδοσία προς τα εμπρός με στήλες απογύμνωσης, (ε) Τροφοδοσία προς τα εμπρός με στήλες εμπλουτισμού. Η τροφοδοσία μπορεί να είναι είτε υγρή είτε αέρια.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στα συστήματα πολλαπλών βαθμίδων απόσταξης είναι η “ισορροπία” των αποστακτικών στηλών. Ένα τέτοιο σύστημα

“ισορροπεί” όταν οι στήλες λειτουργούν με τον ίδιο πολλαπλασιαστή του ελάχιστου λόγου αναρροής τους, δηλαδή έχουν ίδιο $m = (L/D)/(L/D)_{\min} = R/R_{\min}$, και οι ενεργειακές απαιτήσεις των στηλών είναι ισορροπημένες μεταξύ τους. Η ισορροπία αυτή επιτυγχάνεται είτε αλλάζοντας τη κατανομή της ροής F μεταξύ των βαθμίδων (όπου υπάρχει αυτή η δυνατότητα), είτε χρησιμοποιώντας τη σύσταση (x_D ή x_B) του διασυνδέοντος ρεύματος ή ρευμάτων, είτε με την εισαγωγή της ροής τροφοδοσίας F_{bal} που είναι ίδιας σύστασης με τη τροφοδοσία F , όπου βέβαια αυτό είναι εφικτό και στα σημεία που υποδεικνύονται από τα διαγράμματα ροής.

2.2.5 Ολοκλήρωση Εξατμιστήρων

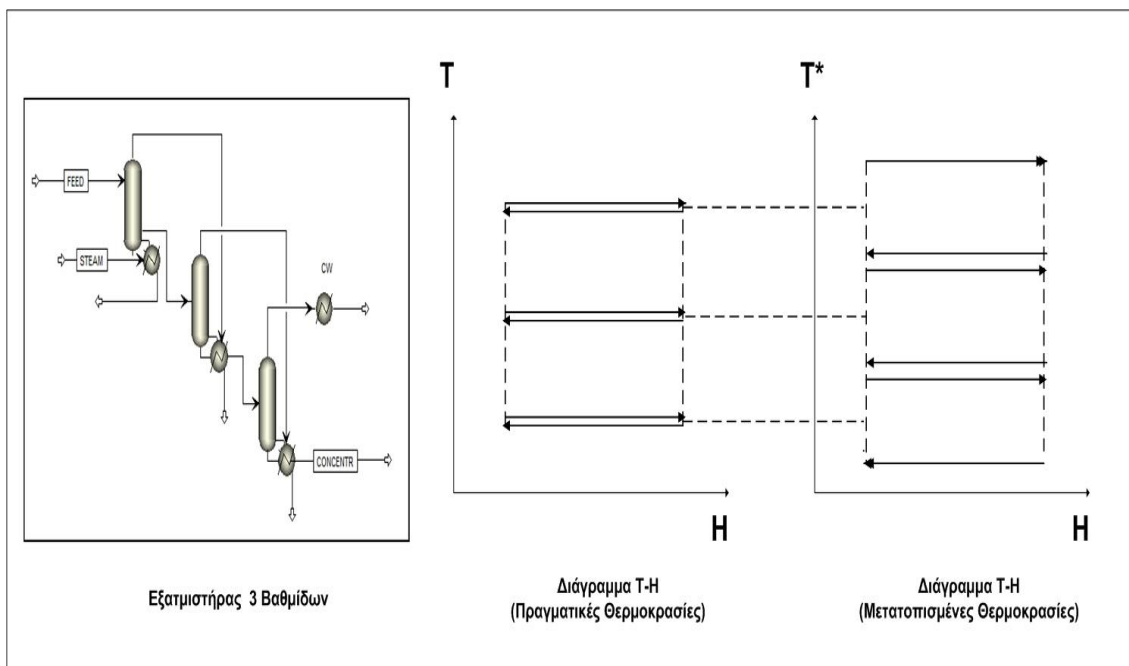
Στις διεργασίες εξάτμισης έχουμε διαχωρισμό ενός μόνο συστατικού, συνήθως νερού, από ένα μη πτητικό μείγμα. Για το λόγο αυτό, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η εξάτμιση και η συμπύκνωση γίνονται σε σταθερές θερμοκρασίες. Τα ενεργειακά φορτία της εξάτμισης και συμπύκνωσης αντιστοιχούν σε ένα ψυχρό και ένα θερμό ρεύμα τα οποία βρίσκονται στην ίδια πραγματική θερμοκρασία. Όταν όμως αυτά μετατοπιστούν κατά $+\Delta T_{\min}/2$ και $-\Delta T_{\min}/2$ αντίστοιχα, τότε πλέον έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες και μάλιστα το ψυχρό ρεύμα είναι θερμότερο απ’το θερμό, άρα δεν υπάρχουν περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας, όπως φαίνεται στην Εικόνα.



ΣΧΗΜΑ 2-20 Απεικόνιση Εξατμιστήρα μίας βαθμίδας σε διάγραμμα T-H και T*-H

Η διεργασία της εξάτμισης μπορεί να αναπαρασταθεί στο ΜΣΓ με ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο (κουτί), όπως η διεργασία της απόσταξης. Επομένως, ο

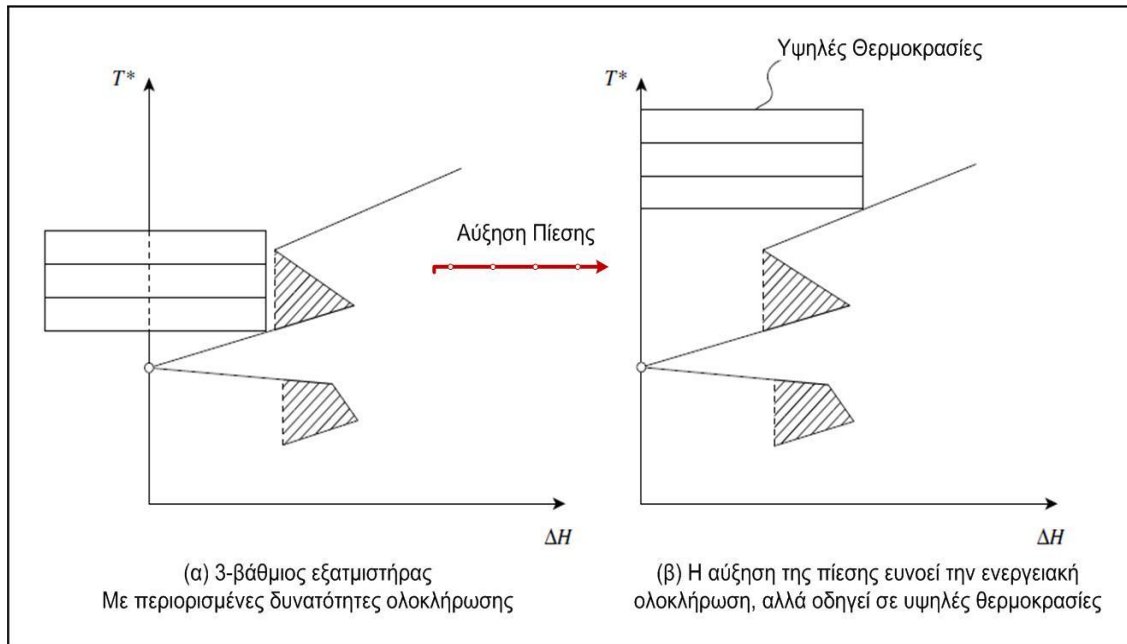
εξατμιστήρας μπορεί να ολοκληρωθεί ενεργειακά με την υπόλοιπη διεργασία, αρκεί να οριστούν οι κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας ώστε το κουτί αυτό να τοποθετηθεί σωστά στο Μεγάλο Σύνθετο Διάγραμμα, δηλαδή πάνω ή κάτω απ'το Κόμβο Ανάσχεσης. Εάν ο εξατμιστήρας αποτελείται από περισσότερες βαθμίδες, τότε κάθε βαθμίδα αναπαριστάται με ένα τέτοιο κουτί στο ΜΣΓ.



ΣΧΗΜΑ 2-21 Απεικόνιση Εξατμιστήρα τριών βαθμίδων σε διάγραμμα T-H και T*-H

Οι βαθμοί ελευθερίας της εξάτμισης παρέχουν σημαντικές ευκαιρίες για την ενεργειακή ολοκλήρωση του εξατμιστήρα με την υπόλοιπη διεργασία, έτσι ώστε να υπάρξει σημαντική ενεργειακή εξοικονόμηση.

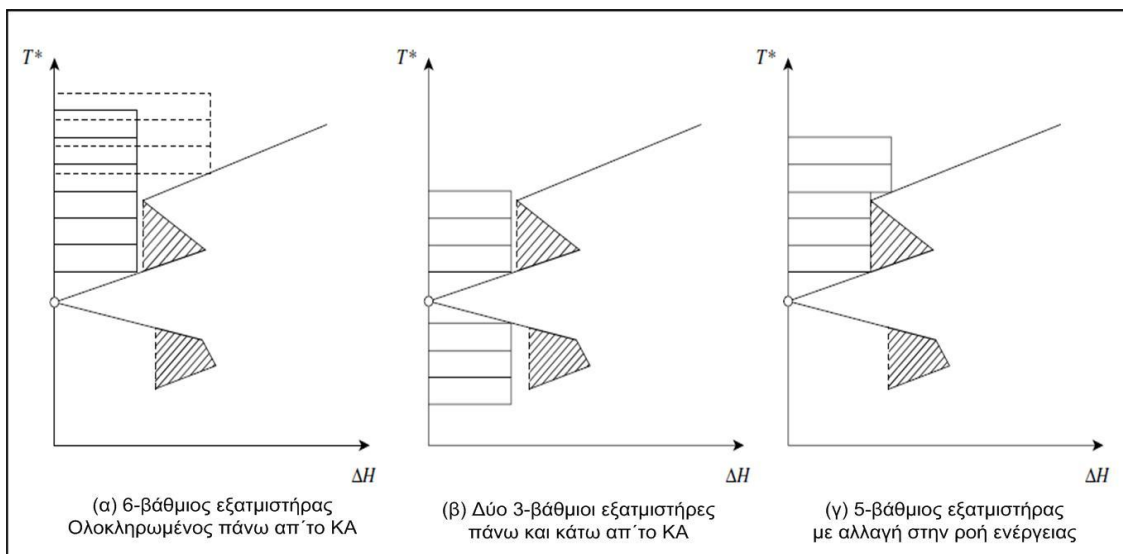
➤ Η αύξηση ή μείωση της πίεσης οδηγεί σε αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας του εξατμιστήρα, οπότε μπορεί να επιλεγεί κατάλληλα ώστε να διευκολυνθεί η ενεργειακή ολοκλήρωση του εξατμιστήρα είτε πάνω είτε κάτω απ'το Κόμβο Ανάσχεσης. Όμως, υπάρχει ο περιορισμός της υψηλής θερμοκρασίας για θερμοευαίσθητα προϊόντα, άρα η αύξηση της πίεσης δεν επιτρέπεται σε αρκετές περιπτώσεις.



ΣΧΗΜΑ 2-22 Ολοκλήρωση του 3-βάθμιου εξατμιστήρα με αύξηση της πίεσης λειτουργίας

➤ Μια άλλη σχεδιαστική επιλογή είναι ο αριθμός των βαθμίδως εξάτμισης, καθώς και το εάν πρέπει ή όχι να είναι ενεργειακά συνδεδεμένες μεταξύ τους. Η επιλογή αυτή μπορεί να οδηγήσει σε εξατμιστήρες με περισσότερες βαθμίδες (εφ' όσον δεν οδηγούμαστε σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες που μπορεί να είναι απαγορευτικές για ορισμένα προϊόντα) ή ακόμα και σε εξατμιστήρες που λειτουργούν παράλληλα, έχοντας κάποιες βαθμίδες πάνω απ' το ΚΑ και κάποιες βαθμίδες κάτω απ' το ΚΑ.

➤ Ανάλογα με τη μορφή του ΜΣΓ, το σύστημα εξατμιστήρων μπορεί να λειτουργεί με διαφορετική ροή ενέργειας σε κάθε βαθμίδα, άρα και διαφορετική ροή μάζας. Δηλαδή, ο ατμός που εξατμίζεται από μια βαθμίδα μπορεί να χρησιμοποιείται εν μέρει για τις ανάγκες της υπόλοιπης διεργασίας και το υπόλοιπο τμήμα του να χρησιμοποιείται για την εξάτμιση στην επόμενη βαθμίδα. Δηλαδή, το μεγαλύτερο μέρος της εξάτμισης γίνεται στις πρώτες βαθμίδες και λιγότερο στις επόμενες, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



ΣΧΗΜΑ 2-23 Ολοκλήρωση του 6-βάθμιου εξατμιστήρα (α) πάνω απ' το KA, (β) πάνω και κάτω απ' το KA, (γ) πάνω απ' το KA με αλλαγή στη ροή μάζας και ενέργειας

2.2.6 Εξαγωγή Δεδομένων

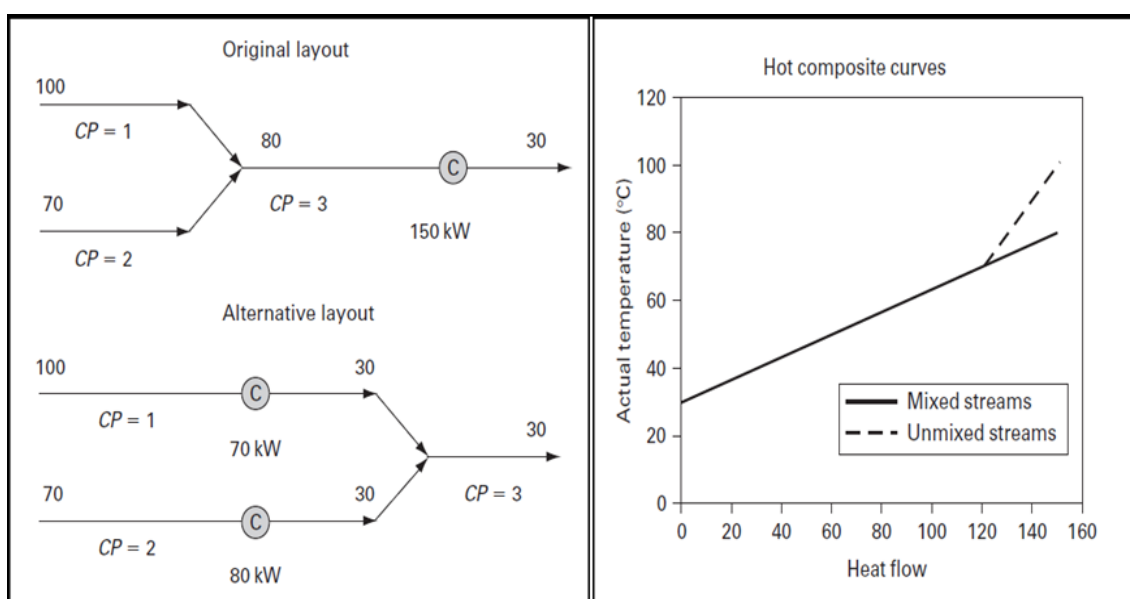
Κατά την ενεργειακή ανάλυση μιας διεργασίας πρέπει να συλλέξουμε προσεκτικά και σωστά τα απαραίτητα ενεργειακά δεδομένα. Για το καθορισμό των ρευμάτων που είναι αναγκαία στην ενεργειακή ολοκλήρωση, το κριτήριο είναι τα ρεύματα αυτά να αλλάζουν θερμικό φορτίο αλλά να μην αλλάζει η σύστασή τους. Επομένως, η ροή ενός υγρού από ένα εναλλάκτη θερμότητας, η εξάτμιση ενός μονοσυστατικού υγρού ή η ψύξη ενός πολυσυστατικού μίγματος χωρίς κανένα διαχωρισμό των συστατικών του, θεωρούνται όλα, και μπορούν να αναπαρασταθούν, ως θερμά ή ψυχρά ρεύματα. Αντίθετα, η ροή ενός υγρού μέσα από στήλη απορρόφησης, ένα μίγμα που αντιδρά ή η ροή μέσα από μια αποστακτική στήλη, δεν θεωρούνται ως ρεύματα προς ολοκλήρωση (2).

Τα δεδομένα που πρέπει να συλλέξουμε για τα ρεύματα αυτά είναι η αρχική και τελική θερμοκρασία τους ($T_1 \rightarrow T_2$), το είδος του ρεύματος (θερμό ή ψυχρό) και το ροή ενέργειας ανά μονάδα θερμοκρασίας CP (kW/K) ή το θερμικό φορτίο του ρεύματος ΔH (kW). Η εξαγωγή των δεδομένων αυτών γίνεται με τους παρακάτω τρόπους:

- από τη μαζική παροχή των ρευμάτων, εφόσον είναι γνωστές (ή μπορούμε να μετρήσουμε) οι ειδικές θερμοχωρητικότητες των συστατικών των ρευμάτων
- από τη μαζική παροχή των ρευμάτων και τις τιμές της ειδικής ενθαλπίας

- από τις μετρήσεις των θερμικών φορτίων στους εναλλάκτες θερμότητας
- από θερμικά φορτία άλλων ρευμάτων, με έμμεσο τρόπο χρησιμοποιώντας το ισοζύγιο ενέργειας.

Κατά την ανάλυση ενός διαγράμματος ροής μιας διεργασίας, ο μηχανικός διεργασιών πρέπει να εξετάσει προσεκτικά εάν υπάρχουν κάποιοι βαθμοί ελευθερίας στις θερμοκρασίες των ρευμάτων οι οποίοι μπορούν να αξιοποιηθούν για να δώσουν καλύτερα αποτελέσματα στην ενεργειακή ολοκλήρωση. Για παράδειγμα, η τελική θερμοκρασία αποθήκευσης ενός ενδιάμεσου ή τελικού προϊόντος δεν είναι πάντα αμετάβλητη, άρα μια μικρή αλλαγή σε αυτήν μπορεί να βελτιώσει τα περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας. Επίσης, η ανάμιξη δύο ρευμάτων υποβαθμίζει ενεργειακά τα ρεύματα αυτά. Για το λόγο αυτό, κατά την εξαγωγή δεδομένων πρέπει να θεωρείται ότι θερμαίνονται ή ψύχονται στη τελική τους θερμοκρασία (που έχουν μετά την ανάμιξη) ως δύο ξεχωριστά ρεύματα.



ΣΧΗΜΑ 2-24 Εξαγωγή δεδομένων ρευμάτων ανάμιξης και η επίδραση της επιλογής στο Σύνθετο Γράφημα

Είναι πολύ σημαντικό όμως να μην σπάμε τα ρεύματα της διεργασίας σε πολλά άλλα μικρότερα, διότι τότε θα προκύψει ένα πολύ περίπλοκο δίκτυο εναλλακτών θερμότητας, με μεγάλο πάγιο κόστος και ελάχιστο ενεργειακό όφελος. Ο κανόνας κατά την εξαγωγή δεδομένων είναι “Κράτα τα θερμά ρεύματα θερμά και τα ψυχρά ρεύματα ψυχρά”. Με

τον τρόπο αυτό αξιοποιείται πλήρως όλη η διαθέσιμη ενέργεια για θέρμανση ή ψύξη άλλων ρευμάτων της διεργασίας.

2.3 Ανάλυση Συνολικής Μονάδας

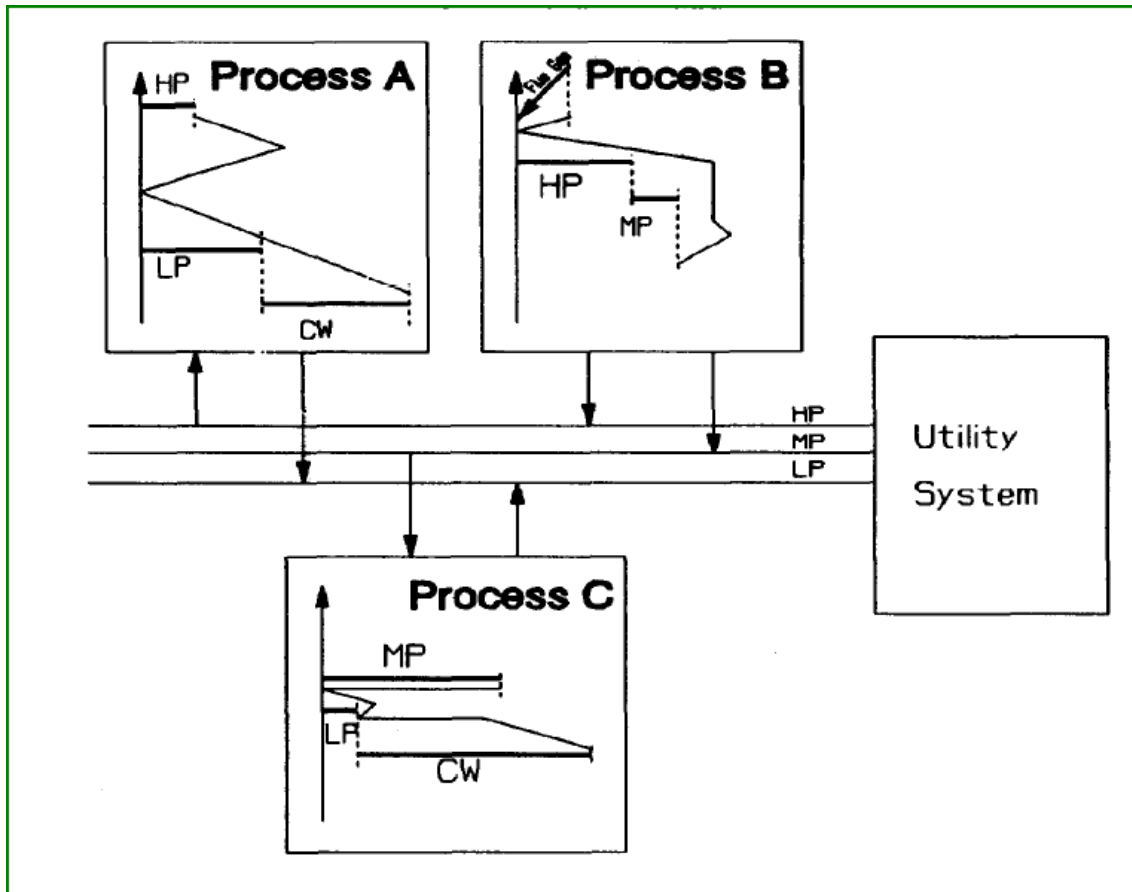
Οι τοποθεσίες εγκατάστασης των χημικών βιομηχανιών χωρίζονται, συνήθως, σε διακεκριμένες περιοχές που καθορίζονται νοητά ή πραγματικά από τις ανεξάρτητες διεργασίες που λειτουργούν μέσα στα γεωγραφικά όρια της εγκατάστασης. Η ενεργειακή ολοκλήρωση κάθε διεργασίας χωριστά είναι πλέον τυπική διαδικασία και έχουν αναπτυχθεί επαρκώς τα κατάλληλα εργαλεία για την εφαρμογή της σε υπάρχουσες ή νέες διεργασίες. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ενεργειακή ολοκλήρωση μιας συγκεκριμένης διεργασίας μπορεί να γίνει εύκολα χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία του Κόμβου Ανάσχεσης. Στη περίπτωση όμως που έχουμε πολλές διαφορετικές διεργασίες, πρέπει να ακολουθηθεί διαφορετική προσέγγιση για την ενεργειακή ολοκλήρωσή τους.

Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των διεργασιών μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: άμεσα και έμμεσα. Η άμεση μεταφορά θερμότητας μεταξύ ρευμάτων που ανήκουν σε διαφορετικές διεργασίες παρουσιάζει σημαντικά πρακτικά προβλήματα. Ορισμένα από αυτά είναι (6):

- Δυσκολίες κατά την εκκίνηση (startup) ή το σταμάτημα (shutdown) λειτουργίας της εγκατάστασης.
- Υψηλό πάγιο και λειτουργικό κόστος των σωληνώσεων και των αντλιών που απαιτούνται για τη μεταφορά των ρευμάτων από διεργασία σε διεργασία.
- Χωροθέτηση διεργασιών στο χώρο της εγκατάστασης, θέματα ασφάλειας.

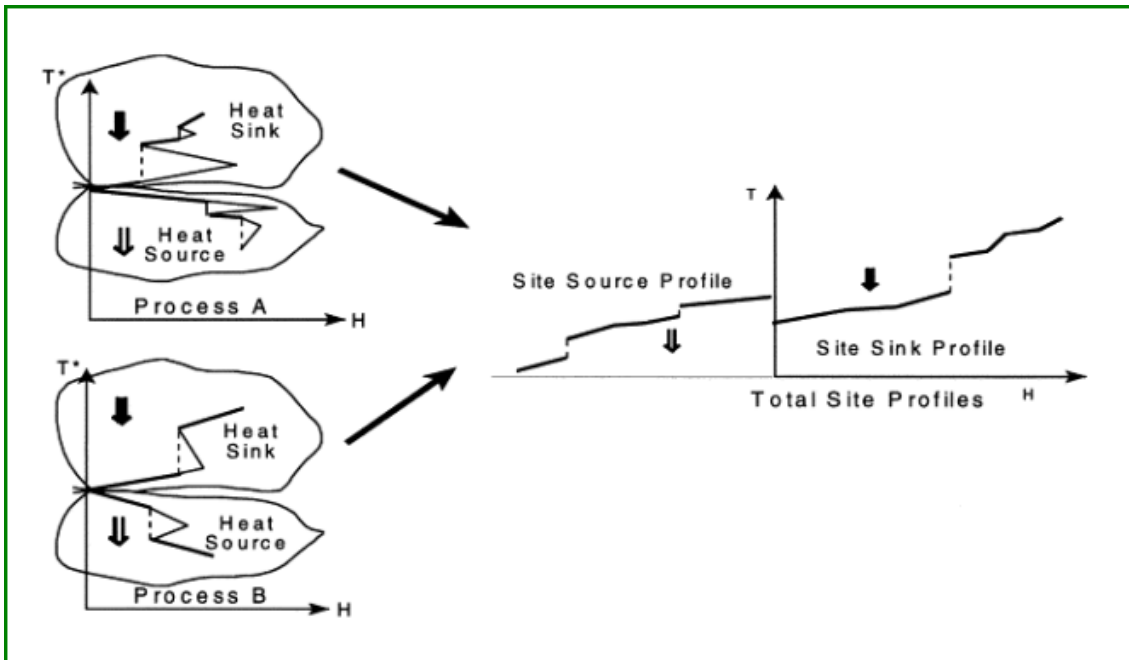
Για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα, έχει προταθεί ως λύση η έμμεση μεταφορά θερμότητας από διεργασία σε διεργασία με τη χρήση ενός μέσου μεταφοράς θερμότητας, όπως είναι το λάδι ή ο ατμός. Με τον τρόπο αυτό γίνεται χρήση του ήδη υπάρχοντος κυκλώματος μεταφοράς των θερμών και ψυχρών παροχών που χρησιμοποιούνται στην εγκατάσταση. Τα χημικά εργοστάσια συνήθως καταναλώνουν ή παράγουν ατμό σε διάφορα επίπεδα πίεσεων (π.χ. ατμός χαμηλής, μεσαίας, υψηλής και πολύ υψηλής πίεσης). Επομένως, με τη κατάλληλη διάταξη, ο ατμός που παράγεται από μια διεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις άλλες, αρκεί να ανήκει στα επιθυμητά επίπεδα πίεσης. Η συνολική εγκατάσταση και το σύστημα παροχής ατμού από και προς τις διεργασίες φαίνεται στο ΣΧΗΜΑ 2-25. Στη περίπτωση αυτή, τα όρια της

εγκατάστασης αποτελούν και τα όρια ολοκλήρωσης του συστήματος, ανάγοντας το πρόβλημα εξοικονόμησης ενέργειας σε πρόβλημα βελτιστοποίησης της παραγωγής και χρήσης ατμού στα κατάλληλα επίπεδα πίεσης.



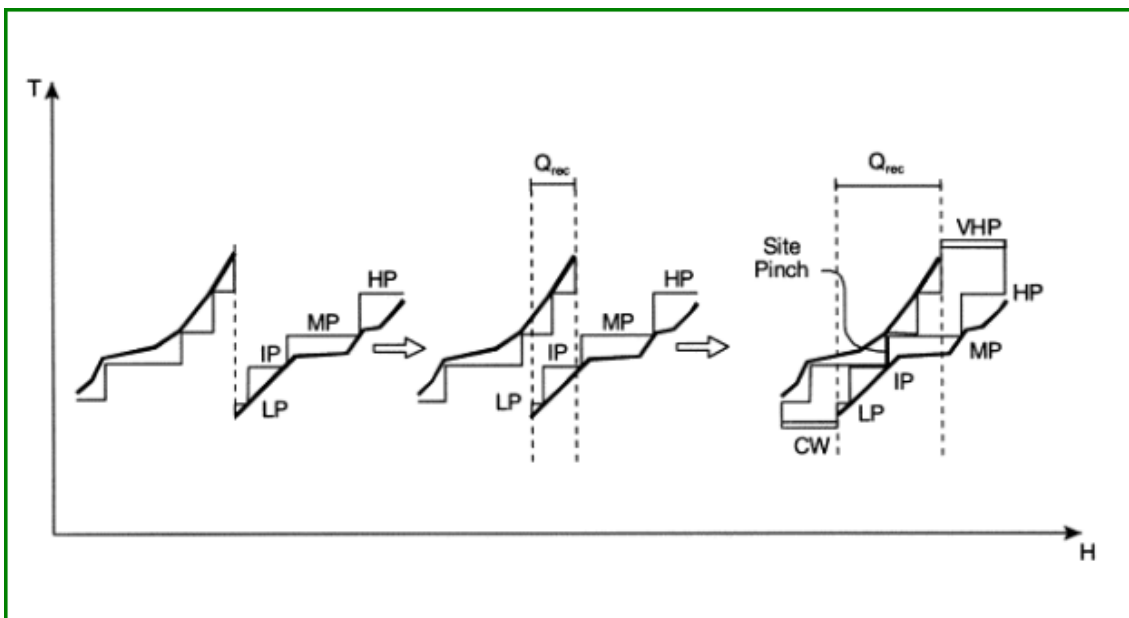
ΣΧΗΜΑ 2-25 Σχηματική απεικόνιση συνολικής εγκατάστασης με το σύστημα παροχής ατμού από/πρός τις ανεξάρτητες διεργασίες

Η βελτιστοποίηση του προβλήματος προσφοράς και ζήτησης ατμού σε μια εγκατάσταση με πολλές ανεξάρτητες διεργασίες έχει στόχο την ελαχιστοποίηση της χρήσης ενέργειας (με άλλα λόγια την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου) για τη παραγωγή ατμού. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος έχει προταθεί και εδώ η Μεθοδολογία του Κόμβου Ανάσχεσης (Linnhoff, 1984). Η μέθοδος αυτή συνδυάζει τα Μεγάλα Σύνθετα Γραφήματα των ανεξάρτητων διεργασιών προκειμένου να παρασταθούν γραφικά η πηγή και η δεξαμενή θερμότητας της εγκατάστασης (site heat source και site heat sink), ώστε να εντοπιστούν τα βέλτιστα επίπεδα ατμού για την ενεργειακή ολοκλήρωση των διεργασιών (ΣΧΗΜΑ 2-26 και ΣΧΗΜΑ 2-27).



ΣΧΗΜΑ 2-26 Κατασκευή διαγράμματος T-H της συνολικής εγκατάστασης από τα ΜΣΓ των ανεξάρτητων διεργασιών.

Πηγή: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431100000132>



ΣΧΗΜΑ 2-27 Σύνθετο γράφημα Ολόκληρης της Εγκατάστασης (μεθοδολογία Κόμβου Ανάσχεσης)

Πηγή: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431100000132>

Μια άλλη μεθοδολογία, που έχει αναπτυχθεί για την ανάλυση της συνολικής Μονάδας, είναι η Μεθοδολογία Ανάλυσης Εξέργειας (Dhole και Linnhoff, 1992), η οποία στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της απώλειας εξέργειας μεταξύ των θερμών/ψυχρών παροχών και της δεξαμενής/πηγής θερμότητας της συνολικής εγκατάστασης. Η μέθοδος αυτή είναι γραφική και το μειονέκτημά της είναι ότι δεν λαμβάνει υπ' όψιν το πάγιο κόστος των εναλλακτών θερμότητας, ούτε καθορίζει το πώς κατανέμεται η χρήση ατμού στην ανάκτηση θερμότητας μεταξύ των διεργασιών.

Εναλλακτικά, έχουν εξεταστεί τρόποι για την άμεση ολοκλήρωση των ανεξάρτητων διεργασιών μιας συνολικής Μονάδας, περιορίζοντας τα προβλήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω σχετικά με την άμεση ενεργειακή ολοκλήρωση διεργασιών. Μια μεθοδολογία που έχει προταθεί (Ahmad και Hui, 1991) στηρίζεται στον προσδιορισμό της μέγιστης δυνατής ανάκτησης θερμότητας, αλλά με την ελαχιστοποίηση του αριθμού των διασυνδέσεων και την μικρότερη δυνατή μεταφορά θερμότητας μεταξύ των διεργασιών. Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί μαθηματικά μοντέλα που στοχεύουν αφ' ενός στην μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνεται από την άμεση ενεργειακή ολοκλήρωση όλων των διεργασιών της μονάδας, και αφ' ετέρου στην ελαχιστοποίηση των συνδέσεων των ρευμάτων από διαφορετικές διεργασίες που απαιτούνται για την επίτευξη της μέγιστης ανάκτησης θερμότητας (7). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας και μειώνεται το κόστος (πάγιο και λειτουργικό) των σωληνώσεων και των αντλιών που απαιτούνται για τη μεταφορά των θερμών και ψυχρών ρευμάτων ανάμεσα στις διεργασίες.

3 ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΛΙΓΝΟΚΥΤΤΑΡΙΝΟΥΧΟΥ ΒΙΟΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟΥ

3.1 Γενικά

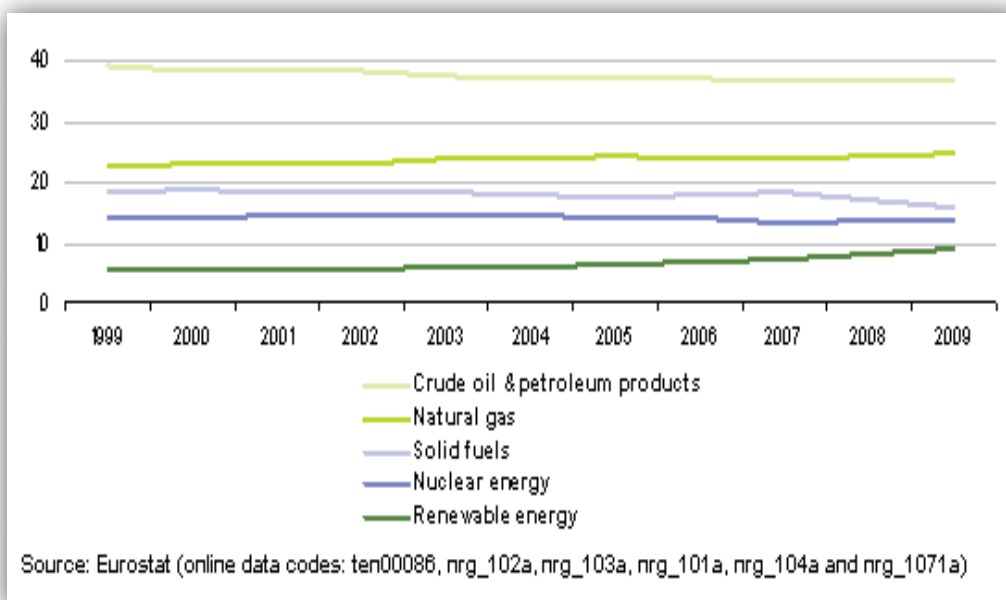
Σε αυτή την εργασία θα εξετάσουμε την περίπτωση ενός βιοδιυλιστηρίου που μετατρέπει την λιγνοκυτταρινούχο βιομάζα σε τρία ενδιάμεσα προϊόντα, τη λιγνίνη, τα C5 και τα C6 σάκχαρα, αξιοποιώντας τη τεχνολογία κλασμάτωσης βιομάζας με οργανική οξέα. Οι διεργασίες που μπορούν να υλοποιηθούν μέσα σ' ένα τέτοιο διυλιστήριο είναι διεργασίες που μετατρέπουν τα ενδιάμεσα σε τελικά προϊόντα, μεταξύ των οποίων είναι: οι PF Ρητίνες και η Πολυουρεθάνη από τη λιγνίνη, η

Αιθανόλη και η Ξυλιτόλη (με βιοτεχνολογική και καταλυτική διεργασία) από τα C5 σάκχαρα, και το Ιτακονικό Οξύ και η Αιθανόλη από τα C6 σάκχαρα.

3.2 Το Βιοδιυλιστήριο και η σημασία του

Το βιοδιυλιστήριο είναι μια εγκατάσταση που περιλαμβάνει ολοκληρωμένες διεργασίες μετασχηματισμού της βιομάζας σε βιοκαύσιμα και σε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας, ενώ παράλληλα γίνεται συμπαραγωγή θερμότητας και ισχύος. Το βιοδιυλιστήριο είναι ανάλογο με το διυλιστήριο αργού πετρελαίου, διαφέρει όμως στο ότι η τροφοδοσία του προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, όπως είναι η βιομάζα. Καθώς τα αποθέματα αργού πετρελαίου συνεχώς εξαντλούνται, η λειτουργία βιοδιυλιστηρίων για τη παραγωγή υγρών καυσίμων καθίσταται επιτακτική.

Οι μελέτες που έγιναν στα πλαίσια ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος (SupraBio) έδειξαν ότι, με κριτήριο τη διαθεσιμότητα πηγών βιομάζας, μπορούν να κατασκευαστούν στην Ευρώπη ένας σχετικά μεγάλος αριθμός (~300) μικρών βιοδιυλιστηρίων (δυναμικότητας 25,000 tpa) και ένας μικρός αριθμός (~10), μεγάλων εγκαταστάσεων (δυναμικότητας 750,000 tpa). Η δυνατότητα αυτή θα αυξήσει σημαντικά το ποσοστό συμμετοχής της βιομάζας στον ενεργειακό χάρτη της Ευρώπης, το οποίο σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία παραμένει χαμηλό (ΓΡΑΦΗΜΑ 3-1).



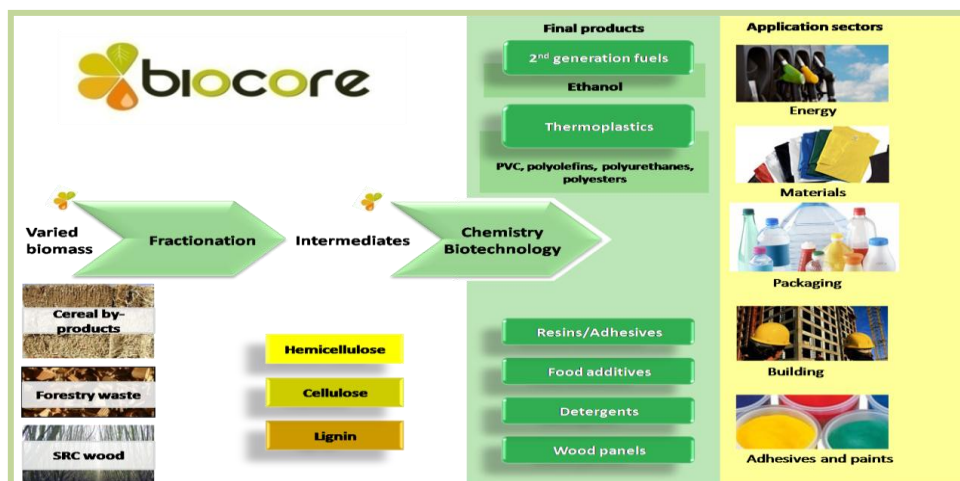
ΓΡΑΦΗΜΑ 3-1 Πηγές Ενέργειας ως ποσοστά επί της ακαθάριστης εγχώριας κατανάλωσης ενέργειας στην Ε.Ε. για τα έτη 1999-2009

Πηγή: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home>

Η λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα είναι μια εναλλακτική πρόταση του πετρελαίου και είναι αξιόλογη περίπτωση διότι αφ' ενός είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και αφ' ετέρου μπορεί να είναι α' ύλη για ταυτόχρονη παραγωγή θερμότητας, ηλεκτρισμού, υγρών καυσίμων και χημικών προϊόντων. Καλύπτει δηλαδή ένα ευρύ φάσμα αναγκών της σύγχρονης κοινωνίας και, επιπλέον, η βιομάζα αυτή δεν αποτελεί κομμάτι της τροφικής αλυσίδας και προσφέρει σημαντικές δυνατότητες για αειφόρες πρακτικές παραγωγής. Πιθανές τροφοδοσίες για ένα λιγνοκυτταρινούχο βιοδυλιστήριο μπορεί να είναι παραπροϊόντα δημητριακών (πχ υπολείμματα φλοιών σιταριού ή ρυζιού), υπολείμματα δασοκομίας ή ξυλεία από δάση περιοδικής υλοτόμησης. Τα είδη αυτά της βιομάζας βρίσκονται ανεκμετάλλευτα σε πολύ μεγάλες ποσότητες, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις η σωστή επεξεργασία τους θα αποτρέψει επιβλαβείς για το περιβάλλον πρακτικές, όπως η καύση γεωργικών παραπροϊόντων σε υπαίθριους χώρους. Εξ' άλλου, τα δάση περιοδικής υλοτόμησης μπορούν να αναπτυχθούν σε εδάφη ακατάλληλα για γεωργική ή κτηνοτροφική χρήση, ακόμα και σε μολυσμένα εδάφη.

Το βιοδυλιστήριο έχει αρκετές εναλλακτικές ως προς την επιλογή των προϊόντων που θα επιλέξει να παράγει. Η τελική επιλογή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όμως οι οικονομικοί παράγοντες είναι αυτοί που καθορίζουν τελικά τη βιωσιμότητα μιας τέτοιας δραστηριότητας. Θετικό είναι το γεγονός ότι, η ευρεία γκάμα των προϊόντων που μπορεί (ή σχεδιάζεται στο μέλλον) να παράγει ένα βιοδυλιστήριο, περιλαμβάνει ορισμένα υψηλής προστιθέμενης αξίας. Αυτό σημαίνει ότι, ακόμα και αν παράγονται σε μικρές ποσότητες, συντελούν στη μεγιστοποίηση του προσδοκώμενου κέρδους από τη χρήση της βιομάζας.

Η έρευνα σχετικά με τα βιοδυλιστήρια βρίσκεται σε πλήρη εξέλιξη τα τελευταία χρόνια. Ένα σχετικό ερευνητικό πρόγραμμα είναι το BIOCORE που στοχεύει στη πλήρη διερεύνηση των πιθανών προϊόντων της λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας, συμπεριλαμβανομένης της βιο-αιθανόλης αλλά και άλλων υψηλής προστιθέμενης αξίας τελικών προϊόντων, όπως το βιο-PVC. Η πορεία μετασχηματισμού της βιομάζας σε τελικά προϊόντα φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



ΕΙΚΟΝΑ 3-1 Μετασχηματισμός Βιομάζας σε τελικά προϊόντα, σύμφωνα με το ερευνητικό πρόγραμμα “Biocore”

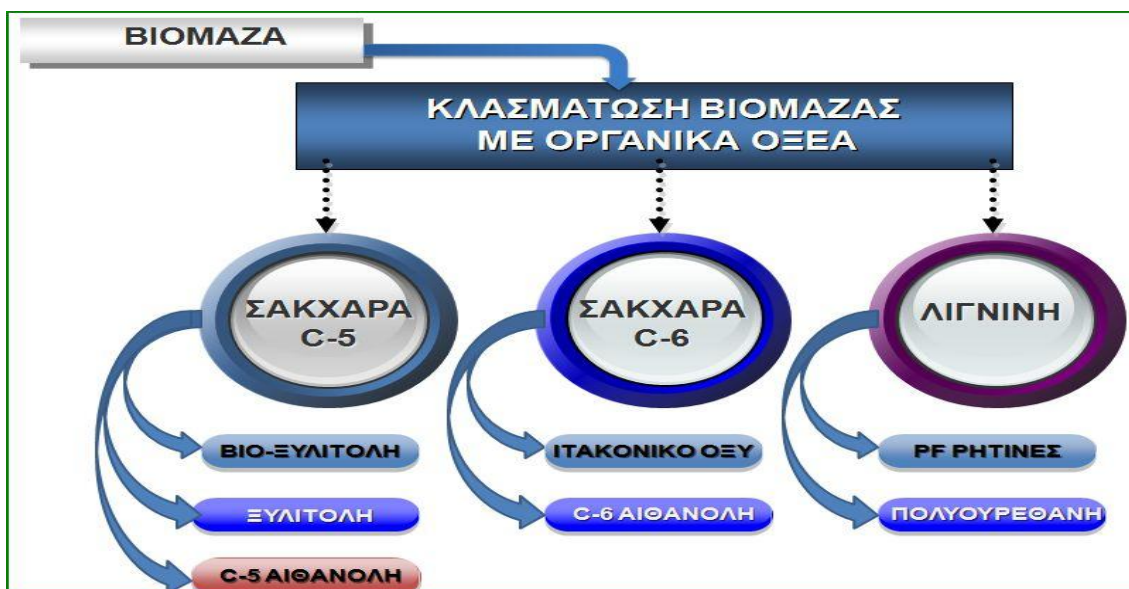
Πηγή: <http://www.biocore-europe.org/page.php?optim=biocore-in-brief> (12/04/2012)

Για να είναι αποδοτική η χρήση της βιομάζας πρέπει να γίνεται πλήρης αξιοποίησή της από το βιοδιυλιστήριο. Για το λόγο αυτό η τεχνολογία, που επιλέγεται από τη Biocore για τη κλασμάτωση της βιομάζας σε ενδιάμεσα προϊόντα, χρησιμοποιεί οργανικά οξέα με τα οποία επιτυγχάνεται η διαλυτοποίηση της λιγνίνης και η παραγωγή υψηλής ποιότητας κυτταρίνης και ημι-κυτταρίνης (C-6 και C-5 σάκχαρα).

Ο στόχος για την βιωσιμότητα ενός βιοδιυλιστηρίου είναι ο βέλτιστος συνδυασμός των διεργασιών που υλοποιούνται μέσα σε αυτό, με τη σωστή σύνθεση και την ολοκλήρωσή τους, έτσι ώστε να παραχθούν βιοκαύσιμα από αιεφόρες, ανανεώσιμες πρώτες ύλες, σε ανταγωνιστικές τιμές σε σχέση με τα παράγωγα του πετρελαίου. Επίσης, αντικειμενικός στόχος είναι η μεγιστοποίηση της αξίας των παραπροϊόντων των διεργασιών ή/και η παραγωγή άλλων προϊόντων (έστω και σε μικρότερες ποσότητες) υψηλής προστιθέμενης αξίας.

3.3 Διεργασία Κλασμάτωσης Βιομάζας με Οργανικά Οξέα

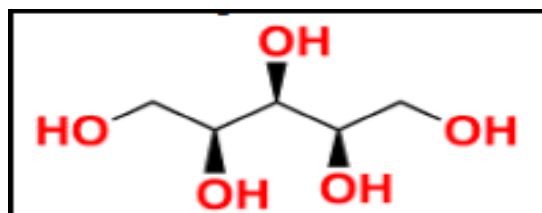
Η διεργασία αυτή αξιοποιεί την δυνατότητα διάσπασης της λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας με τη χρήση οργανικών οξέων (οξικό/φορμικό οξύ) προκειμένου να ληφθούν τα τρία βασικά της συστατικά, που είναι η λιγνίνη, τα C-5 και τα C-6 σάκχαρα. Τα προϊόντα αυτά θεωρούνται ενδιάμεσα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να τροφοδοτήσουν ένα πλήθος άλλων διεργασιών, όπως θα δούμε παρακάτω.



ΕΙΚΟΝΑ 3-2 Μετασχηματισμός Βιομάζας σε ενδιάμεσα και τελικά προϊόντα μέσω της διεργασίας Κλασμάτωσης

3.4 Ξυλιτόλη

Η ξυλιτόλη είναι ένα γλυκαντικό το οποίο χρησιμοποιείται ως ένα φυσικό υποκατάστατο της ζάχαρης. Βρίσκεται στις ίνες πολλών φρούτων και λαχανικών, και μπορεί να εξαχθεί από διάφορα μούρα, βρώμη, μανιτάρια, καθώς και από ινώδη υλικά, όπως φλούδες καλαμποκιού, ζαχαροκάλαμου και σημύδας. Η ξυλιτόλη είναι μια οργανική ένωση με τον χημικό τύπο $(\text{CHOH})_3(\text{CH}_2\text{OH})_2$ και είναι το μη χειρόμορφο από τα τέσσερα ισομερή της 1,2,3,4,5-πεντανο-πεντόλης. Είναι περίπου τόσο γλυκιά όσο η σουκρόζη, αλλά με μόνο τα δύο τρίτα της θερμιδικής αξίας. Όπως και με άλλα σάκχαρα, η υπερβολική κατανάλωση μπορεί να οδηγήσει σε προσωρινές γαστρεντερικές ανεπιθύμητες ενέργειες, όπως φούσκωμα, μετεωρισμός και διάρροια. Η ξυλιτόλη έχει ένα χαμηλότερο όριο ημερήσιας πρόσληψης από ορισμένες αλκοόλες της ζάχαρης, αλλά είναι πιο εύκολα ανεκτή από άλλες, όπως τη μαννιτόλη και τη σορβιτόλη.



ΣΧΗΜΑ 3-1 Μοριακός Τύπος Ξυλιτόλης

Στη βιομηχανία παράγεται από ανανεώσιμες πρώτες ύλες, όπως καλαμπόκι, αλλά και από λιγότερο περιβαλλοντικά βιώσιμες πηγές, όπως σκληρό ξύλο. Η ξυλιτόλη εμφανίζεται φυσικά και στο σώμα μας - στην πραγματικότητα, ένας μέσος ενήλικας άνθρωπος κατασκευάζει μέχρι και 15 γραμμάρια ξυλιτόλης καθημερινά κατά τη διάρκεια του κανονικού μεταβολισμού (8). Η καθαρή ξυλιτόλη είναι μια λευκή κρυσταλλική ουσία που μοιάζει και έχει γεύση όπως η ζάχαρη.



ΕΙΚΟΝΑ 3-3 Λευκή Κρυσταλλική Ξυλιτόλη

Η ξυλιτόλη ανακαλύφθηκε, σχεδόν ταυτόχρονα, από Γερμανούς και Γάλλους χημικούς στα τέλη του 19ου αιώνα, και για πρώτη φορά έγινε δημοφιλής στην Ευρώπη ως ένα ασφαλές γλυκαντικό για τα άτομα με διαβήτη, διότι δεν επηρεάζει τα επίπεδα ινσουλίνης. Αυτό οφείλεται στον πολύ χαμηλό γλυκαιμικό δείκτη της (13 έναντι 100 της γλυκόζης). Αργότερα, διάφορες μελέτες έδειξαν τα οφέλη που έχει η κατανάλωση ξυλιτόλης και στην υγιεινή των δοντιών. Για το λόγο αυτό, σήμερα η ξυλιτόλη χρησιμοποιείται ευρύτατα ως γλυκαντικό στις οδοντόστιγλες ή σε άλλα προϊόντα στοματικής υγιεινής, όπως οδοντόπαστες και στοματικά διαλύματα (9). Η παγκόσμια ζήτηση της ξυλιτόλης εκτιμάται σε πάνω από 100.000 τόνους, με τάση αύξησης λόγω των νέων προϊόντων που εισέρχονται στην αγορά και περιέχουν ξυλιτόλη.

Η ξυλιτόλη είναι ένας φυσικός υδρογονάνθρακας (πολυόλη) με δομή αλυσίδας πέντε ατόμων άνθρακα, το οποίο είναι ένα ξεχωριστό γνώρισμα σε σχέση με τα κοινά σάκχαρα που έχουν έξι άτομα άνθρακα. Η μοριακή αυτή διαφορά της ξυλιτόλης είναι υπεύθυνη για τα ευεργετικά χαρακτηριστικά της. Ενώ ο άνθρωπος και μερικοί άλλοι ανώτεροι οργανισμοί έχουν το κατάλληλο μεταβολικό μονοπάτι προκειμένου να χρησιμοποιήσουν τη ξυλιτόλη ως μια εναλλακτική πηγή ενέργειας, πολλοί μικροοργανισμοί (συμπεριλαμβανομένου και πολλών κοινών παθογόνων βακτηρίων) δεν μπορούν να μεταβολίσουν την ουσία αυτή. Επίσης, η ξυλιτόλη εμποδίζει την ικανότητα των βακτηρίων να προσκολλούνται σε ιστούς του σώματος, όπως στο στόμα

και στις ρινικές οδούς. Η έρευνα σχετικά με τις χρήσεις της ξυλιτόλης εστιάστηκε στην υγιεινή των δοντιών, αλλά επεκτάθηκε και στο τομέα του διαβήτη, της θεραπείας τραυμάτων, της υγιεινής του αναπνευστικού συστήματος και στην απορρόφηση του ασβεστίου σε παθολογικές περιπτώσεις. Από την έρευνα αυτή έχουν προκύψει σημαντικά συμπεράσματα και πρακτικές εφαρμογές για τη ξυλιτόλη.

3.5 Βιο-Αιθανόλη

Το πρώτο καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε ως υποκατάστατο της βενζίνης σε κινούμενα οχήματα είναι η βιοαιθανόλη. Η βιοαιθανόλη παράγεται κυρίως από την αλκοολική ζύμωση της ζάχαρης. Μπορεί επίσης να συντεθεί βιομηχανικά από την χημική αντίδραση του αιθυλενίου με ατμό.

Οι κύριες πηγές ζάχαρης που απαιτούνται για την παραγωγή αιθανόλης προέρχονται από ενεργειακές καλλιέργειες, δηλ από καλλιέργειες που αναπτύσσονται ειδικά για ενεργειακούς σκοπούς. Οι καλλιέργειες αυτές μπορεί να είναι το σόργο, τα τεύτλα, το καλαμπόκι, το σιτάρι, τα άχυρα, το ξύλο ιτιάς και άλλων δέντρων, το πριονίδι, ο μίσχανθος, η αγριαγκινάρα και άλλες. Παράλληλα, βρίσκονται σε εξέλιξη έρευνες σχετικά με την αξιοποίηση των δημοτικών στερεών αποβλήτων για την παραγωγή βιοαιθανόλης.

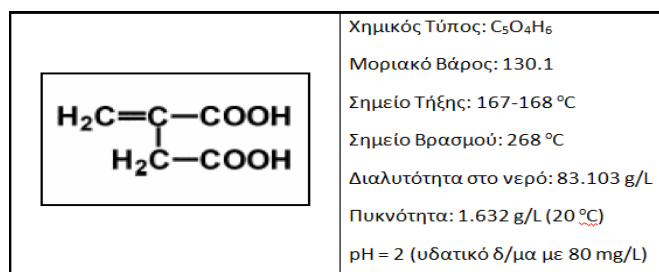
Η αιθανόλη ή αιθυλική αλκοόλη (C_2H_5OH) είναι ένα άχρωμο διαυγές υγρό. Είναι βιοαποικοδομήσιμη, χαμηλής τοξικότητας και προκαλεί πολύ μικρή περιβαλλοντική μόλυνση αν χυθεί στο περιβάλλον. Κατά την τέλεια καύση της παράγεται διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Η αιθανόλη είναι ένα καύσιμο υψηλού αριθμού οκτανίων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο αύξησης του αριθμού οκτανίου της βενζίνης. Με τη ανάμιξή της με τη βενζίνη επιτυγχάνουμε επίσης τον εμπλουτισμού του καυσίμου μίγματος σε οξυγόνο, με αποτέλεσμα μια πιο ολοκληρωμένη καύση, άρα και μειωμένες εκπομπές επικίνδυνων καυσαερίων.

Μίγματα καυσίμου αιθανόλης με βενζίνη πωλούνται ευρύτατα στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το πιο συνηθισμένο μίγμα είναι αυτό που αποτελείται από 10% αιθανόλη και 90% βενζίνη (E10) . Οι κινητήρες των συμβατικών οχημάτων δεν απαιτούν μετατροπή για να κινηθούν με E10 , επιπλέον η χρήση E10 δεν έχει καμία επίπτωση στην εγγύηση του οχήματος. Μόνο ευέλικτα οχήματα μπορούν να κινηθούν με καύσιμο μίγμα 85% αιθανόλης και 15% βενζίνης (E85) (10).

Για την περίπτωση του βιοδιυλιστηρίου, η βιοαιθανόλη μπορεί να παραχθεί αξιοποιώντας είτε το ρεύμα των C5, είτε το ρεύμα των C6 σακχάρων. Η διεργασία παραγωγής τους είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα, λόγω της απόσταξης που απαιτείται για να ληφθεί η αιθανόλη με κατάλληλες προδιαγραφές σύστασης και του αζεότροπου μίγματος αιθανόλης – νερού που σχηματίζεται.

3.6 Ιτακονικό Οξύ

Το ιτακονικό οξύ είναι ένα ακόρεστο δικαρβοξυλικό οξύ και σε κανονικές συνθήκες βρίσκεται σε μορφή άσπρης, κρυσταλλικής σκόνης. Είναι διαλυτό στο νερό, την αιθανόλη και την ακετόνη. Παράγεται ενζυματικά μέσα από τη διεργασία του κύκλου του Krebs, ενώ από το 1960 παράγεται βιομηχανικά από ενζυμική μετατροπή υδατανθράκων, όπως η γλυκόζη, χρησιμοποιώντας το μύκητα *Aspergillus Terreus*. Για το λόγο αυτό θεωρείται ένα ανανεώσιμο υλικό της βιομηχανίας πολυμερών και χρησιμοποιείται κυρίως ως δομικό στοιχείο (συμπολυμερές) για τη παραγωγή διαφόρων προϊόντων. Στη παρακάτω εικόνα φαίνονται οι φυσικοχημικές ιδιότητες του ιτακονικού οξέος ενώ στον πίνακα αναφέρονται οι πιθανοί τρόποι παραγωγής του και οι χρήσεις του.

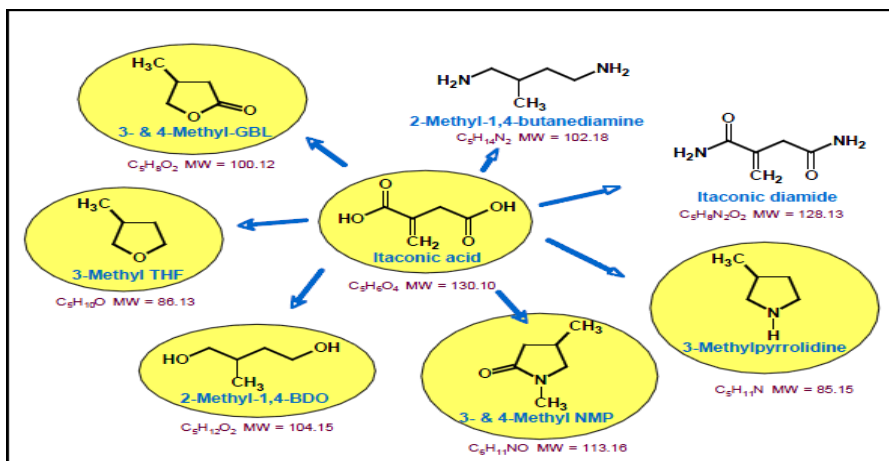


ΕΙΚΟΝΑ 3-4 Συντακτικός Τύπος και Φυσικοχημικές ιδιότητες του Ιτακονικού Οξέος

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1 Τρόποι Παραγωγής Ιτακονικού Οξέος

Τρόπος Παραγωγής	Τεχνικές δυσκολίες και λύσεις	Άμεσες Χρήσεις
Χημική Σύνθεση πολλών σταδίων – συνήθως όχι βιώσιμη επιλογή	-Κοστοβόρα σύνθεση λόγω των πολλών χημικών αντιδράσεων -Μείωση των ενδιάμεσων σταδίων	Συμπολυμερές με στυρένιο και βουταδιένιο
Αερόβια Ενζυμική μετατροπή υδατανθράκων	-Εξειδίκευση ενζύμων -Ανάπτυξη βιοκαταλυτών προκειμένου να μειωθούν άλλα όξινα παραπροϊόντα και να αυξηθεί η απόδοση της αντίδρασης -Χαμηλότερο κόστος με ολοκλήρωση της διεργασίας	Συμπολυμερές με στυρένιο και βουταδιένιο Αυξάνει την δεκτικότητα των υφασμάτων στη βαφή.

Η χημεία του ιτακονικού οξέος και τα παράγωγά του φαίνονται στην ΕΙΚΟΝΑ 3-5.



ΕΙΚΟΝΑ 3-5 Παράγωγα Ιτακονικού Οξέος

Το ιτακονικό οξύ παράγεται επί του παρόντος μέσω ζύμωσης και χρησιμοποιείται κυρίως ως ένα μονομερές ειδικού σκοπού. Οι κύριες εφαρμογές του περιλαμβάνουν τη χρήση του ως συμπολυμερές με ακρυλικό οξύ και σε πολυμερή με στυρένιο-βουταδιένιο. Τα κύρια τεχνικά εμπόδια για την ανάπτυξη της χρήσης του ιτακονικού οξέος ως δομικό στοιχείο για βασικά χημικά προϊόντα, περιλαμβάνουν την ανάπτυξη ενζυματικής μετατροπής με χαμηλό κόστος. Το κύριο σημείο που χρήζει βελτίωσης είναι η αύξηση του ρυθμού ζύμωσης και η αύξηση της απόδοσης από τη γλυκόζη.

Οι κύριες χρήσεις του είναι:

- Ως μονομερές για την προετοιμασία ακρυλικών ινών και καουτσούκ, ενισχυμένων ινών γυαλιού, τεχνητών διαμαντιών και φακών.
- Ως προσθετικό σε ίνες και ρητίνες ιοντο-εναλλαγής για την αύξηση της τριβής, της στεγανότητας, της φυσικής αντοχής και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.
- Στο τομέα της επεξεργασίας νερού, για την πρόληψη της μόλυνσης από μεταλλικά αλκάλια.
- Ως συνδετικό υλικό και σταθεροποιητικός παράγοντας σε μη υφάνσιμες ίνες, χαρτί και χρώματα τσιμέντου.
- Τελικές εφαρμογές του ιτακονικού οξέος είναι κάποια προϊόντα συμπολυμερισμού, πλαστικοποιητές, λιπαντικά έλαια, κόλλες, βαφές, γαλακτωματοποιητές, τασιενεργά συστατικά, φαρμακευτικά και χημικά προϊόντα εκτύπωσης.

Η παγκόσμια ζήτηση του ιτακονικού οξέος ανέρχεται σε 200,000 τόνους με ετήσιο ρυθμό αύξησης πάνω από 10%, ενώ η παγκόσμια δυναμικότητα παραγωγής ιτακονικού οξέος είναι μόνο 100,000 τόνοι περίπου, κυρίως στην Αμερική και την Ιαπωνία (<http://english.jl.gov.cn>). Σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη της GIA (Global Industry Analysts, Inc), η παγκόσμια αγορά ιτακονικού οξέος θα φτάσει τα 398.3 εκατομμύρια US \$ μέχρι το έτος 2017, παρουσιάζοντας μεγάλη αύξηση λόγω της ανησυχίας εξαφάνισης των ορυκτών πόρων και της ανάγκης για παρασκευή φιλικών προς το περιβάλλον, “πράσινων”, χημικών ουσιών. Η παραγωγή του ιτακονικού οξέος έχει επικεντρωθεί στις ανανεώσιμες πρώτες ύλες, ξεφεύγοντας σιγά σιγά από τις αντίστοιχες πετροχημικές. Ιδιαίτερα αυξημένη ζήτηση παρουσιάζεται στις αγορές της Κίνας, της Ινδίας, της Ρωσίας και άλλων Ανατολικών Ευρωπαϊκών χωρών (11).

Επομένως, το σημαντικό έλλειμμα που υπάρχει σε ιτακονικό οξύ, οφείλεται στο ότι στο διεθνή χώρο υπάρχει σημαντική ζήτηση για προϊόντα που προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές (bio-based products) και έχουν ως βάση το δομικό στοιχείο C5 του ιτακονικού οξέος. Εξάλλου, το ιτακονικό οξύ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως προϊόν αλλά και να αποτελέσει την πρώτη ύλη για κάποιο άλλο προϊόν, πχ το πολυμερές του ιτακονικού οξέος. Στο τομέα της παραγωγής, η διεργασία της ενζυμικής μετατροπής γλυκόζης σε ιτακονικό οξύ πρέπει να βελτιστοποιηθεί προκειμένου να μειωθεί το κόστος παραγωγής και να ανταγωνιστεί τα πετροχημικά προϊόντα. Επίσης, πρέπει να διερευνηθεί η γενετική τροποποίηση μικροοργανισμών που θα μεγιστοποιήσουν το ρυθμό παραγωγής του προϊόντος.

3.7 Ρητίνες Φαινόλης – Φορμαλδεΐδης (PF Ρητίνες)

Οι Ρητίνες Φαινόλης – Φορμαλδεΐδης (PF Ρητίνες) προκύπτουν από την πολυσυμπύκνωση της φαινόλης και της φορμαλδεΐδης. Οι PF ρητίνες έχουν πρωταρχική σημασία από τις αρχές του 1900, όταν εμφανίστηκαν ως τα πρώτα συνθετικά πολυμερή. Οι PF Ρητίνες είναι ανθεκτικές στις καιρικές συνθήκες και αυτό έχει ως συνέπεια να χρησιμοποιούνται ευρέως σε προϊόντα ξύλου για εξωτερικές χρήσεις.

Ανάλογα με τις αναλογίες των αντιδραστηρίων και το τύπο του καταλύτη, έχουν αναπτυχθεί δύο τύποι συγκολλητικών PF ρητινών. Οι Ρεζόλες, που παράγονται καταλυτικά με πολυμερισμό χρησιμοποιώντας περίσσεια φορμαλδεΐδης, και οι

Νοβολάκες, που λαμβάνονται από πολυμερισμό με καταλύτη οξύ και χρησιμοποιώντας περίσσεια φαινόλης (12).

Στο βιοδιυλιστήριο, οι PF Ρητίνες μπορούν να παραχθούν από το ενδιάμεσο προϊόν της κλασμάτωσης βιομάζας, τη λιγνίνη. Η χημική δομή της λιγνίνης, που είναι ένα φαινολικό ετεροπολυμερές, επέτρεψε τη χρησιμοποίησή της σε προϊόντα πολυμερισμού, που είναι υψηλής αξίας και ευρείας κατανάλωσης. Πράγματι, η αντικατάσταση της φαινόλης από τη λιγνίνη σε ρητίνες είναι οικονομικά ελκυστική, καθώς η αγορά PF Ρητινών ξεπέρασε τα 2,5 εκατομμύρια τόνους το έτος 2001 (13).

3.8 Πολυουρεθάνη (PU)

Η πολυουρεθάνη βρίσκει εφαρμογή σε μια ευρεία γκάμα προϊόντων, από τη δημιουργία ειδικών καλουπιών, μέχρι τη χρήση της ως μονωτικό υλικό και τη δημιουργία μηχανημάτων και επίπλων. Επίσης, χρησιμοποιείται κατά κόρον στις κατασκευές για την δημιουργία θερμομονωτικών πάνελ πολυουρεθάνης.

Στο βιοδιυλιστήριο, η πολυουρεθάνη μπορεί να παραχθεί με πρώτη ύλη το ενδιάμεσο προϊόν της κλασμάτωσης βιομάζας, τη λιγνίνη, προσθέτοντας κάποια πολυόλη (όπως PEG και PPG). Στο διάλυμα που προκύπτει προστίθεται MDI (Diphenyl Methane - 4,4 - Diisocyanate) και κάποιος πλαστικοποιητής (PEG ή PPG), σχηματίζοντας έτσι την ακατέργαστη πολυουρεθάνη, η οποία στη συνέχεια επεξεργάζεται κατάλληλα για να δώσει το τελικό προϊόν (14).

4 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΤΟΥ ΒΙΟΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟΥ

4.1 Γενικά

Η διαδικασία της ενεργειακής ολοκλήρωσης των ανεξάρτητων διεργασιών του βιοδιυλιστηρίου, που εξετάζονται στη παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται με την εφαρμογή της μεθόδου του Κόμβου Ανάσχεσης και περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

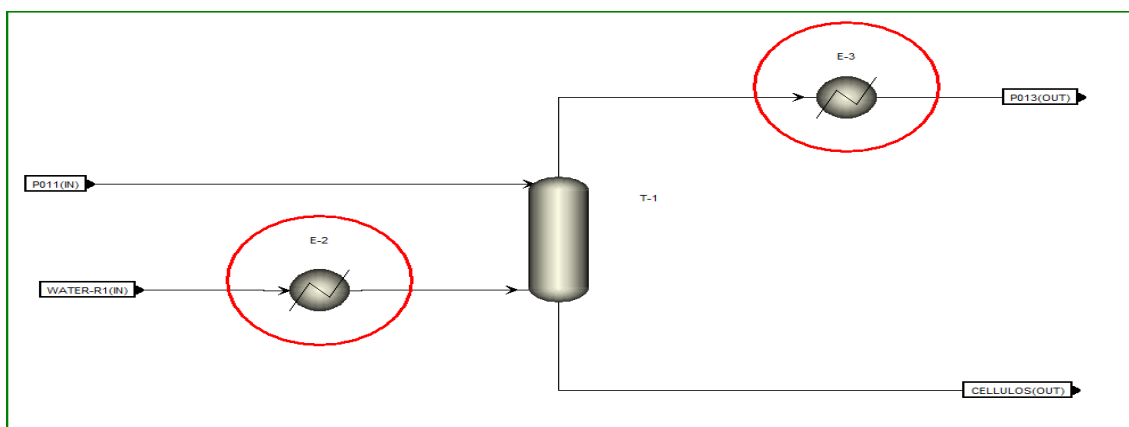
- Εξαγωγή ενεργειακών δεδομένων από τη προσομοίωση των διαγραμμάτων ροής των διεργασιών στο Aspen Plus V7.2
- Δημιουργία ενεργειακού καταρράκτη και υπολογισμός ελάχιστης απαιτούμενης θερμής και ψυχρής παροχής

- Κατασκευή Μεγάλου Σύνθετου Γραφήματος
- Ολοκλήρωση των ενεργοβόρων συστημάτων διαχωρισμού (αποστακτικές στήλες, εξατμιστήρες) με τα ρεύματα της διεργασίας
- Επανασχεδιασμός των συστημάτων διαχωρισμού, εφόσον υπάρχουν περιθώρια για περαιτέρω ενεργειακή εξοικονόμηση
- Επανυπολογισμός ελάχιστης απαιτούμενης θερμής και ψυχρής παροχής

4.2 Διεργασία Κλασμάτωσης Βιομάζας με Οργανικά Οξέα

4.2.1 Απαιτήσεις σε Θερμή και Ψυχρή Παροχή

Η διεργασία αυτή χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα, όπως είδαμε παραπάνω (Κεφ. 3.3), και κάθε ένα από αυτά έχει συγκεκριμένες ενεργειακές απαιτήσεις σε θερμή και ψυχρή παροχή. Οι τιμές που υπολογίστηκαν μέσω της προσομοίωσης της διεργασίας στο Aspen Plus V7.2, αναφέρονται στην απαιτούμενη θερμή και ψυχρή παροχή για την επεξεργασία 18750 kg/h τροφοδοσίας (λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα) και την μετατροπή τους στα τρία ενδιάμεσα προϊόντα (λιγνίνη, C-5 και C-6 σάκχαρα). Η απαιτούμενη θερμή και ψυχρή παροχή χρησιμοποιείται για θέρμανση και ψύξη των ρευμάτων της διεργασίας καθώς και για τη λειτουργία μιας αποστακτικής στήλης (τμήμα απόσταξης) και δύο εξατμιστήρων (στο τμήμα συμπύκνωσης του liquor και στο τμήμα συμπύκνωσης των C-5 σακχάρων). Για παράδειγμα, στο τμήμα του διαγράμματος ροής της διεργασίας που απεικονίζεται στο ΣΧΗΜΑ 4-1, υπάρχει ανάγκη θέρμανσης – ψύξης στους εναλλάκτες θερμότητας E-2 και E-3, ενώ στη στήλη T-1 δεν υπάρχει κάποιο ενεργειακό φορτίο καθώς πρόκειται για στήλη απογύμνωσης με ατμό.



ΣΧΗΜΑ 4-1 Τμήμα Διαγράμματος Ροής Διεργασίας Κλασμάτωσης Βιομάζας με Οργανικά Οξέα

Στο παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι ενεργειακές απαιτήσεις των ρευμάτων της διεργασίας Κλασμάτωσης Βιομάζας, όπως αυτές προέκυψαν από τη προσομοίωση της στο Aspen Plus V7.2. Στις δεξιά στήλες του πίνακα αναφέρονται οι μετατοπισμένες θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο του Κόμβου Ανάσχεσης. Οι θερμοκρασίες των ψυχρών ρευμάτων μετατοπίζονται κατά $+\Delta T_{\min}/2$, ενώ οι θερμοκρασίες των θερμών ρευμάτων μετατοπίζονται κατά $-\Delta T_{\min}/2$.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1 Πίνακας Ενεργειακών Δεδομένων των Ρευμάτων της Διεργασίας Κλασμάτωσης Βιομάζας με Οργανικά Οξέα

$\Delta T_{\min} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$						
Όνομασία Ρεύματος	$T_{\text{αρχ}}$	$T_{\text{τελ}}$	Θερμικό Φορτίο	Είδος Ρεύματος	$T_{\text{αρχ,μετατ.}}$	$T_{\text{τελ,μετατ.}}$
	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	kW		$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
FRAC-P001	10	105	2547.5	ΨΥΧΡΟ	20	115
FRAC-P003BIS	103.8	105	2060.9	ΨΥΧΡΟ	113.8	115
FRAC-P010BIS	104.7	105	3523.8	ΨΥΧΡΟ	114.7	115
FRAC-R1	105.1	105	-2063.7	ΘΕΡΜΟ	95.1	95
FRAC-R2	85	85.1	872.6	ΨΥΧΡΟ	95	95.1
FRAC-11BNT	20	100	9694.9	ΨΥΧΡΟ	30	110
FRAC-P013N	184.7	100	-7420.9	ΘΕΡΜΟ	174.7	90
FRAC-P003TER1	105	85	-639.5	ΘΕΡΜΟ	95	75
FRAC-P014NT	73.6	59	-362	ΘΕΡΜΟ	63.6	49
FRAC-P017	20	50	458.6	ΨΥΧΡΟ	30	60
FRAC-P016	86.1	50	-173.2	ΘΕΡΜΟ	76.1	40
FRAC-P021BISN	15	50	262.9	ΨΥΧΡΟ	25	60
FRAC-P021NT	15	50	262.9	ΨΥΧΡΟ	25	60
FRAC-P019-P020	50	101.6	1298.5	ΨΥΧΡΟ	60	111.6
FRAC-P027TNT	15	100	5445.8	ΨΥΧΡΟ	25	110
FRAC-P028BNT	86.8	66	-5032.5	ΘΕΡΜΟ	76.8	56
FRAC-P028NT	81.7	55	-554.1	ΘΕΡΜΟ	71.7	45
FRAC-P015BIS	59	172	667.7	ΨΥΧΡΟ	69	182
FRAC-P069	58.3	156	3187.4	ΨΥΧΡΟ	68.3	166
FRAC-P013	100	162	907.7	ΨΥΧΡΟ	110	172
FRAC-P062NT	14.7	80	1824.2	ΨΥΧΡΟ	24.7	90
FRAC-TT-1	104.8	104.7	-1474.8	ΘΕΡΜΟ	94.8	94.7

Από τα παραπάνω δεδομένα του πίνακα μπορούμε να υπολογίσουμε τις συνολικές αρχικές ανάγκες θερμής και ψυχρής παροχής, για το σύνολο των ρευμάτων της διεργασίας. Οι συνολικές αρχικές ανάγκες για τα ρεύματα της διεργασίας είναι:

Θερμή Παροχή = 33015 kW

Ψυχρή Παροχή = 17721 kW

Επίσης, το μοντέλο προσομοίωσης της παραγωγικής διαδικασίας περιλαμβάνει μία αποστακτική στήλη και δύο εξατμιστήρες μίας βαθμίδας, τα οποία λειτουργούν στις παρακάτω συνθήκες:

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-2 Πίνακας Συνθηκών Λειτουργίας Εξοπλισμού Διαχωρισμού της Διεργασίας Κλασμάτωσης Βιομάζας με Οργανικά Οξέα

Όνομασία Εξοπλισμού	T _{αναβρ.}	T _{συμπ.}	Θερμικό Φορτίο	Πίεση Λειτουργίας	Ροή Αποστάγματος
	°C	°C	kW	bar	kg/h
ΑΠΟΣΤΑΚΤΙΚΗ ΣΤΗΛΗ T-3	191,2	170,7	94387	8	32903
ΕΞΑΤΜΙΣΤΗΡΑΣ 1 (Liquor Conc.)	84,3	73,6	13893	0,52	66328
ΕΞΑΤΜΙΣΤΗΡΑΣ 2 (C-5 Conc.)	88,1	81,7	10835	0,48	21076

4.2.2 Ενεργειακή Ολοκλήρωση

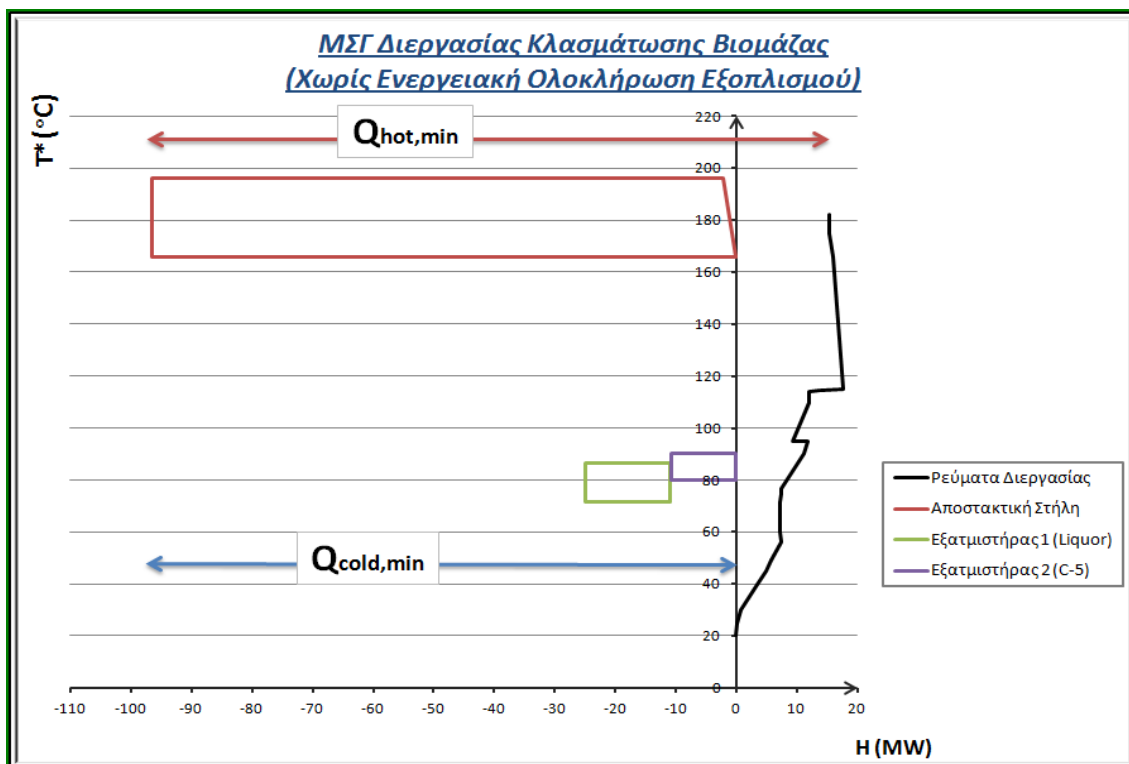
Εφαρμόζοντας τη μέθοδο του Κόμβου Ανάσχεσης, κατασκευάζουμε το Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα της διεργασίας, στο οποίο η αποστακτική στήλη και οι εξατμιστήρες αναπαρίστανται ως ορθογώνια παραλληλόγραμμα (“κουτιά”). Όπως φαίνεται στο ΜΣΓ που ακολουθεί, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα απ’την εφαρμογή της μεθόδου (χωρίς ενεργειακή ολοκλήρωση του εξοπλισμού με τα ρεύματα της διεργασίας) :

$$T_{\text{pinch}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{\text{hot,min}} = 109681 \text{ kW (για την αποστακτική στήλη και τα ρεύματα διεργασίας)}$$

$$Q_{\text{cold,min}} = 0 \text{ kW (για τα ρεύματα της διεργασίας – “πρόβλημα Ουδού”)}$$

$$Q_{\text{cold,min-tot.}} = 96547 \text{ kW (για την αποστακτική στήλη)}$$



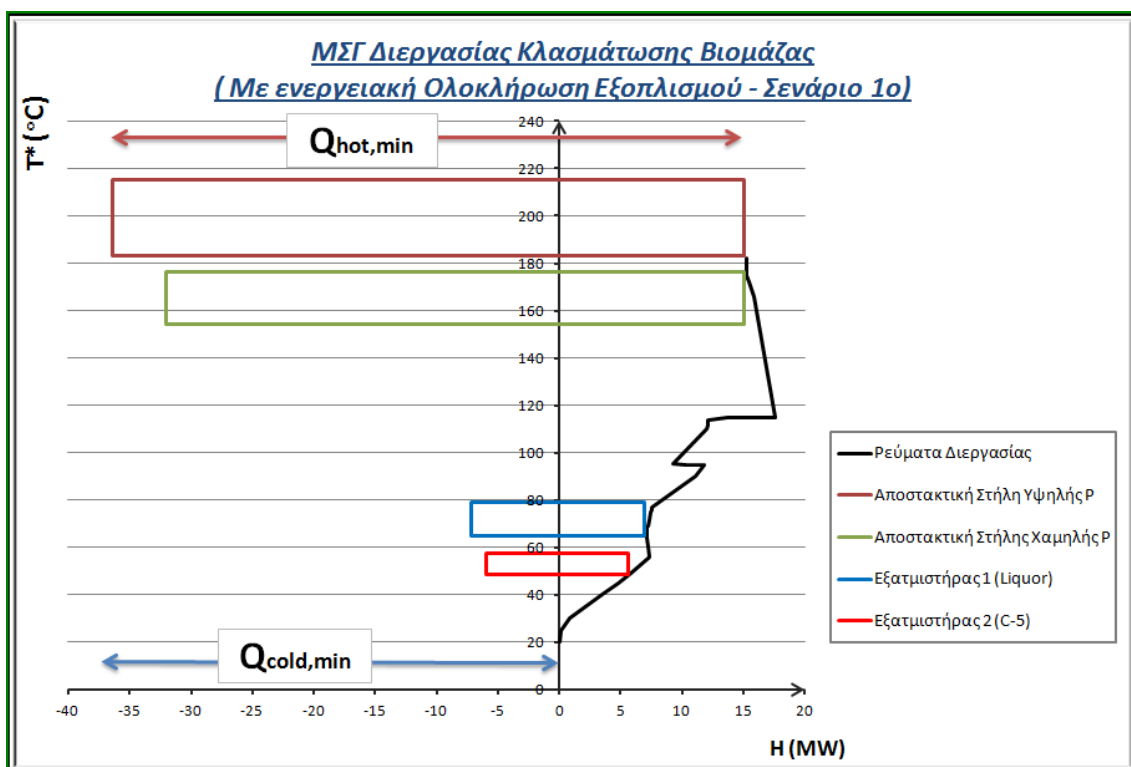
ΓΡΑΦΗΜΑ 4-1 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Διεργασίας Κλασμάτωσης Βιομάζας, χωρίς ενεργειακή ολοκλήρωση της αποστακτικής στήλης και των εξατμιστήρων

Απ' το ΜΣΓ της διεργασίας παρατηρούμε ότι η αποστακτική στήλη και οι εξατμιστήρες λειτουργούν πάνω από το κόμβο ανάσχεσης άρα μπορούν να ολοκληρωθούν με τα ρεύματα της διεργασίας. Το φορτίο της αποστακτικής στήλης όμως, είναι πολύ μεγάλο και για το λόγο αυτό η ενεργειακή εξοικονόμηση που θα προκύψει ολοκληρώνοντάς την με τα ρεύματα θα είναι περίπου 16% (15 MW). Το σχήμα όμως του ΜΣΓ μας οδηγεί στο να σκεφτούμε κάποια καλύτερη διάταξη αποστακτικών στηλών οι οποίες θα είναι ενεργειακά ολοκληρωμένες μεταξύ τους και θα παρουσιάζουν καλύτερα περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας. Παρακάτω, παρουσιάζονται δύο πιθανά σενάρια σύνθεσης της διεργασίας, το ένα με δύο παράλληλες αποστακτικές στήλες και το άλλο με τρεις παράλληλες στήλες. Οι στήλες αυτές λέγονται βαθμίδες απόσταξης (effects) και λειτουργούν σε διαφορετικές πιέσεις, δέχονται τροφοδοσία ίδιας σύστασης αλλά διαφορετικής ποσότητας και εκτελούν μαζί τον ίδιο διαχωρισμό που κάνει και η μία αποστακτική στήλη. Το πλεονέκτημα όμως είναι ότι, με τον τρόπο αυτό, οι ατμοί που εξέρχονται από τη στήλη υψηλής πίεσης συμπυκνώνονται προσφέροντας τη θερμότητα στον αναβραστήρα της στήλης χαμηλότερης πίεσης, εξοικονομώντας έτσι σημαντικά ποσά θερμής και ψυχρής

παροχής. Για τις στήλες αυτές μπορούμε να θεωρήσουμε διαφορετικό ΔT_{\min} από τα ρεύματα της διεργασίας, σε τιμές που κυμαίνονται 5-10 °C, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (15).

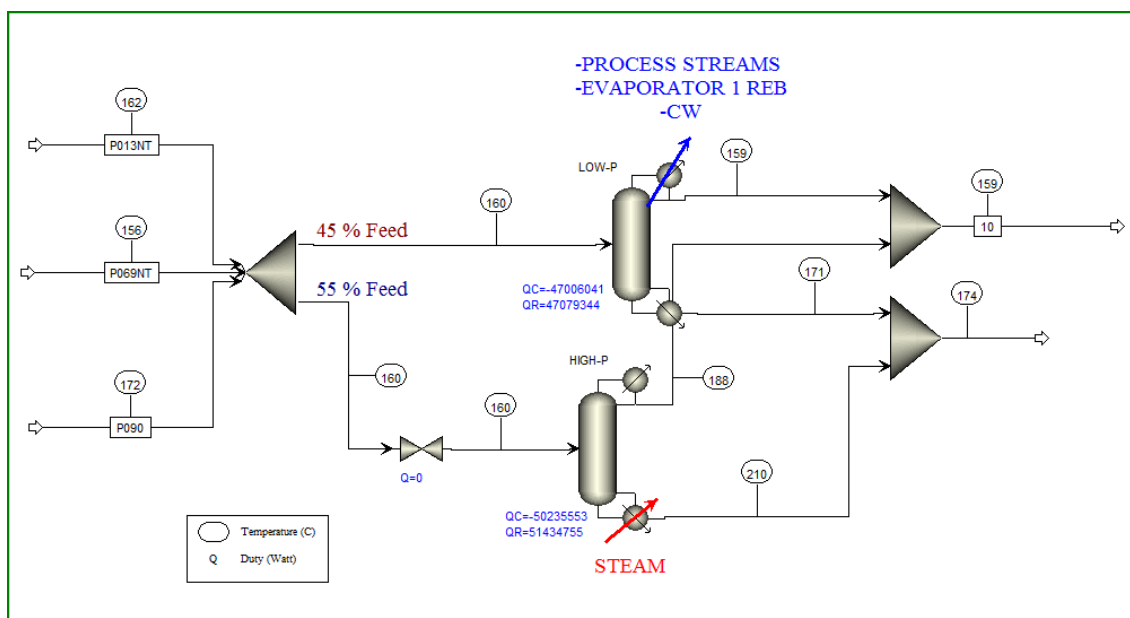
Οι εξατμιστήρες μπορούν να ολοκληρωθούν είτε με τα ρεύματα της διεργασίας είτε με την αποστακτική στήλη και να έχουμε σημαντική εξοικονόμηση θερμής και ψυχρής παροχής. Όμως για τεχνικούς λόγους, λόγω του μεγάλου φορτίου τους, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιήσουμε πολύ-βάθμιους εξατμιστήρες. Οι εξατμιστήρες αυτοί, όπως φαίνεται στα ΜΣΓ των σεναρίων 1 και 2, λειτουργούν αποκλειστικά με θερμή παροχή από το συμπυκνωτήρα της τελευταίας βαθμίδας της συστοιχίας των αποστακτικών στηλών, άρα ουσιαστικά με 100% εξοικονόμηση θερμής παροχής.

Στο Σενάριο 1 χρησιμοποιείται ένα σύστημα δύο παράλληλων αποστακτικών στηλών και ρυθμίζεται η πίεση λειτουργίας των εξατμιστήρων ώστε να μπορούν να ολοκληρωθούν ενεργειακά μεταξύ τους, ενώ στο Σενάριο 2 χρησιμοποιείται ένα σύστημα τριών παράλληλων αποστακτικών στηλών, ένας τριβάθμιος και ένας διβάθμιος εξατμιστήρας. Τα ΜΣΓ των δύο σεναρίων χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον υπολογισμό της ενεργειακής εξοικονόμησης που επιτυγχάνεται.



ΓΡΑΦΗΜΑ 4-2 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Διεργασίας Κλασμάτωσης Βιομάζας (Σενάριο 1)

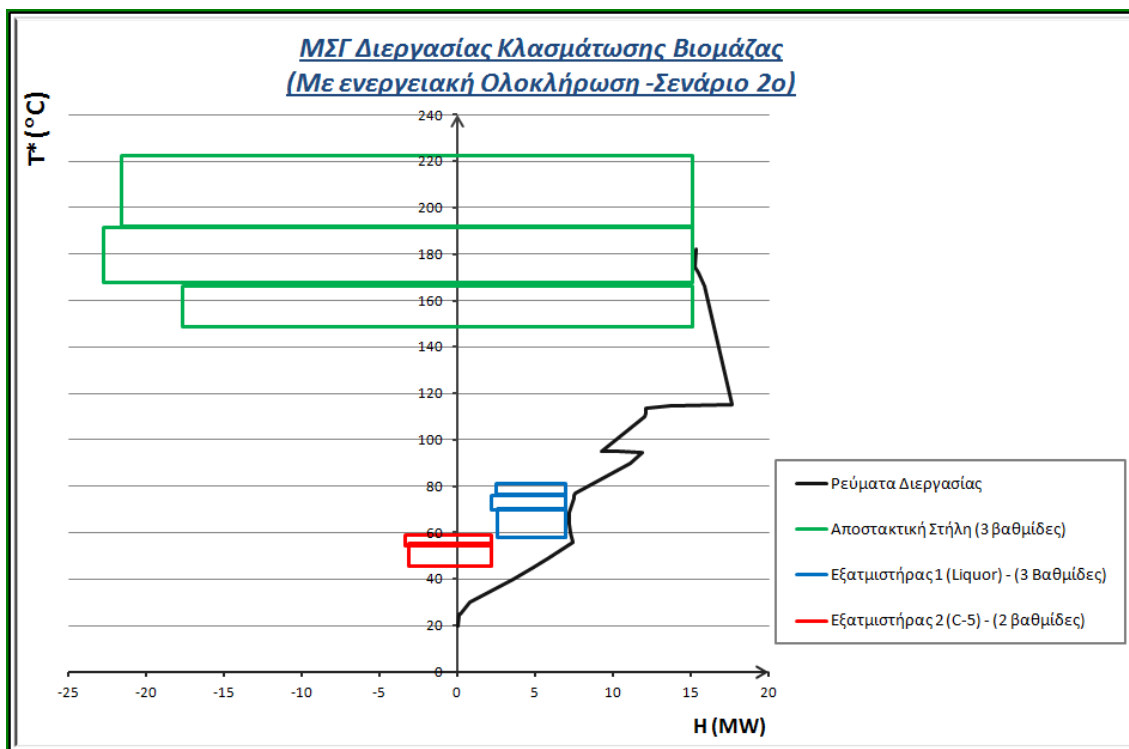
Η προτεινόμενη διάταξη με τις δύο παράλληλες αποστακτικές στήλες φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



ΣΧΗΜΑ 4-2 Τμήμα απόσταξης Κλασμάτωσης Βιομάζας με 2 παράλληλες αποστακτικές στήλες

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-3 Πίνακας Συνθηκών Λειτουργίας του Εξοπλισμού Διαχωρισμού για το Σενάριο 1 στη Διεργασία Κλασμάτωσης Βιομάζας

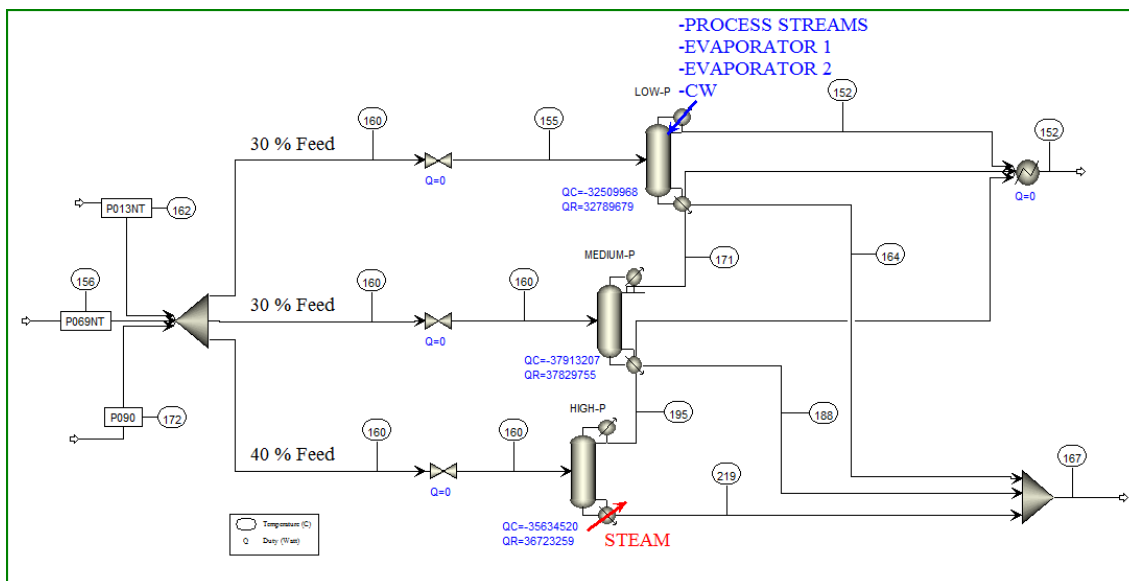
Σενάριο 1: Δύο (2) Παράλληλες Αποστακτικές Στήλες					
Εξατμιστήρας 1 (Liquor) μίας βαθμίδας					
Εξατμιστήρας 2 (C-5) μίας βαθμίδας					
Όνομασία Εξοπλισμού	$T_{\text{αναβρ.}}$	$T_{\text{συμπ.}}$	Θερμικό Φορτίο	Πίεση Λειτουργίας	Ροή Αποστάγματος
	°C	°C	kW	bar	kg/h
Αποστακτική Στήλη Υψηλής P	210	188	51435	12	18600
Αποστακτική Στήλη Χαμηλής P	171,2	159	47079	7	14050
Εξατμιστήρας 1 (Liquor)	77	67	14077	0,24	66328
Εξατμιστήρας 2 (C-5)	55,3	50,7	11587	0,12	21076



ΓΡΑΦΗΜΑ 4-3 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Διεργασίας Κλασμάτωσης Βιομάζας (Σενάριο 2^ο)

Είναι προφανές ότι οι δύο εξατμιστήρες μπορούν να λειτουργήσουν και σε μεγαλύτερες πιέσεις, εφόσον η διεργασία αυτή ολοκληρώνεται μόνη της και δεν υπάρχει προοπτική για περαιτέρω ανάκτηση ενέργειας από άλλες διεργασίες. Ο μόνος περιορισμός είναι να μην υπερβαίνουν τη μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία. Η ενεργειακή εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται είναι η ίδια, αλλά απαιτείται τεχνικοοικονομική μελέτη για να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας (πίεση, ΔT_{\min} , ψύξη με ρεύματα διεργασίας ή νερό ψύξης).

Η προτεινόμενη διάταξη με τις τρεις παράλληλες αποστακτικές στήλες φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



ΣΧΗΜΑ 4-3 Τμήμα απόσταξης Κλασμάτωσης Βιομάζας με 3 παράλληλες αποστακτικές στήλες

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-4 Πίνακας Συνθηκών Λειτουργίας του Εξοπλισμού Διαχωρισμού για το Σενάριο 2 στη Διεργασία Κλασμάτωσης Βιομάζας

Σενάριο 2: Τρεις (3) Παράλληλες Αποστακτικές Στήλες					
Εξατμιστήρας 1 (Liquor) τριών (3) βαθμίδων					
Εξατμιστήρας 2 (C-5) δύο (2) βαθμίδων					
Ονομασία Εξοπλισμού	T_{αναβρ.}	T_{συμπ.}	Θερμικό Φορτίο	Πίεση Λειτουργίας	Ροή Αποστάγματος
	°C	°C	kW	bar	kg/h
Αποστακτική Στήλη Υψηλής P	219,4	195,1	36723	14	13650
Αποστακτική Στήλη Μεσαίας P	188,3	170,5	37830	8	10040
Αποστακτική Στήλη Χαμηλής P	163,1	151,9	32790	5	9580
Εξατμιστήρας 1 (Liquor) – 1^η Βαθμίδα	79,1	78,3	4477	0,4	20800
Εξατμιστήρας 1 (Liquor) – 2^η Βαθμίδα	73,8	71,9	4815	0,3	22700
Εξατμιστήρας 1 (Liquor) – 3^η Βαθμίδα	68,4	60,1	4375	0,16	22800

Εξατμιστήρας 2 (C-5) 1 ^η Βαθμίδα	57,2	56,5	5526	0,16	11879
Εξατμιστήρας 2 (C-5) 2 ^η Βαθμίδα	53,4	47,7	5241	0,1	10074

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ενεργειακής εξοικονόμησης που επιτυγχάνεται μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση της διεργασίας, φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-5 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ενεργειακής Εξοικονόμησης στη Διεργασία Κλασμάτωσης Βιομάζας με Οργανικά Οξέα

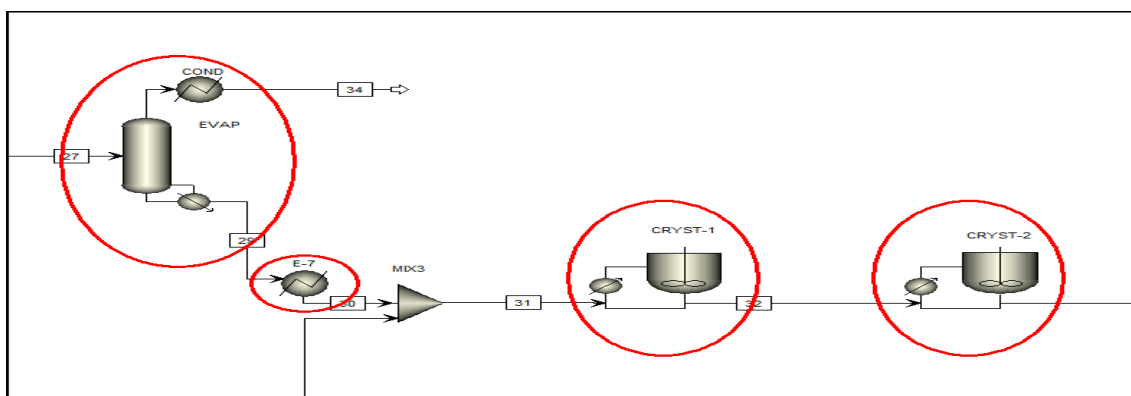
	ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ	
	Θερμή Παροχή (kW)	Ψυχρή Παροχή (kW)
Ρεύματα Διεργασίας	33015	17721
Αποστακτική Στήλη	94387	96547
Εξατμιστήρας 1 (Liquor)	13893	13893
Εξατμιστήρας 2 (C-5)	10835	10835
Συνολικές Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες	152130	138996
	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΣΕΝΑΡΙΟΥ 1	
	Θερμή Παροχή (kW)	Ψυχρή Παροχή (kW)
Ρεύματα Διεργασίας	43	0
Αποστακτικές Στήλες (2 παράλληλες)	51435	29298
Εξατμιστήρας 1 (Liquor) – 1 βαθμίδα	0	1150
Εξατμιστήρας 2 (C-5) – 1 βαθμίδα	0	5987
Συνολικές Ενεργειακές Ανάγκες Σεναρίου 1	51478	36435
Συνολικές Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες	152130	138996
Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	66.2%	73.8%
	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΣΕΝΑΡΙΟΥ 2	
	Θερμή Παροχή (kW)	Ψυχρή Παροχή (kW)
Ρεύματα Διεργασίας	43	0
Αποστακτικές Στήλες (2 παράλληλες)	37830	19340
Εξατμιστήρας 1 (Liquor) – 1 βαθμίδα	0	0
Εξατμιστήρας 2 (C-5) – 1 βαθμίδα	0	3390
Συνολικές Ενεργειακές Ανάγκες Σεναρίου 2	37873	22730
Συνολικές Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες	152130	138996
Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	75.1%	83.6%

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν φανερώνουν ότι το Σενάριο 2 παρουσιάζει τη βέλτιστη ενεργειακή εξοικονόμηση. Επομένως, από ενεργειακής σκοπιάς, προτείνεται το τμήμα απόσταξης να λειτουργεί με τρεις αποστακτικές στήλες, που λειτουργούν παράλληλα σε διαφορετικές πιέσεις ώστε να ολοκληρώνονται μεταξύ τους. Οι εξατμιστήρες μπορούν να λειτουργούν είτε σε μία βαθμίδα είτε σε δύο έως τρεις, σε κατάλληλες πιέσεις ώστε να ικανοποιείται ο περιορισμός της μέγιστης επιτρεπτής θερμοκρασίας που επιβάλλεται απ' τη φύση των προϊόντων.

4.3 Καταλυτική Μέθοδος Παραγωγής Ξυλιτόλης

4.3.1 Απαιτήσεις σε Θερμή και Ψυχρή Παροχή

Οι ενεργειακές ανάγκες της διεργασίας αυτής περιλαμβάνουν τη θέρμανση και ψύξη των ρευμάτων της διεργασίας, τη διατήρηση των αντιδραστήρων σε σταθερή θερμοκρασία και τη λειτουργία δύο κρυσταλλωτήρων και ενός εξατμιστήρα. Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται ένα τμήμα του διαγράμματος ροής της διεργασίας, στο οποίο οι ενεργειακές ανάγκες εμφανίζονται στον εξατμιστήρα EVAP, στους κρυσταλλωτήρες που σημειώνονται στο σχήμα και στον εναλλάκτη θερμότητας E-7.



ΣΧΗΜΑ 4-4 Τμήμα Διαγράμματος Ροής Διεργασίας Παραγωγής Ξυλιτόλης (καταλύτη)

Στο παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι ενεργειακές απαιτήσεις των ρευμάτων της διεργασίας παραγωγής ξυλιτόλης με καταλύτη, όπως αυτές προέκυψαν από τη προσομοίωση της διεργασίας στο Aspen Plus V7.2. Οι θερμοκρασίες των ψυχρών ρευμάτων μετατοπίζονται κατά $+\Delta T_{\min}/2$, ενώ οι θερμοκρασίες των θερμών ρευμάτων μετατοπίζονται κατά $-\Delta T_{\min}/2$, προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος του Κόμβου Ανάσχεσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-6 Πίνακας Ενεργειακών Δεδομένων των Ρευμάτων της Διεργασίας Παραγωγής Ευλιτόλης με καταλύτη

$\Delta T_{\min} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$						
Όνομασία Ρεύματος	$T_{\text{αρχ}}$	$T_{\text{τελ}}$	Θερμικό Φορτίο	Είδος Ρεύματος	$T_{\text{αρχ,μετατ.}}$	$T_{\text{τελ,μετατ.}}$
	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	kW		$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
XYL CAT - 4	15	87.1	189.9	ΨΥΧΡΟ	25	97.1
XYL CAT - 9	15	100	8.2	ΨΥΧΡΟ	25	110
XYL CAT - 15	15	100	9.7	ΨΥΧΡΟ	25	110
XYL CAT - 8	87.1	100	85.1	ΨΥΧΡΟ	97.1	110
XYL CAT - 20	100	80	-133.2	ΘΕΡΜΟ	90	70
XYL CAT - 29	108.6	-20	-228	ΘΕΡΜΟ	98.6	-30
XYL CAT - 37	8	-20	-115.9	ΘΕΡΜΟ	-2	-30
XYL CAT - 33	-20	8	164.3	ΨΥΧΡΟ	-10	18
XYL CAT - R1	87.1	87.2	515.9	ΨΥΧΡΟ	97.1	97.2
XYL CAT - R2	100.1	100	-1616.1	ΘΕΡΜΟ	90.1	90

Από τα παραπάνω δεδομένα του πίνακα μπορούμε να υπολογίσουμε τις συνολικές αρχικές ανάγκες θερμής και ψυχρής παροχής, για το σύνολο των ρευμάτων της διεργασίας. Οι συνολικές αρχικές ανάγκες (που εξήχθησαν απ'το μοντέλο προσομοίωσης της διεργασίας στο Aspen Plus V7.2) είναι:

Θερμή Παροχή = 973 kW

Ψυχρή Παροχή = 2093 kW

Επίσης, το μοντέλο προσομοίωσης της παραγωγικής διαδικασίας περιλαμβάνει ένα εξατμιστήρα μίας βαθμίδας, ο οποίος λειτουργεί στις παρακάτω συνθήκες:

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-7 Πίνακας Συνθηκών Λειτουργίας Εξατμιστήρα της Διεργασίας Παραγωγής βιο-Ευλιτόλης

Όνομασία Εξοπλισμού	$T_{\text{αναβρ.}}$	$T_{\text{συμπ.}}$	Θερμικό Φορτίο	Πίεση Λειτουργίας	Ροή Αποστάγματος
	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	kW	atm	kg/h
EVAP	108,6	89	2400	0,6	3625

4.3.2 Ενεργειακή Ολοκλήρωση

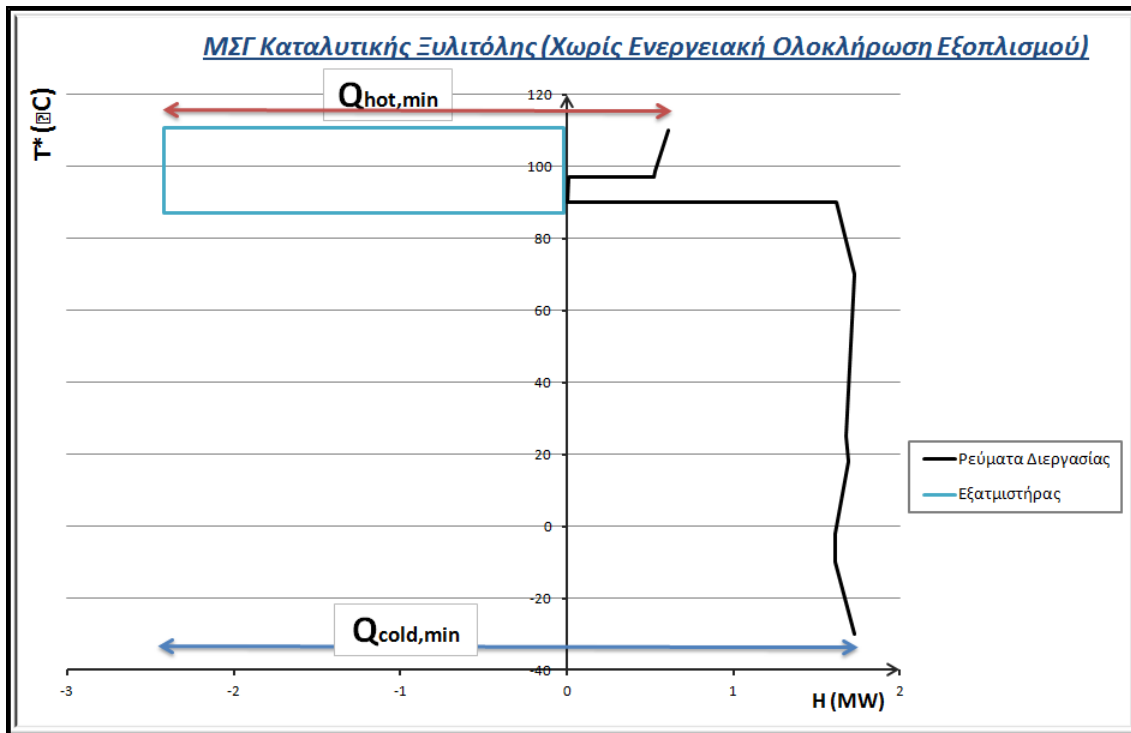
Εφαρμόζοντας τη μέθοδο του Κόμβου Ανάσχεσης, κατασκευάζουμε το Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα της διεργασίας, στο οποίο ο εξατμιστήρας αναπαρίσταται ως ορθογώνιο παραλληλόγραμμο κουτί. Από το ΜΣΓ που ακολουθεί προκύπτουν τα

παρακάτω αποτελέσματα απ'την εφαρμογή της μεθόδου (χωρίς ενεργειακή ολοκλήρωση του εξατμιστήρα με τα ρεύματα της διεργασίας) :

$$T_{\text{pinch}} = 90,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{\text{hot,min}} = 3009 \text{ kW (για τον εξατμιστήρα και τα ρεύματα διεργασίας)}$$

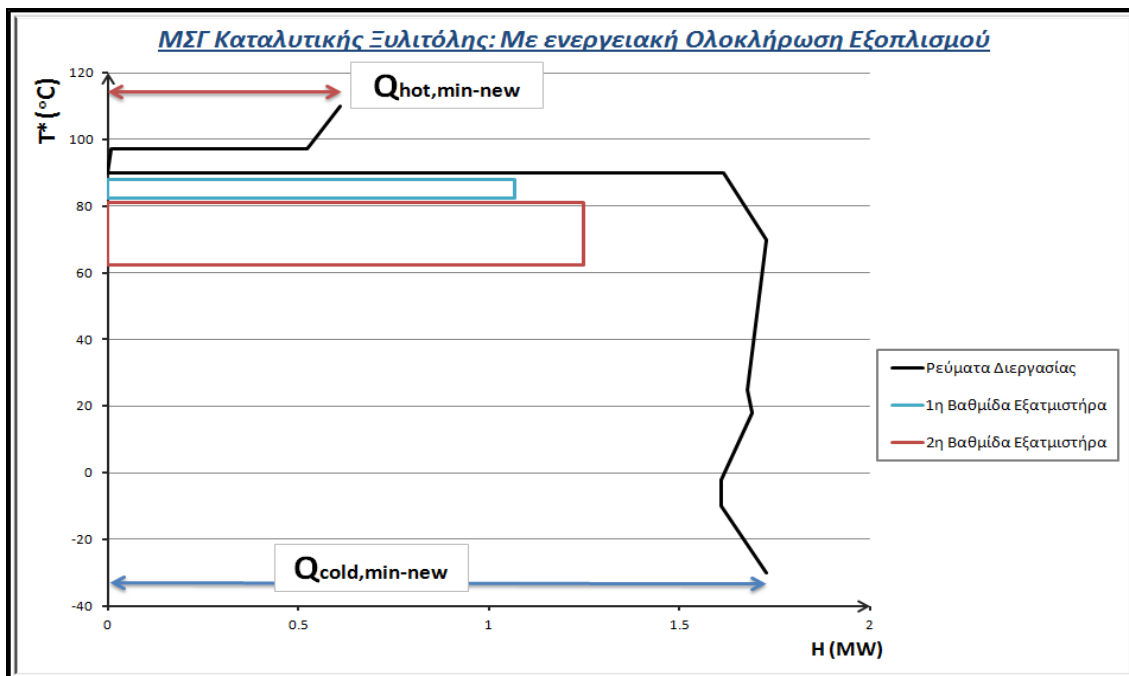
$$Q_{\text{cold,min}} = 4129 \text{ kW (- // -)}$$



ΓΡΑΦΗΜΑ 4-4 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Διεργασίας Παραγωγής Ξυλιτόλης (με καταλύτη), χωρίς ενεργειακή ολοκλήρωση του εξατμιστήρα

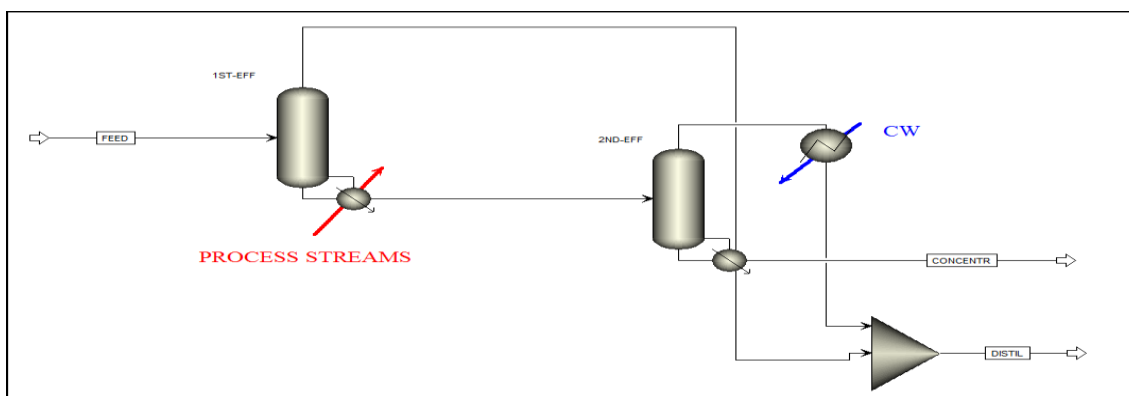
Απ'το ΜΣΓ της διεργασίας παρατηρούμε ότι ο εξατμιστήρα λειτουργεί μέσα από το κόμβο ανάσχεσης, επομένως δεν υπάρχει ενεργειακό όφελος εάν ολοκληρωθεί με τα ρεύματα της διεργασίας. Για το λόγο αυτό πρέπει να αλλάξουμε τις συνθήκες λειτουργίας του ώστε να βρίσκεται πάνω ή κάτω απ'το κόμβο ανάσχεσης της διεργασίας. Όπως παρατηρούμε απ'το ΜΣΓ, τα μεγαλύτερα περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας βρίσκονται κάτω απ'το κόμβο ανάσχεσης και είναι τέτοια ώστε εάν σχεδιάσουμε ένα εξατμιστήρα δύο βαθμίδων ενεργειακά ολοκληρωμένων μεταξύ τους, τότε η εξοικονόμηση θερμής και ψυχρής παροχής για τη λειτουργία του εξατμιστήρα θα είναι 100 %. Πράγματι, όπως φαίνεται στο ΜΣΓ της ολοκληρωμένης διεργασίας που

ακολουθεί, ο 2-βάθμιος εξατμιστήρας λειτουργεί αποκλειστικά με θερμή παροχή από τα ρεύματα της διεργασίας.



ΓΡΑΦΗΜΑ 4-5 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Διεργασίας Παραγωγής Ξυλιτόλης (με καταλύτη), με ενεργειακή ολοκλήρωση του εξατμιστήρα

Η χρήση του 2-βάθμιου εξατμιστήρα διευκολύνει την ενεργειακή ολοκλήρωση και επιτυγχάνεται 100% εξοικονόμηση στη λειτουργία του εξατμιστήρα, καθώς οι βαθμίδες λειτουργούν σε διαφορετικές πιέσεις και έτσι οι ατμοί που εξέρχονται απ' την πρώτη βαθμίδα συμπυκνώνονται δίνοντας το θερμικό φορτίο στον αναβραστήρα της επόμενης βαθμίδας (μικρότερης πίεσης). Η προτεινόμενη διάταξη με τον εξατμιστήρα των δύο βαθμίδων φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



ΣΧΗΜΑ 4-5 Λειτουργία του εξατμιστήρα με 2 βαθμίδες σε σειρά

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-8 Πίνακας Συνθηκών Λειτουργίας 2-βάθμιου Εξατμιστήρα της Διεργασίας Παραγωγής Ξυλιτόλης με καταλύτη

Όνομασία Εξοπλισμού	T _{αναβρ.}	T _{συμπ.}	Θερμικό Φορτίο	Πίεση Λειτουργίας	Ροή Αποστάγματος
	°C	°C	kW	atm	kg/h
1 ^η Βαθμίδα	86,0	84,3	1067	0,5	1615
2 ^η Βαθμίδα	79,0	64,4	1249	0,2	2010

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ενεργειακής εξοικονόμησης που επιτυγχάνεται μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση της διεργασίας, φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-9 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ενεργειακής Εξοικονόμησης στη Διεργασία Παραγωγής Ξυλιτόλης με καταλύτη

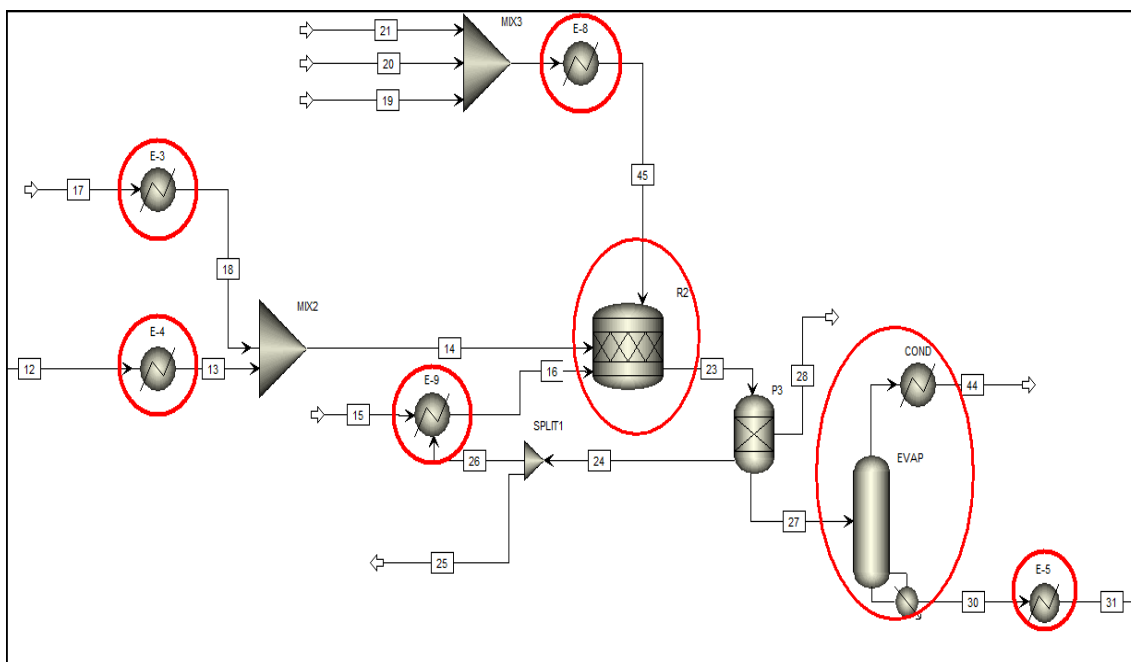
	ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ	
	Θερμή Παροχή (kW)	Ψυχρή Παροχή (kW)
Ρεύματα Διεργασίας	973	2093
Εξατμιστήρας	2400	2400
Συνολικές Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες	3373	4493
	ΤΕΛΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ	
	Θερμή Παροχή (kW)	Ψυχρή Παροχή (kW)
Ρεύματα Διεργασίας	609	480
Εξατμιστήρας (3βάθμιος)	0	1249
Συνολικές Τελικές Ενεργειακές Ανάγκες	609	1729
Συνολικές Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες	3373	4493
Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	81,9 %	61,5 %

4.4 Βιοτεχνολογική Μέθοδος Παραγωγής Ξυλιτόλης

4.4.1 Απαιτήσεις σε Θερμή και Ψυχρή Παροχή

Οι ενεργειακές ανάγκες της διεργασίας αυτής είναι παρόμοιες με τις ανάγκες της καταλυτικής διεργασίας παραγωγής βιο-ξύλιτόλης και περιλαμβάνουν αντίστοιχα τη θέρμανση και ψύξη των ρευμάτων της διεργασίας, τη διατήρηση των αντιδραστήρων σε σταθερή θερμοκρασία και τη λειτουργία δύο κρυσταλλωτήρων και ενός εξατμιστήρα. Μια σημαντική διαφορά με την καταλυτική διεργασία είναι ότι ο

εξατμιστήρας εδώ έχει μεγαλύτερο φορτίο (27,6 MW σύμφωνα με τη προσομοίωση στο Aspen Plus) λόγω της μεγάλης ποσότητας νερού που πρέπει να απομακρυνθεί. Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται ένα τμήμα του διαγράμματος ροής της διεργασίας, στο οποίο οι ενεργειακές ανάγκες εμφανίζονται στον εξατμιστήρα EVAP, στους εναλλάκτες θερμότητας που σημειώνονται στο σχήμα και στον αντιδραστήρα R2. Το κομμάτι P-3 είναι μια διάταξη διαχωρισμού υγρού – στερεών η οποία δεν απαιτεί κάποιο θερμικό φορτίο.



ΣΧΗΜΑ 4-6 Τμήμα Διαγράμματος Ροής Διεργασίας Παραγωγής βιο-Ξυλιτόλης

Στο παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι ενεργειακές απαιτήσεις των ρευμάτων της διεργασίας παραγωγής βιο-ξυλιτόλης, όπως αυτές προέκυψαν από τη προσομοίωση της διεργασίας στο Aspen Plus V7.2. Οι θερμοκρασίες των ψυχρών ρευμάτων μετατοπίζονται κατά $+\Delta T_{\min}/2$, ενώ οι θερμοκρασίες των θερμών ρευμάτων μετατοπίζονται κατά $-\Delta T_{\min}/2$, προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος του Κόμβου Ανάσχεσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-10 Πίνακας Ενεργειακών Δεδομένων των Ρευμάτων της Διεργασίας Παραγωγής βιο-ξυλιτόλης

$\Delta T_{\min} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$						
Όνομασία Ρεύματος	$T_{\text{αρχ}}$	$T_{\text{τελ}}$	Θερμικό Φορτίο	Είδος Ρεύματος	$T_{\text{αρχ,μετατ.}}$	$T_{\text{τελ,μετατ.}}$
	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	kW		$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$
XYL BIO - 2	87.1	25	-294	ΘΕΡΜΟ	77.1	15

XYL BIO - 5	15	25	1.3	ΨΥΧΡΟ	25	35
XYL BIO - 8	15	25	16.7	ΨΥΧΡΟ	25	35
XYL BIO - 12	25	30	24.7	ΨΥΧΡΟ	35	40
XYL BIO - 17	15	30	608.1	ΨΥΧΡΟ	25	40
XYL BIO - 20	15	30	5.1	ΨΥΧΡΟ	25	40
XYL BIO - 30	104	-20	-198.4	ΘΕΡΜΟ	94	-30
XYL BIO - 38	8	-20	-103.9	ΘΕΡΜΟ	-2	-30
XYL BIO - 34	-20	8	147.5	ΨΥΧΡΟ	-10	18
XYL BIO - R1	24.9	25	598.8	ΨΥΧΡΟ	34.9	35
XYL BIO - R2	30.1	30	-2591.5	ΘΕΡΜΟ	20.1	20

Από τα παραπάνω δεδομένα του πίνακα μπορούμε να υπολογίσουμε τις συνολικές αρχικές ανάγκες θερμής και ψυχρής παροχής, για το σύνολο των ρευμάτων της διεργασίας. Οι συνολικές αρχικές ανάγκες (που εξήχθησαν απ' το μοντέλο προσομοίωσης της διεργασίας στο Aspen Plus V7.2) είναι:

Θερμή Παροχή = 1402 kW

Ψυχρή Παροχή = 3188 kW

Επίσης, το μοντέλο προσομοίωσης της παραγωγικής διαδικασίας περιλαμβάνει ένα εξατμιστήρα μίας βαθμίδας, ο οποίος λειτουργεί στις παρακάτω συνθήκες:

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-11 Πίνακας Συνθηκών Λειτουργίας Εξατμιστήρα της Διεργασίας Παραγωγής βιο-Ευλιτόλης

Όνομασία Εξοπλισμού	$T_{\text{αναβρ.}}$	$T_{\text{συμπ.}}$	Θερμικό Φορτίο	Πίεση Λειτουργίας	Ροή Αποστάγματος
	°C	°C	kW	atm	kg/h
EVAP	104,0	81,3	27600	0,5	40860

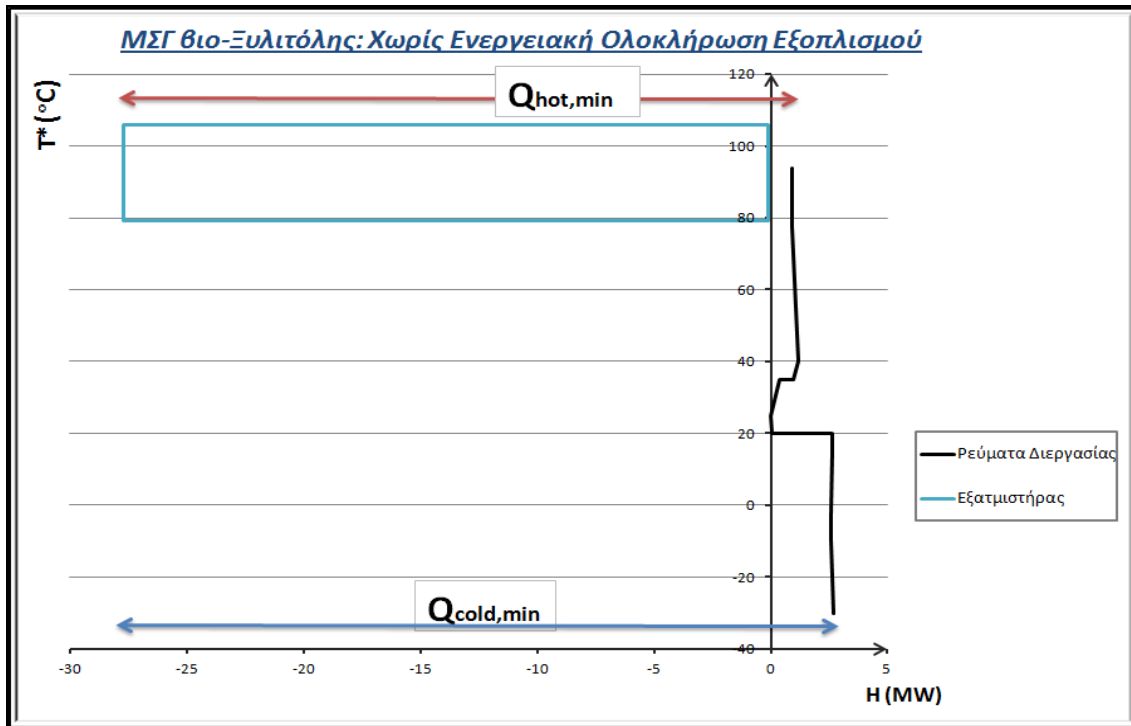
4.4.2 Ενεργειακή Ολοκλήρωση

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο του Κόμβου Ανάσχεσης, κατασκευάζουμε το Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα της διεργασίας, στο οποίο ο εξατμιστήρας αναπαρίσταται ως ορθογώνιο παραλληλόγραμμο κουτί. Όπως φαίνεται στο ΜΣΓ που ακολουθεί, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα απ' την εφαρμογή της μεθόδου (χωρίς ενεργειακή ολοκλήρωση του εξατμιστήρα με τα ρεύματα της διεργασίας) :

$$T_{\text{pinch}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

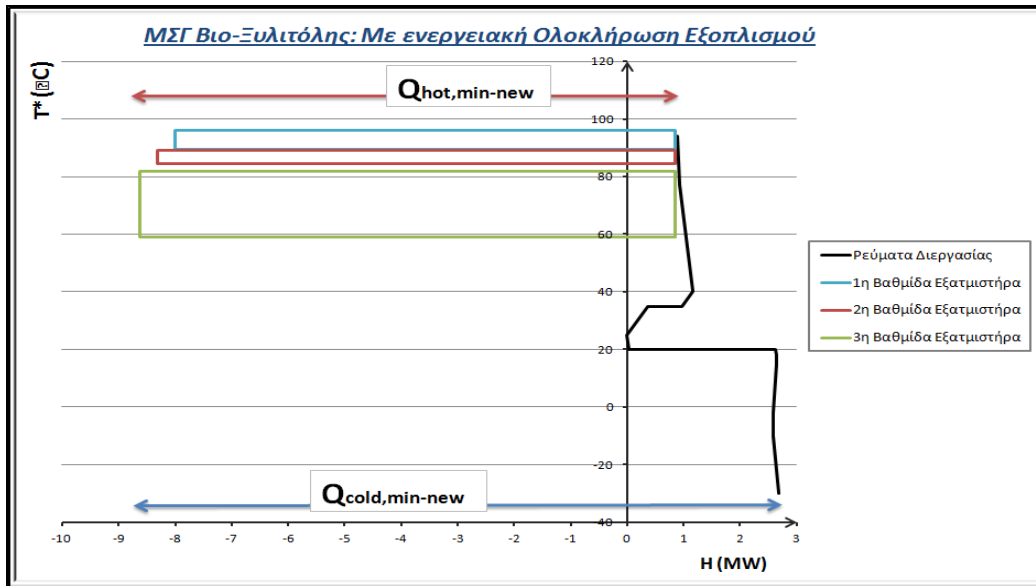
$$Q_{\text{hot,min}} = 28498 \text{ kW (για τον εξατμιστήρα και τα ρεύματα διεργασίας)}$$

$$Q_{\text{cold,min}} = 30283 \text{ kW (- // -)}$$



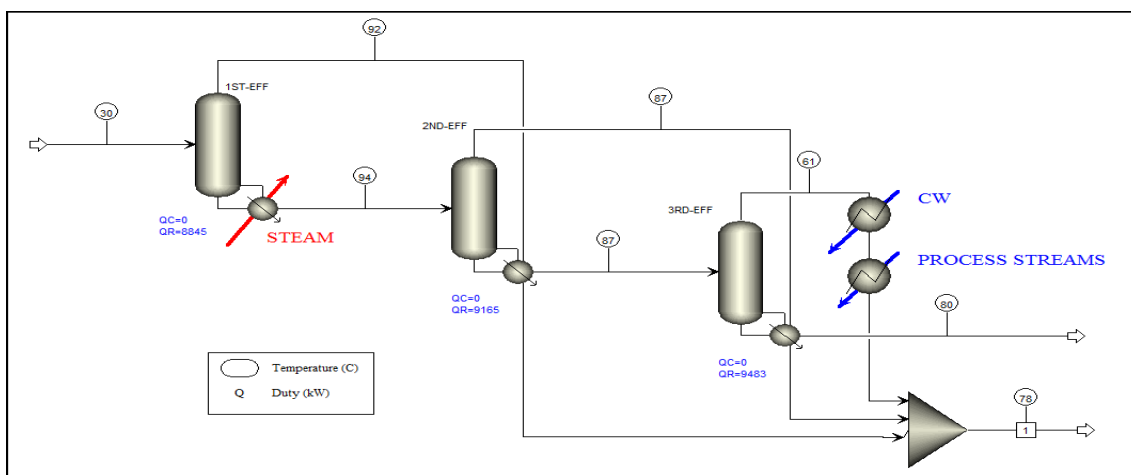
ΓΡΑΦΗΜΑ 4-6 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Διεργασίας Παραγωγής βιο-Ξυλιτόλης, χωρίς ενεργειακή ολοκλήρωση του εξατμιστήρα

Από το ΜΣΓ της διεργασίας παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν μεγάλα περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας από την ολοκλήρωση του εξατμιστήρα με τα ρεύματα της διεργασίας. Για το λόγο αυτό, η μόνη λύση που θα δώσει αξιόλογα αποτελέσματα είναι ο σχεδιασμός ενός εξατμιστήρα τριών βαθμίδων, ενεργειακά ολοκληρωμένων μεταξύ τους αλλά και με τη διεργασία όσο γίνεται. Το ΜΣΓ της ολοκληρωμένης διεργασίας φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.



ΓΡΑΦΗΜΑ 4-7 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Διεργασίας Παραγωγής βιο-Ξυλιτόλης, με ενεργειακή ολοκλήρωση του εξατμιστήρα

Η χρήση ενός 3-βάθμιου εξατμιστήρα διευκολύνει την ενεργειακή ολοκλήρωση και επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση καθώς οι βαθμίδες λειτουργούν σε διαφορετικές πιέσεις και έτσι οι ατμοί που εξέρχονται απ'τον ένα συμπυκνώνονται δίνοντας το θερμικό φορτί στον αναβραστήρα της επόμενης βαθμίδας (μικρότερης πίεσης). Επομένως, απαιτείται μικρότερη θερμή παροχή (8,8 MW αντί για 27,6 MW) για τη λειτουργία του αναβραστήρα της 1^{ης} βαθμίδας (και πολύ λίγη για τη 2^η και 3^η) ψυχρή παροχή για τη λειτουργία του συμπυκνωτήρα μόνο της 3^{ης} βαθμίδας. Η προτεινόμενη διάταξη των τριών βαθμίδων φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



ΣΧΗΜΑ 4-7 Λειτουργία του εξατμιστήρα με 3 βαθμίδες σε σειρά

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-12 Πίνακας Συνθηκών Λειτουργίας 3-βάθμιου Εξατμιστήρα της Διεργασίας Παραγωγής βιο-Ξυλιτόλης

Όνομασία Εξοπλισμού	T _{αναβρ.}	T _{συμπ.}	Θερμικό Φορτίο	Πίεση Λειτουργίας	Ροή Αποστάγματος
	°C	°C	kW	atm	kg/h
1 ^η Βαθμίδα	94,2	91,6	8845	0,8	10860
2 ^η Βαθμίδα	87	86,6	9165	0,6	14800
3 ^η Βαθμίδα	79,7	60,9	9483	0,2	15200

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ενεργειακής εξοικονόμησης που επιτυγχάνεται μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση της διεργασίας, φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

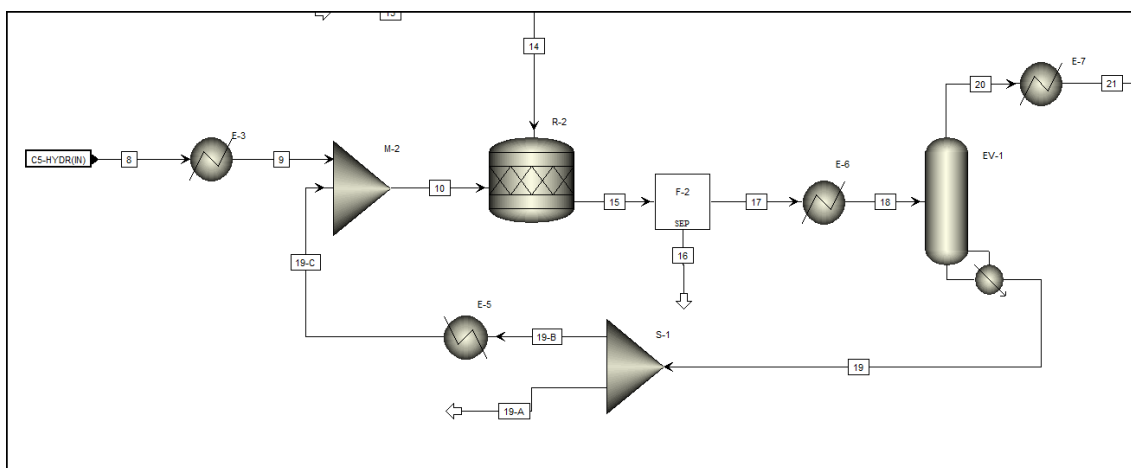
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-13 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ενεργειακής Εξοικονόμησης στη Διεργασία Παραγωγής βιο-Ξυλιτόλης

	ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ	
	Θερμή Παροχή (kW)	Ψυχρή Παροχή (kW)
Ρεύματα Διεργασίας	1402	3188
Εξατμιστήρας	27600	27600
Συνολικές Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες	29002	30788
	ΤΕΛΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ	
	Θερμή Παροχή (kW)	Ψυχρή Παροχή (kW)
Ρεύματα Διεργασίας	47	2683
Εξατμιστήρας (3βάθμιος)	9483	8633
Συνολικές Τελικές Ενεργειακές Ανάγκες	9530	11316
Συνολικές Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες	29002	30788
Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	67,1 %	62,5 %

4.5 Διεργασία Παραγωγής βιο-Αιθανόλης με α΄ ύλη σάκχαρα C-5

4.5.1 Απαιτήσεις σε Θερμή και Ψυχρή Παροχή

Οι ενεργειακές ανάγκες της διεργασίας αφορούν τη θέρμανση και ψύξη των ρευμάτων της διεργασίας, τη διατήρηση δύο αντιδραστήρων σε σταθερή θερμοκρασία και τη λειτουργία ενός εξατμιστήρα και μιας συστοιχίας αποστακτικών στηλών. Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται ένα τμήμα του διαγράμματος ροής της διεργασίας, στο οποίο οι ενεργειακές ανάγκες εμφανίζονται στους εναλλάκτες θερμότητας E-3, E-5 και E-6, στον αντιδραστήρα R-2 και στον εξατμιστήρα EV-1. Οι αποστακτικές στήλες απαιτούν θερμή παροχή για τους αναβραστήρες και ψυχρή παροχή για τους συμπυκνωτήρες.



ΣΧΗΜΑ 4-8 Τμήμα Διαγράμματος Ροής Διεργασίας Παραγωγής C-5 βιο-Αιθανόλης

Στο παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι ενεργειακές απαιτήσεις των ρευμάτων της διεργασίας, όπως αυτές προέκυψαν από τη προσομοίωση της διεργασίας στο Aspen Plus V7.2. Οι θερμοκρασίες των ψυχρών ρευμάτων μετατοπίζονται κατά $+\Delta T_{\min}/2$, ενώ οι θερμοκρασίες των θερμών ρευμάτων μετατοπίζονται κατά $-\Delta T_{\min}/2$, προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος του Κόμβου Ανάσχεσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-14 Πίνακας Ενεργειακών Δεδομένων των Ρευμάτων της Διεργασίας Παραγωγής C-5 βιο-Αιθανόλης

$\Delta T_{\min} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$						
Όνομασία Ρεύματος	$T_{\text{αρχ}}$	$T_{\text{τελ}}$	Θερμικό Φορτίο	Είδος Ρεύματος	$T_{\text{αρχ,μετατ.}}$	$T_{\text{τελ,μετατ.}}$
	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	kW		$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$
ETH - 1	87.1	60	-100.3	ΘΕΡΜΟ	77.1	50.0
ETH - 2	25	60	24	ΨΥΧΡΟ	35.0	70.0

ΕΤΗ - R1	59.9	60	819.7	ΨΥΧΡΟ	69.9	70.0
ΕΤΗ - 8	60	33	-110.5	ΘΕΡΜΟ	50.0	23.0
ΕΤΗ - 12-14	25	33	60.5	ΨΥΧΡΟ	35.0	43.0
ΕΤΗ - R2	33.1	33	-569.3	ΘΕΡΜΟ	23.1	23.0
ΕΤΗ - 17	33	29.9	-201.4	ΘΕΡΜΟ	23.0	19.9
ΕΤΗ - 19B	101.8	33	-2671.5	ΘΕΡΜΟ	91.8	23.0
ΕΤΗ - 19A	101.8	25	-91.6	ΘΕΡΜΟ	91.8	15.0
ΕΤΗ - 25	-1.4	84.3	584	ΨΥΧΡΟ	8.6	94.3

Από τα παραπάνω δεδομένα του πίνακα μπορούμε να υπολογίσουμε τις συνολικές αρχικές ανάγκες θερμής και ψυχρής παροχής, για το σύνολο των ρευμάτων της διεργασίας. Οι συνολικές αρχικές ανάγκες (που εξήχθησαν απ' το μοντέλο προσομοίωσης της διεργασίας στο Aspen Plus V7.2) είναι:

Θερμή Παροχή = 1488 kW

Ψυχρή Παροχή = 3745 kW

Επίσης, το μοντέλο προσομοίωσης της παραγωγικής διαδικασίας περιλαμβάνει ένα εξατμιστήρα μίας βαθμίδας και συστοιχία αποστακτικών στηλών, τα οποία λειτουργούν στις παρακάτω συνθήκες:

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-15 Πίνακας Συνθηκών Λειτουργίας Εξοπλισμού Διαχωρισμού της Διεργασίας Παραγωγής C-5 βιο-Αιθανόλης

Όνομασία Εξοπλισμού	T _{αναβρ.}	T _{συμπ.}	Θερμή Παροχή	Ψυχρή Παροχή	Πίεση Λειτουργίας
	°C	°C	kW	kW	atm
EV-1	101,8	92,1	7083	7083	1
Αποστακτικές Στήλες	-	-	20860	21020	Διάφορες

4.5.2 Ενεργειακή Ολοκλήρωση

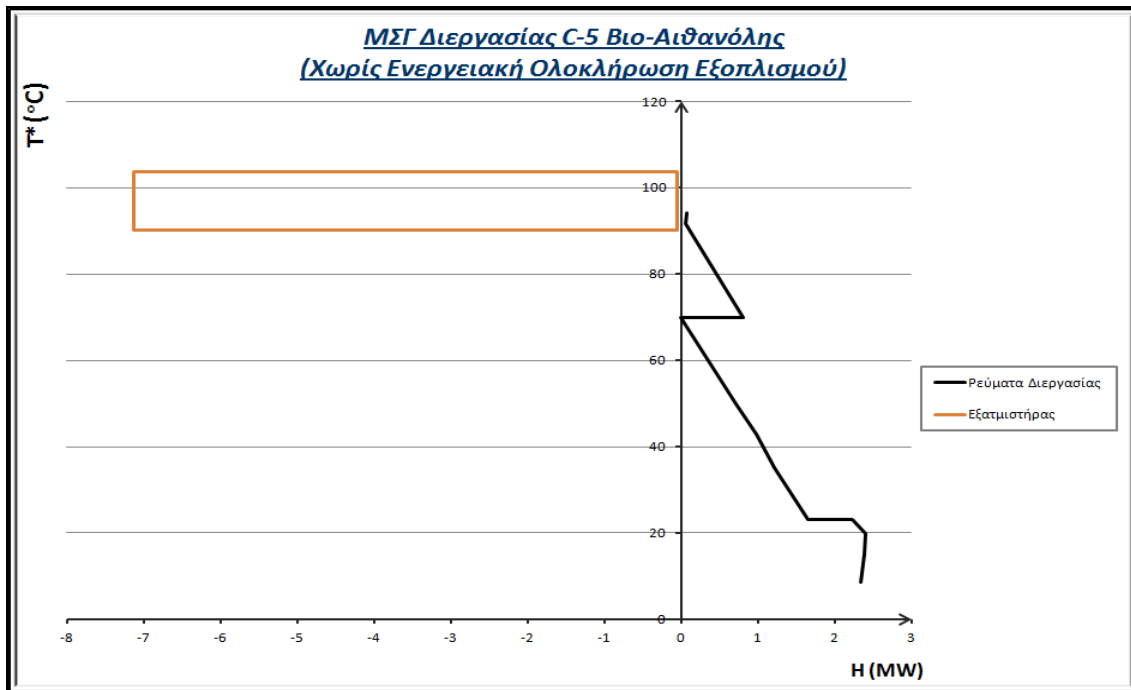
Εφαρμόζοντας τη μέθοδο του Κόμβου Ανάσχεσης, κατασκευάζουμε το Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα της διεργασίας, στο οποίο ο εξατμιστήρας αναπαρίσταται ως ορθογώνιο παραλληλόγραμμο κουτί. Όπως φαίνεται στο ΜΣΓ που ακολουθεί,

προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα απ' την εφαρμογή της μεθόδου (χωρίς ενεργειακή ολοκλήρωση του εξατμιστήρα με τα ρεύματα της διεργασίας) :

$$T_{\text{pinch}} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

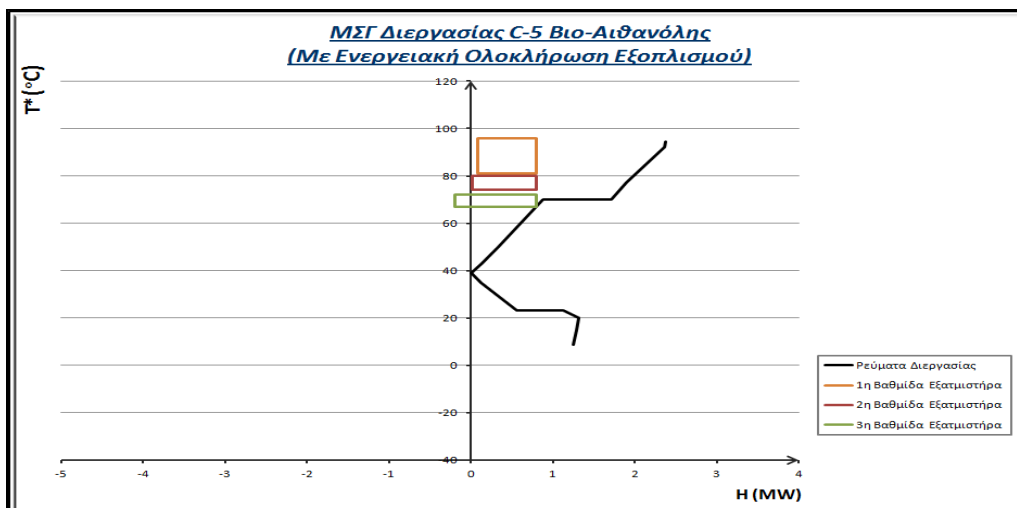
$$Q_{\text{hot,min}} = 7166 \text{ kW (για τον εξατμιστήρα και τα ρεύματα διεργασίας)}$$

$$Q_{\text{cold,min}} = 9422 \text{ kW (-//)}$$



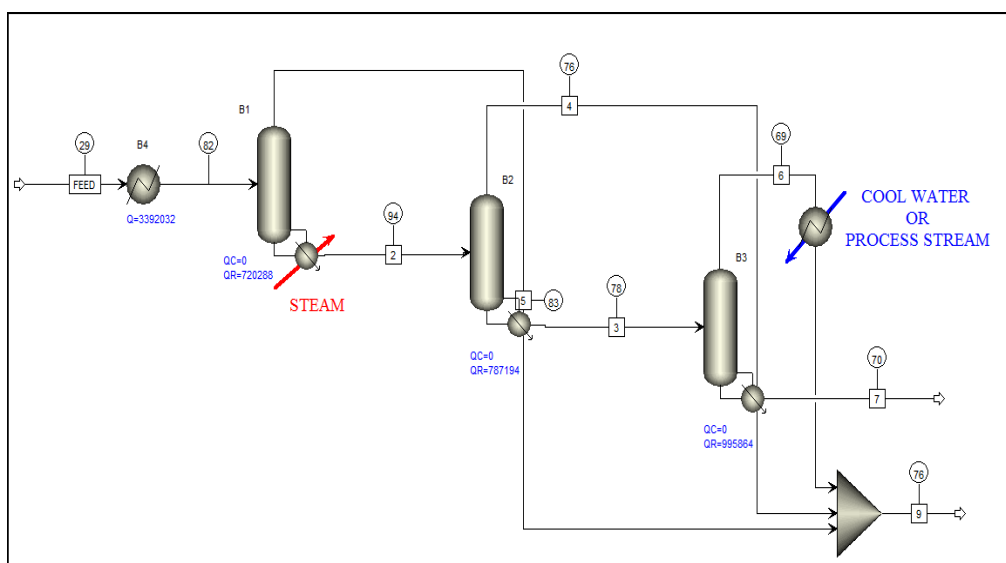
ΓΡΑΦΗΜΑ 4-8 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Διεργασίας Παραγωγής C-5 βιο-Αιθανόλης, χωρίς ενεργειακή ολοκλήρωση του εξοπλισμού διαχωρισμού (εξατμιστήρες και αποστακτικές στήλες)

Απ' το ΜΣΓ της διεργασίας παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν μεγάλα περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας από την ολοκλήρωση του εξατμιστήρα με τα ρεύματα της διεργασίας, καθώς οι ενεργειακές ανάγκες είναι κυρίως ψυχρής παροχής. Για το λόγο αυτό, η μόνη λύση που δίνει αξιόλογα αποτελέσματα είναι ο σχεδιασμός ενός εξατμιστήρα τριών βαθμίδων σε σειρά, ενεργειακά ολοκληρωμένες μεταξύ τους αλλά και με τη διεργασία όσο γίνεται. Επίσης, τοποθετούμε ένα εναλλάκτη θερμότητας πριν τους εξατμιστήρες για προθέρμανση της τροφοδοσίας τους. Το φορτίο του εναλλάκτη εισέρχεται στο ΜΣΓ των ρευμάτων της διεργασίας και έτσι απαιτούνται μικρότεροι εξατμιστήρες που μπορούν να ολοκληρωθούν στο ΜΣΓ με μεγαλύτερα ποσοστά εξοικονόμησης. Το ΜΣΓ αυτής της ολοκληρωμένης διεργασίας φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.



ΓΡΑΦΗΜΑ 4-9 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Διεργασίας Παραγωγής C-5 βιο-Αιθανόλης, με ενεργειακή ολοκλήρωση του εξατμιστήρα

Το σπάσιμο του εξατμιστήρα EV-1 σε τρεις βαθμίδες, διευκολύνει την ενεργειακή ολοκλήρωση και επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση καθώς οι βαθμίδες λειτουργούν σε διαφορετικές πιέσεις και έτσι οι ατμοί που εξέρχονται απ' τον ένα συμπυκνώνονται δίνοντας το θερμικό φορτί στον αναβραστήρα της επόμενης βαθμίδας (μικρότερης πίεσης). Η προσομοίωση των εξατμιστήρων γίνεται στο Aspen Plus V7.2 με τη χρήση στήλης RadFrac 3 δίσκων (συμπεριλαμβανομένου του αναβραστήρα και του συμπυκνωτήρα). Η προτεινόμενη διάταξη των τριών βαθμίδων με προθέρμανση της τροφοδοσίας, φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



ΣΧΗΜΑ 4-9 Λειτουργία του εξατμιστήρα 3 βαθμίδων σε σειρά

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-16 Πίνακας Συνθηκών Λειτουργίας 3-βάθμιου Εξατμιστήρα της Διεργασίας Παραγωγής C-5 βιο-Αιθανόλης

Όνομασία Εξοπλισμού	$T_{\text{αναβρ.}}$	$T_{\text{συμπ.}}$	Θερμικό Φορτίο	Πίεση Λειτουργίας	Ροή Αποστάγματος
	°C	°C	kW	atm	kg/h
1 ^η Βαθμίδα	94	83	720	1	3597
2 ^η Βαθμίδα	78	76	787	0,45	3034
3 ^η Βαθμίδα	70	69	996	0,3	2350

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ενεργειακής εξοικονόμησης που επιτυγχάνεται μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση της διεργασίας, φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

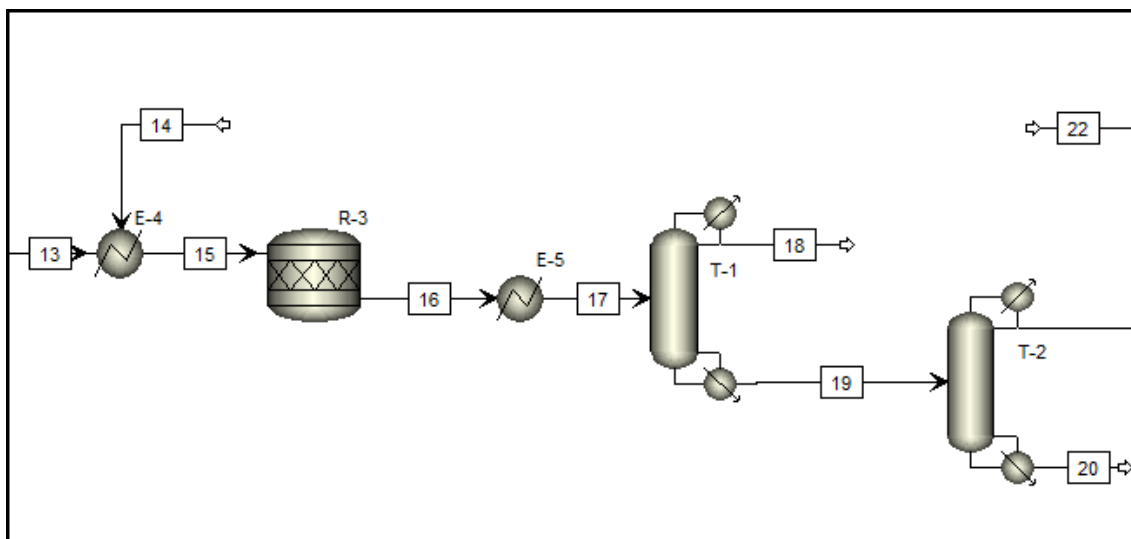
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-17 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ενεργειακής Εξοικονόμησης στη Διεργασία Παραγωγής C-5 βιο-Αιθανόλης

	ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ	
	Θερμή Παροχή (kW)	Ψυχρή Παροχή (kW)
Ρεύματα Διεργασίας	1488	3745
Εξατμιστήρας 1	7083	7083
Αποστακτικές Στήλες	20860	21020
Συνολικές Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες	29431	31848
	ΤΕΛΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ	
	Θερμή Παροχή (kW)	Ψυχρή Παροχή (kW)
Ρεύματα Διεργασίας	1582	1246
Εξατμιστήρας 1 (4βάθμιος)	996	197
Αποστακτικές Στήλες	20860	21020
Συνολικές Τελικές Ενεργειακές Ανάγκες	23438	22463
Συνολικές Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες	29431	31848
Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	20,4 %	29,5 %

4.6 Διεργασία Παραγωγής βιο-Αιθανόλης με α' ύλη σάκχαρα C-6

4.6.1 Απαιτήσεις σε Θερμή και Ψυχρή Παροχή

Οι ενεργειακές ανάγκες της διεργασίας αφορούν τη θέρμανση και ψύξη των ρευμάτων της διεργασίας, τη διατήρηση τριών αντιδραστήρων σε σταθερή θερμοκρασία και τη λειτουργία μιας συστοιχίας αποστακτικών στηλών. Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται ένα τμήμα του διαγράμματος ροής της διεργασίας, στο οποίο οι ενεργειακές ανάγκες εμφανίζονται στους εναλλάκτες θερμότητας E-4 και E-5, στον αντιδραστήρα R-3 και στις αποστακτικές στήλες T-1 και T-2. Οι αποστακτικές στήλες απαιτούν θερμή παροχή για τους αναβραστήρες και ψυχρή παροχή για τους συμπυκνωτήρες.



ΣΧΗΜΑ 4-10 Τμήμα Διαγράμματος Ροής Διεργασίας Παραγωγής C-6 βιο-Αιθανόλης

Η αιθανόλη με το νερό σχηματίζει αζεότροπο και για το λόγο αυτό είναι δύσκολος ο διαχωρισμός τους προκειμένου η αιθανόλη να αποκτήσει τις κατάλληλες προδιαγραφές σύστασης. Στην παρούσα εργασία οι ενεργειακές ανάγκες των αποστακτικών στηλών δεν θα εισαχθούν στην ενεργειακή ολοκλήρωση, διότι η προσομείωση του διαχωρισμού με απλές αποστακτικές στήλες δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Οι ενεργειακές ανάγκες των αποστακτικών στηλών θα θεωρηθούν ως δεδομένες (όπως προέκυψαν από το Aspen Plus) για να έχουμε μια συνολική εικόνα των ενεργειακών αναγκών της μονάδας παραγωγής C-6 βιο-αιθανόλης.

Στο παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι ενεργειακές απαιτήσεις των ρευμάτων της διεργασίας, όπως αυτές προέκυψαν από τη προσομοίωση της διεργασίας στο Aspen

Plus V7.2. Οι θερμοκρασίες των ψυχρών ρευμάτων μετατοπίζονται κατά $+\Delta T_{\min}/2$, ενώ οι θερμοκρασίες των θερμών ρευμάτων μετατοπίζονται κατά $-\Delta T_{\min}/2$, προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος του Κόμβου Ανάσχεσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-18 Πίνακας Ενεργειακών Δεδομένων των Ρευμάτων της Διεργασίας Παραγωγής C-6 βιο-Αιθανόλης

$\Delta T_{\min} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$						
Όνομασία Ρεύματος	$T_{\text{αρχ}}$	$T_{\text{τελ}}$	Θερμικό Φορτίο	Είδος Ρεύματος	$T_{\text{αρχ,μετατ.}}$	$T_{\text{τελ,μετατ.}}$
	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	kW		$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
ETH - 1	100.6	60	-1408	ΘΕΡΜΟ	90.6	50
ETH - 3	25	60	114	ΨΥΧΡΟ	35	70
ETH - R1	60	60.1	2367	ΨΥΧΡΟ	70	70.1
ETH - 9	25	60	1858	ΨΥΧΡΟ	35	70
ETH - R2	60	59.9	-889	ΘΕΡΜΟ	50	49.9
ETH - 13	60	33	-1746	ΘΕΡΜΟ	50	23
ETH - R3	33	33.1	2849	ΨΥΧΡΟ	43	43.1
ETH - 16	33	27	-433	ΘΕΡΜΟ	23	17

Από τα παραπάνω δεδομένα του πίνακα μπορούμε να υπολογίσουμε τις συνολικές αρχικές ανάγκες θερμής και ψυχρής παροχής, για το σύνολο των ρευμάτων της διεργασίας.

Αρχικές Ανάγκες σε Θερμή Παροχή = 7188 kW

Αρχικές Ανάγκες σε Ψυχρή Παροχή = 4476 kW

Για τις αποστακτικές στήλες θα χρησιμοποιήσουμε τις τιμές που έδωσε η προσομοίωση του διαχωρισμού με 4 απλές αποστακτικές στήλες, και είναι:

$$Q_{\text{θερμή,αποστ.}} = 15845 \text{ kW}$$

$$Q_{\text{ψυχρή,αποστ.}} = 15136 \text{ kW}$$

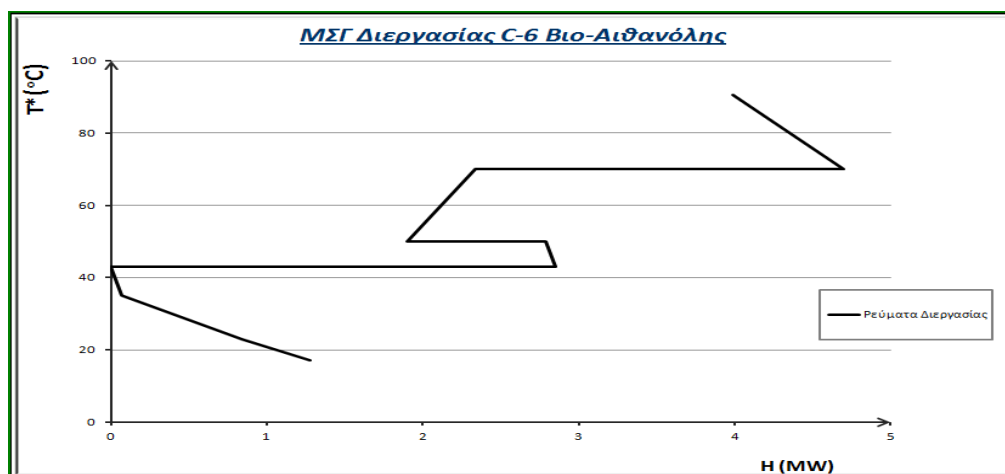
4.6.2 Ενεργειακή Ολοκλήρωση

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο του Κόμβου Ανάσχεσης, κατασκευάζουμε το Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα της διεργασίας. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι:

$$T_{\text{pinch}} = 43 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{\text{hot,min}} = 3988 \text{ kW} \text{ (για τα ρεύματα διεργασίας και τους αντιδραστήρες)}$$

$$Q_{\text{cold,min}} = 1276 \text{ kW} \text{ (-//-)}$$



ΓΡΑΦΗΜΑ 4-10 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Διεργασίας Παραγωγής C-6 βιο-Αιθανόλης

Απ'το ΜΣΓ της διεργασίας παρατηρούμε ότι για να ολοκληρωθεί κάποια αποστακτική στήλη με τα ρεύματα της διεργασίας, πρέπει ο συμπυκνωτήρας της να λειτουργεί σε θερμοκρασία μεγαλύτερη απ'τη θερμοκρασία του κόμβου ανάσχεσης, δηλαδή σε μεγαλύτερη των 43 °C (που είναι 53 °C πραγματική θερμοκρασία). Η εξοικονόμηση που μπορεί να επιτευχθεί σε αυτή τη περίπτωση είναι περίπου 4 MW θερμής και ψυχρής παροχής, για τη λειτουργία του αναβραστήρα και του συμπυκνωτήρα αντίστοιχα.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ενεργειακής εξοικονόμησης που επιτυγχάνεται μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση της διεργασίας, φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

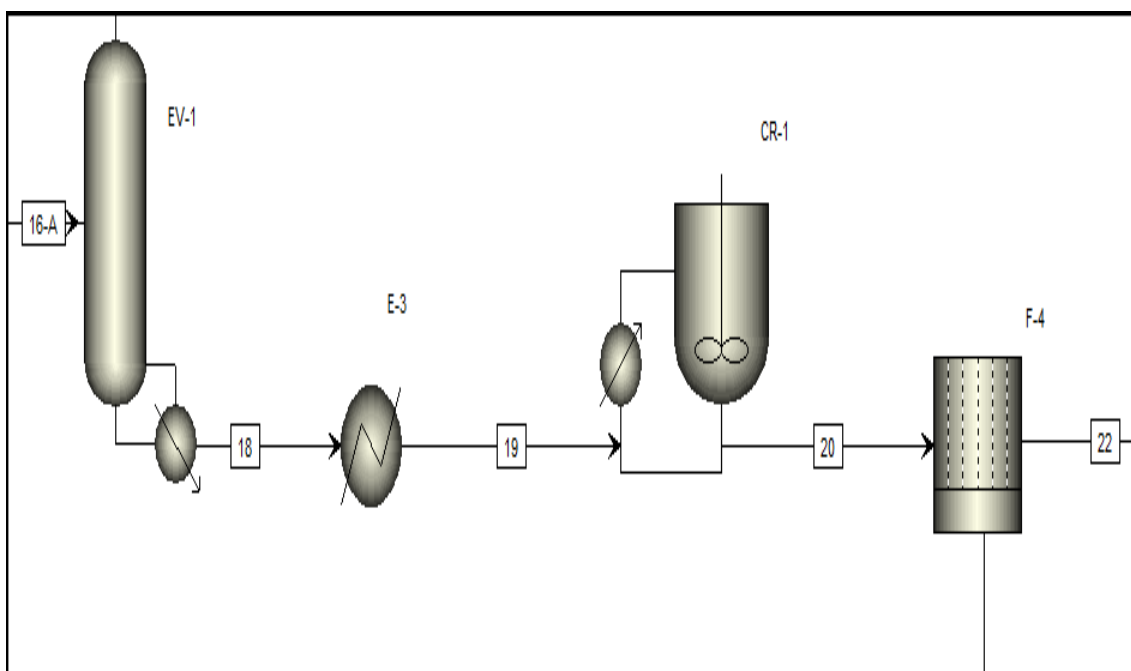
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-19 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ενεργειακής Εξοικονόμησης στη Διεργασία Παραγωγής C-6 βιο-Αιθανόλης

	ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ	
	Θερμή Παροχή (kW)	Ψυχρή Παροχή (kW)
Ρεύματα Διεργασίας	7188	4476
Αποστακτικές Στήλες	15845	15136
Συνολικές Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες	23033	16912
	ΤΕΛΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ	
	Θερμή Παροχή (kW)	Ψυχρή Παροχή (kW)
Ρεύματα Διεργασίας	3988	1276
Αποστακτικές Στήλες	15845	15136
Συνολικές Τελικές Ενεργειακές Ανάγκες	19833	16412
Συνολικές Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες	23033	19612
Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	13,9 %	16,3 %

4.7 Διεργασία Παραγωγής Ιτακονικού Οξέος

4.7.1 Απαιτήσεις σε Θερμή και Ψυχρή Παροχή

Οι ενεργειακές ανάγκες της διεργασίας αφορούν τη θέρμανση και ψύξη των ρευμάτων της διεργασίας, τη λειτουργία τριών κρυσταλλωτήρων και τριών εξατμιστήρων. Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται ένα τμήμα του διαγράμματος ροής της διεργασίας, στο οποίο οι ενεργειακές ανάγκες εμφανίζονται στον εξατμιστήρα EV-1, στον εναλλάκτη θερμότητας E-3 και στο κρυσταλλωτήρα CR-1. Το κομμάτι F-4 είναι μια διάταξη διαχωρισμού υγρού – στερεών η οποία δεν απαιτεί κάποιο θερμικό φορτίο.



ΣΧΗΜΑ 4-11 Τμήμα Διαγράμματος Ροής Διεργασίας Παραγωγής Ιτακονικού Οξέος

Στο παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι ενεργειακές απαιτήσεις των ρευμάτων της διεργασίας παραγωγής Ιτακονικού Οξέος, όπως αυτές προέκυψαν από τη προσομοίωση της διεργασίας στο Aspen Plus V7.2. Οι θερμοκρασίες των ψυχρών ρευμάτων μετατοπίζονται κατά $+\Delta T_{\min}/2$, ενώ οι θερμοκρασίες των θερμών ρευμάτων μετατοπίζονται κατά $-\Delta T_{\min}/2$, προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος του Κόμβου Ανάσχεσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-20 Πίνακας Ενεργειακών Δεδομένων των Ρευμάτων της Διεργασίας Παραγωγής Ιτακονικού Οξέος

$\Delta T_{\min} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$						
Όνομασία Ρεύματος	$T_{\text{αρχ}}$	$T_{\text{τελ}}$	Θερμικό Φορτίο	Είδος Ρεύματος	$T_{\text{αρχ,μετατ.}}$	$T_{\text{τελ,μετατ.}}$
	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	kW		$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
ITAC - 3	100.6	60	-3378	ΘΕΡΜΟ	90.6	50
ITAC - 4	25	60	1773	ΨΥΧΡΟ	35	70
ITAC - R1	60	60.01	66	ΨΥΧΡΟ	70	70.01
ITAC - 8	60	37	-1430	ΘΕΡΜΟ	50	27
ITAC - 9	25	37	26	ΨΥΧΡΟ	35	47
ITAC - R2	37.1	37	-6551	ΘΕΡΜΟ	27.1	27
ITAC - FL1	33.1	33	-306	ΘΕΡΜΟ	23.1	23
ITAC - 18	200	4	-1727	ΘΕΡΜΟ	190	-6
ITAC - 26	94.6	80	-50	ΘΕΡΜΟ	84.6	70
ITAC - CR1	4.1	4	-84	ΘΕΡΜΟ	-5.9	-6
ITAC - 21B	4	33	150	ΨΥΧΡΟ	14	43
ITAC - 24	32	80	85	ΨΥΧΡΟ	42	90
ITAC - CR2	80	80.1	106	ΨΥΧΡΟ	90	90.1
ITAC - 30	80	4	-213	ΘΕΡΜΟ	70	-6
ITAC - CR3	4.1	4	-75	ΘΕΡΜΟ	-5.9	-6

Από τα παραπάνω δεδομένα του πίνακα μπορούμε να υπολογίσουμε τις συνολικές αρχικές ανάγκες θερμής και ψυχρής παροχής, για το σύνολο των ρευμάτων της διεργασίας. Οι συνολικές αρχικές ανάγκες (που εξήχθησαν απ'το μοντέλο προσομοίωσης της διεργασίας στο Aspen Plus V7.2) είναι:

Θερμή Παροχή = 2206 kW

Ψυχρή Παροχή = 13814 kW

Επίσης, το μοντέλο προσομοίωσης της παραγωγικής διαδικασίας περιλαμβάνει τρεις εξατμιστήρες μίας βαθμίδας, οι οποίοι λειτουργούν στις παρακάτω συνθήκες:

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-21 Πίνακας Συνθηκών Λειτουργίας Εξατμιστήρων της Διεργασίας Παραγωγής Ιτακονικού Οξέος

Όνομασία Εξοπλισμού	$T_{\text{αναβρ.}}$	$T_{\text{συμπ.}}$	Θερμικό Φορτίο	Πίεση Λειτουργίας	Ροή Αποστάγματος
	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	kW	atm	kg/h
EV-1	95,8	94,6	39000	0,8	54672
EV-2	343,8	341,2	400	1	849
EV-3	101,1	100,1	500	1	667

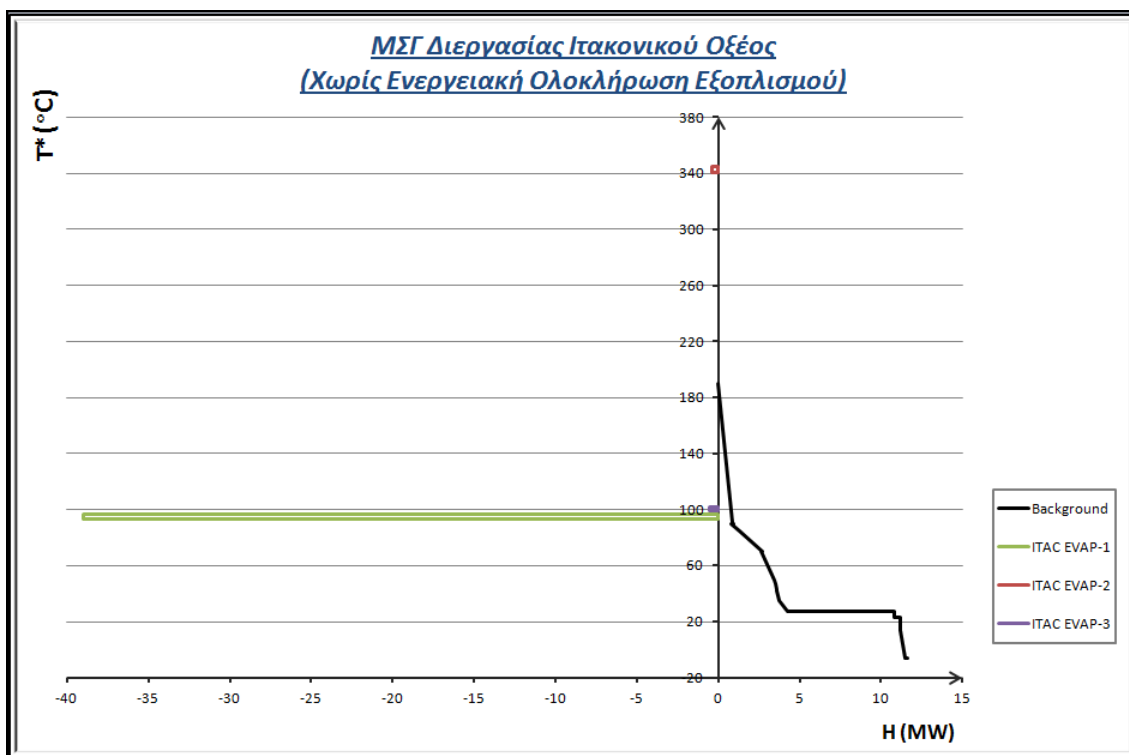
4.7.2 Ενεργειακή Ολοκλήρωση

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο του Κόμβου Ανάσχεσης, κατασκευάζουμε το Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα της διεργασίας, στο οποίο ο εξατμιστήρας αναπαρίσταται ως ορθογώνιο παραλληλόγραμμο κουτί. Όπως φαίνεται στο ΜΣΓ που ακολουθεί, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα απ'την εφαρμογή της μεθόδου (χωρίς ενεργειακή ολοκλήρωση του εξατμιστήρα με τα ρεύματα της διεργασίας) :

$$T_{\text{pinch}} = 190 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$Q_{\text{hot,min}} = 39900 \text{ kW}$ (μόνο για τους εξατμιστήρες, διότι έχουμε πρόβλημα “Ουδού” με $Q_{\text{hot,min-background}} = 0$)

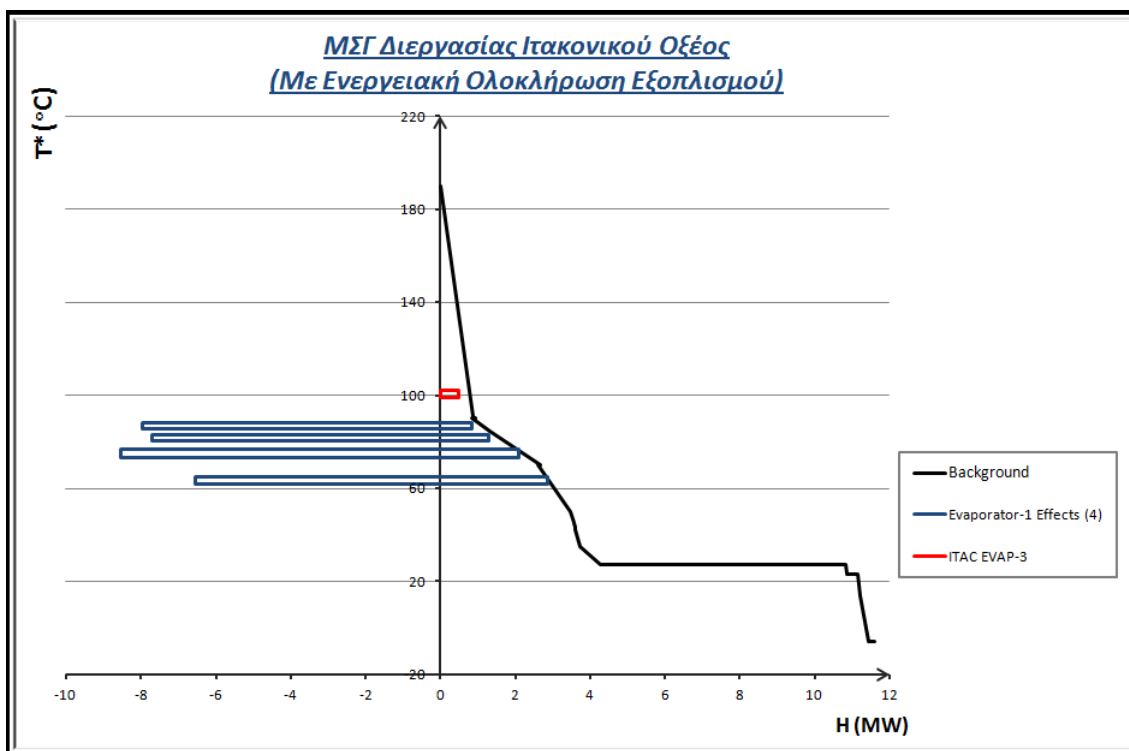
$$Q_{\text{cold,min}} = 51508 \text{ kW}$$
 (για τα ρεύματα διεργασίας και τους εξατμιστήρες)



ΓΡΑΦΗΜΑ 4-11 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Διεργασίας Παραγωγής Ιτακονικού Οξέος, χωρίς ενεργειακή ολοκλήρωση του εξοπλισμού διαχωρισμού (εξατμιστήρες)

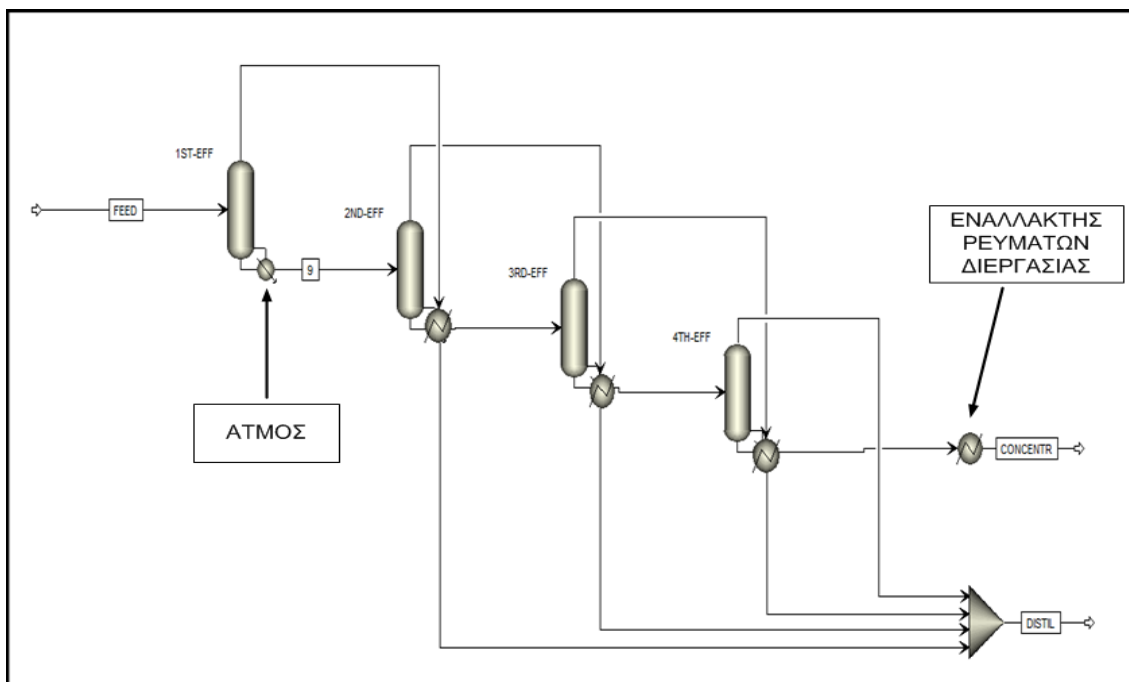
Απ'το ΜΣΓ της διεργασίας παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν μεγάλα περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας από την ολοκλήρωση του 1^{ου} εξατμιστήρα με τα ρεύματα της διεργασίας. Για το λόγο αυτό, η μόνη λύση που δίνει αξιόλογα αποτελέσματα είναι ο σχεδιασμός ενός εξατμιστήρα τεσσάρων βαθμίδων, ενεργειακά ολοκληρωμένες μεταξύ

τους αλλά και με τη διεργασία όσο γίνεται. Το ΜΣΓ της ολοκληρωμένης διεργασίας φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.



ΓΡΑΦΗΜΑ 4-12 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Διεργασίας Παραγωγής Ιτακονικού Οξέος, με ενεργειακή ολοκλήρωση του εξοπλισμού διαχωρισμού

Οι εξατμιστήρες EV-2 και EV-3 είναι μικροί εξατμιστήρες σε σχέση με τα ενεργειακά μεγέθη της διεργασίας και ολοκληρώνονται μέσα στη διεργασία χωρίς να αλλάξουμε τις συνθήκες λειτουργίας του, Το σπάσιμο όμως, του εξατμιστήρα EV-1 σε τέσσερις βαθμίδες, διευκολύνει την ενεργειακή ολοκλήρωση και επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση καθώς οι βαθμίδες λειτουργούν σε διαφορετικές πιέσεις και έτσι οι ατμοί που εξέρχονται απ'τον ένα συμπυκνώνονται δίνοντας το θερμικό φορτί στον αναβραστήρα της επόμενης βαθμίδας (μικρότερης πίεσης). Η προτεινόμενη διάταξη των τεσσάρων βαθμίδων φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



ΣΧΗΜΑ 4-12 Λειτουργία του εξατμιστήρα σε 4 βαθμίδες σε σειρά

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-22 Πίνακας Συνθηκών Λειτουργίας 4-βάθμιου Εξατμιστήρα της Διεργασίας Παραγωγής Ιτακονικού Οξέος

Όνομασία Εξοπλισμού	$T_{\text{αναβρ.}}$	$T_{\text{συμπ.}}$	Θερμικό Φορτίο	Πίεση Λειτουργίας	Ροή Αποστάγματος
	°C	°C	kW	atm	kg/h
1 ^η Βαθμίδα	87,2	86,6	8821	0,6	8300
2 ^η Βαθμίδα	83	82,6	9005	0,5	14800
3 ^η Βαθμίδα	75,6	74,2	10648	0,35	17372
4 ^η Βαθμίδα	63,8	62,	9387	0,2	14200

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ενεργειακής εξοικονόμησης που επιτυγχάνεται μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση της διεργασίας, φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

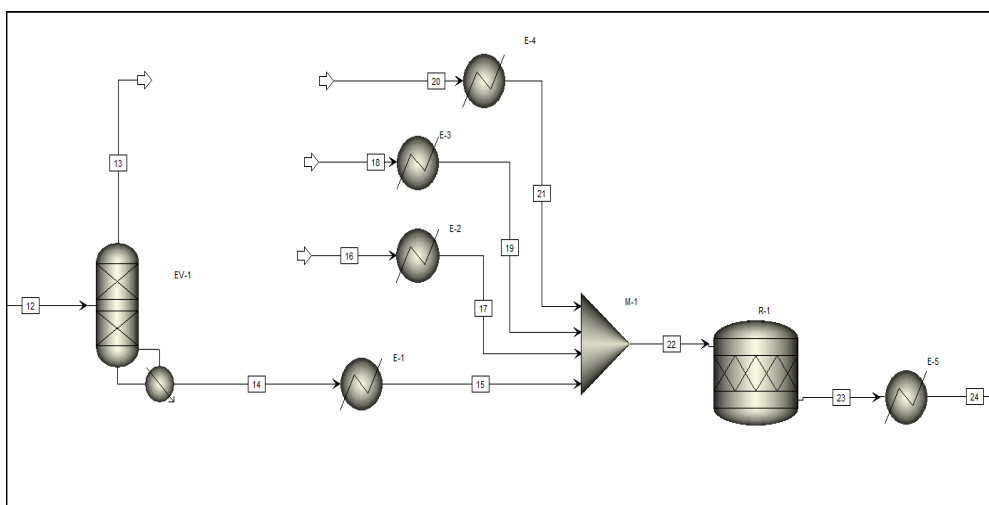
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-23 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ενεργειακής Εξοικονόμησης στη Διεργασία Παραγωγής Ιτακονικού Οξέος

	ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ	
	Θερμή Παροχή (kW)	Ψυχρή Παροχή (kW)
Ρεύματα Διεργασίας	2206	13814
Εξατμιστήρας 1	39000	39000
Εξατμιστήρας 2	400	400
Εξατμιστήρας 3	500	500
Συνολικές Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες	42106	53714
	ΤΕΛΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ	
	Θερμή Παροχή (kW)	Ψυχρή Παροχή (kW)
Ρεύματα Διεργασίας	0	8758
Εξατμιστήρας 1 (4βάθμιος)	8148	11398
Εξατμιστήρας 2	400	0
Εξατμιστήρας 3	0	0
Συνολικές Τελικές Ενεργειακές Ανάγκες	8548	20156
Συνολικές Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες	42106	53714
Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	79,7 %	62,5 %

4.8 Διεργασία Παραγωγής Ρητινών Φαινόλης – Φορμαλδεΰδης (PF Ρητίνες)

4.8.1 Απαιτήσεις σε Θερμή και Ψυχρή Παροχή

Οι ενεργειακές ανάγκες της διεργασίας δεν είναι μεγάλες, κυρίως αφορούν τη θέρμανση των πρώτων υλών και τη λειτουργία ενός εξατμιστήρα, όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα του διαγράμματος ροής.



ΣΧΗΜΑ 4-13 Τμήμα Διαγράμματος Ροής Διεργασίας Παραγωγής PF Ρητινών.

Στο παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι ενεργειακές απαιτήσεις των ρευμάτων της διεργασίας παραγωγής PF Ρητινών, όπως αυτές προέκυψαν από τη προσομοίωση της διεργασίας στο Aspen Plus V7.2. Οι θερμοκρασίες των ψυχρών ρευμάτων μετατοπίζονται κατά $+\Delta T_{\min}/2$, ενώ οι θερμοκρασίες των θερμών ρευμάτων μετατοπίζονται κατά $-\Delta T_{\min}/2$, προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος του Κόμβου Ανάσχεσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-24 Πίνακας Ενεργειακών Δεδομένων των Ρευμάτων της Διεργασίας Παραγωγής PF Ρητινών

$\Delta T_{\min} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$						
Όνομασία Ρεύματος	$T_{\text{αρχ}}$	$T_{\text{τελ}}$	Θερμικό Φορτίο	Είδος Ρεύματος	$T_{\text{αρχ,μετατ.}}$	$T_{\text{τελ,μετατ.}}$
	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	kW		$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$
PF RES - 14	104	90	-58.1	ΘΕΡΜΟ	94.0	80.0
PF RES - 16	25	90	276.7	ΨΥΧΡΟ	35.0	100.0
PF RES - 18	25	90	2119.2	ΨΥΧΡΟ	35.0	100.0
PF RES - 20	25	90	241.6	ΨΥΧΡΟ	35.0	100.0
PF RES - 23	90	25	-4390	ΘΕΡΜΟ	80.0	15.0
PF RES - R1	90	89.9	-87.5	ΘΕΡΜΟ	80.0	79.9

Από τα παραπάνω δεδομένα του πίνακα μπορούμε να υπολογίσουμε τις συνολικές αρχικές ανάγκες θερμής και ψυχρής παροχής, για το σύνολο των ρευμάτων της διεργασίας. Οι συνολικές αρχικές ανάγκες (που εξήχθησαν απ'το μοντέλο προσομοίωσης της διεργασίας στο Aspen Plus V7.2) είναι:

Θερμή Παροχή = 2638 kW

Ψυχρή Παροχή = 4536 kW

Επίσης, το μοντέλο προσομοίωσης της παραγωγικής διαδικασίας περιλαμβάνει έναν εξατμιστήρα μίας βαθμίδας, ο οποίος λειτουργεί στις παρακάτω συνθήκες:

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-25 Πίνακας Συνθηκών Λειτουργίας Ενεργοβόρων Τμημάτων Εξοπλισμού της Διεργασίας Παραγωγής PF Ρητινών

Όνομασία Εξοπλισμού	$T_{\text{αναβρ.}}$	$T_{\text{συμπ.}}$	Θερμικό Φορτίο	Πίεση Λειτουργίας
	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	kW	bar
EV-1 (Εξατμιστήρας 1 βαθμίδας)	104	100,1	560	1

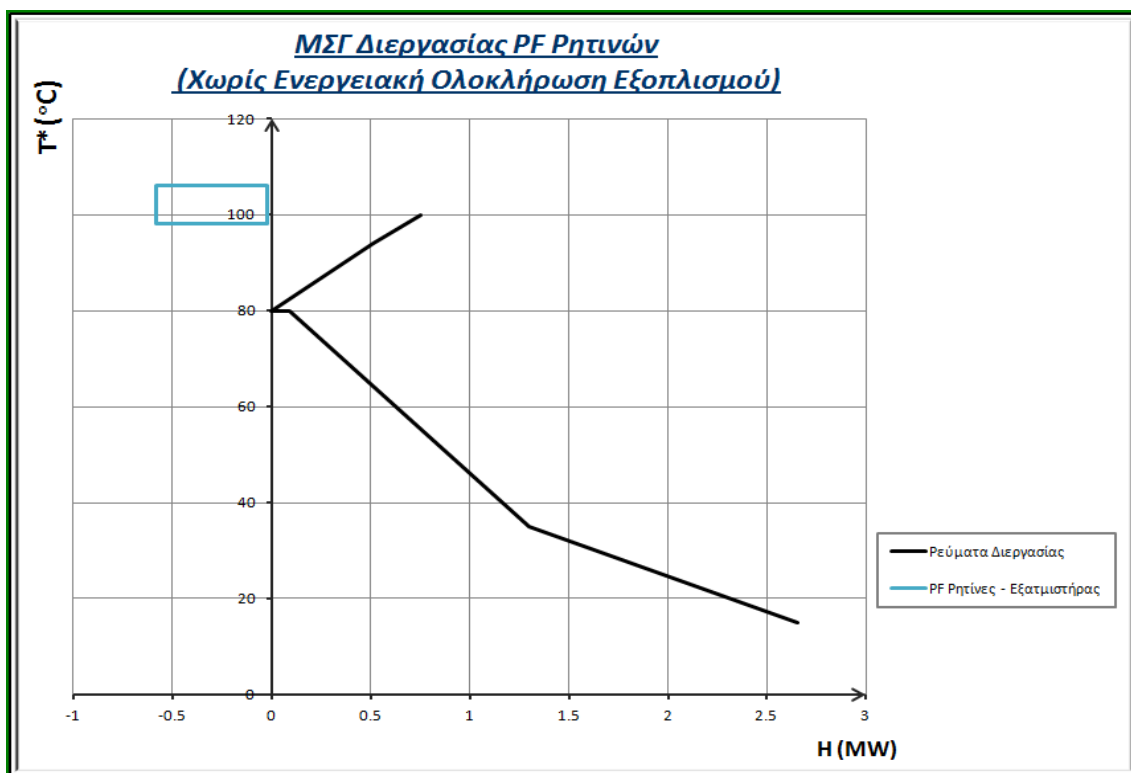
4.8.2 Ενεργειακή Ολοκλήρωση

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο του Κόμβου Ανάσχεσης, κατασκευάζουμε το Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα της διεργασίας, στο οποίο ο εξατμιστήρας αναπαρίσταται ως ορθογώνιο παραλληλόγραμμο κουτί. Όπως φαίνεται στο ΜΣΓ που ακολουθεί, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα απ' την εφαρμογή της μεθόδου (χωρίς ενεργειακή ολοκλήρωση του εξατμιστήρα με τα ρεύματα της διεργασίας) :

$$T_{\text{pinch}} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

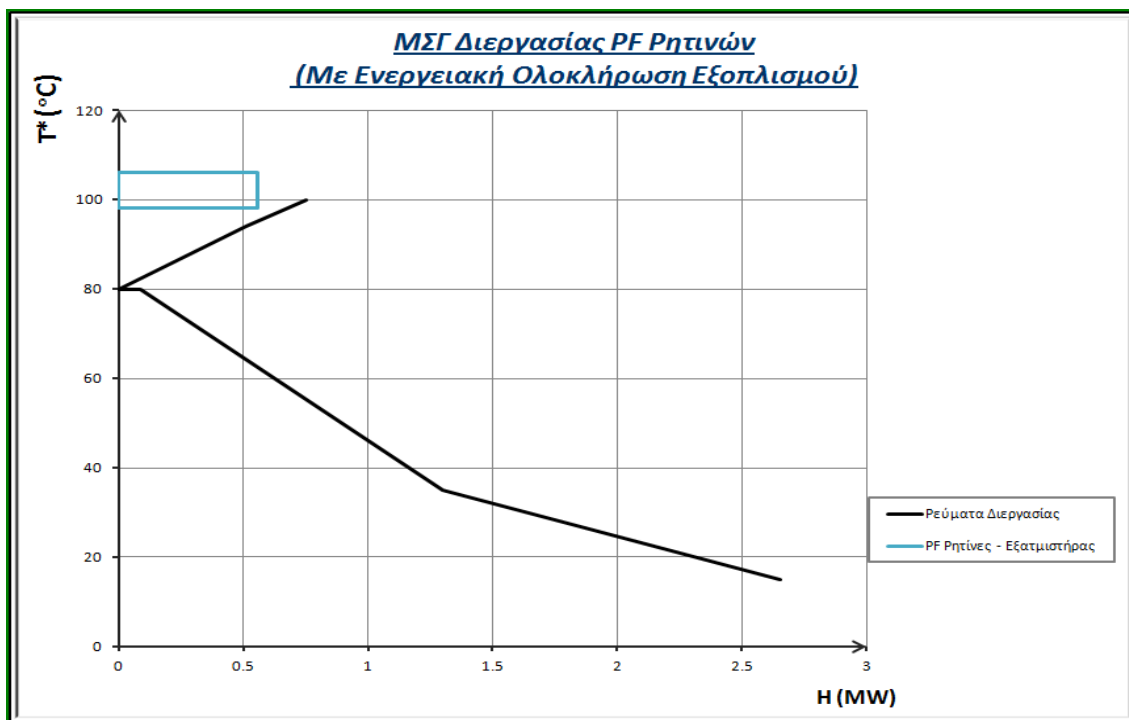
$$Q_{\text{hot,min}} = 1313 \text{ kW (για τα ρεύματα διεργασίας και τον εξατμιστήρα)}$$

$$Q_{\text{cold,min}} = 3212 \text{ kW (για τα ρεύματα διεργασίας και τον εξατμιστήρα)}$$



ΓΡΑΦΗΜΑ 4-13 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Διεργασίας Παραγωγής PF Ρητινών, χωρίς ενεργειακή ολοκλήρωση του εξατμιστήρα

Απ' το ΜΣΓ της διεργασίας παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει ανάγκη αλλαγής των λειτουργικών συνθηκών του εξατμιστήρα, καθώς μπορεί να ολοκληρωθεί ενεργειακά με τα ρεύματα της διεργασία, εξοικονομώντας κατά 100 % τις ανάγκες θερμής και ψυχρής παροχής (560 kW) για τη λειτουργία του αναβραστήρα και του συμπυκνωτήρα, αντίστοιχα. Το ΜΣΓ της ολοκληρωμένης διεργασίας φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.



ΓΡΑΦΗΜΑ 4-14 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Διεργασίας Παραγωγής PF Ρητινών, με ενεργειακή ολοκλήρωση του εξατμιστήρα

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ενεργειακής εξοικονόμησης που επιτυγχάνεται μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση της διεργασίας, φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

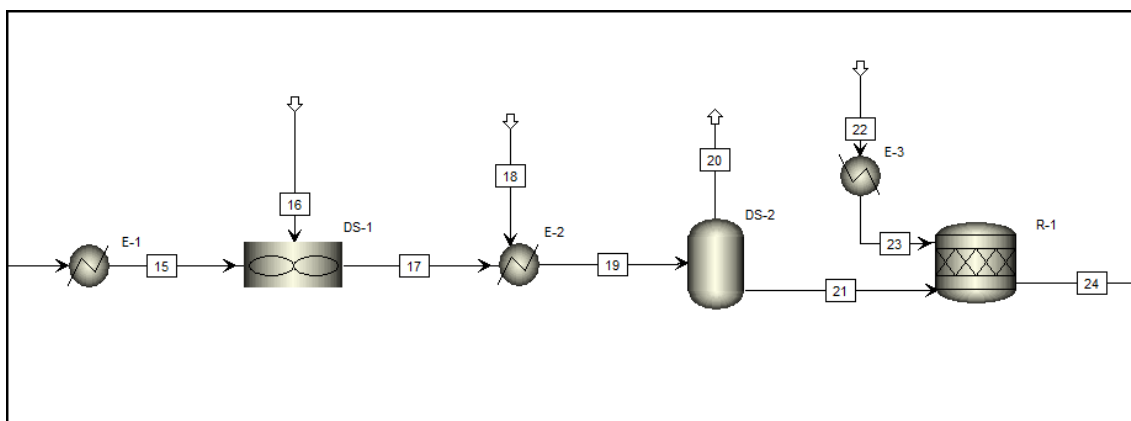
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-26 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ενεργειακής Εξοικονόμησης στη Διεργασία Παραγωγής PF Ρητινών

	ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ	
	Θερμή Παροχή (kW)	Ψυχρή Παροχή (kW)
Ρεύματα Διεργασίας	2638	4536
PF Ρητίνες - Εξατμιστήρας	560	560
Συνολικές Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες	3198	5096
	ΤΕΛΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ	
	Θερμή Παροχή (kW)	Ψυχρή Παροχή (kW)
Ρεύματα Διεργασίας	193	2652
PF Ρητίνες - Εξατμιστήρας	560	0
Συνολικές Τελικές Ενεργειακές Ανάγκες	753	2652
Συνολικές Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες	3198	5096
Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	76.5%	48.0%

4.9 Διεργασία Παραγωγής Πολυουρεθάνης

4.9.1 Απαιτήσεις σε Θερμή και Ψυχρή Παροχή

Οι ενεργειακές ανάγκες της διεργασίας δεν είναι μεγάλες, κυρίως αφορούν τη θέρμανση και ψύξη των ρευμάτων της διεργασίας και τη λειτουργία ενός εξατμιστήρα και ενός δοχείου εκτόνωσης (flash), όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα του διαγράμματος ροής.



ΣΧΗΜΑ 4-14 Τμήμα Διαγράμματος Ροής Διεργασίας Παραγωγής Πολυουρεθάνης

Στο παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι ενεργειακές απαιτήσεις των ρευμάτων της διεργασίας παραγωγής Πολυουρεθάνης από λιγνίνη, όπως αυτές προέκυψαν από τη προσομοίωση της διεργασίας στο Aspen Plus V7.2. Στη συνέχεια, οι θερμοκρασίες των ψυχρών ρευμάτων μετατοπίζονται κατά $+\Delta T_{\min}/2$, ενώ οι θερμοκρασίες των θερμών ρευμάτων μετατοπίζονται κατά $-\Delta T_{\min}/2$, προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος του Κόμβου Ανάσχεσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-27 Πίνακας Ενεργειακών Δεδομένων των Ρευμάτων της Διεργασίας Παραγωγής Πολυουρεθάνης

$\Delta T_{\min} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$						
Όνομασία Ρεύματος	$T_{\text{αρχ}}$	$T_{\text{τελ}}$	Θερμικό Φορτίο	Είδος Ρεύματος	$T_{\text{αρχ,μετατ.}}$	$T_{\text{τελ,μετατ.}}$
	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	kW		$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$
PU – 14	103.5	23	-138.9	ΘΕΡΜΟ	93.5	13.0
PU – 22	-4	25	31.6	ΨΥΧΡΟ	6.0	35.0
PU – 25	25	70	216.7	ΨΥΧΡΟ	35.0	80.0
PU – FD	25	25.1	51.2	ΨΥΧΡΟ	35.0	35.1
PU – R1	25	24.9	-25.3	ΘΕΡΜΟ	15.0	14.9

Από τα παραπάνω δεδομένα του πίνακα μπορούμε να υπολογίσουμε τις συνολικές αρχικές ανάγκες θερμής και ψυχρής παροχής, για το σύνολο των ρευμάτων της διεργασίας. Οι συνολικές αρχικές ανάγκες για τα ρεύματα της διεργασίας (που εξήχθησαν απ' το μοντέλο προσομοίωσης της διεργασίας στο Aspen Plus V7.2) είναι:

Θερμή Παροχή = 300 kW

Ψυχρή Παροχή = 164 kW

Επίσης, το μοντέλο προσομοίωσης της παραγωγικής διαδικασίας περιλαμβάνει έναν εξατμιστήρα μίας βαθμίδας, ο οποίος λειτουργεί στις παρακάτω συνθήκες:

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-28 Πίνακας Συνθηκών Λειτουργίας Ενεργοβόρων Τμημάτων Εξοπλισμού της Διεργασίας Παραγωγής Πολυουρεθάνης

Όνομασία Εξοπλισμού	$T_{\text{αναβρ.}}$	$T_{\text{συμπ.}}$	Θερμικό Φορτίο	Πίεση Λειτουργίας
	°C	°C	kW	bar
EV-1 (Εξατμιστήρας 1 βαθμίδας)	103.5	100	560	1

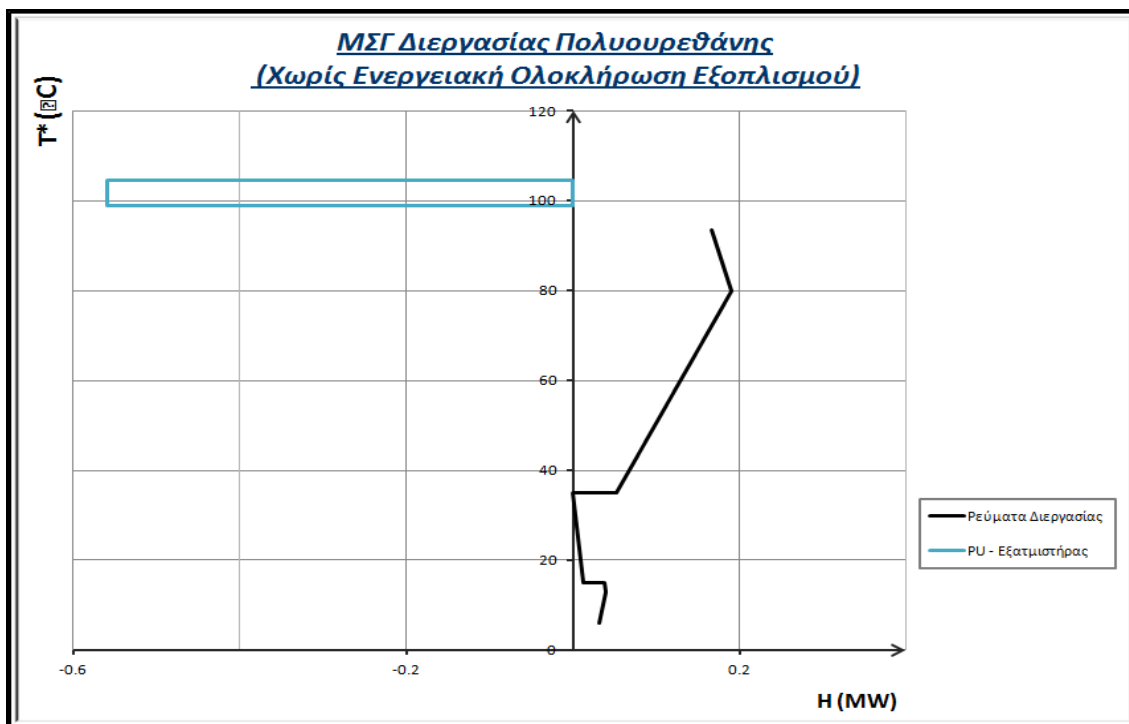
4.9.2 Ενεργειακή Ολοκλήρωση

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο του Κόμβου Ανάσχεσης για τη διεργασία της πολυουρεθάνης, κατασκευάζουμε το Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα της διεργασίας, στο οποίο ο εξατμιστήρας αναπαρίσταται ως ορθογώνιο παραλληλόγραμμο κουτί. Όπως φαίνεται στο ΜΣΓ που ακολουθεί, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα απ' την εφαρμογή της μεθόδου (χωρίς ενεργειακή ολοκλήρωση του εξατμιστήρα με τα ρεύματα της διεργασίας) :

$$T_{\text{pinch}} = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{\text{hot,min}} = 727 \text{ kW (για τα ρεύματα διεργασίας και τον εξατμιστήρα)}$$

$$Q_{\text{cold,min}} = 592 \text{ kW (για τα ρεύματα διεργασίας και τον εξατμιστήρα)}$$



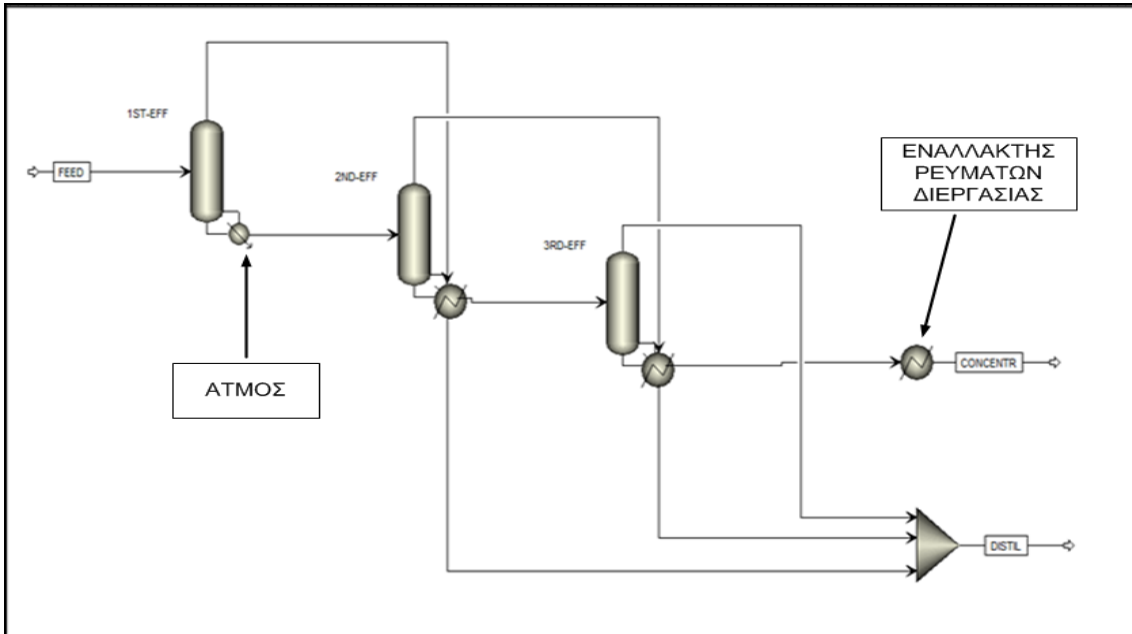
ΓΡΑΦΗΜΑ 4-15 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Διεργασίας Παραγωγής Πολυουρεθάνης (PU), χωρίς ενεργειακή ολοκλήρωση του εξοπλισμού διαχωρισμού

Απ'το ΜΣΓ της διεργασίας παρατηρούμε ότι υπάρχει περιθώριο ενεργειακής ολοκλήρωσης του εξατμιστήρα με τα ρεύματα της διεργασίας, αλλά για να έχουμε σημαντική εξοικονόμηση πρέπει να “σπάσει” ο εξατμιστήρας σε περισσότερες βαθμίδες μικρότερου φορτίου. Λόγω του σχήματος του GCC, η καλύτερη εξοικονόμηση επιτυγχάνεται όταν έχουμε τρεις βαθμίδες, με τις συνθήκες λειτουργίας που αναφέρονται στο παρακάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-29 Πίνακας Συνθηκών Λειτουργίας των τριών βαθμίδων του Εξατμιστήρα της Διεργασίας Παραγωγής Πολυουρεθάνης

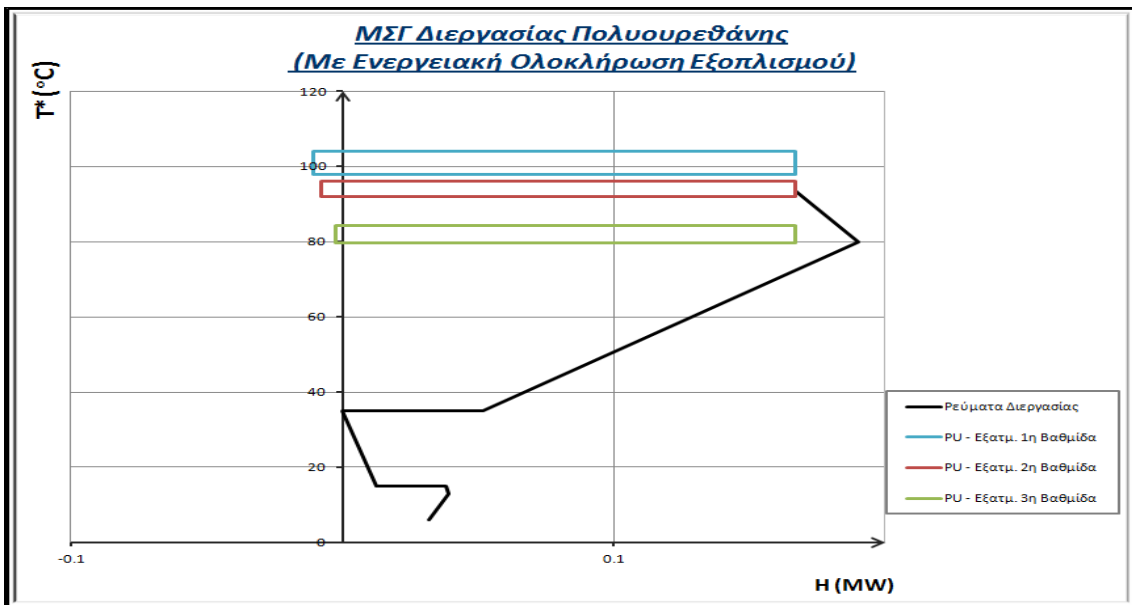
Όνομασία Εξοπλισμού	$T_{\text{αναβρ.}}$	$T_{\text{συμπ.}}$	Θερμικό Φορτίο	Ροή Αποστάγματος	Πίεση Λειτουργίας
	°C	°C	kW	kg/h	atm
EV-1 (1 ^η βαθμίδα)	102	100	177.8	170	1
EV-1 (2 ^η βαθμίδα)	94	93.9	174.6	305	0.8
EV-1 (3 ^η βαθμίδα)	82.2	81.7	169.6	307	0.5

Το νέο διάγραμμα ροής που προκύπτει, περιλαμβάνει τους τρεις μικρότερους εξατμιστήρες σε σειρά, λειτουργώντας κατά φθίνουσα πίεση, έτσι ώστε το φορτίο συμπύκνωσης του ενός να παρέχει την απαραίτητη ενέργεια για τη λειτουργία του αναβραστήρα της επόμενης βαθμίδας, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



ΣΧΗΜΑ 4-15 Εξατμιστήρας Τριών Βαθμίδων σε σειρά, για ενεργειακή ολοκλήρωση με τα ρεύματα της διεργασίας παραγωγής πολυουρεθάνης

Το ΜΣΓ της ολοκληρωμένης διεργασίας με το τρι-βάθμιο εξατμιστήρα, φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.



ΓΡΑΦΗΜΑ 4-16 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Διεργασίας Παραγωγής Πολυουρεθάνης (PU), με ενεργειακή ολοκλήρωση του εξοπλισμού διαχωρισμού

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ενεργειακής εξοικονόμησης που επιτυγχάνεται μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση της διεργασίας, φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-30 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ενεργειακής Εξοικονόμησης στη Διεργασία Παραγωγής Πολυουρεθάνης

	ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ	
	Θερμή Παροχή (kW)	Ψυχρή Παροχή (kW)
Ρεύματα Διεργασίας	300	164
PU - Εξατμιστήρας	560	560
Συνολικές Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες	860	724
	ΤΕΛΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ	
	Θερμή Παροχή (kW)	Ψυχρή Παροχή (kW)
Ρεύματα Διεργασίας	0	32
PU - Εξατμιστήρας	178	11
Συνολικές Τελικές Ενεργειακές Ανάγκες	178	43
Συνολικές Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες	860	724
Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	79,3%	94,1%

5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΣΤΟ ΒΙΟΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟ

5.1 Ανάλυση Μεθοδολογίας

Οι διεργασίες του βιοδιυλιστηρίου που εξετάζονται στη παρούσα εργασία ολοκληρώθηκαν ενεργειακά ως αυτόνομες διεργασίες στο Κεφάλαιο 4. Θεωρώντας όμως ότι βρισκόμαστε στη φάση του σχεδιασμού και της σύνθεσης των διεργασιών, μπορούμε να επεκτείνουμε τα όρια ολοκλήρωσης και να συμπεριλάβουμε περισσότερες διεργασίες, προκειμένου να μελετήσουμε εάν υπάρχουν περαιτέρω περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας. Όπως είδαμε και παραπάνω, οι διεργασίες του βιοδιυλιστηρίου είναι εξαιρετικά ενεργοβόρες, επομένως η εξοικονόμηση ενέργειας είναι καθοριστικός παράγοντας για την βιωσιμότητά του.

Τα ενδιάμεσα προϊόντα του λιγνοκυτταρινούχου βιοδιυλιστηρίου είναι δεδομένα και αποτελούν τη τροφοδοσία για τις διεργασίες που θα δώσουν τα τελικά προϊόντα. Η επιλογή όμως των διεργασιών που θα υλοποιηθούν τελικά, είναι ένας

βαθμός ελευθερίας, διότι απ'το πλήθος των πιθανών προϊόντων που μπορούν να παραχθούν, μόνο ένα μέρος απ'αυτά είναι υψηλής προστιθέμενης αξίας και συνεισφέρουν στη βιωσιμότητα του βιοδιυλιστηρίου. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την τελική επιλογή είναι σαφώς πάρα πολλοί, αλλά το μεγαλύτερο ειδικό βάρος έχουν οι οικονομικοί παράγοντες. Η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία των διεργασιών είναι ένα σημαντικό ποσοστό του λειτουργικού κόστους. Επομένως, η ενεργειακή αξιολόγηση όλων των διεργασιών πρέπει να γίνει με στόχο τον σχεδιασμό ολοκληρωμένων συστημάτων που θα έχουν την ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση. Η μελέτη των αποτελεσμάτων μπορεί να δώσει χρήσιμα συμπεράσματα που θα οδηγήσουν στην ορθή επιλογή συγκεκριμένων διεργασιών.

Θεωρώντας ως χημικό μονοπάτι τη νοητή γραμμή που ενώνει όλες τις διεργασίες μετασχηματισμού των α' υλών σε τελικά προϊόντα, δημιουργείται ένας χάρτης με ένα πλήθος τέτοιων μονοπατιών, που αντιπροσωπεύει το σύνολο της εγκατάστασης του βιοδιυλιστηρίου. Οι διεργασίες αυτές δεν υφίστανται όμως στη πραγματικότητα, αλλά βρίσκονται υπό αξιολόγηση για την επιλογή των πλέον κατάλληλων και βιώσιμων από οικονομικής άποψης. Κάθε ένα απ'αυτά τα μονοπάτια μπορεί να περιλαμβάνει διάφορες διεργασίες, ανάλογα με τα τελικά προϊόντα που προκύπτουν.

Η ενεργειακή αξιολόγηση του κάθε μονοπατιού θα γίνει με εργαλείο την "Ανάλυση Συνολικής Μονάδας" (Total Site Analysis). Με το εργαλείο αυτό δεν αξιολογούμε τη κάθε διεργασία χωριστά, αλλά όλες μαζί, στα όρια της συνολικής εγκατάστασης της βιομηχανίας. Όπως αναφέραμε στο Κεφάλαιο 2.3, η προσέγγιση αυτή στοχεύει στην άμεση ή έμμεση μεταφορά θερμότητας από διεργασία σε διεργασία, και έχει εφαρμοστεί σε υπάρχουσες χημικές βιομηχανίες. Εάν όμως χρησιμοποιήσουμε τη προσέγγιση αυτή για την ενεργειακή αξιολόγηση πιθανών συνδυασμών διεργασιών, τότε μπορούμε να διαμορφώσουμε διάφορα σενάρια σχετικά με το ποιές διεργασίες θα υλοποιηθούν μέσα στην εγκατάσταση και θα ολοκληρωθούν σε ένα ενιαίο σύστημα.

Ανάλογα με τον αριθμό των ενδιάμεσων προϊόντων, θεωρούμε ότι θα έχουμε αντίστοιχο αριθμό διεργασιών για το μετασχηματισμό τους σε τελικά προϊόντα. Άρα, το κάθε μονοπάτι περιλαμβάνει τη κεντρική διεργασία, τις διεργασίες των τελικών προϊόντων και πιθανώς κάποιες ενδιάμεσες διεργασίες. Ξεκινάμε με βασικό σενάριο ότι

κάθε διεργασία του μονοπατιού ολοκληρώνεται ενεργειακά ως ανεξάρτητη μονάδα. Στη συνέχεια αυξάνουμε τον αριθμό των διεργασιών που συμμετέχουν στην ολοκληρωμένη συνολική Μονάδα (2, 3, 4, κτλ) και καταλήγουμε στο τελικό σενάριο όπου όλες οι διεργασίες του μονοπατιού βρίσκονται μέσα στη συνολική εγκατάσταση και είναι ενεργειακά ολοκληρωμένες μεταξύ τους.

Σε κάθε πιθανό σενάριο συνδυασμού διεργασιών ο υπολογισμός της ελάχιστης απαιτούμενης θερμής και ψυχρής παροχής γίνεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του Κόμβου Ανάσχεσης. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει, για κάθε υποψήφιο μονοπάτι, η βέλτιστη ενεργειακή εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται, ως αποτέλεσμα του σχεδιασμού ενός ολοκληρωμένου συγκροτήματος διεργασιών. Η τελική επιλογή είναι το μονοπάτι που έχει τις ελάχιστες απαιτήσεις σε θερμή και ψυχρή παροχή και την μέγιστη ανάκτηση θερμότητας.

Το βέλτιστο σενάριο για κάθε μονοπάτι είναι λογικά αυτό που ολοκληρώνει όλες τις διεργασίες μαζί, διότι προκύπτει μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Επειδή, όμως, υπάρχουν πρακτικές δυσκολίες στην άμεση ολοκλήρωση όλων των διεργασιών, η ανάλυση όλων των πιθανών σεναρίων ολοκλήρωσης, ουσιαστικά αποτυπώνει το ενεργειακό κόστος που θα είχε η τοποθέτηση κάποιας διεργασίας έξω απ'τα όρια του ολοκληρωμένου συγκροτήματος. Επομένως, με αυτή τη μεθοδολογία επιτυγχάνουμε αφ'ενός τον εντοπισμό του βέλτιστου (ενεργειακά) μονοπατιού πιθανών διεργασιών προς υλοποίηση, και αφ'ετέρου την αξιολόγηση του ενεργειακού κόστους που θα έχει η παρέκκλιση από το στόχο της ολοκλήρωσης όλων των διεργασιών μαζί.

Συγκεκριμένα, η μεθοδολογία που αναλύθηκε παραπάνω, περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- Καθορισμός όλων των επιτρεπτών πιθανών συνδυασμών των τελικών διεργασιών
- Καθορισμός των μονοπατιών σύνδεσης όλων των διεργασιών μεταξύ α' υλών και τελικών προϊόντων
- Εφαρμογή μεθόδου “Ανάλυση Συνολικής Μονάδας” με βαθμό ελευθερίας τον αριθμό διεργασιών που εισέρχονται στη Συνολική Μονάδα
- Κατασκευή Μεγάλου Σύνθετου Γραφήματος (ΜΣΓ) με εφαρμογή της μεθόδου του Κόμβου Ανάσχεσης, για κάθε πιθανό σενάριο ολοκλήρωσης σε κάθε μονοπάτι διεργασιών

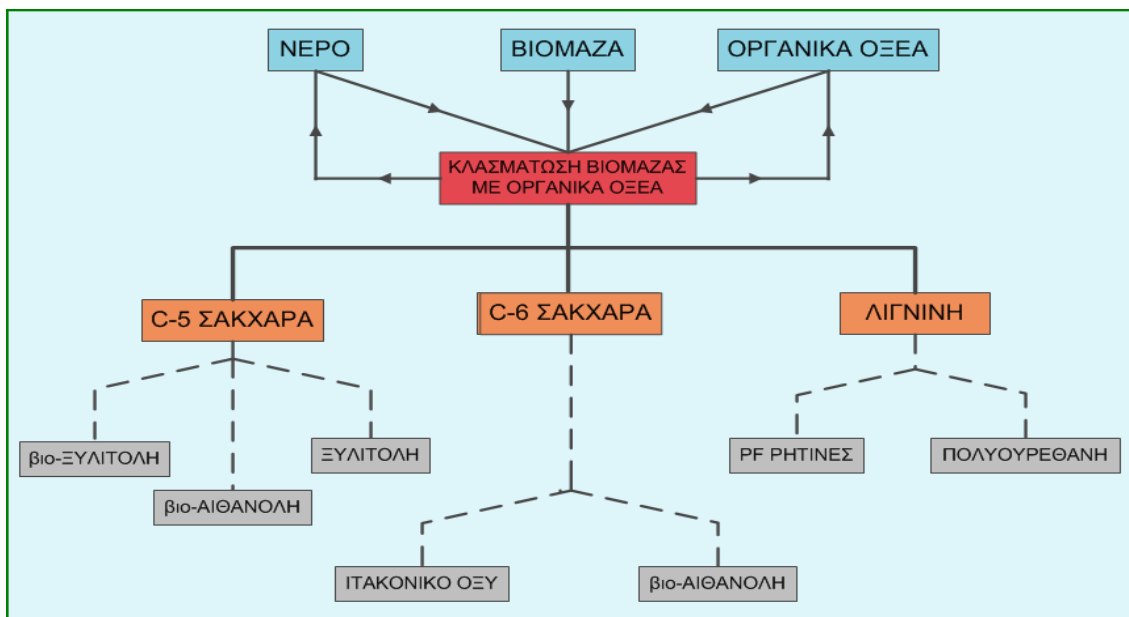
- Ολοκλήρωση των ενεργοβόρων τμημάτων εξοπλισμού (αποστακτική στήλη, εξατμιστήρες) με τα ρεύματα των υπολοίπων διεργασιών, ανάλογα με τη μορφή του ΜΣΓ
- Υπολογισμός ελάχιστης απαιτούμενης Θερμής και Ψυχρής παροχής
- Σύγκριση αποτελεσμάτων – Επιλογή μονοπατιού με την ελάχιστη ενεργειακή απαίτηση για θέρμανση και ψύξη και την μέγιστη ανάκτηση ενέργειας

5.2 Εφαρμογή σε Επιλεγμένες Διεργασίες Βιοδιυλιστηρίου

Οι διεργασίες που θα μελετήσουμε προκειμένου να επιλέξουμε το βέλτιστο ενεργειακό συνδυασμό αυτών, είναι οι εξής:

- (1). Διεργασία Κλασμάτωσης Βιομάζας με Οργανικά Οξέα
- (2). Διεργασία Παραγωγής βιο-Ξυλιτόλης (από C5 σάκχαρα)
- (3). Διεργασία Παραγωγής Ξυλιτόλης με καταλύτη (από C5 σάκχαρα)
- (4). Διεργασία Παραγωγής βιο-Αιθανόλης (από C5 σάκχαρα)
- (5). Διεργασία Παραγωγής βιο-Αιθανόλης (από C6 σάκχαρα)
- (6). Διεργασία Παραγωγής Ιτακονικού Οξέος (από C6 σάκχαρα)
- (7). Διεργασία Παραγωγής PF Ρητινών (από λιγνίνη)
- (8). Διεργασία Παραγωγής Πολυουρεθάνης (από λιγνίνη)

Όλα τα πιθανά μονοπάτια ξεκινούν από τη κεντρική διεργασία της κλασμάτωσης βιομάζας και καταλήγουν στις διεργασίες που δίνουν τα τελικά προϊόντα. Άρα, σε κάθε μονοπάτι είναι υποχρεωτική η παρουσία της διεργασίας (1), μίας εκ των (2), (3) ή (4) που προέρχονται από τα C5 σάκχαρα, μίας εκ των (5) και (6) που προέρχονται από τα C6 σάκχαρα, και μία εκ των (7) και (8) που προέρχονται από τη λιγνίνη. Επομένως, για το βιοδιυλιστήριο που μελετάμε σε αυτή την εργασία, ο αριθμός των πιθανών μονοπατιών είναι το αποτέλεσμα των συνδυασμών ανά τρία όλων των υποψήφιων τελικών προϊόντων. Ο περιορισμός που τίθεται είναι τα προϊόντα αυτά να μην προέρχονται από το ίδιο ενδιάμεσο προϊόν. Θεωρούμε δηλαδή, ότι όλη η ποσότητα ενός ενδιάμεσου μετασχηματίζεται σε ένα συγκεκριμένο τελικό προϊόν. Διαφορετικά, θα πρέπει να κατασκευαστούν περισσότερες μονάδες, γεγονός που συνεπάγεται μεγαλύτερο πάγιο κόστος. Επίσης, θα υπήρχε το θέμα της κατανομής της τροφοδοσίας στα τελικά προϊόντα, δηλαδή πχ πόσο % λιγνίνης θα χρησιμοποιούνταν για τη παραγωγή PF ρητινών και πόσο για τη παραγωγή πολυουρεθάνης.



ΣΧΗΜΑ 5-1 “Χάρτης” όλων των υποψήφιων “μονοπατιών” με τις διεργασίες μετασηματισμού των α΄ υλών σε τελικά προϊόντα

Τα μονοπάτια που θα αξιολογήσουμε είναι συνολικά δώδεκα, όπως προκύπτει απ΄ το δεντροδιάγραμμα των πιθανών προϊόντων του βιοδυλιστηρίου που εξετάζουμε.

Τα μονοπάτια αυτά (κάνοντας όλους του πιθανούς συνδυασμούς) είναι:

1. Κλασμάτωση → βιο-Ευλιτόλη + Ιτακονικό Οξύ + PF Ρητίνες
2. Κλασμάτωση → βιο-Ευλιτόλη + Ιτακονικό Οξύ + Πολυουρεθάνη
3. Κλασμάτωση → βιο-Ευλιτόλη + C6 βιο-Αιθανόλη + PF Ρητίνες
4. Κλασμάτωση → βιο-Ευλιτόλη + C6 βιο-Αιθανόλη + Πολυουρεθάνη
5. Κλασμάτωση → Ευλιτόλη (με καταλύτη) + Ιτακονικό Οξύ + PF Ρητίνες
6. Κλασμάτωση → Ευλιτόλη (με καταλύτη) + Ιτακονικό Οξύ + Πολυουρεθάνη
7. Κλασμάτωση → Ευλιτόλη (με καταλύτη) + C6 βιο-Αιθανόλη + PF Ρητίνες
8. Κλασμάτωση → Ευλιτόλη (με καταλύτη) + C6 βιο-Αιθανόλη + Πολυουρεθάνη
9. Κλασμάτωση → C5 βιο-Αιθανόλη + Ιτακονικό Οξύ + PF Ρητίνες
10. Κλασμάτωση → C5 βιο-Αιθανόλη + Ιτακονικό Οξύ + Πολυουρεθάνη
11. Κλασμάτωση → C5 βιο-Αιθανόλη + C6 βιο-Αιθανόλη + PF Ρητίνες
12. Κλασμάτωση → C5 βιο-Αιθανόλη + C6 βιο-Αιθανόλη + Πολυουρεθάνη

Σε κάθε μονοπάτι η ενεργειακή αξιολόγηση ξεκινά με βασικό σενάριο ότι κάθε διεργασία ολοκληρώνεται ενεργειακά ως ανεξάρτητη μονάδα. Στη συνέχεια

ολοκληρώνουμε περισσότερες διεργασίες μαζί (ανά δύο και ανά τρεις), θεωρώντας ότι μπορούν να βρίσκονται κοντά, και καταλήγουμε στο τελικό σενάριο όπου όλες οι διεργασίες είναι ολοκληρωμένες μαζί με τη κεντρική διεργασία της κλασμάτωσης βιομάζας. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται για κάθε μονοπάτι δώδεκα πιθανά σενάρια ολοκλήρωσης και σε κάθε ένα από αυτά εφαρμόζουμε τη μέθοδο του Κόμβου Ανάσχεσης, προκειμένου να υπολογίσουμε τις ελάχιστες απαιτήσεις σε θερμή και ψυχρή παροχή.

5.3 Αποτελέσματα Ενεργειακής Ολοκλήρωσης Συνολικής Μονάδας

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί αναλυτικά η διαδικασία και τα αποτελέσματα για την ενεργειακή ολοκλήρωση ενός μονοπατιού διεργασιών (το οποίο εμφάνισε τη μεγαλύτερη ανάκτηση ενέργειας), ενώ τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα όλων των συνδυασμών παρουσιάζονται στο “Παράρτημα Β”.

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα ελαχιστοποίησης της θερμής και ψυχρής παροχής για τις ανάγκες του βιοδιωλιστηρίου, αναζητείται ο βέλτιστος συνδυασμός των διεργασιών που θα ολοκληρωθούν στην ενιαία Μονάδα. Η τελική λύση του προβλήματος περιλαμβάνει τη κεντρική διεργασία (κλασμάτωση βιομάζας) και άλλες τρεις που τροφοδοτούνται από τα τρία ενδιάμεσα προϊόντα. Επομένως, οι δυνατές επιλογές (N) που υπάρχουν για την ολοκλήρωση των τεσσάρων διεργασιών, είναι οι συνδυασμοί των τεσσάρων ανά δύο, ανά τρεις και ανά τέσσερις. Επιπλέον, υπάρχει και η βασική επιλογή να ολοκληρωθεί κάθε μία μόνη της, δηλαδή κάθε διεργασία να είναι μια ανεξάρτητη μονάδα. Επομένως, ισχύει ότι :

$$N = 1 + \binom{4}{2} + \binom{4}{3} + \binom{4}{4} = 1 + \frac{4!}{2!*2!} + \frac{4!}{3!*1!} + \frac{4!}{4!*0!} = 1 + 6 + 4 + 1 = 12$$

Θεωρούμε ότι οι διεργασίες που επιλέγονται στο τελικό σχήμα είναι η διεργασία παραγωγής βιο-Ξυλιτόλης, η διεργασία παραγωγής Ιτακονικού Οξέος και η διεργασία παραγωγής PF Ρητινών (Μονοπάτι 1). Τα πιθανά σενάρια ολοκλήρωσης, για αυτό το μονοπάτι, φαίνονται στο παρακάτω πίνακα:

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-1 Πιθανά σενάρια ολοκλήρωσης των τεσσάρων διεργασιών του μονοπατιού Νο 1 σε 1 έως 4 ανεξάρτητες, ολοκληρωμένες Μονάδες.

1.	ΚΛΑΣΜΑΤΩΣΗ ---> βιο-ΞΥΛΙΤΟΛΗ + ΙΤΑΚΟΝΙΚΟ ΟΞΥ + PF ΡΗΤΙΝΕΣ			
	ΜΟΝΑΔΑ 1	ΜΟΝΑΔΑ 2	ΜΟΝΑΔΑ 3	ΜΟΝΑΔΑ 4
1	ORGANOSOLV	XYL BIO	ITAC	PF RES
2	ORGANOSOLV - XYL BIO	ITAC	PF RES	-
3	ORGANOSOLV - ITAC	XYL BIO	PF RES	-
4	ORGANOSOLV - PF RES	XYL BIO	ITAC	-
5	ORGANOSOLV - XYL BIO	ITAC - PF RES	-	-
6	ORGANOSOLV - ITAC	XYL BIO - PF RES	-	-
7	ORGANOSOLV - PF RES	XYL BIO - ITAC	-	-
8	ORGANOSOLV - XYL BIO - ITAC	PF RES	-	-
9	ORGANOSOLV - XYL BIO - PF RES	ITAC	-	-
10	ORGANOSOLV - ITAC - PF RES	XYL BIO	-	-
11	XYL BIO - ITAC - PF RES	ORGANOSOLV	-	-
12	ORGANOSOLV - XYL BIO - ITAC - PF RES	-	-	-

Σημείωση: ORGANOSOLV = ΚΛΑΣΜΑΤΩΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΟΞΕΑ
 XYL BIO = βιο-ΞΥΛΙΤΟΛΗ
 ITAC = ΙΤΑΚΟΝΙΚΟ ΟΞΥ
 PF RES = PF ΡΗΤΙΝΕΣ

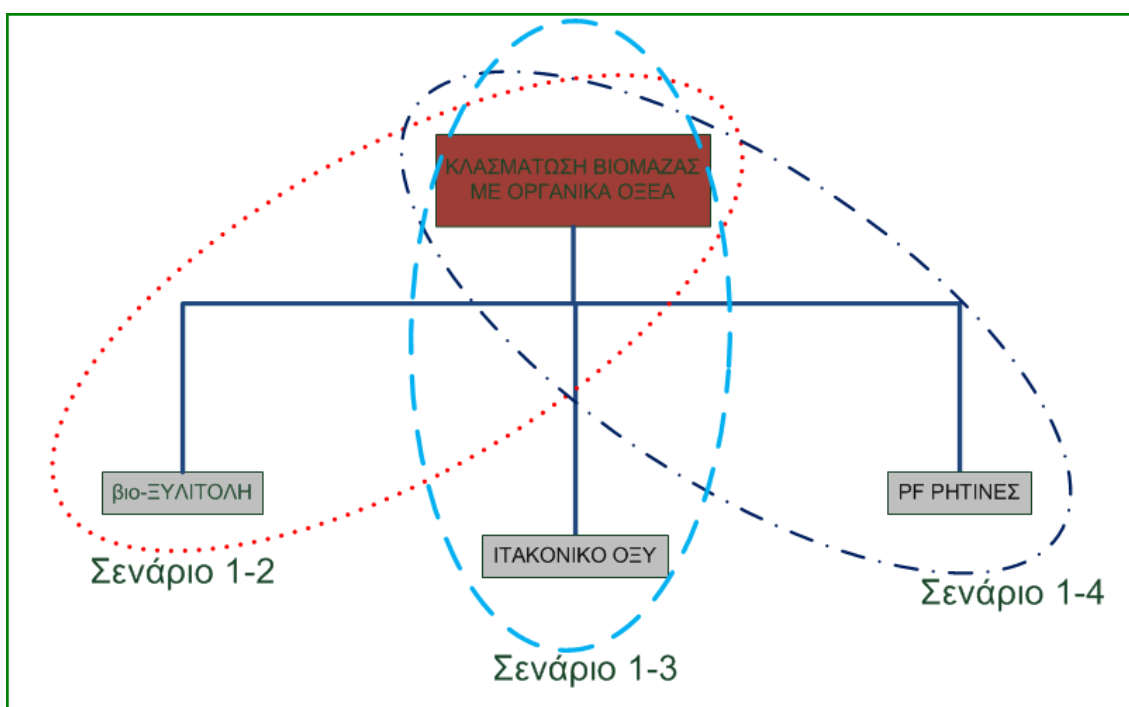
Στο πρώτο σενάριο (1-1) κάθε διεργασία αποτελεί μια ξεχωριστή μονάδα και μπορεί να ολοκληρωθεί ενεργειακά ανεξάρτητα από τις άλλες. Οι ανάγκες σε θερμή και ψυχρή παροχή υπολογίστηκαν στο Κεφάλαιο 4 και παρουσιάζονται συνοπτικά στο παρακάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-2 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα της ενεργειακής ολοκλήρωσης των διεργασιών χωρίς μεταφορά θερμότητας μεταξύ τους

ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	ΘΕΡΜΗ ΠΑΡΟΧΗ ΜΕΤΑ (kW)	ΘΕΡΜΗ ΠΑΡΟΧΗ ΠΡΙΝ (kW)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ	ΨΥΧΡΗ ΠΑΡΟΧΗ ΜΕΤΑ (kW)	ΨΥΧΡΗ ΠΑΡΟΧΗ ΠΡΙΝ (kW)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ
ΚΛΑΣΜΑΤΩΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	37873	152130	75.1%	22730	138996	83.6%
βιο-ΞΥΛΙΤΟΛΗ	9530	29002	67.1%	11316	30788	63.2%
ΙΤΑΚΟΝΙΚΟ ΟΞΥ	8548	42106	79.7%	20156	53714	62.5%
PF ΡΗΤΙΝΕΣ	753	3198	76.5%	2652	5096	48.0%

Τα σενάρια 1-2 έως 1-4 περιλαμβάνουν τη βασική διεργασία της κλασμάτωσης ολοκληρωμένη ενεργειακά με μία εκ των τριών άλλων που δίνουν τα τελικά προϊόντα,

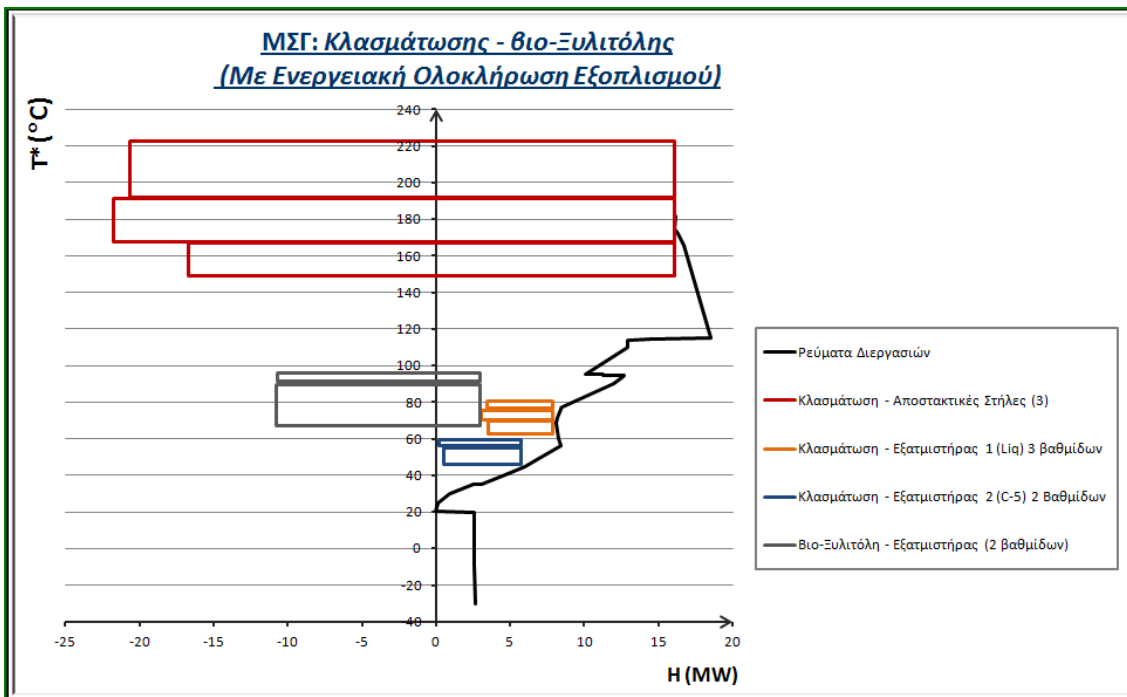
όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Οι άλλες δύο παραμένουν ανεξάρτητες η μία με την άλλη.



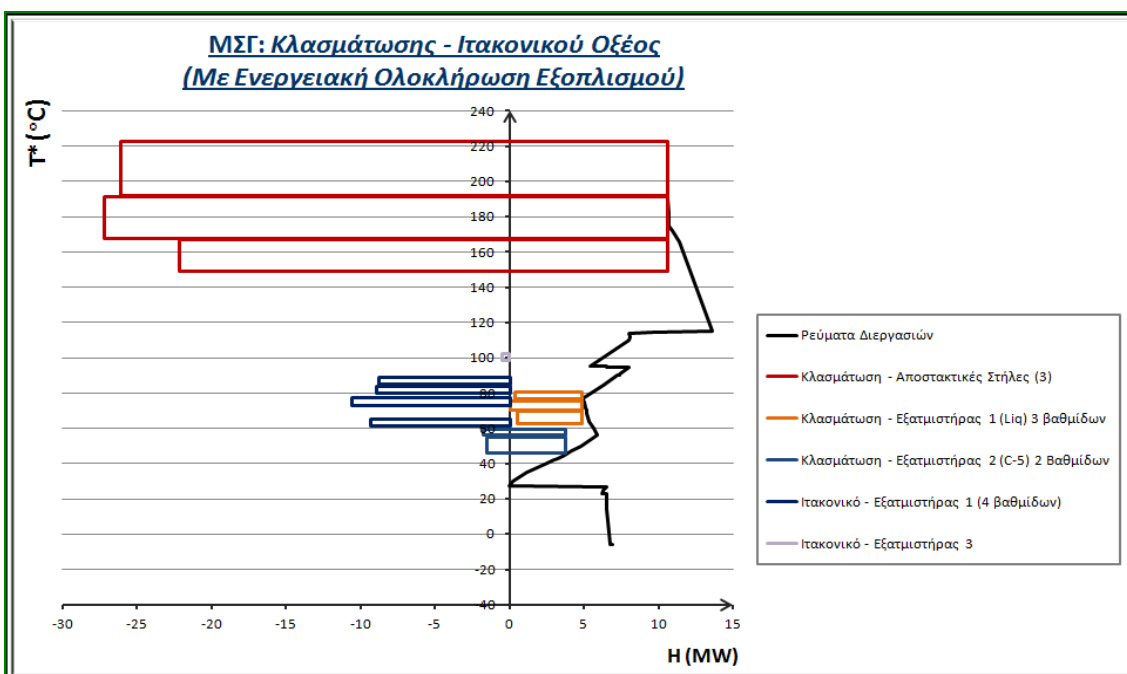
ΣΧΗΜΑ 5-2 Όρια Ενεργειακής Ολοκλήρωσης Διεργασιών ανά δύο (Σενάρια 1-2 έως 1-4)

Με τη μέθοδο του Κόμβου Ανάσχεσης κατασκευάζουμε τα Μεγάλα Σύνθετα Γραφήματα των συνολικών ολοκληρωμένων Μονάδων και προσδιορίζουμε την ελάχιστη απαιτούμενη θερμότητα και ψυχρή παροχή. Τα ενεργοβόρα τμήματα εξοπλισμού ολοκληρώνονται πάνω ή κάτω απ'το Κόμβο Ανάσχεσης και επιλέγουμε κατάλληλα τον αριθμό και των βαθμίδων και τη πίεση λειτουργίας κάθε βαθμίδα, έτσι ώστε να επιτύχουμε τη μεγαλύτερη δυνατή ανάκτηση θερμότητας. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται, κατά τη προσομοίωση των διεργασιών στο Aspen Plus, στους περιορισμούς που υπάρχουν λόγω της θερμικής διάσπασης των προϊόντων και στη τήρηση των προδιαγραφών σύστασης. Δηλαδή, ενώ το ΜΣΓ μπορεί να προσφέρει δυνατότητες για μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας, οι περιορισμοί της διεργασίας δεν επιτρέπουν πάντα την εκμετάλλευση αυτής της δυνατότητας.

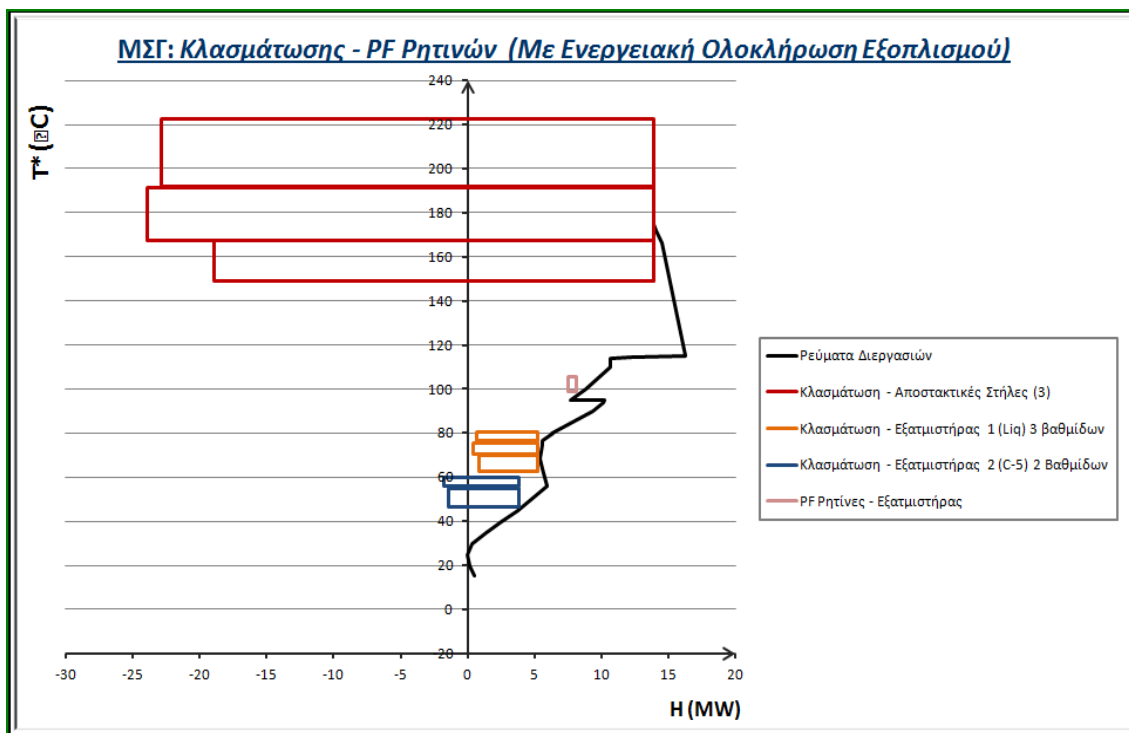
Τα τελικά ΜΣΓ για τα σενάρια 1-2 έως 1-4 είναι τα παρακάτω:



ΓΡΑΦΗΜΑ 5-1 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Συνολικής Μονάδας των διεργασιών "Κλασμάτωσης Βιομάζας" και "βιο-Ξυλιτόλης" (Σενάριο 1-2)

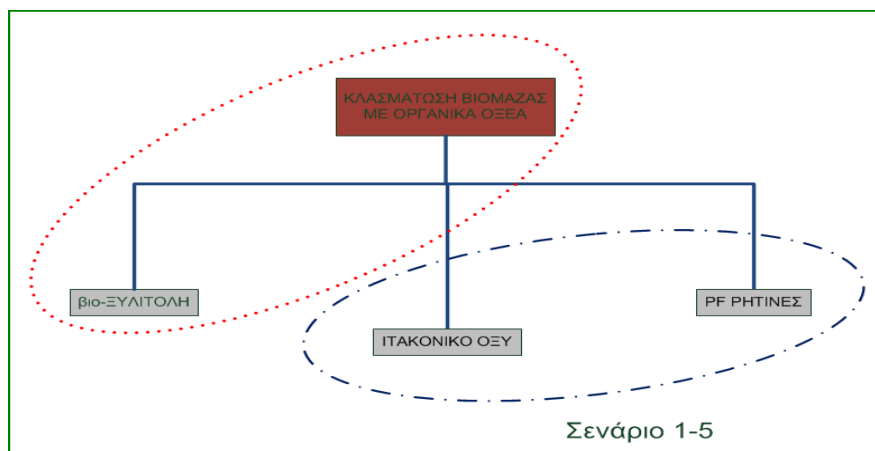


ΓΡΑΦΗΜΑ 5-2 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Συνολικής Μονάδας των διεργασιών "Κλασμάτωσης Βιομάζας" και "Ιτακονικού Οξέος" (Σενάριο 1-3)



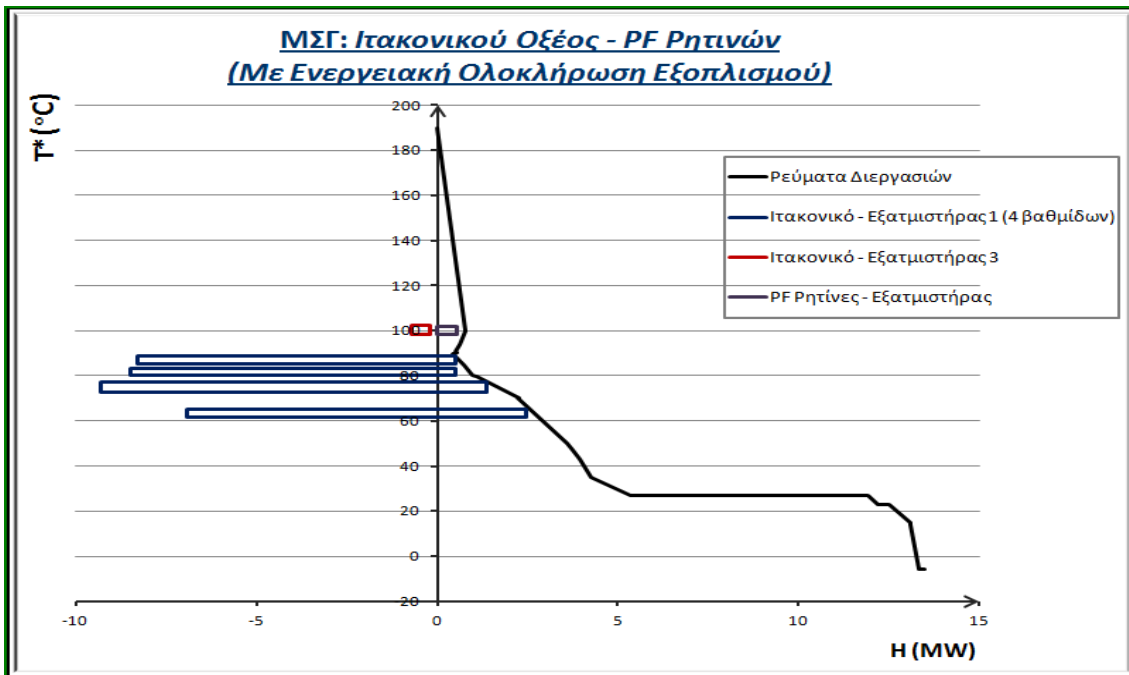
ΓΡΑΦΗΜΑ 5-3 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Συνολικής Μονάδας των διεργασιών "Κλασμάτωσης Βιομάζας" και "PF Ρητινών" (Σενάριο 1-4)

Εάν ολοκληρώσουμε τη κεντρική διεργασία με μία μόνο διεργασία τελικού προϊόντος, τότε υπάρχει η επιλογή για τις άλλες δύο διεργασίες, που αφήνονται εκτός της κεντρικής Μονάδας, να ολοκληρωθούν ανεξάρτητα η μία με την άλλη (σενάρια 1-2 έως 1-4) ή να ολοκληρωθούν μαζί σε ένα άλλο υποσυγκρότημα - υπομονάδα. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται τα σενάρια 1-5 έως 1-7 με τους συνδυασμούς "Ιτακονικό Οξύ – PF Ρητίνες", "βιο-Ξυλιτόλη – PF Ρητίνες" και "βιο-Ξυλιτόλη – Ιτακονικό Οξύ".

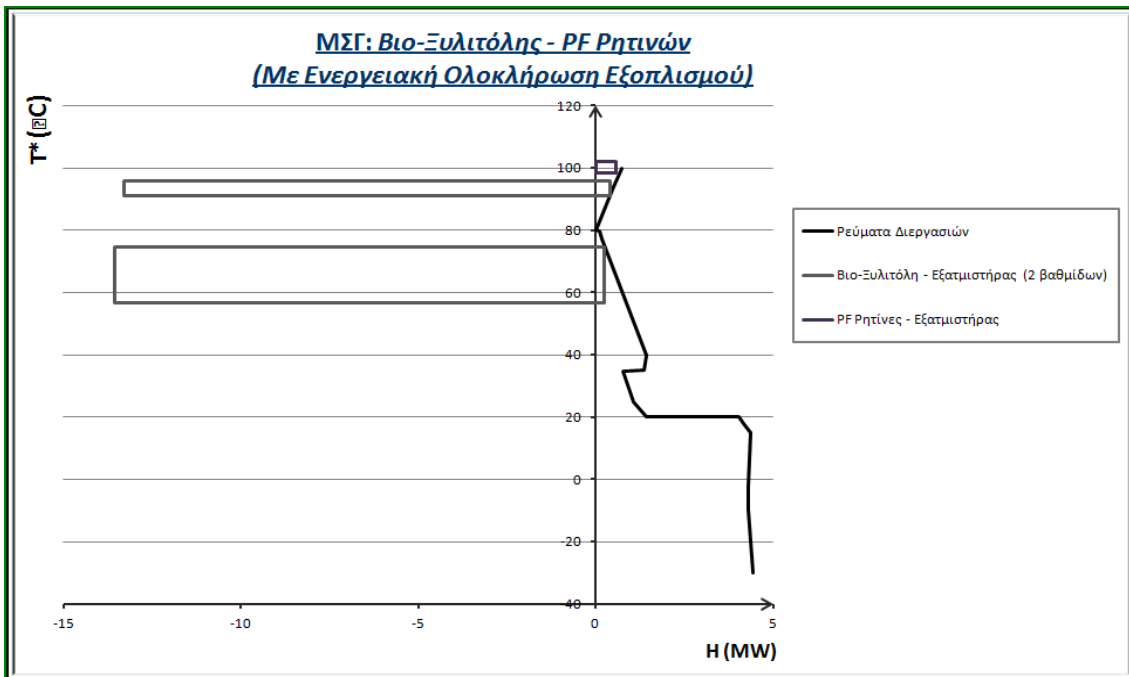


ΣΧΗΜΑ 5-3 Όρια Ενεργειακής Ολοκλήρωσης για το Σενάριο 1-5

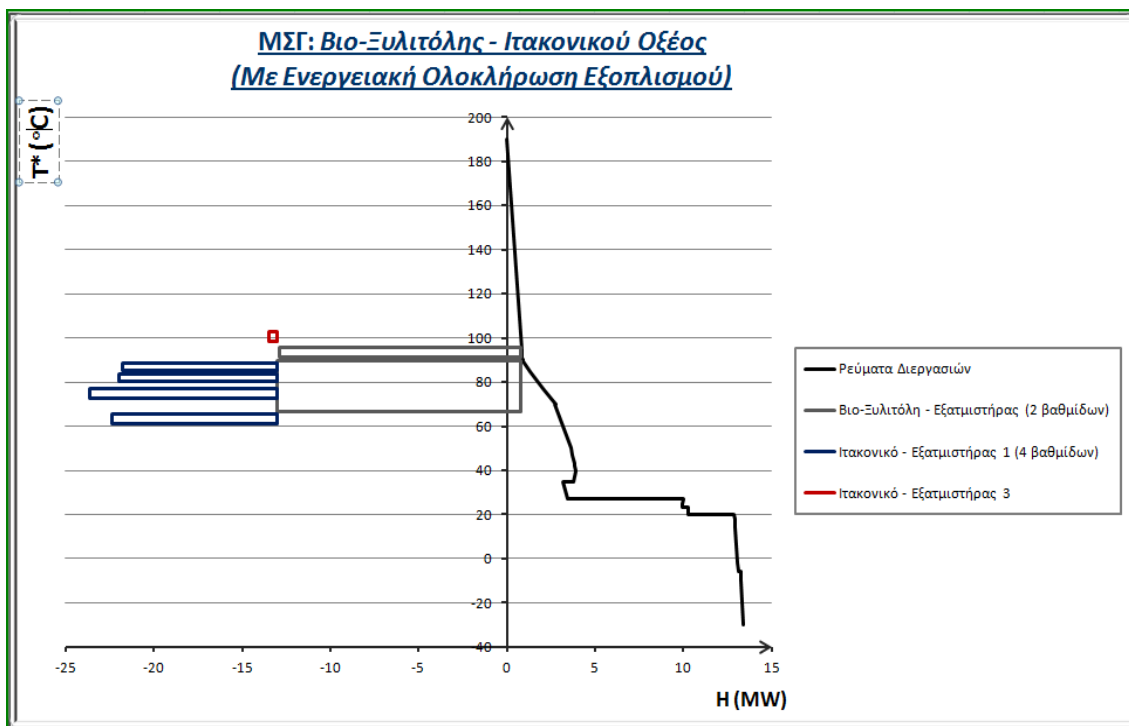
Τα ΜΣΓ για τους συνδυασμούς αυτούς δίνονται στα γραφήματα που ακολουθούν.



ΓΡΑΦΗΜΑ 5-4 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Συνολικής Μονάδας των διεργασιών "Ιτακονικό Οξύ" και "PF Ρητινών" (Σενάριο 1-5)



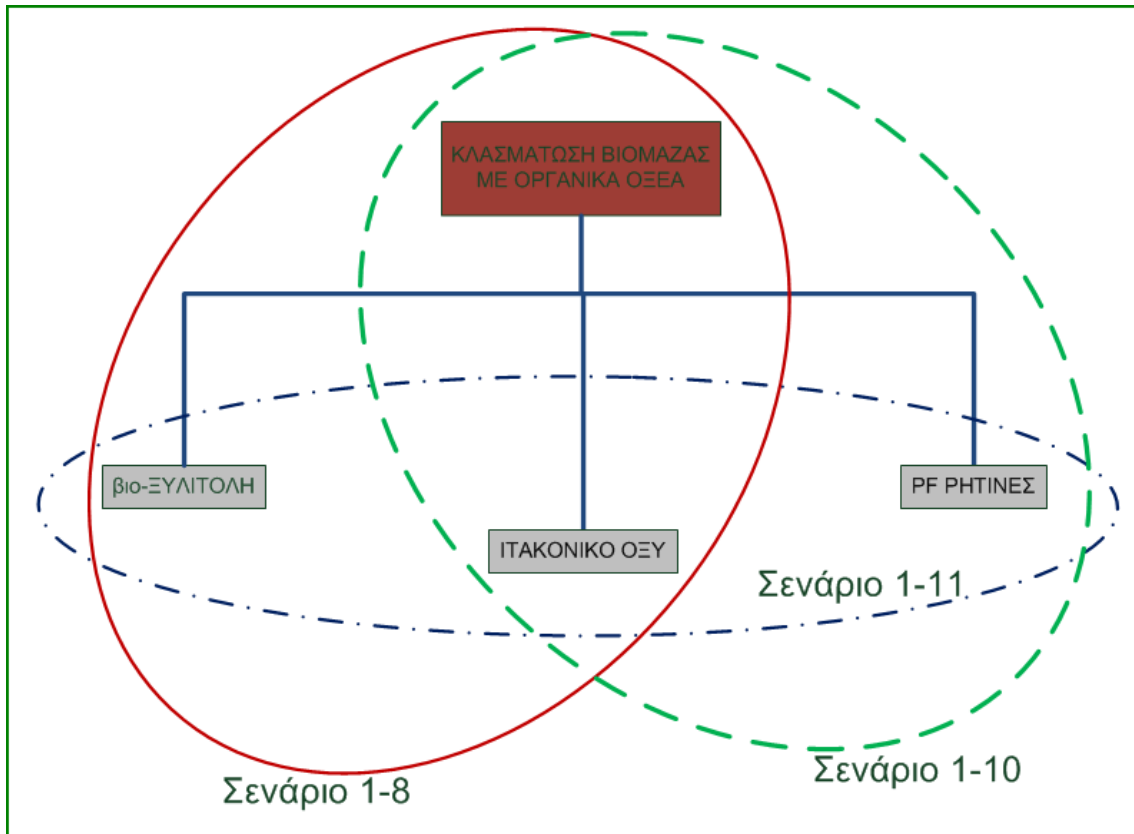
ΓΡΑΦΗΜΑ 5-5 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Συνολικής Μονάδας των διεργασιών "βιο-Ξυλιτόλης" και "PF Ρητινών" (Σενάριο 1-6)



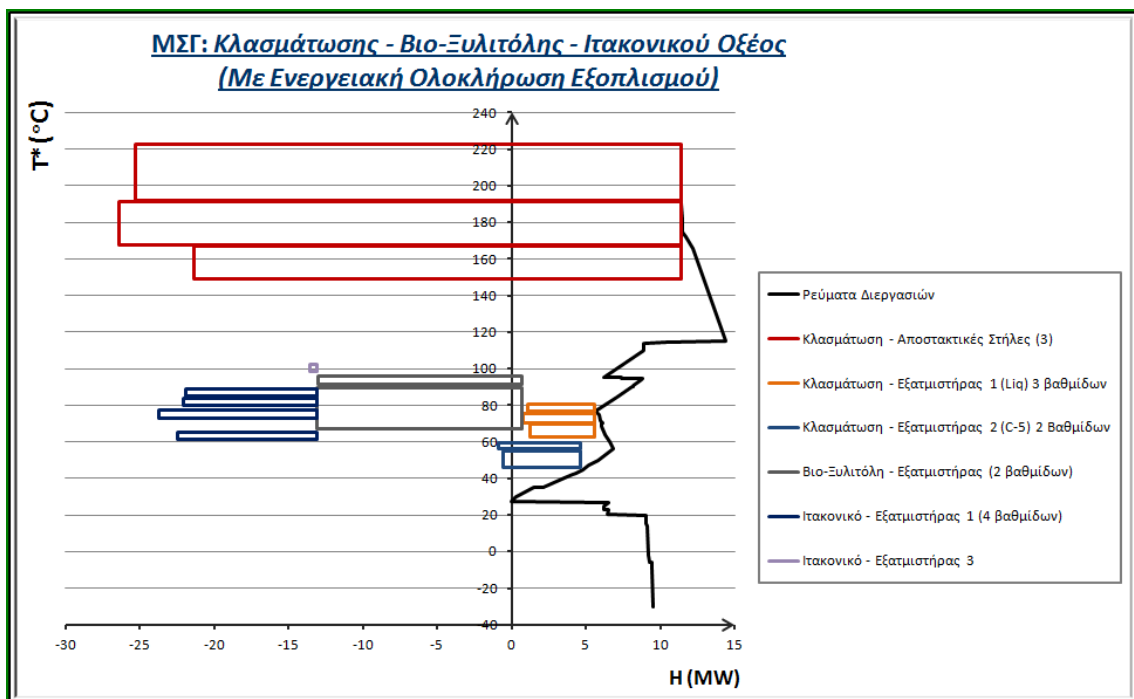
ΓΡΑΦΗΜΑ 5-6 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Συνολικής Μονάδας των διεργασιών "βιο-Ξυλιτόλης" και "Ιτακονικό Οξύ" (Σενάριο 1-7)

Παρατηρούμε από τα παραπάνω γραφήματα ότι η τοποθέτηση των διεργασιών έξω από τη κεντρική Μονάδα προσφέρει μικρότερες δυνατότητες για ολοκλήρωση των ενεργοβόρων τμημάτων τους. Αντίθετα, οι ολοκληρωμένες συνολικές Μονάδες, που περιλαμβάνουν τη διεργασία της κλασμάτωσης, έχουν μεγαλύτερο περιθώριο για ολοκλήρωση και άλλων διεργασιών, καθώς η αποστακτική στήλη (έστω και σε 3 παράλληλες στήλες) είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα και αποτελεί μια “ενεργειακή ομπρέλα” κάτω απ’την οποία μπορούν να ολοκληρωθούν τμήματα διεργασιών που απαιτούν θερμή παροχή.

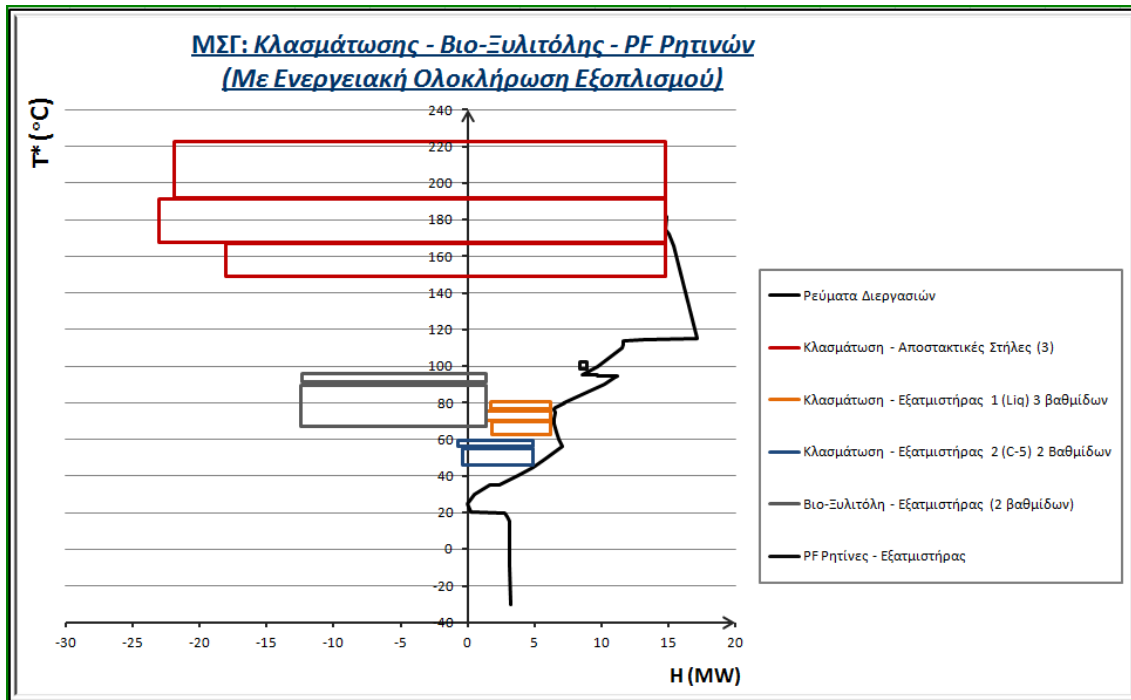
Προχωρώντας ένα βήμα παραπέρα, ολοκληρώνουμε τρεις διεργασίες μαζί και προκύπτουν τα σενάρια 1-8 έως 1-11. Συγκεκριμένα, το σενάριο 1-11 περιγράφει ένα βιοδιυλιστήριο όπου η κεντρική διεργασία είναι ολοκληρωμένη μόνη της και οι διεργασίες των τελικών προϊόντων αποτελούν μαζί ένα ενιαίο, ξεχωριστό συγκρότημα. Τα ΜΣΓ, που προέκυψαν από τα ενεργειακά δεδομένα για τα σενάρια αυτά, δίνονται στα γραφήματα που ακολουθούν.



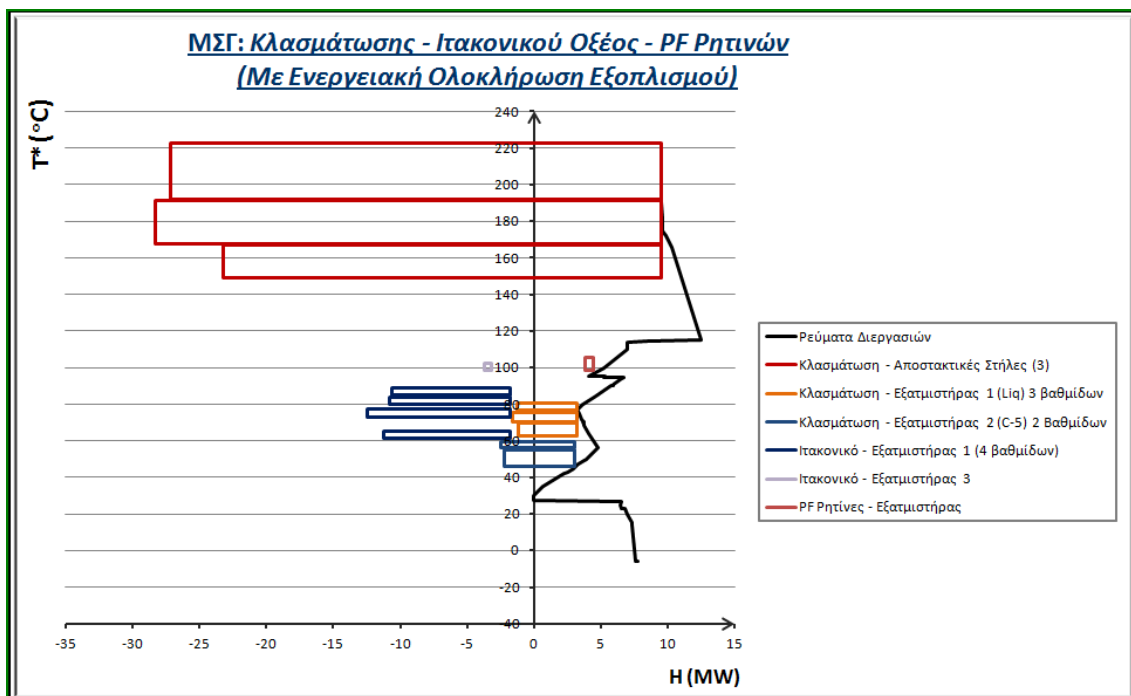
ΣΧΗΜΑ 5-4 Όρια Ενεργειακής Ολοκλήρωσης για τα Σενάρια 1-8 έως 1-11



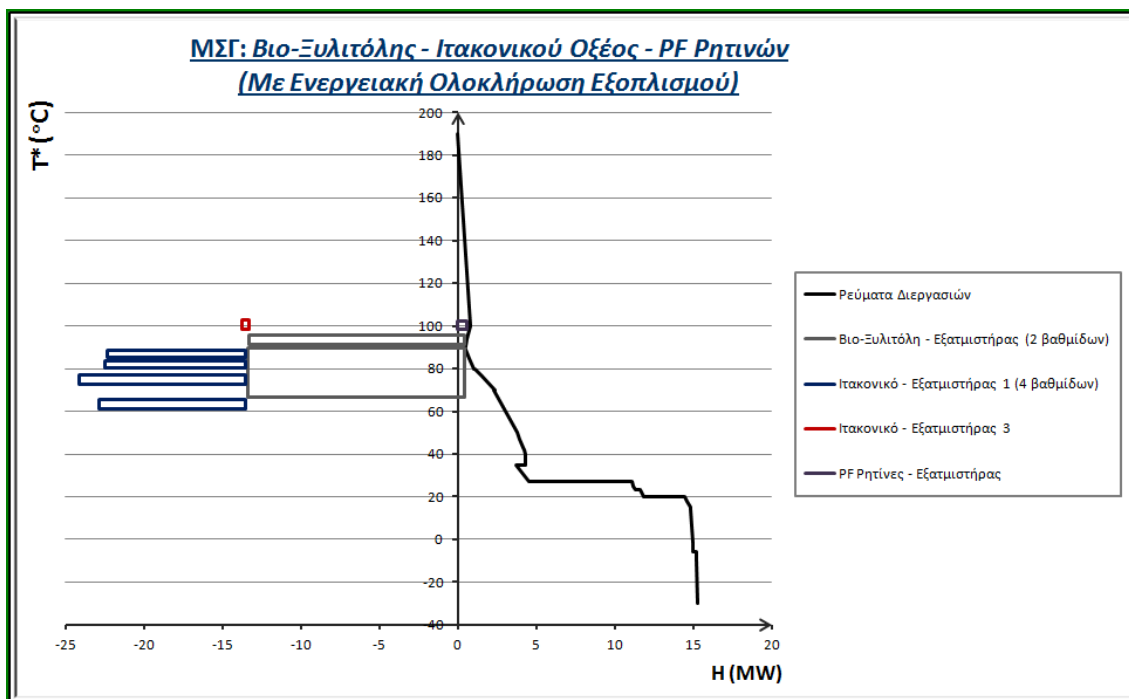
ΓΡΑΦΗΜΑ 5-7 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Συνολικής Μονάδας των διεργασιών "Κλασμάτωσης", "βιο-Ξυλιτόλης" και "Ιτακονικό Οξύ" (Σενάριο 1-8)



ΓΡΑΦΗΜΑ 5-8 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Συνολικής Μονάδας των διεργασιών "Κλασμάτωσης", "βιο-Ξυλιτόλης" και "PF Ρητινών" (Σενάριο 1-9)

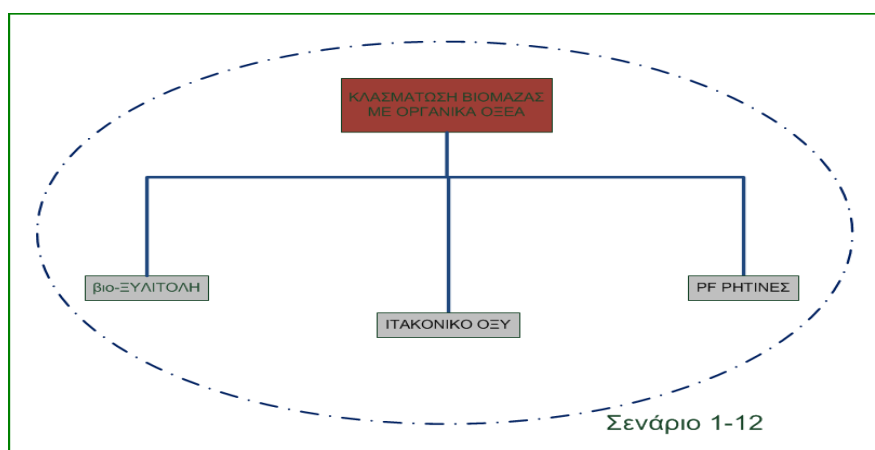


ΓΡΑΦΗΜΑ 5-9 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Συνολικής Μονάδας των διεργασιών "Κλασμάτωσης", "Ιτακονικού Οξέος" και "PF Ρητινών" (Σενάριο 1-10)

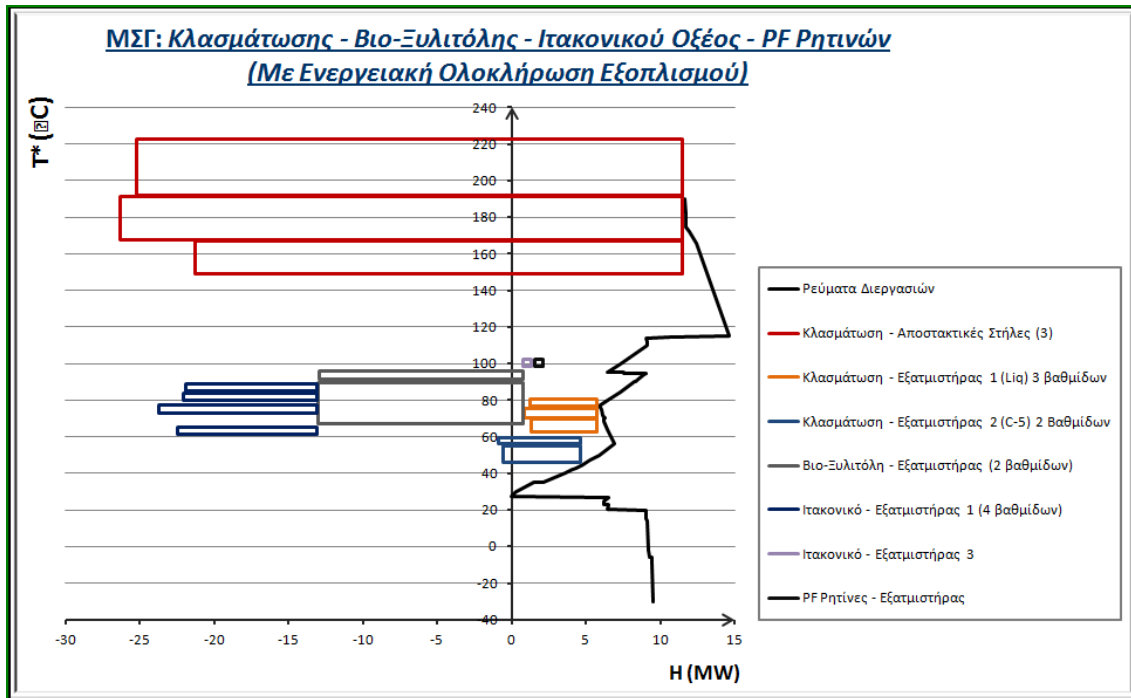


ΓΡΑΦΗΜΑ 5-10 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Συνολικής Μονάδας των διεργασιών "βιο-Ξυλιτόλης", "Ιτακονικού Οξέος" και "PF Ρητινών" (Σενάριο 1-11)

Το τελευταίο σενάριο (1-12) αναφέρεται στην ενεργειακή ολοκλήρωση όλων των διεργασιών του 1^{ου} μονοπατιού. Όπως είναι αναμενόμενο, το σενάριο αυτό είναι το πιο φιλόδοξο από όλα τα υπόλοιπα καθώς όλες οι διεργασίες των τελικών προϊόντων του σεναρίου αυτού εισέρχονται στη συνολική Μονάδα.



ΣΧΗΜΑ 5-5 Όρια Ενεργειακής Ολοκλήρωσης για το σενάριο 1-12



ΓΡΑΦΗΜΑ 5-11 Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα Συνολικής Μονάδας των διεργασιών "βιο-Ξυλιτόλης", "Ιτακονικού Οξέος" και "PF Ρητινών" (Σενάριο 1-12)

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-3 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας (Μονοπάτι 1ο)

1ο Μονοπάτι: ORGANOSOLV ----> bio-XYLITOL + ITACONIC ACID + PF RESINS														
A/A	ΜΟΝΑΔΑ 1	ΜΟΝΑΔΑ 2	ΜΟΝΑΔΑ 3	ΜΟΝΑΔΑ 4	HOT 1 (kW)	HOT 2 (kW)	HOT 3 (kW)	HOT 4 (kW)	COLD 1 (kW)	COLD 2 (kW)	COLD 3 (kW)	COLD 4 (kW)	TOTAL HOT (kW)	TOTAL COLD (kW)
1	ORGANOSOLV	XYL BIO	ITAC	PF RES	37873	9530	8548	753	22730	11316	20156	2652	56704	56854
2	ORGANOSOLV - XYL BIO	ITAC	PF RES	-	37873	8548	753	0	24365	20156	2652	0	47174	47173
3	ORGANOSOLV - ITAC	XYL BIO	PF RES	-	37830	9530	753	0	34143	11316	2652	0	48113	48111
4	ORGANOSOLV - PF RES	XYL BIO	ITAC	-	37873	9530	8548	0	24477	11316	20156	0	55951	55949
5	ORGANOSOLV - XYL BIO	ITAC - PF RES	-	-	37873	8798	0	0	24365	24148	0	0	46671	48513
6	ORGANOSOLV - ITAC	XYL BIO - PF RES	-	-	37830	14535	0	0	34143	18219	0	0	52365	52362
7	ORGANOSOLV - PF RES	XYL BIO - ITAC	-	-	37873	23637	0	0	24477	36216	0	0	61510	60693
8	ORGANOSOLV - XYL BIO - ITAC	PF RES	-	-	37830	753	0	0	35929	2652	0	0	38583	38581
9	ORGANOSOLV - XYL BIO - PF RES	ITAC	-	-	37873	8548	0	0	26262	20156	0	0	46421	46418
10	ORGANOSOLV - ITAC - PF RES	XYL BIO	-	-	37830	9530	0	0	36042	11316	0	0	47360	47358
11	XYL BIO - ITAC - PF RES	ORGANOSOLV	-	-	24010	37873	0	0	39302	22730	0	0	61883	62032
12	ORGANOSOLV - XYL BIO - ITAC - PF RES	-	-	-	37830	0	0	0	35752	0	0	0	37830	35752

Για το 1^ο Μονοπάτι, που αναλύσαμε παραπάνω, η τελική βέλτιστη λύση (σενάριο 1-12) προβλέπει εξοικονόμηση θερμής και ψυχρής παροχής κατά **83,3 %** και **84,4 %** αντίστοιχα, σε σχέση με τις αρχικές ενεργειακές ανάγκες χωρίς καμία ενεργειακή ολοκλήρωση. Επίσης, από το παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι ο αριθμός των διεργασιών που θα συμπεριληφθούν στην ολοκληρωμένη συνολική Μονάδα είναι καθοριστικός για την ενεργειακή εξοικονόμηση που θα επιτευχθεί. Όπως υπολογίζεται από τα δεδομένα του παρακάτω πίνακα, το εύρος του % εξοικονόμησης θερμής παροχής κυμαίνεται **μεταξύ 75 % και 83,3 %**, ανάλογα με τον αριθμό των διεργασιών που θα εισάγουμε στο ολοκληρωμένο βιοδιυλιστήριο, ενώ για τη ψυχρή παροχή είναι **μεταξύ 75,1 % και 84,4 %**.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-4 Αποτελέσματα Ενεργειακής Εξοικονόμησης για τη βέλτιστη λύση

	ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	ΘΕΡΜΗ ΠΑΡΟΧΗ ΠΡΙΝ (kW)	ΘΕΡΜΗ ΠΑΡΟΧΗ ΜΕΤΑ (kW)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ	ΨΥΧΡΗ ΠΑΡΟΧΗ ΠΡΙΝ (kW)	ΨΥΧΡΗ ΠΑΡΟΧΗ ΜΕΤΑ (kW)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ
	ORGANOSOLV	152130			138996		
	XYL BIO	29002			30788		
	ITACONIC	42106			53714		
	PF RESINS	3198			5096		
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ							
1	ORGANOSOLV	226436	56704	75.0%	228594	56854	75.1%
2	ORGANOSOLV – XYL BIO	226436	47174	79.2%	228594	47173	79.4%
3	ORGANOSOLV - ITAC	226436	48113	78.8%	228594	48111	79.0%
4	ORGANOSOLV – PF RES	226436	55951	75.3%	228594	55949	75.5%
5	ORGANOSOLV – XYL BIO	226436	46671	79.4%	228594	48513	78.8%
6	ORGANOSOLV - ITAC	226436	52365	76.9%	228594	52362	77.1%
7	ORGANOSOLV – PF RES	226436	61510	72.8%	228594	60693	73.4%
8	ORGANOSOLV – XYL BIO - ITAC	226436	38583	83.0%	228594	38581	83.1%
9	ORGANOSOLV – XYL BIO - PF RES	226436	46421	79.5%	228594	46418	79.7%
10	ORGANOSOLV - ITAC - PF RES	226436	47360	79.1%	228594	47358	79.3%
11	XYL BIO - ITAC – PF RES	226436	61883	72.7%	228594	62032	72.9%
12	ORGANOSOLV -XYL BIO - ITAC - PF RES	226436	37830	83.3%	228594	35752	84.4%

Η τελική βέλτιστη λύση προέκυψε ότι είναι η συνολική Μονάδα που περιλαμβάνει τις διεργασίες “Κλασμάτωση Βιομάζας – βιοΞυλιτόλη – Ιτακονικο Οξύ – PF Ρητίνες”. Τα υπόλοιπα μονοπάτια διεργασιών παρουσίασαν εξίσου σημαντικά ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας και κυρίως στα σενάρια ολοκλήρωσης όλων των διεργασιών σε μία συνολική Μονάδα. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται στο παρακάτω πίνακα, απ’ τον οποίο προκύπτει και το γιατί επιλέχθηκε το “μονοπάτι 1” ως βέλτιστη λύση.

A/A	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ	ΘΕΡΜΗ ΠΑΡΟΧΗ ΜΕΤΑ (kW)	ΘΕΡΜΗ ΠΑΡΟΧΗ ΠΡΙΝ (kW)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ	ΨΥΧΡΗ ΠΑΡΟΧΗ ΜΕΤΑ (kW)	ΨΥΧΡΗ ΠΑΡΟΧΗ ΠΡΙΝ (kW)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ
1	ORGANOSOLV - XYL BIO - ITAC - PF RES	37830	226436	83.3%	35752	228593	84.4%
2	ORGANOSOLV - XYL BIO - ITAC - PU	37830	224098	83.1%	36154	224222	83.9%
3	ORGANOSOLV - XYL BIO - C6 ETH - PF RES	53718	207363	74.1%	38845	194491	80.0%
4	ORGANOSOLV - XYL BIO - C6 ETH - PU	53718	205025	73.8%	36844	190120	80.6%
5	ORGANOSOLV - XYL CAT - ITAC - PF RES	37830	200807	81.2%	33092	202299	83.6%
6	ORGANOSOLV - XYL CAT - ITAC - PU	37830	198469	80.9%	35294	197927	82.2%
7	ORGANOSOLV - XYL CAT - C6 ETH - PF RES	53718	181734	70.4%	38260	168197	77.3%
8	ORGANOSOLV - XYL CAT - C6 ETH - PU	53318	179396	70.3%	36160	163825	77.9%
9	ORGANOSOLV - C5 ETH - ITAC - PF RES	58690	226910	74.1%	53809	226306	76.2%
10	ORGANOSOLV - C5 ETH - ITAC - PU	58690	224572	73.9%	54135	221935	75.6%
11	ORGANOSOLV - C5 ETH - C6 ETH - PF RES	74178	207837	64.3%	56785	192204	70.5%
12	ORGANOSOLV - C5 ETH - C6 ETH - PU	74178	205499	63.9%	54752	187833	70.9%

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε στις προηγούμενες ενότητες και τα αποτελέσματα που παρήχθησαν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας, μπορούμε να εξάγουμε σημαντικά συμπεράσματα.

Τα λιγνοκυτταρινούχα βιοδιυλιστήρια θα αποτελέσουν στο μέλλον σημαντικές βιομηχανικές μονάδες, λόγω της εξάντλησης του πετρελαίου, καθώς η τροφοδοσία τους είναι αποκλειστικά βιομάζα που δεν προορίζεται για τροφή και είναι ανανεώσιμη α΄ ύλη. Τα προϊόντα που παράγονται είναι υψηλής προστιθέμενης αξίας και με μεγάλη ζήτηση στην αγορά, άρα με το σωστό σχεδιασμό τα βιοδιυλιστήρια μπορούν να είναι βιώσιμες μονάδες που θα δώσουν ώθηση στην παγκόσμια οικονομική ανάπτυξη.

Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε ένα βιοδιυλιστήριο είναι εξαιρετικά ενεργοβόρες, όμως, όταν ολοκληρώσουμε ενεργειακά τις ανεξάρτητες διεργασίες σε μία συνολική Μονάδα, τότε οι ενεργειακές απαιτήσεις μειώνονται σημαντικά και μπορεί να εξασφαλιστεί η βιωσιμότητα ενός τέτοιου εγχειρήματος.

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε ένας περιορισμένος αριθμός διεργασιών προκειμένου να αξιολογηθεί το περιθώριο εξοικονόμησης ενέργειας από την ολοκλήρωσή τους σε ευρύτερες Μονάδες. Ο στόχος ήταν επίσης να επιλεγθούν εκείνες οι διεργασίες που προσφέρουν, μέσα από την ολοκλήρωση σε συνολικές Μονάδες, τα μεγαλύτερα περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας. Τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε δείχνουν ότι η βέλτιστη επιλογή είναι το μονοπάτι “Κλασμάτωση Βιομάζας – βιοΞυλιτόλη – Ιτακονικο Οξύ – PF Ρητίνες” με εξοικονόμηση θερμής και ψυχρής παροχής κατά 83,3% και 84,4 % αντίστοιχα. Όμως υπήρχαν και άλλα μονοπάτια, αυτά που περιλαμβάνουν τις διεργασίες Κλασμάτωση Βιομάζας, βιοΞυλιτόλη ή καταλυτική Ξυλιτόλη, Ιτακονικό Οξύ και PF Ρητίνες ή Πολυουρεθάνη (μονοπάτια Νο 2, 5 και 6), με ποσοστά εξοικονόμησης θερμής και ψυχρής παροχής πάνω από 80 %.

Τα υπόλοιπα μονοπάτια παρουσίασαν μέγιστα ποσοστά εξοικονόμησης θερμής παροχής που κυμαίνονται από 63,9 % έως 74,1 % και 70,9 % έως 76 % για την ψυχρή παροχή. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι τα μονοπάτια αυτά περιέχουν τις διεργασίες παραγωγής βιο-αιθανόλης (είτε από C5 είτε από C6) οι οποίες λόγω της συστοιχίας των αποστακτικών στηλών είναι περισσότερο ενεργοβόρες. Επομένως απαιτείται καλύτερος σχεδιασμός των αποστακτικών στηλών προκειμένου να είναι λιγότερο ενεργοβόρες, όπως πχ αντί για συστοιχία απλών αποστακτικών στηλών να έχουμε θερμικά συζευγμένες αποστακτικές στήλες (Thermally Coupled Columns).

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην εργασία αυτή μπορεί να ανιχνεύσει το καλύτερο συνδυασμό διεργασιών που πρέπει να ολοκληρωθούν στη συνολική Μονάδα, αρκεί να υπάρχουν αξιόπιστα ενεργειακά δεδομένα από τη προσομοίωση των διεργασιών ή από πιλοτικές εγκαταστάσεις. Επίσης, γίνεται καταγραφή όλων των αποτελεσμάτων των πιθανών συνδυασμών ολοκλήρωσης των διεργασιών ενός μονοπατιού είτε σε μία συνολική Μονάδα είτε σε περισσότερες υπο-Μονάδες. Γίνεται έτσι εύκολα φανερό η ενεργειακή επιβάρυνση που θα έχει η επιλογή του να τεθεί κάποια διεργασία εκτός της συνολικής Μονάδας. Με τον τρόπο αυτό, ο σχεδιαστής διεργασιών μπορεί να συνθέσει με το καταλληλότερο τρόπο τις διεργασίες, λαμβάνοντας υπόψη και τυχόν πρακτικούς περιορισμούς.

Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν λαμβάνονται υπόψη τα πρακτικά προβλήματα της άμεσης μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των διεργασιών. Η Ανάλυση Συνολικής Μονάδας έχει εφαρμοστεί είτε χρησιμοποιώντας ένα ενδιάμεσο μέσο μεταφοράς θερμότητας (πχ ατμός) είτε ελαχιστοποιώντας τις διασυνδέσεις μεταξύ των διεργασιών στις εντελώς απαραίτητες. Η σωστή προσέγγιση και επέκταση αυτής της μεθοδολογίας θα ήταν να ανιχνεύεται η βέλτιστη λύση και μετά να γίνεται ανάλυση και συνοπτική τεχνοοικονομική μελέτη αυτής, προκειμένου να διαπιστωθεί εάν μπορούν να χαλαρώσουν κάποιοι περιορισμοί και εάν δικαιολογείται η μεγαλύτερη επένδυση σε πάγιο κόστος. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι δεν λαμβάνονται υπόψη οι τιμές των προϊόντων αφού η επιλογή του βέλτιστου μονοπατιού γίνεται με καθαρά ενεργειακά κριτήρια.

Προκειμένου να είναι εφαρμόσιμη η μεθοδολογία αυτή σε ένα μεγάλο αριθμό διεργασιών, απαιτείται η μεταφορά της σε κώδικα Η/Υ. Με τον τρόπο αυτό θα είναι ευκολότερο να ανιχνεύονται όλα τα πιθανά μονοπάτια και να γίνεται αυτόματα η ενεργειακή αξιολόγησή τους με την εφαρμογή της μεθόδου του Κόμβου Ανάσχεσης. Επίσης, προτείνεται η περαιτέρω μελέτη των συστημάτων διαχωρισμού σε διεργασίες βιοδιυλιστηρίου για τη παραγωγή βιο-αιθανόλης, προκειμένου να είναι ενεργειακά αποδοτικές.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Douglas, James M.** *Conceptual Design of Chemical Processes*. s.l. : McGraw-Hill, 1988.
2. **Kemp, Ian C.** *Pinch Analysis and Process Integration*. [επιμ.] IChemE. 2nd. s.l. : Elsevier, 2007.
3. **Linnhoff, M.** *Introduction to Pinch Technology*. 1998.
4. **Wankat, Phillip C.** Multi-effect Distillation Processes. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1993, 32, σσ. 894-905.
5. **Gilliland, Edwin Richard και Robinson, Clark S.** *Elements of Fractional Distillation*. 1950.
6. **Hui, C. W. και Ahmad, S.** *Total Site Heat Integration Using the Utility System*. [επιμ.] Elsevier Science Ltd. 1994. σσ. 729-742. Τόμ. 18.
7. **Bagajewicz, Miguel και Rodera, Hernan.** *Multiple Plant Heat Integration in a Total Site*. s.l. : AIChE., 2002. Τόμ. 48.
8. **Xylitol.org**. About Xylitol. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 24 Απρίλιος 2012.] <http://www.xylitol.org>.
9. **Hyvönen, Lea, Koivistoinen, Pekka και Voirol, Felix.** *5.Food Technological Evaluation of Xylitol, Advances in Food Research*. s.l. : Elsevier, 2012. σσ. 373-403.
10. **Biofuels.gr**. [Ηλεκτρονικό] 18 Ιούνιος 2012. <http://www.biofuels.gr/bioethanol.html>.
11. **Global Industry Analysts, Inc.** PRWEB: Online Visibility from Vocus. *PRWEB*. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 12 Ιούνιος 2012.] http://www.prweb.com/releases/itaconic_acid/renewable_chemicals/prweb8831422.htm.
12. **Laborie, Marie-Pierre G.** Virginia Polytechnic Institute. *Investigation of the Wood/Phenol - Formaldehyde Adhesive Interphase Morphology, Dissertation*. [Ηλεκτρονικό] 2002. [Παραπομπή: 18 Μάιος 2012.] <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-03112002-110430/unrestricted/MarieLaborieETD1.pdf>.

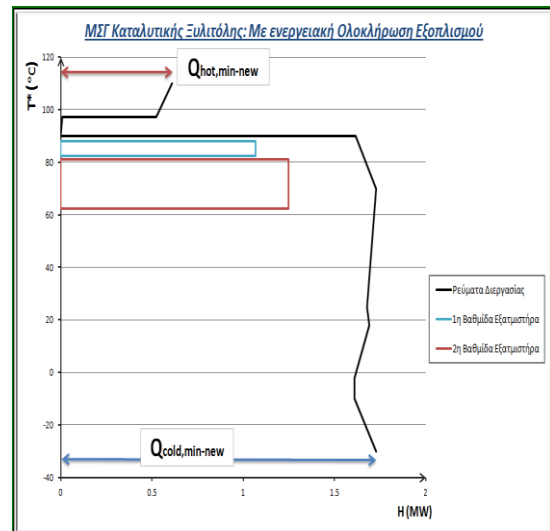
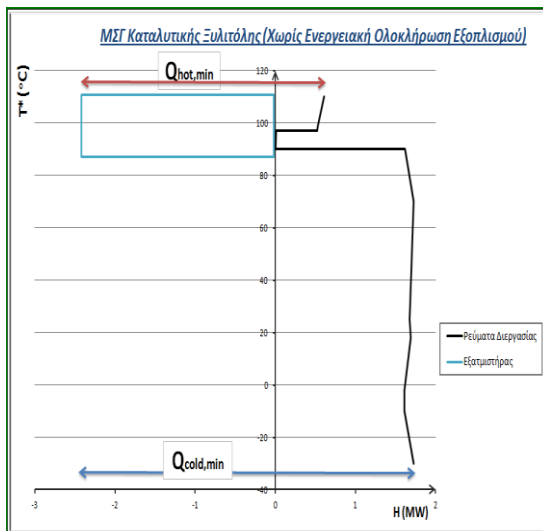
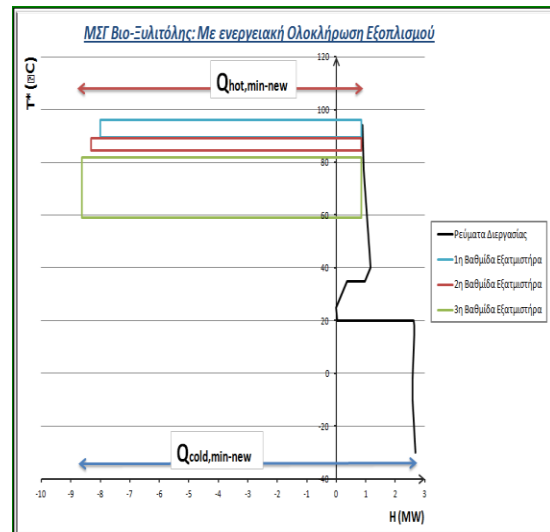
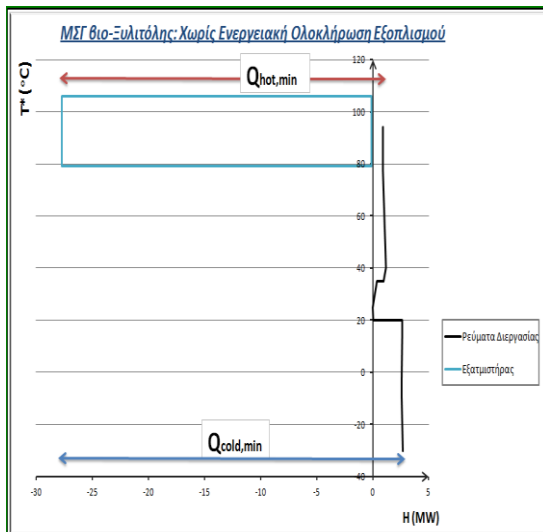
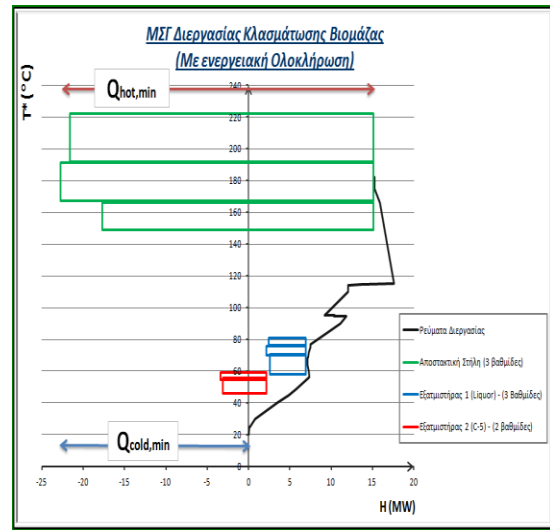
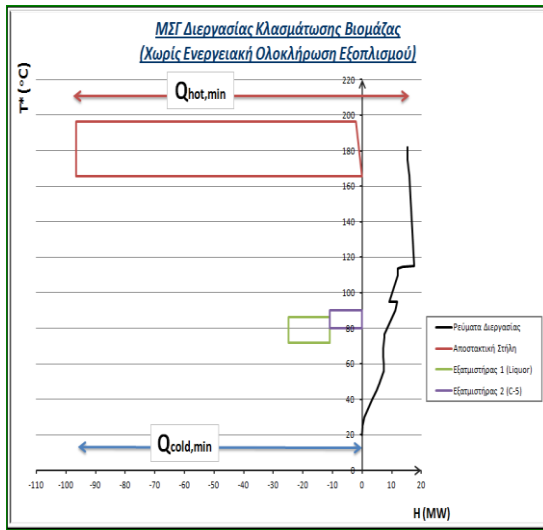
13. **Derek, Stewart.** Lignin as a base material for materials applications: Chemistry, application and economics. *ScienceDirect*. [Ηλεκτρονικό] 2008. [Παραπομπή: 29 Μάρτιος 2012.] www.elsevier.com/locate/indcrop.
14. **Hatakeyama, Hyoe.** Polyurethanes Containing Lignin. [συγγρ. βιβλίου] Thomas Q. Hu. *Chemical Modification, Properties, and Usage of Lignin*. s.l. : Springer, 2002.
15. **Smith, Robin.** *Chemical Process : Design and Integration*. s.l. : John Wiley & Sons Ltd, 2005.
16. **Κουτσοσπύρος, Κωνσταντίνος.** Ολοκληρωμένος Σχεδιασμός Μονάδων Παραγωγής Ξυλιτόλης από Λιγνοκυτταρινούχες Πρώτες Ύλες. *NTUA Library Web Site*. [Ηλεκτρονικό] 2011. [Παραπομπή: 23 Μάρτιος 2012.] http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/5182/1/koutsospyrosk_xylitol.pdf.
17. **Dhole, V. R. και Linnhoff, B.** Distillation Column Targets. *Computers Chem. Eng.* 1993, Τόμ. 17, 5/6, σσ. 549-560.
18. **Matijasevič, L. και Otmae, H.** Energy recovery by pinch technology (Technical Note). *Applied Thermal Engineering*. 2002, 22, σσ. 477-484.
19. **AspenTech.** *Getting Started Building and Running a Process Model, Aspen Plus V7.2*. s.l. : Aspen Technology Inc., 2010.
20. **Dimian, Alexandre C. και Bildea, Costin Sorin.** *Chemical Process Design, Computer-Aided Case Studies*. s.l. : Wiley VCH, 2008.
21. **Mann, James Gainey Jr.** *Process Integration: Unifying Concepts, Industrial Applications and Software Implementation*. [Dissertation] 1999.
22. **Smith, Robin and Jones, P S.** The Optimal Design of Integrated Evaporation Systems. *Heat Recovery Systems & CHP*. 1990, Vol. 10, pp. 341-368.
23. **Yoshida, H., et al.** Kraft lignin in polyurethanes: Mechanical properties of polyurethanes from a kraft lignin–polyether triol–polymeric MDI system. *Appl. Polym. Sci.* 1987, 34, pp. 1187–1198.

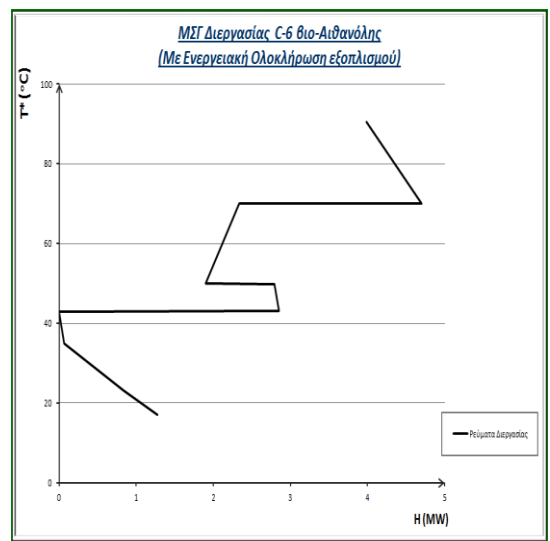
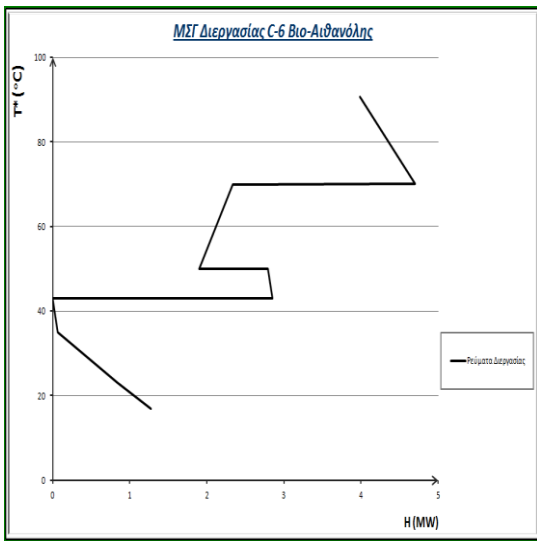
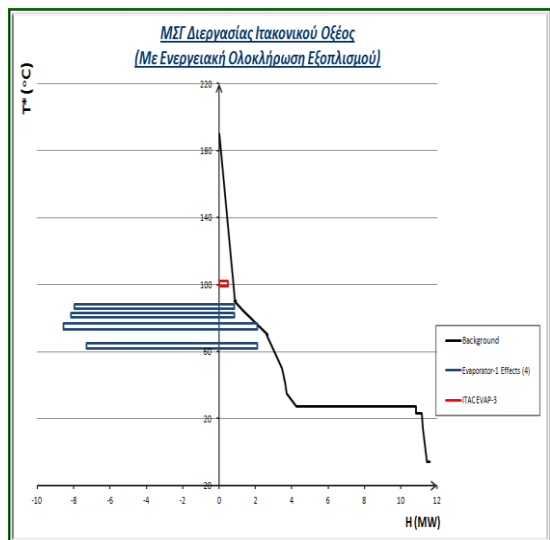
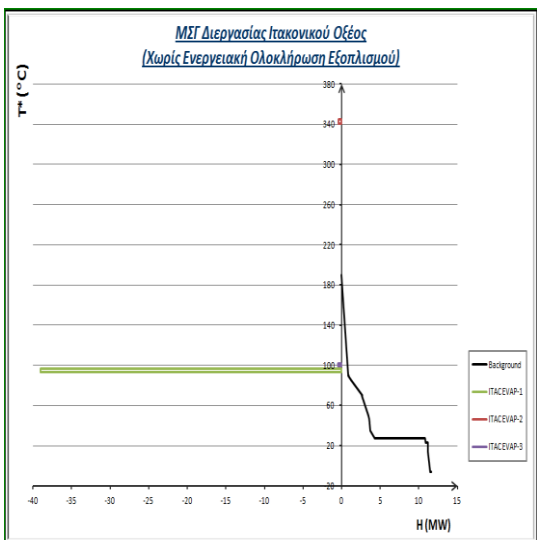
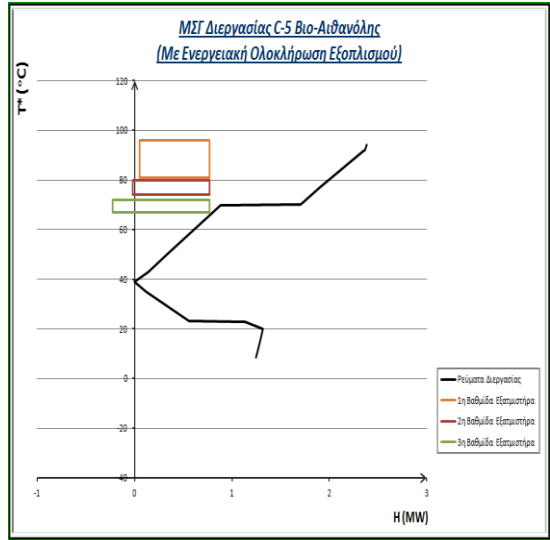
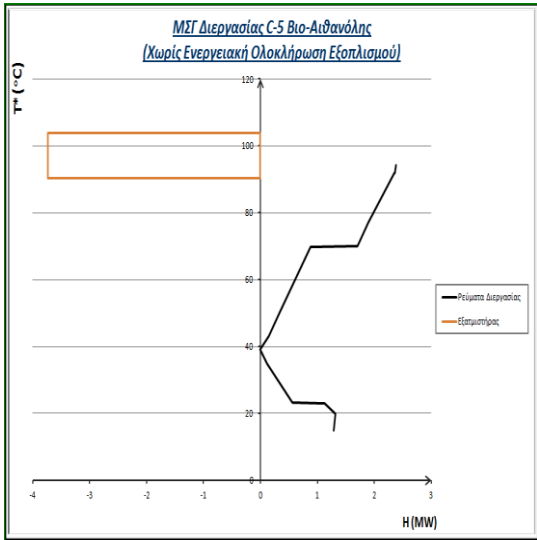
24. **Jilin Province, China.** *People's Government of JiLin Province Web Site.* [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 22 Απρίλιος 2012.] http://english.jl.gov.cn/Investment/Opportunities/Majorproject/201104/t20110401_971872.html.
25. **Aden, A., και συν.** *Lignocellulosic Biomass to Ethanol Process Design and Economics Utilizing Co-Current Dilute Acid Prehydrolysis and Enzymatic Hydrolysis for Corn Stover.* s.l. : US NREL (National Renewable Energy Laboratory), 2002. Technical Report.
26. **Lazzaretto, Andrea, Morandin, Matteo και Toffolo, Andrea.** Methodological aspects in synthesis of combined sugar and ethanol production plant. *ENERGY.* Elsevier, 2012, 41, σσ. 165-174.
27. **Branan, Carl R.** *Rules of Thumb for Chemical Engineers.* 3rd. s.l. : Gulf Professional Publishing (Elsevier Science).
28. **Peters, Max S. και Timmerhaus, Klaus D.** *Plant Design And Economics for Chemical Engineers.* s.l. : McGraw - Hill, 1991.
29. **Garcia, Araceli, και συν.** Energy and economic assessment of soda and organosolv biorefinery processes. *Biomass and Bioenergy.* s.l. : Science Direct (Elsevier), 2011, 35, σσ. 516 - 525.
30. **Speight, James G.** *Chemical and process design handbook.* s.l. : McGraw - Hill, 2002.
31. **Higa, M., και συν.** Thermal integration of multiple effect evaporator in sugar plant. *Applied Thermal Engineering.* s.l. : ScienceDirect (Elsevier), 29, σσ. 515 - 522.
32. **Bandyopadhyay, Santanu, Malik, Ranjan K. και Shenoy, Uday V.** Temperature - Enthalpy curve for energy targeting Of Distillation Columns. Bombay, India : s.n., 1996.
33. **Gorsek, A., Glavic, P. και Bogataj, M.** Design of the optimal total site heat recovery system using SSSP approach. *Chemical Engineering and Processing.* s.l. : ScienceDirect (Elsevier), 2006, 45, σσ. 372 - 382.

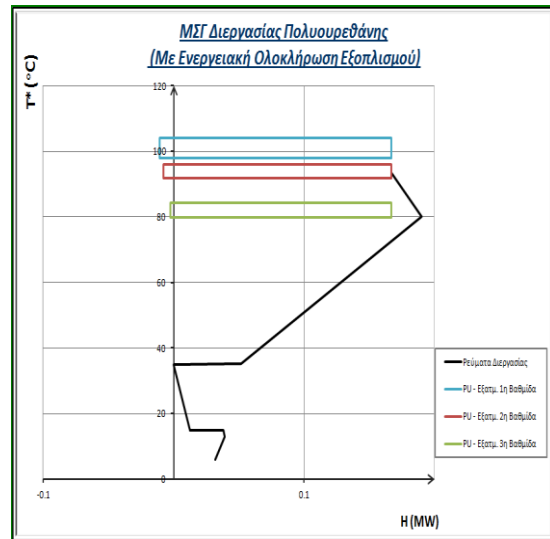
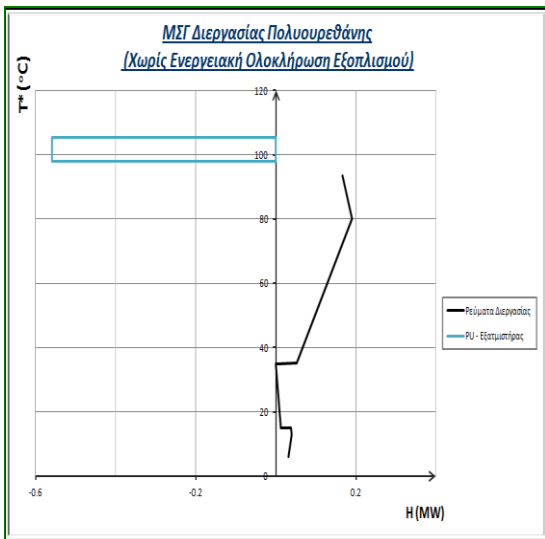
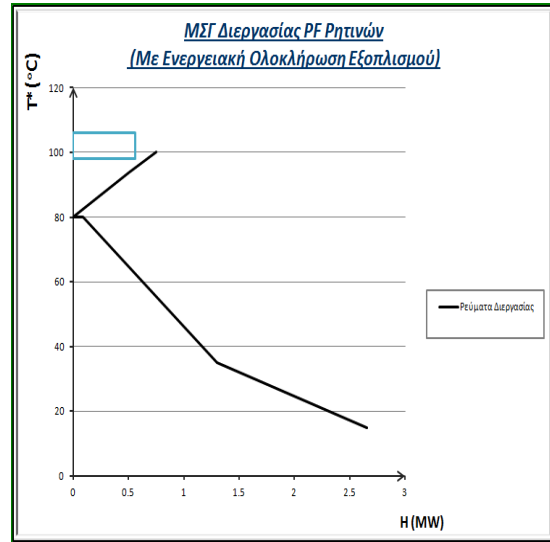
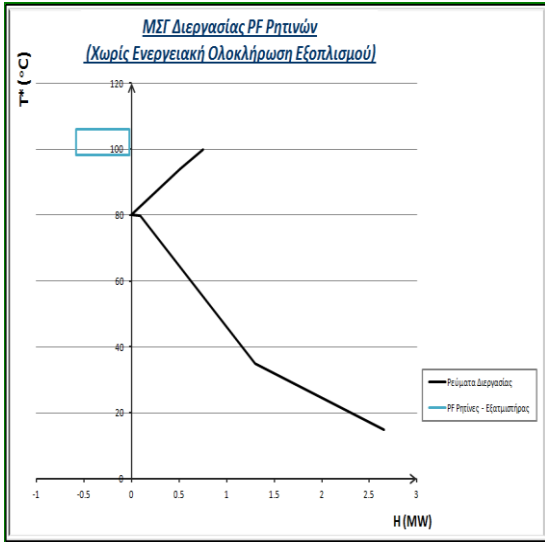
34. **Baliban, Richard C., Elia, Josephine A. και Floudas, Christodoulos A.** Simultaneous process synthesis, heat, power, and water integration of thermochemical hybrid biomass, coal, and natural gas facilities. *Computers and Chemical Engineering*. s.l. : ScienceDirect (Elsevier), 2012, 37, σσ. 297 - 327.
35. **Editorial.** Recent novel developments in heat integration—total site, trigeneration, utility systems and cost-effective decarbonisation. Case studies waste thermal processing, pulp and paper and fuel cells. *Applied Thermal Engineering*. s.l. : ScienceDirect (Elsevier), 2005, 25, σσ. 953 - 960.
36. **Kravanja, Z. και Glavic, P.** Heat Integration of Reactors II - Total Flowsheet Integration. *Chemical Engineering Science*. s.l. : Pergamon Press, 1989, Τόμ. 44, 11, σσ. 2667 - 2682.
37. **Hackl, Roman, Harvey, Simon και Andersson, Eva.** *Total Site Analysis (TSA) Stenungsund*. Göteborg, Sweden : s.n., 2010. Project Report.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. Μεγάλα Σύνθετα Γραφήματα Συνολικών Μονάδων

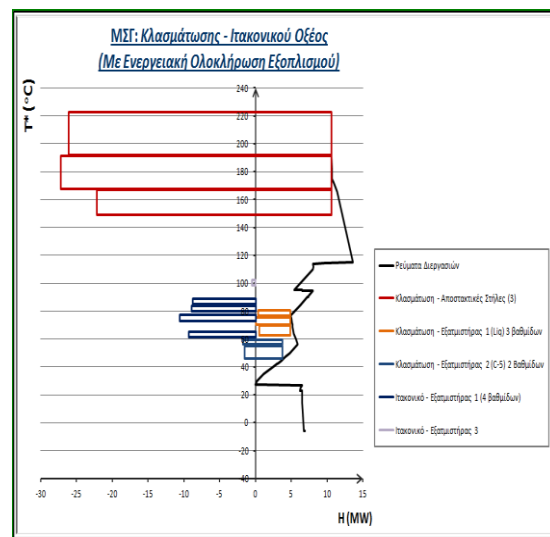
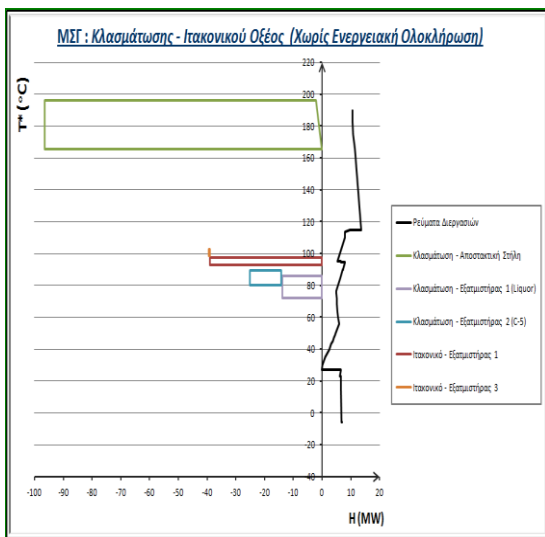
A-1. $N_{\text{διεργασιών}} = 1$

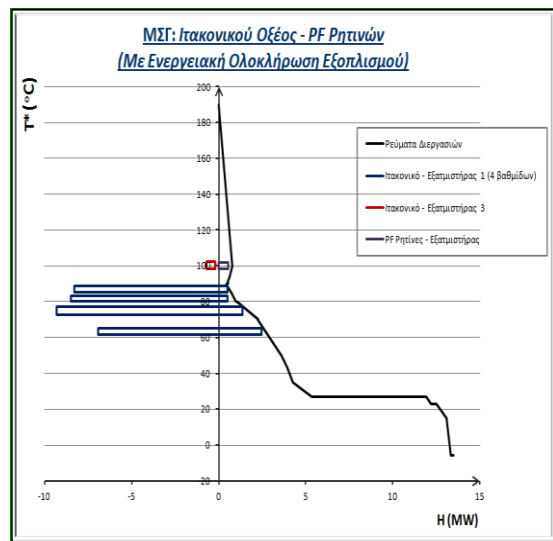
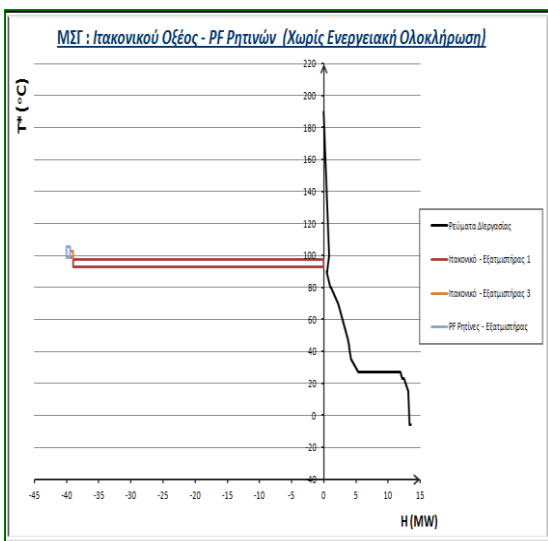
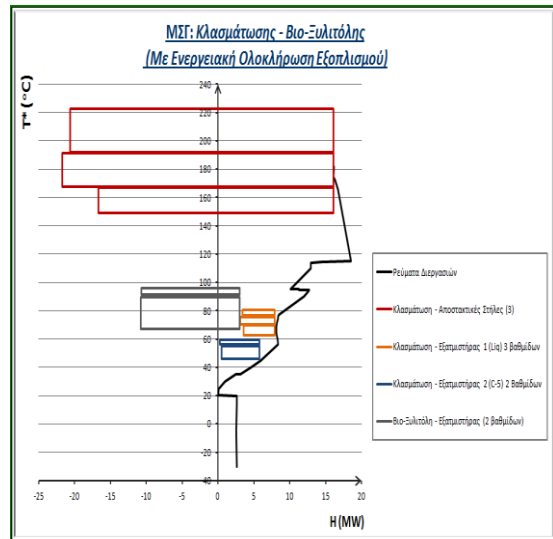
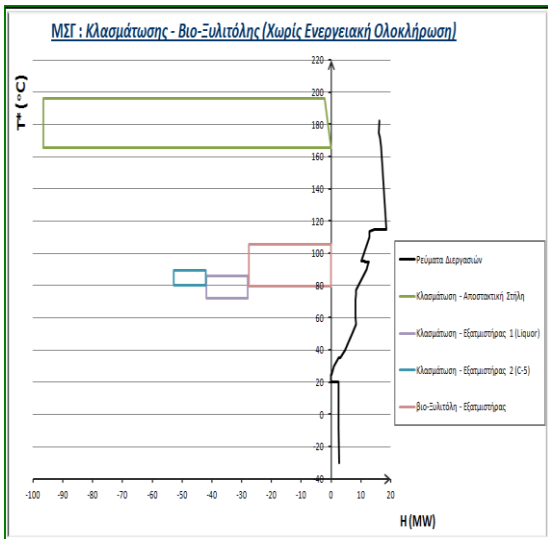
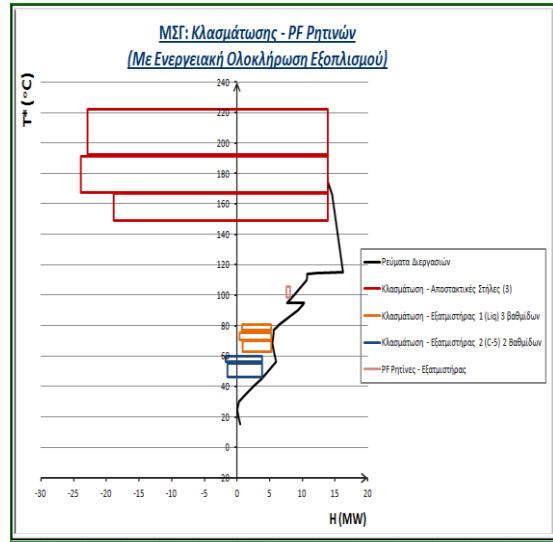
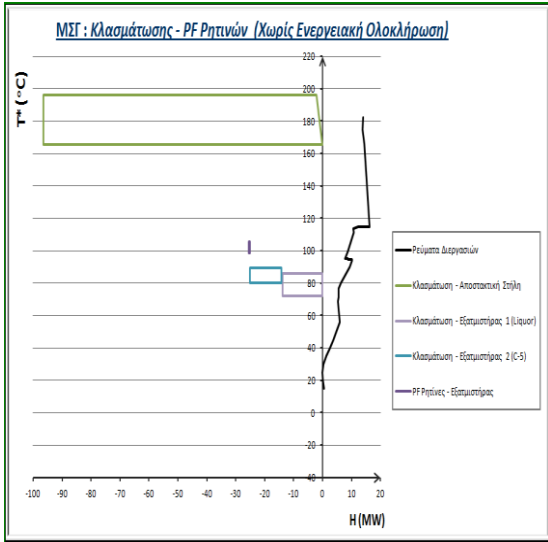


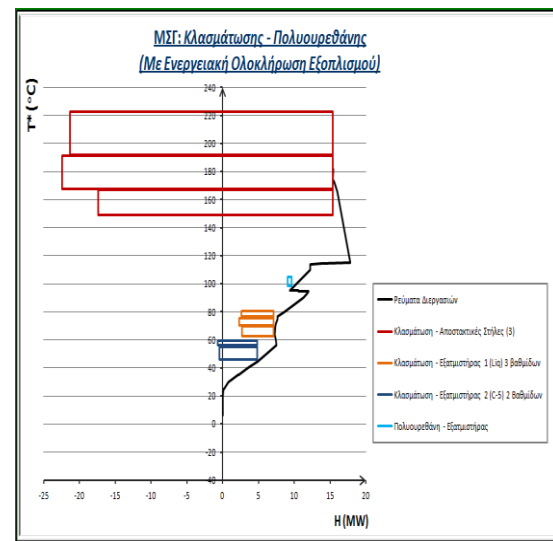
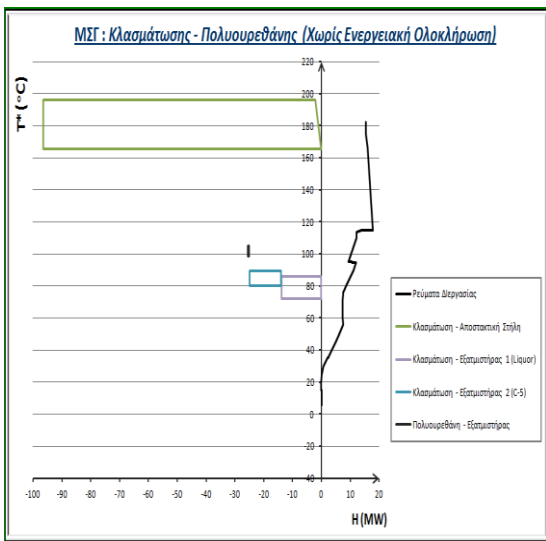
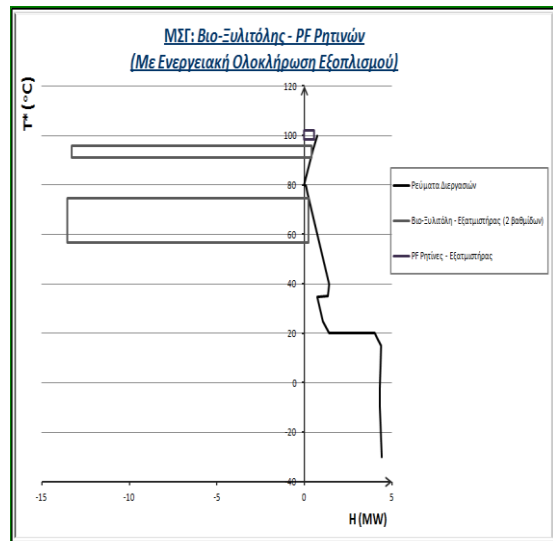
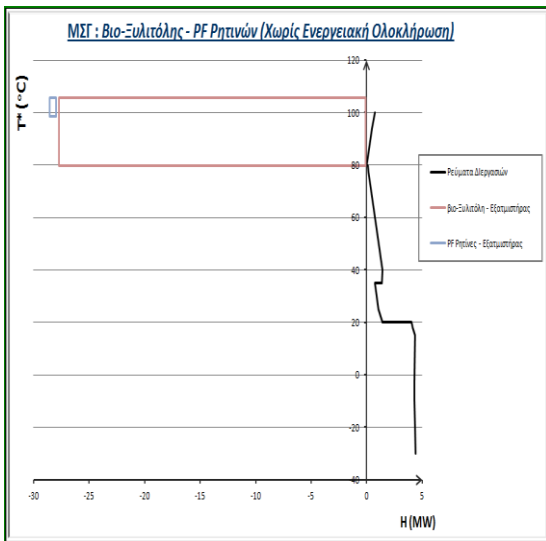
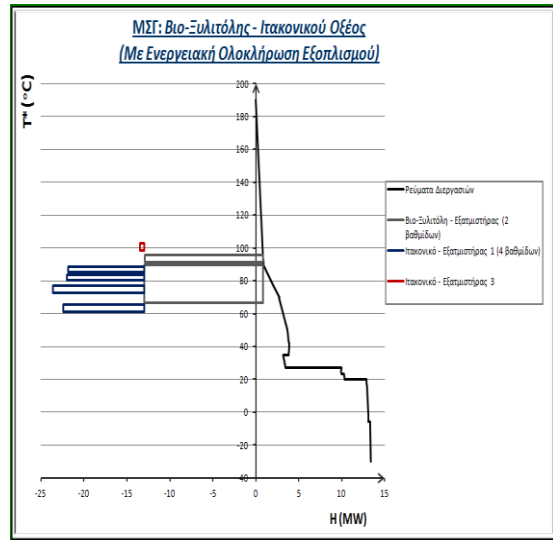
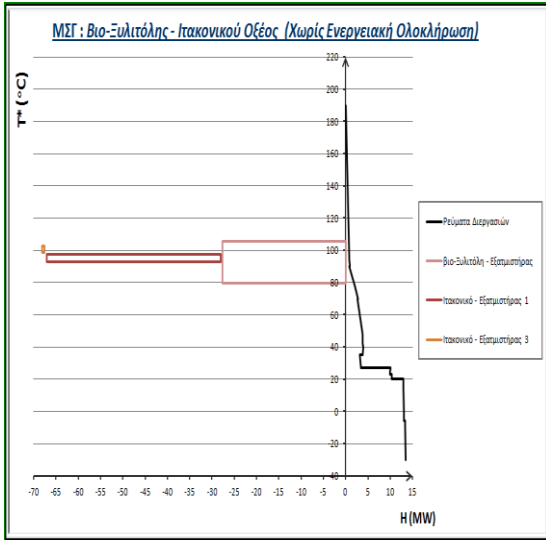


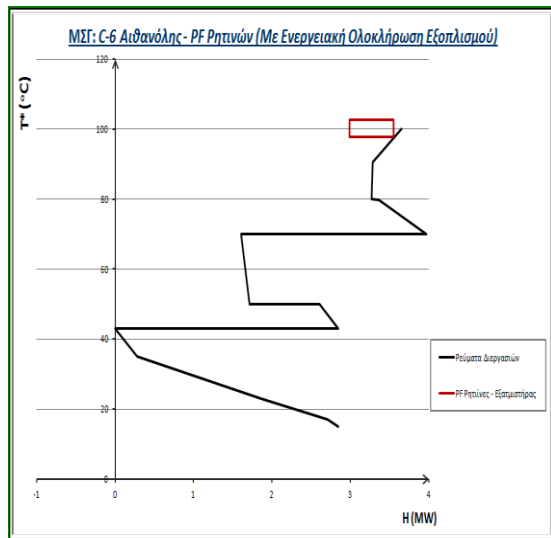
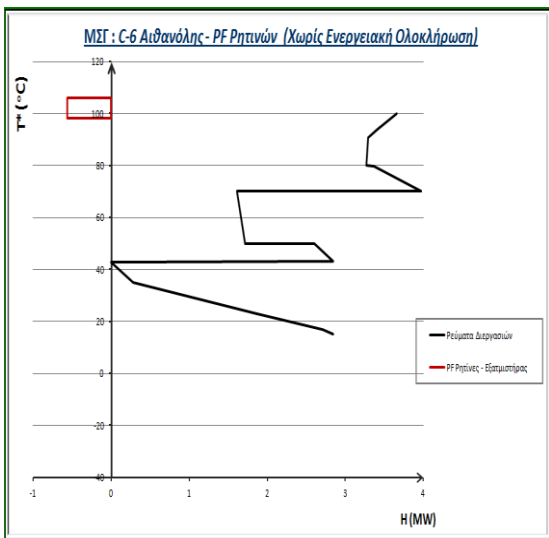
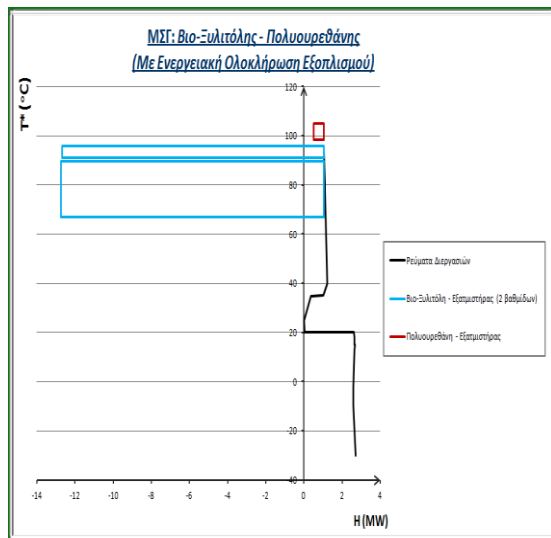
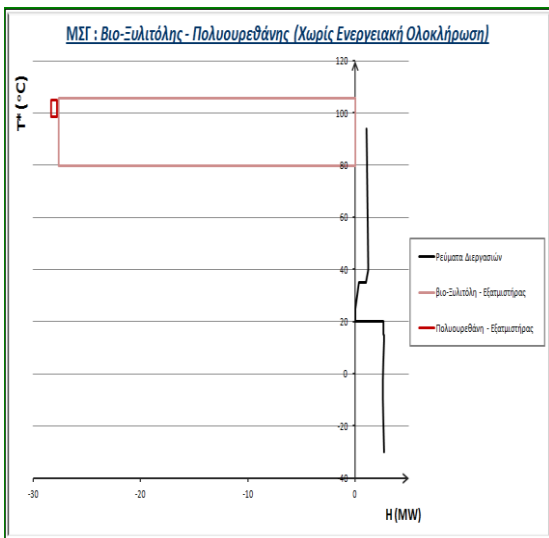
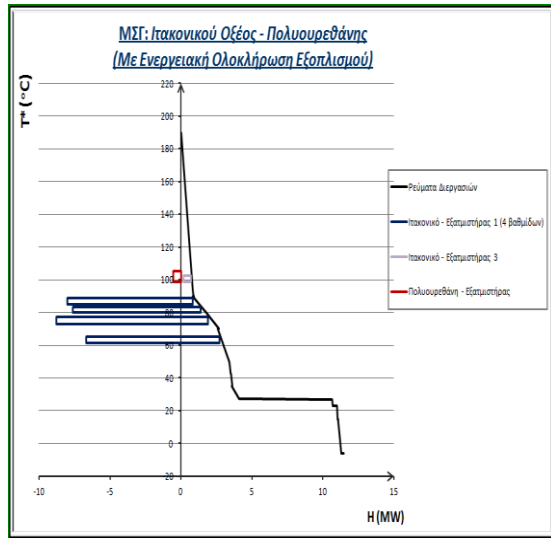
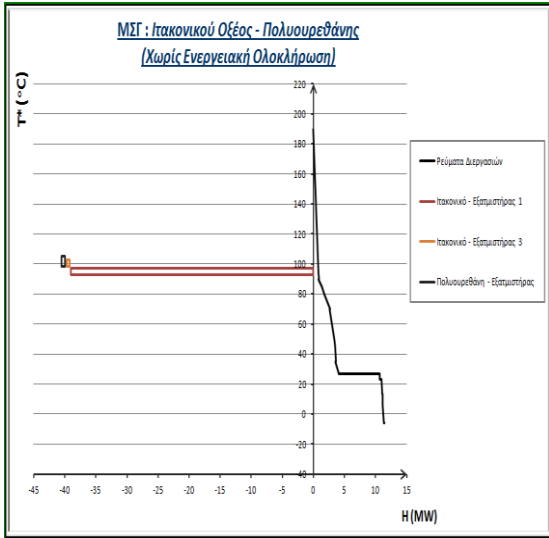


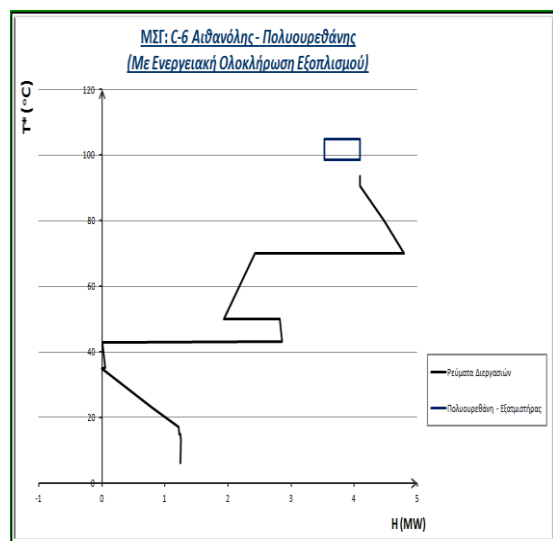
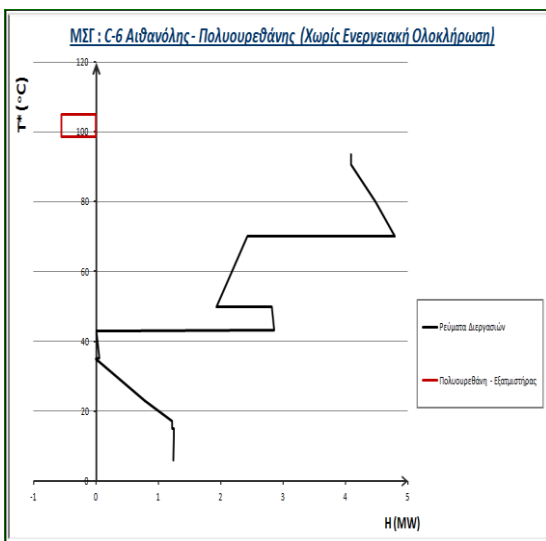
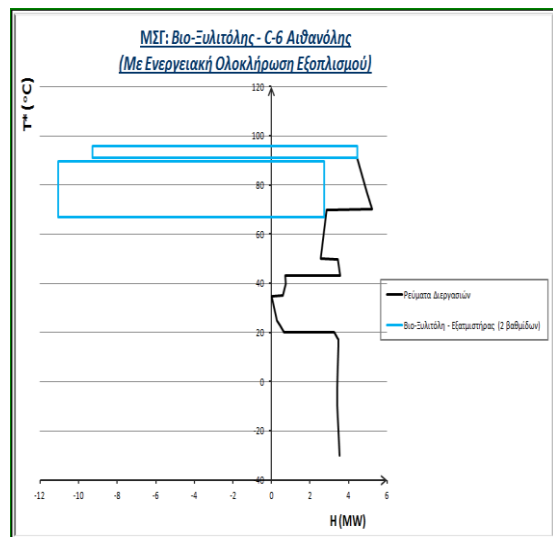
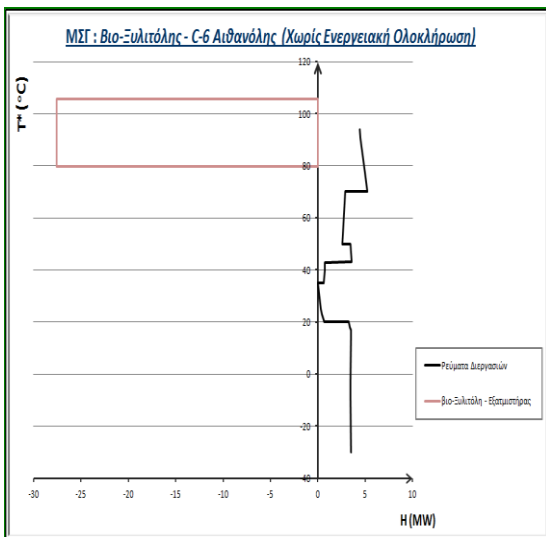
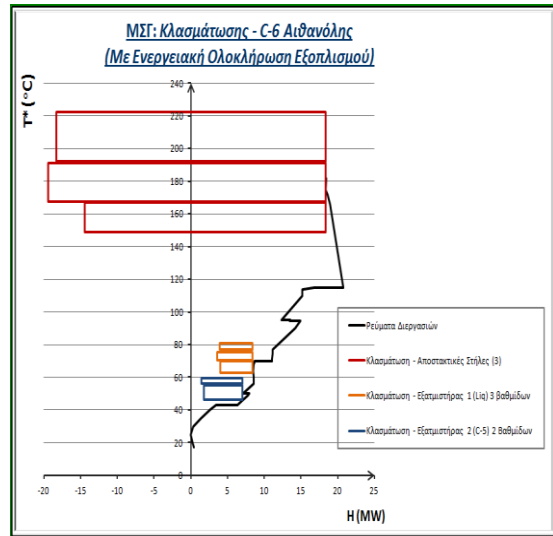
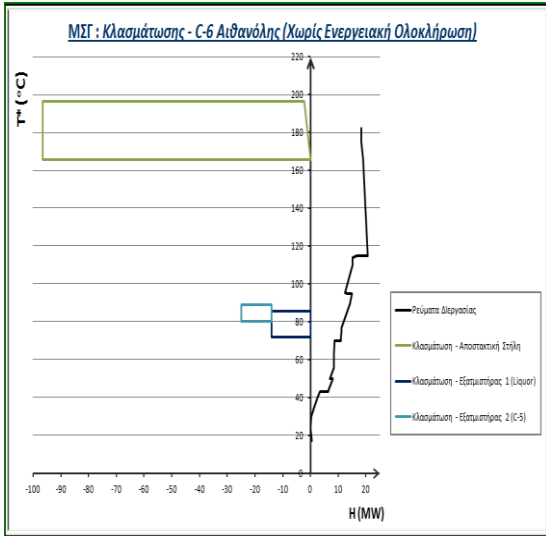
A-2. $N_{\text{διεργασιών}} = 2$

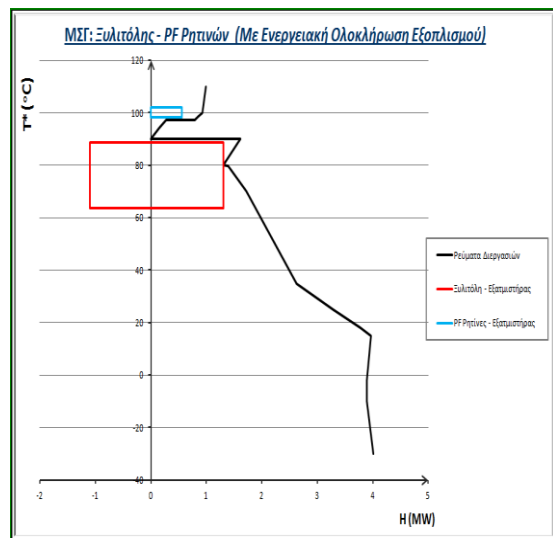
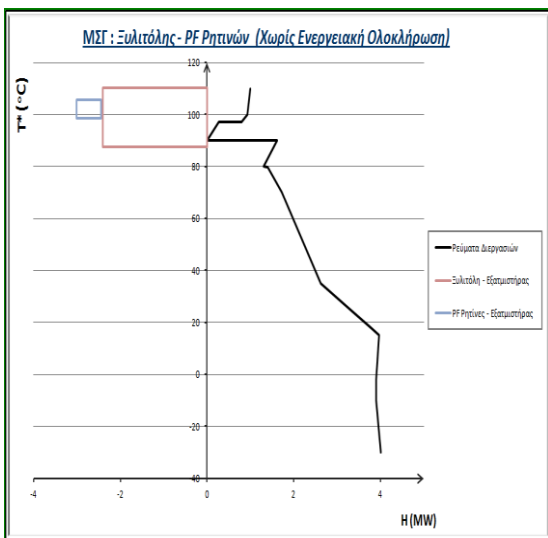
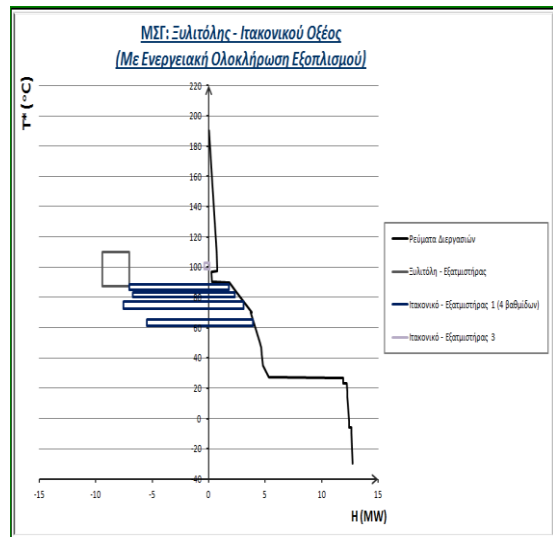
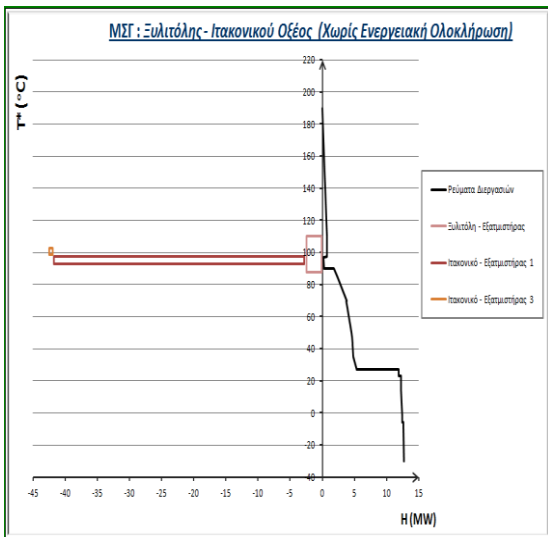
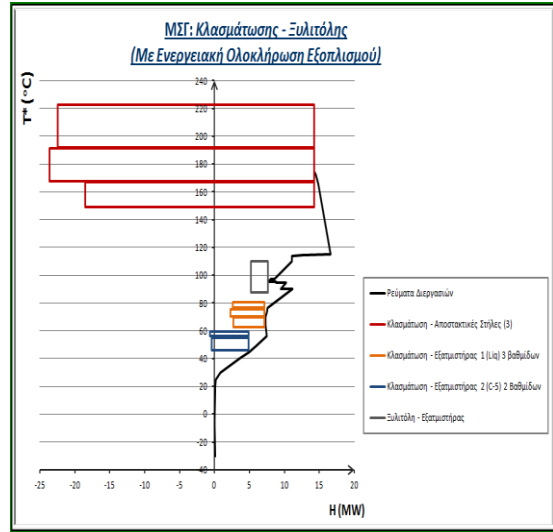
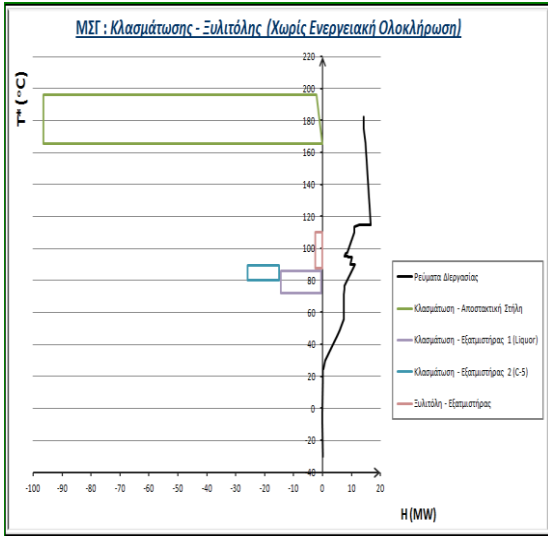


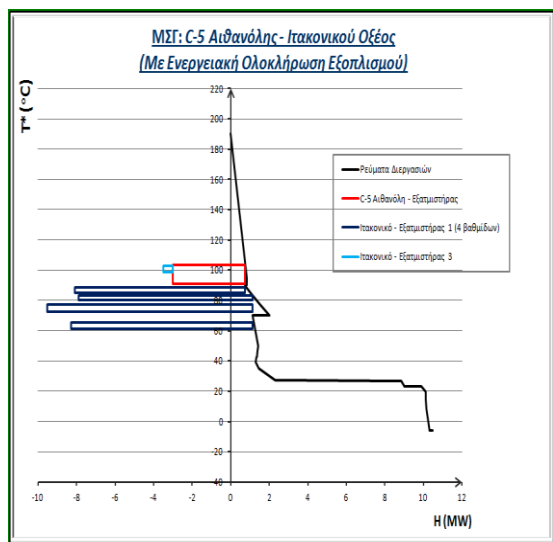
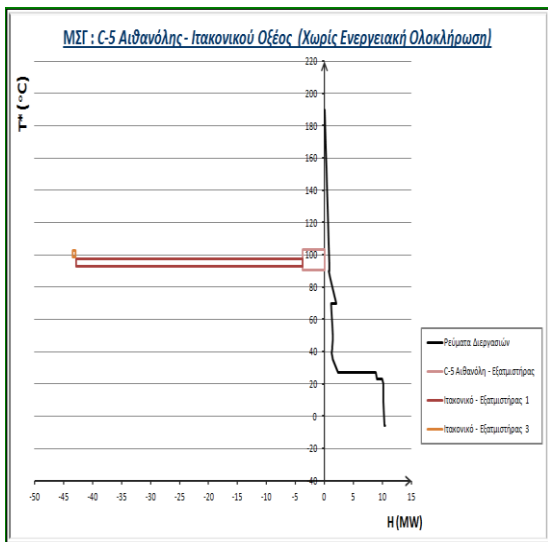
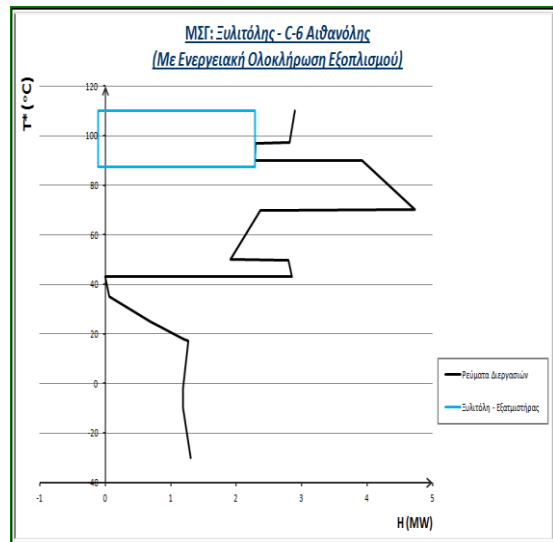
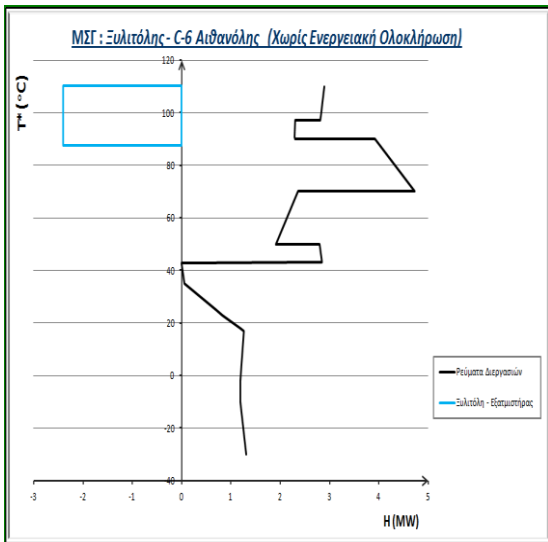
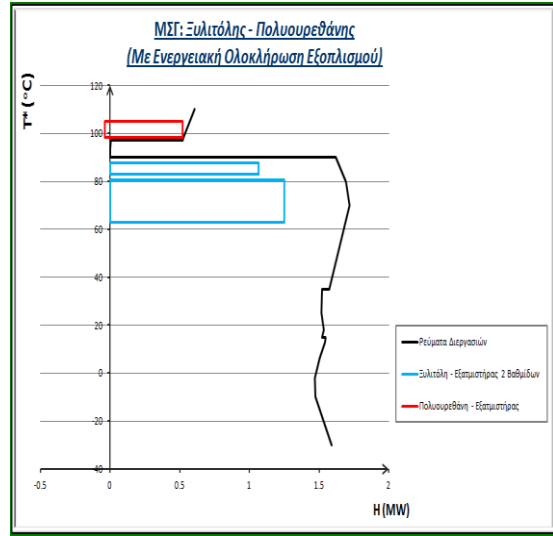
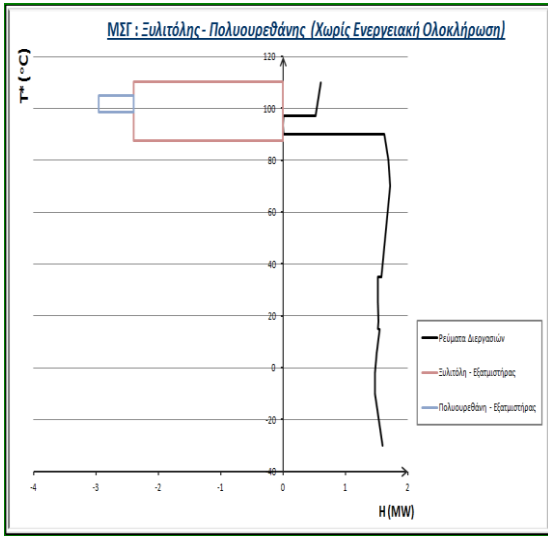


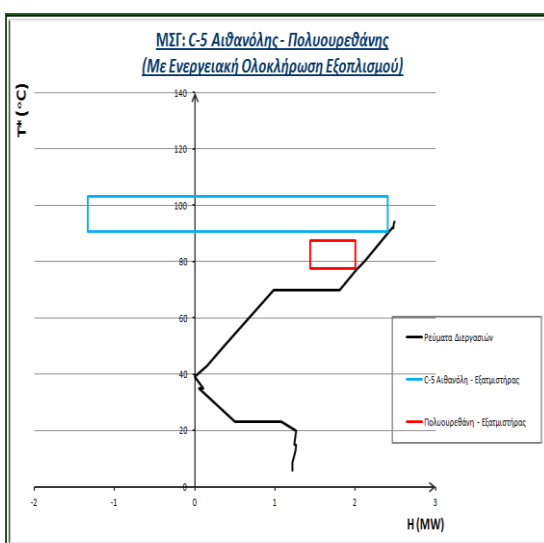
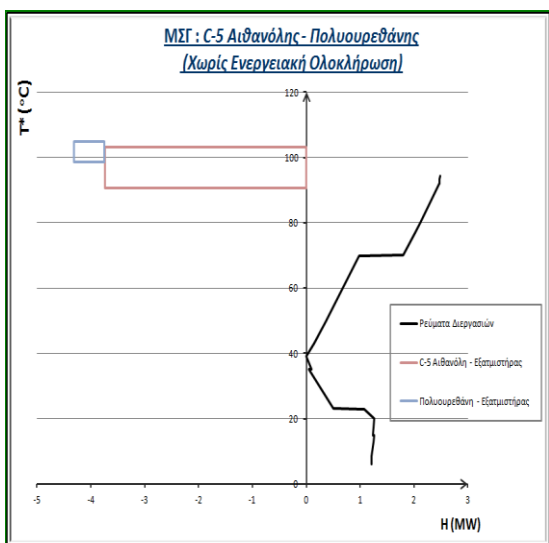
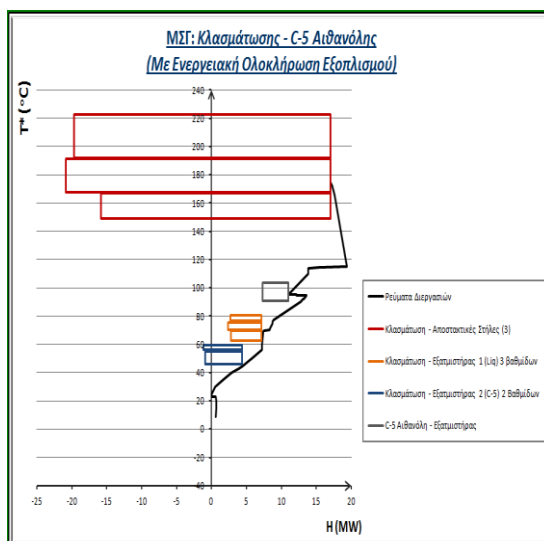
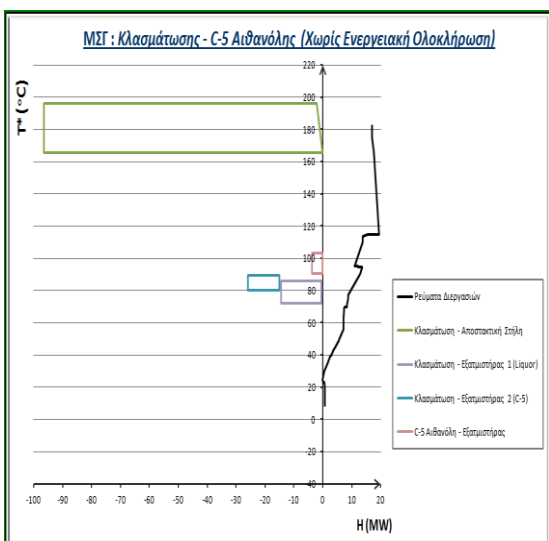
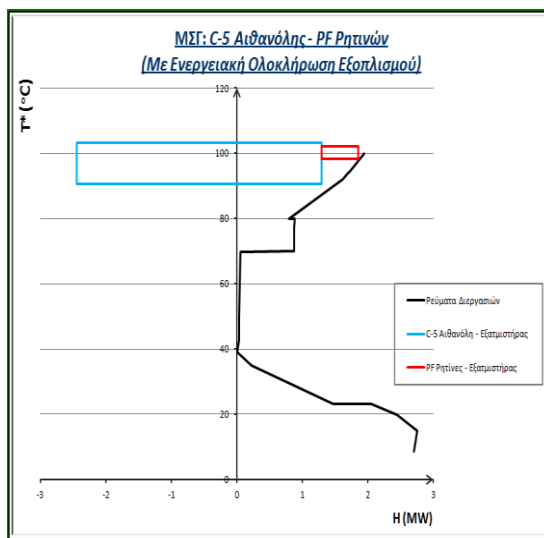
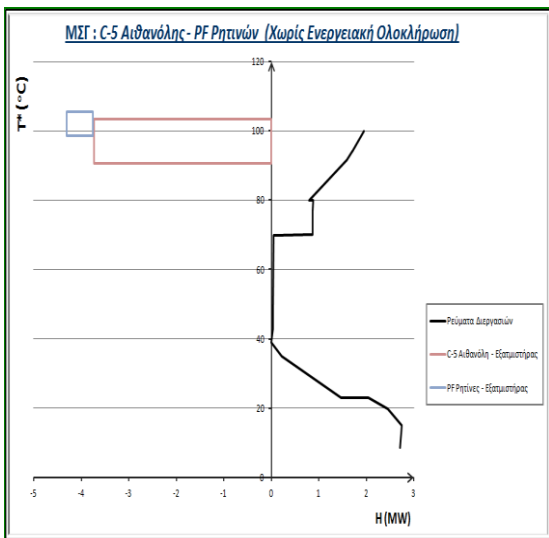


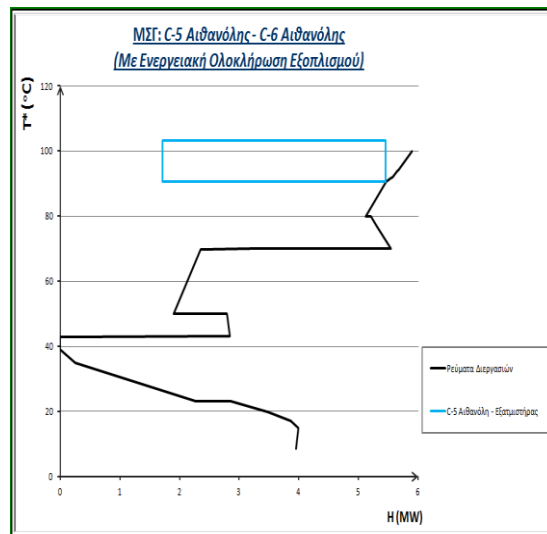
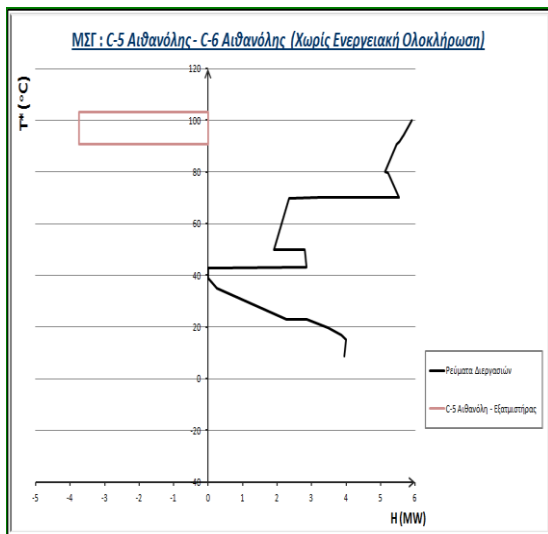




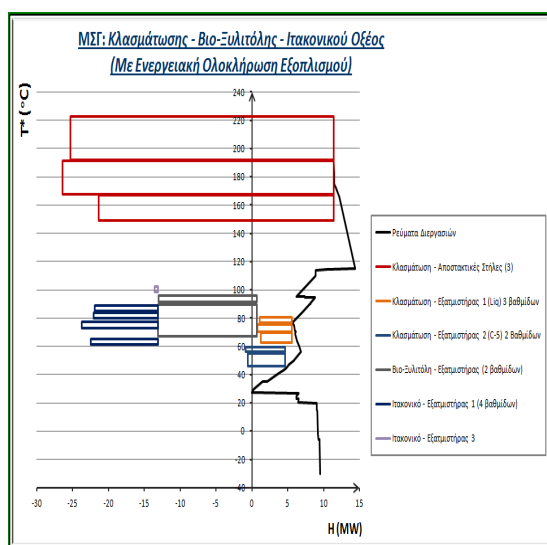
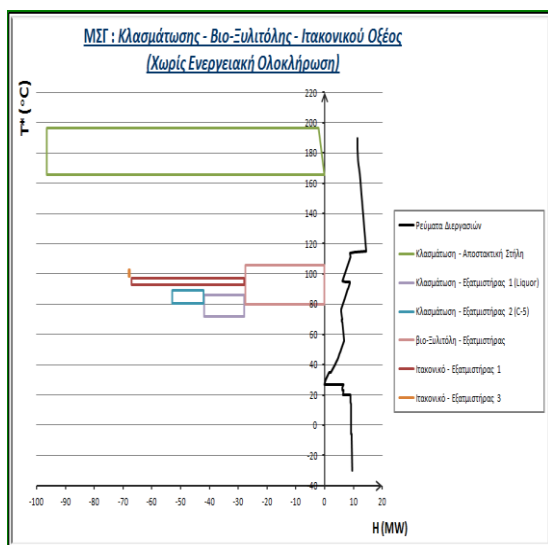
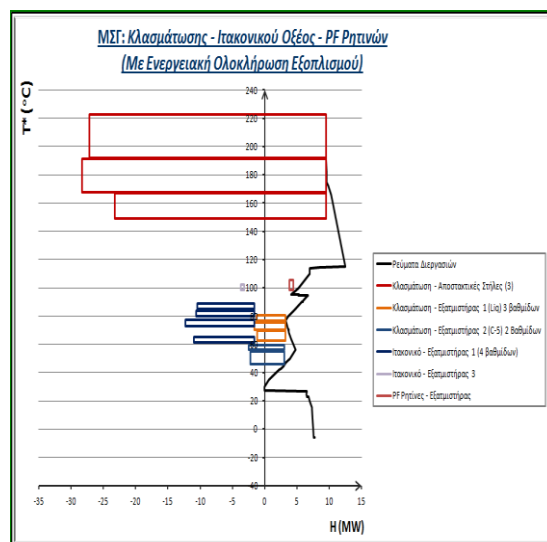
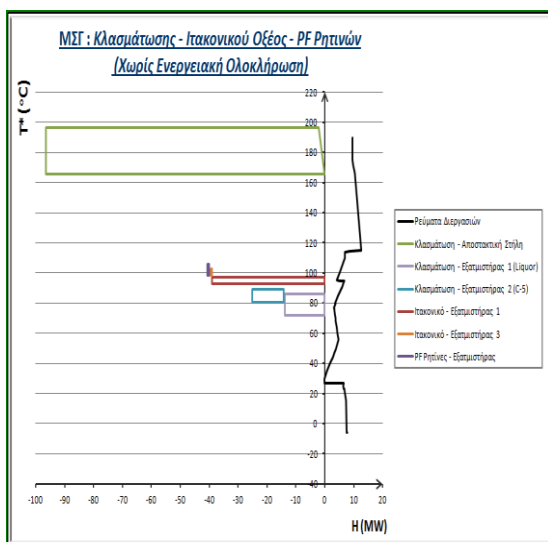


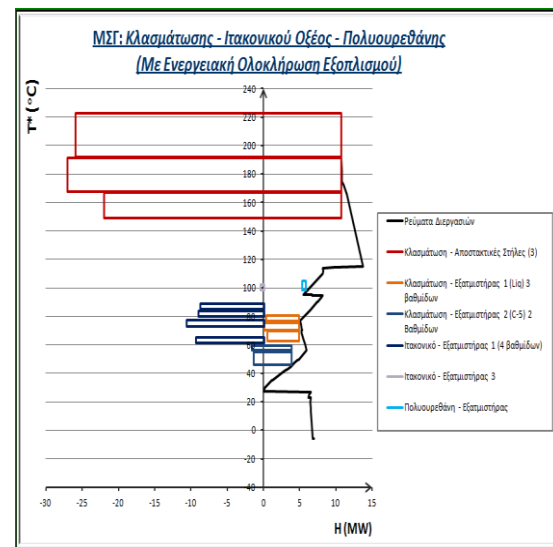
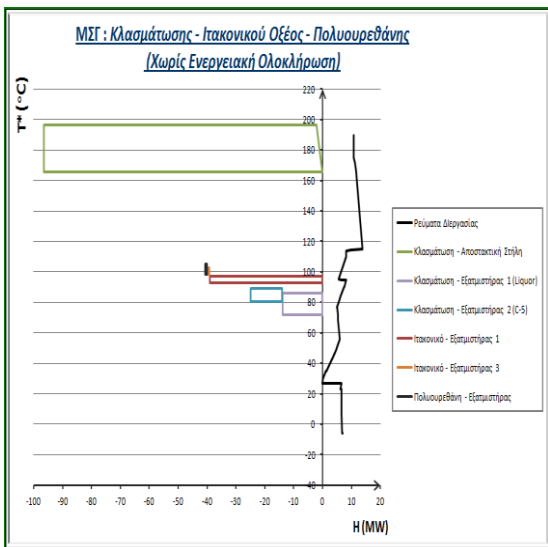
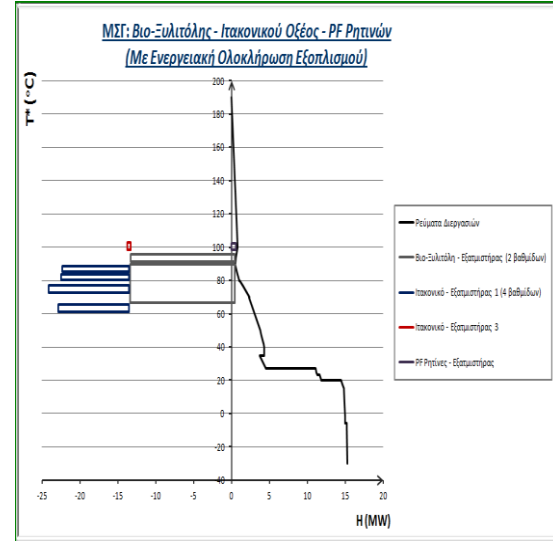
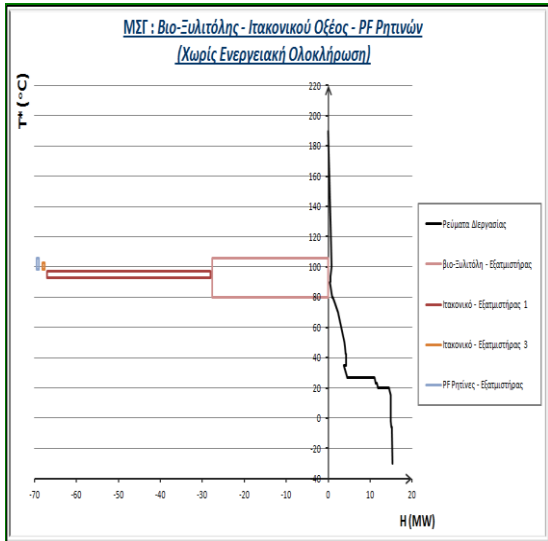
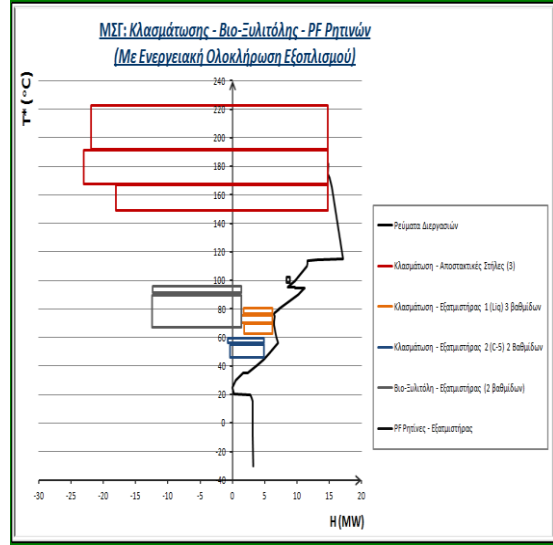
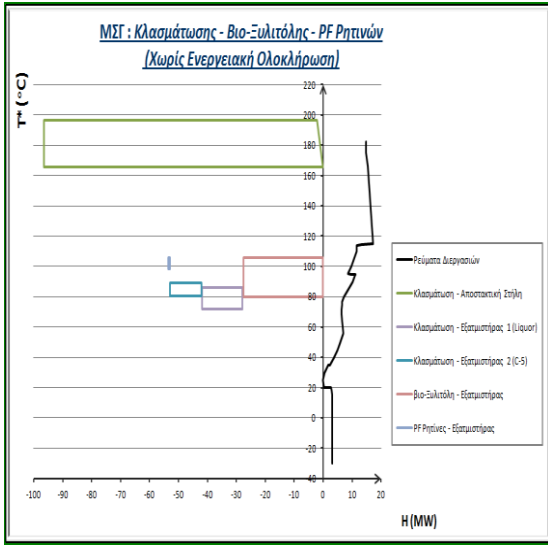


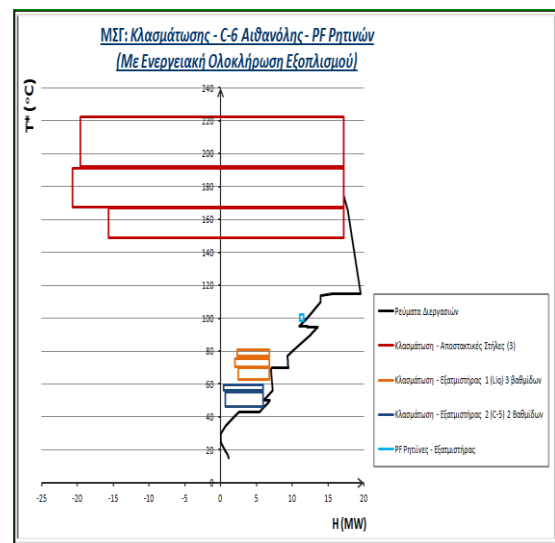
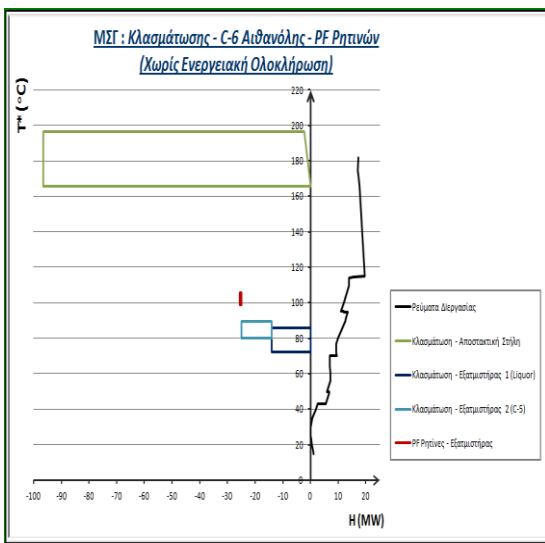
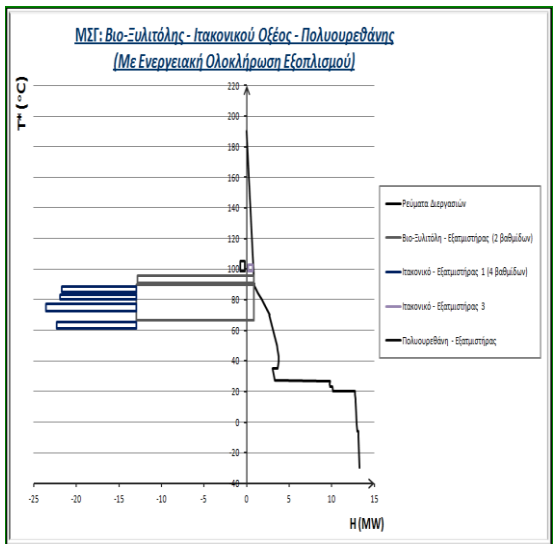
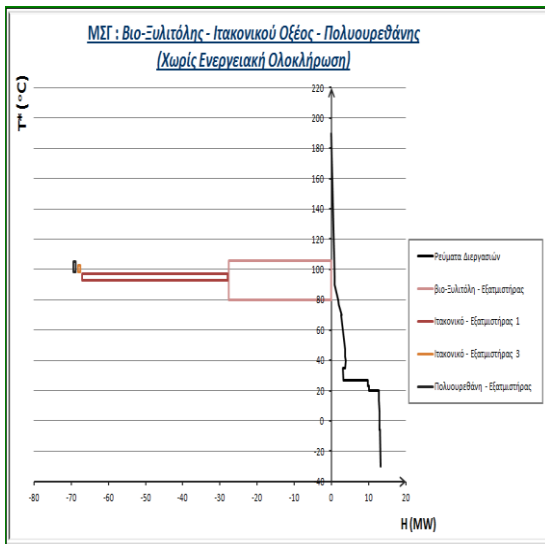
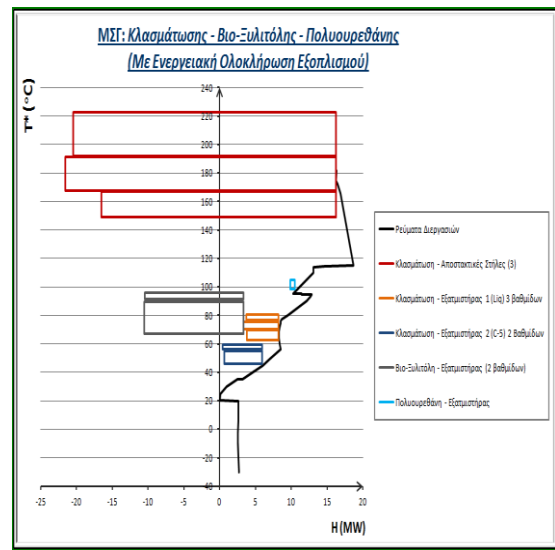
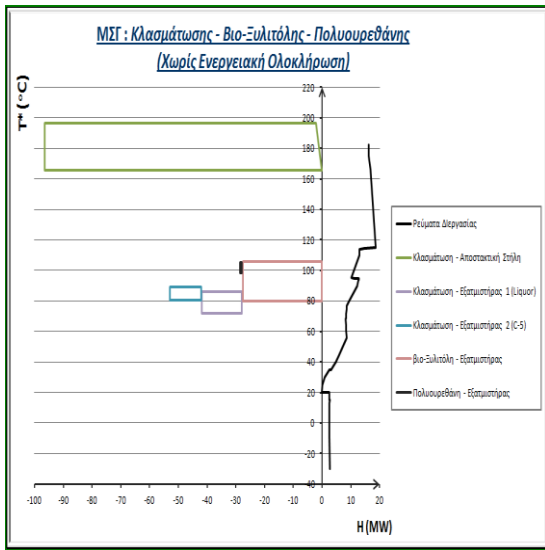


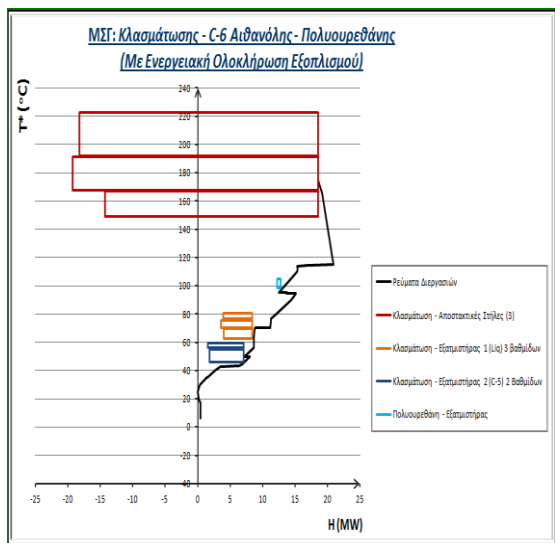
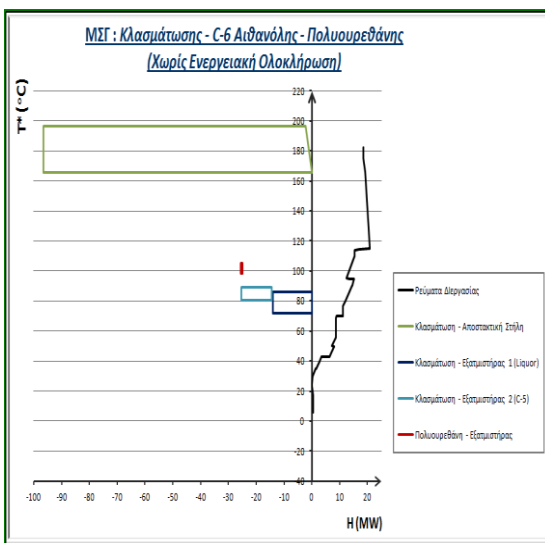
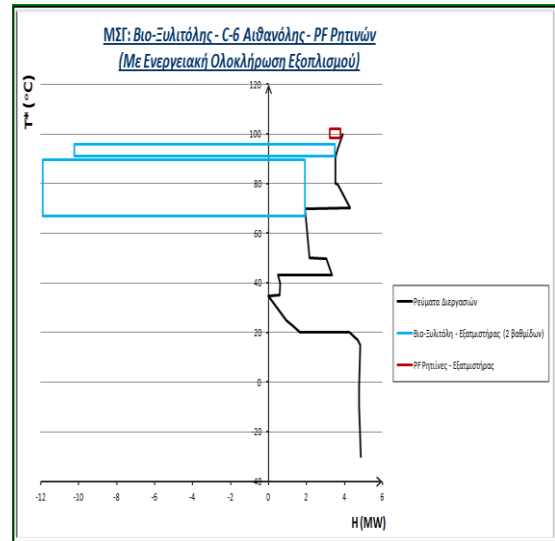
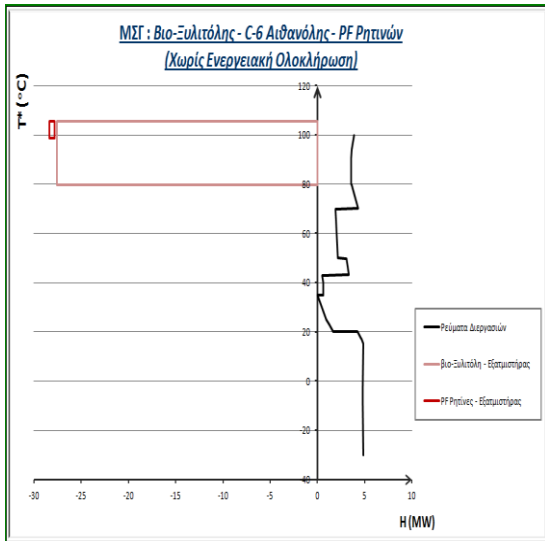
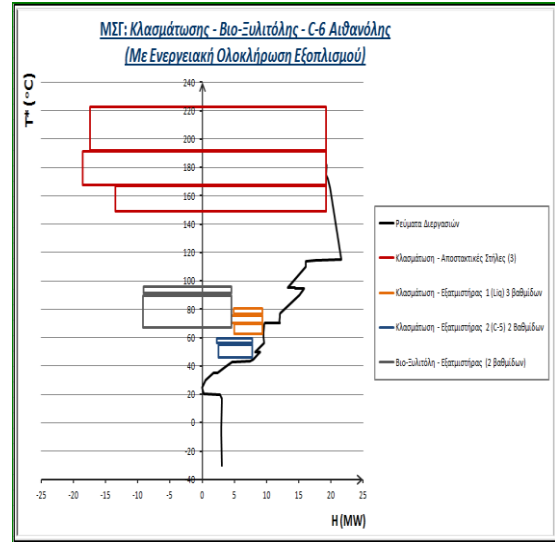
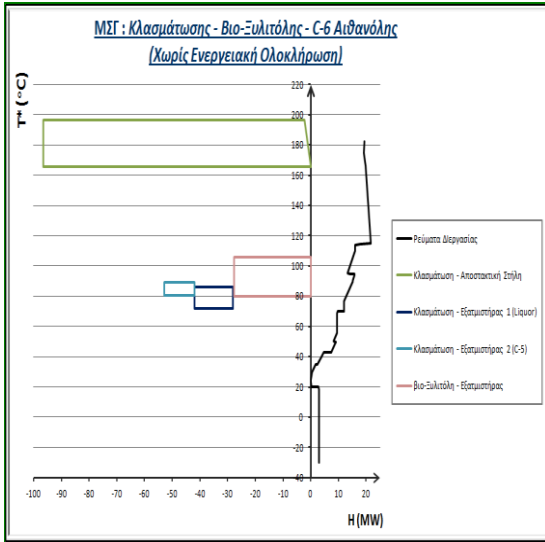


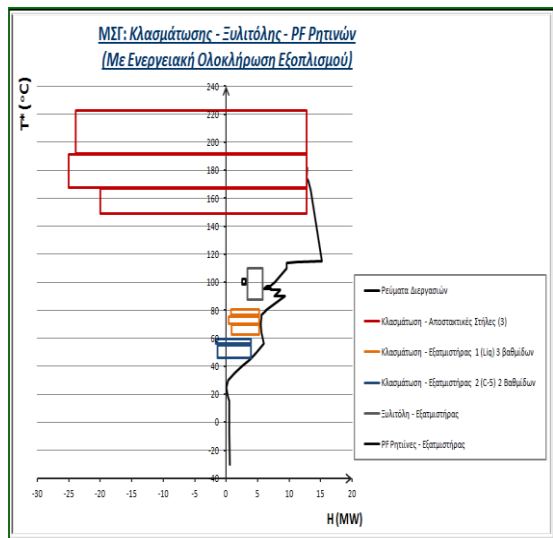
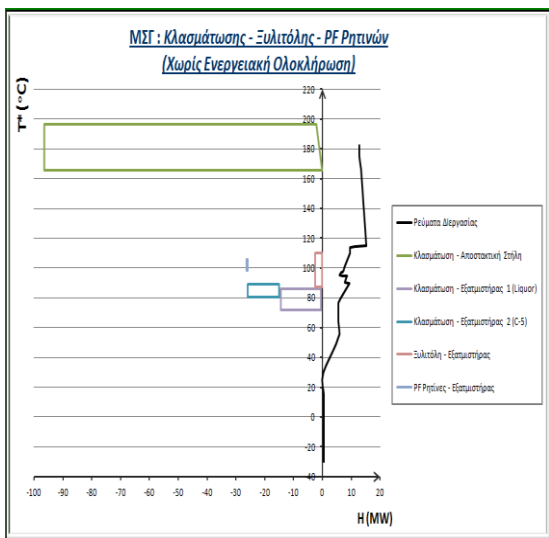
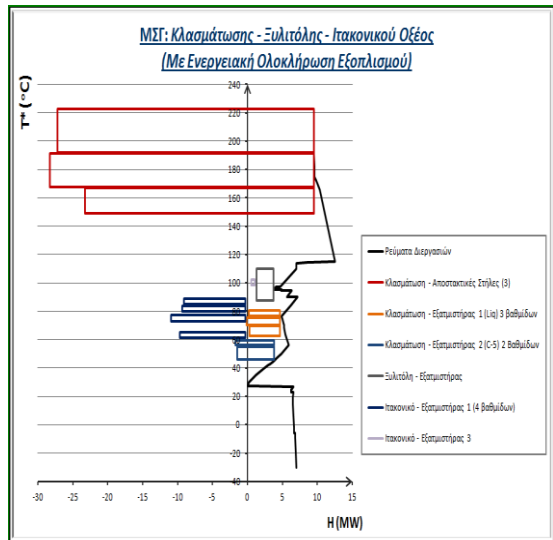
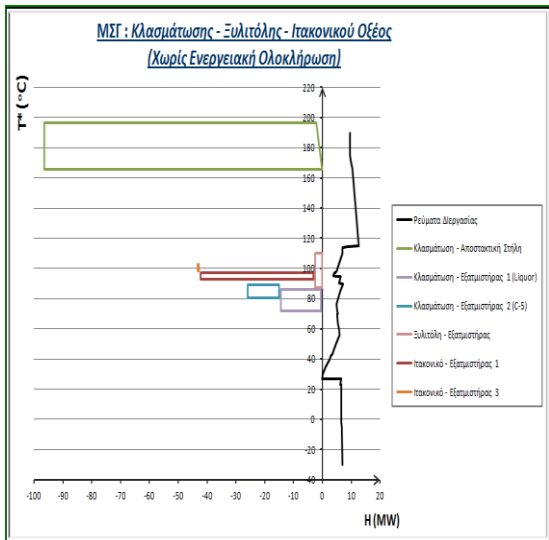
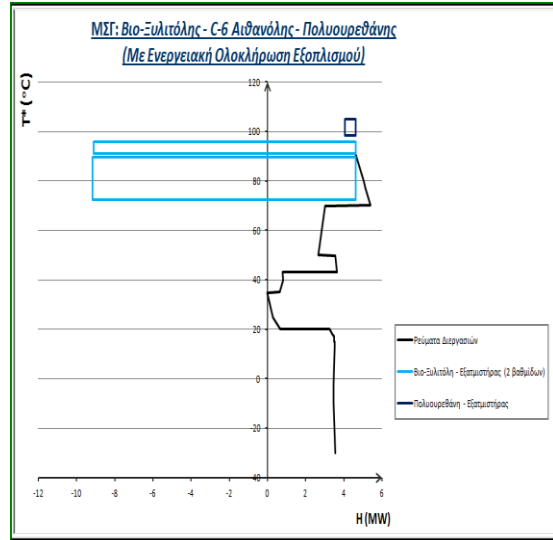
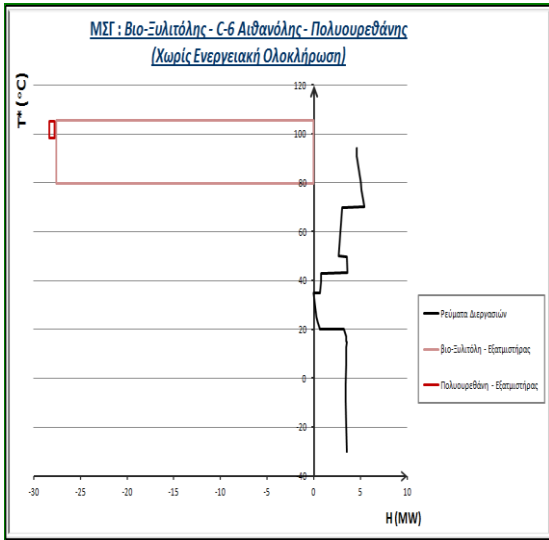
A-3. $N_{\text{διεργασιών}} = 3$

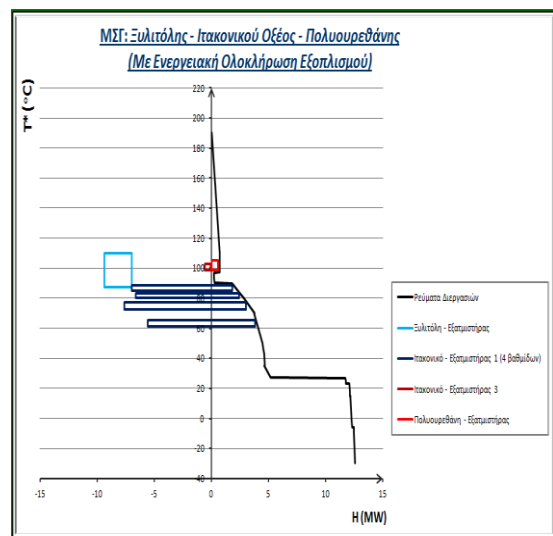
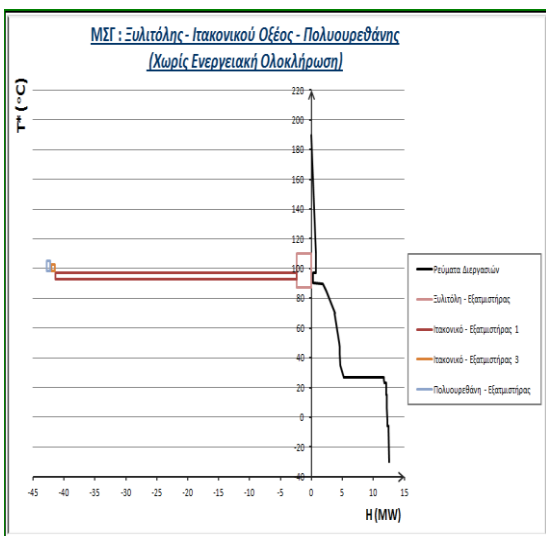
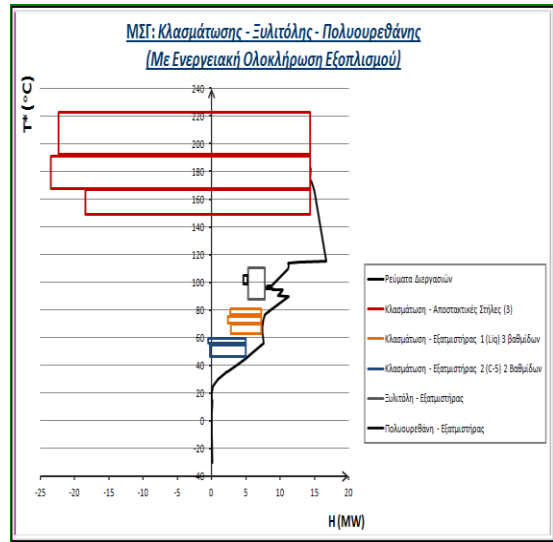
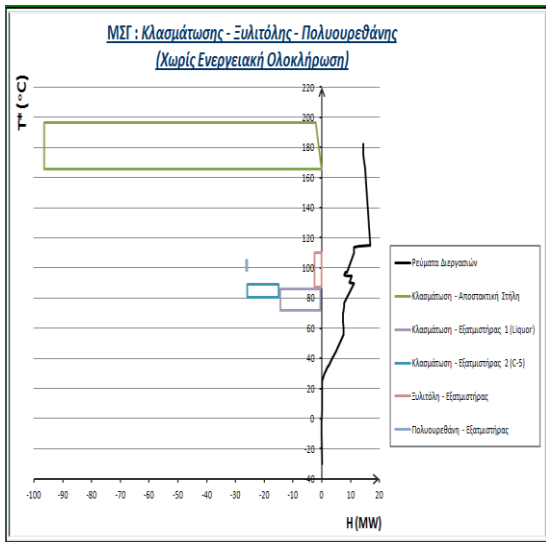
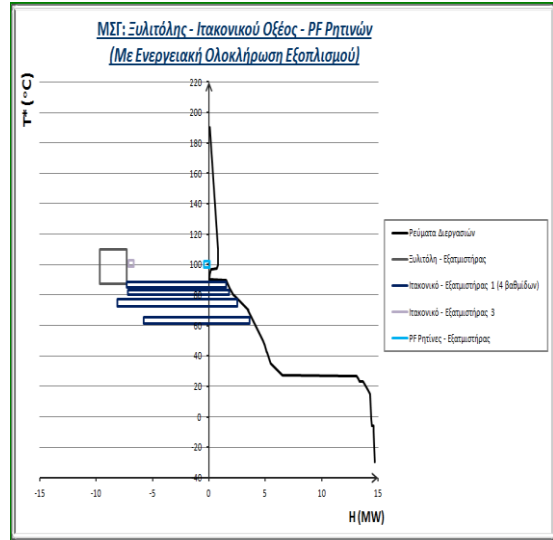
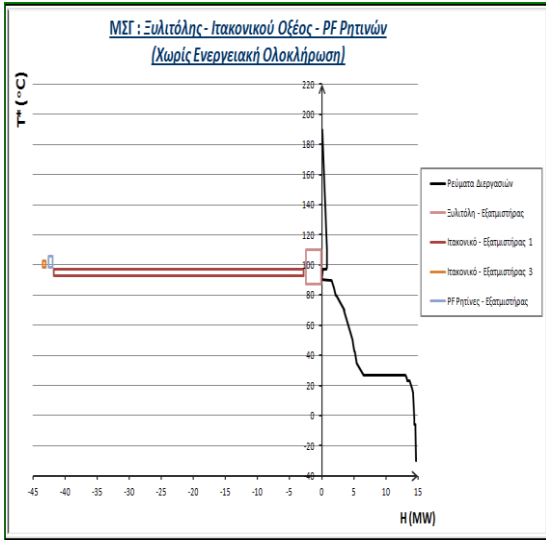


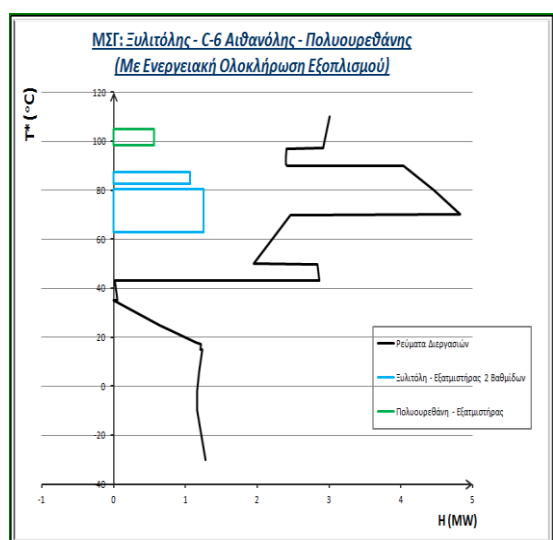
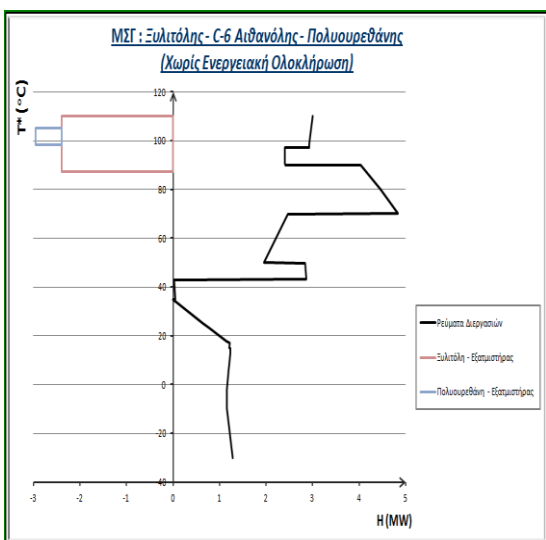
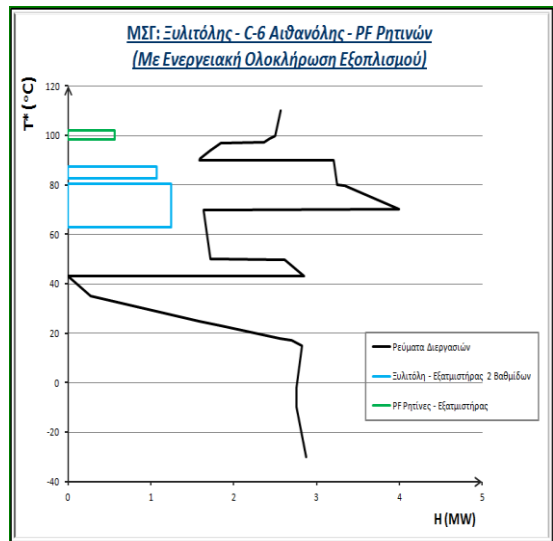
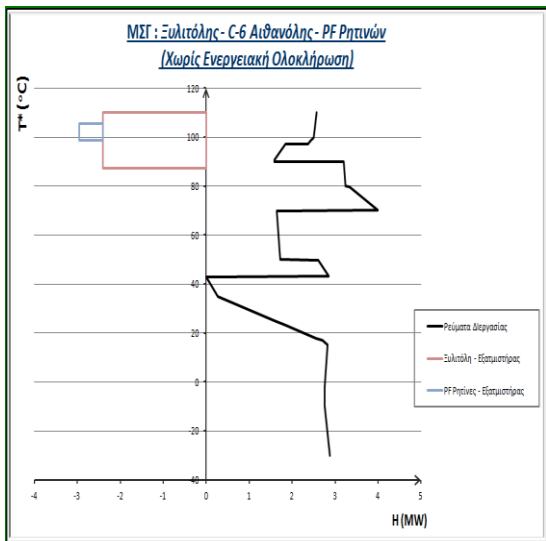
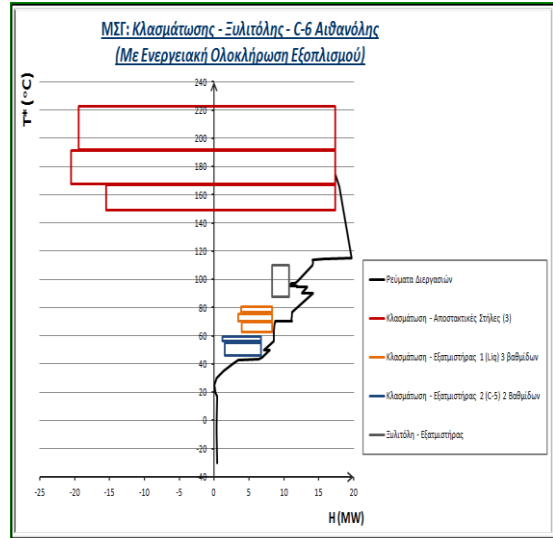
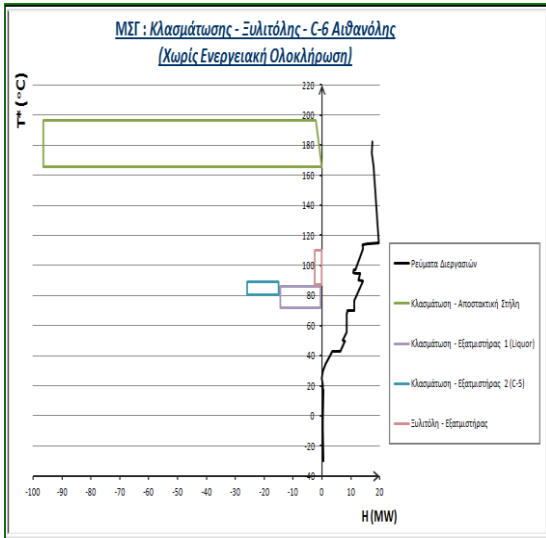


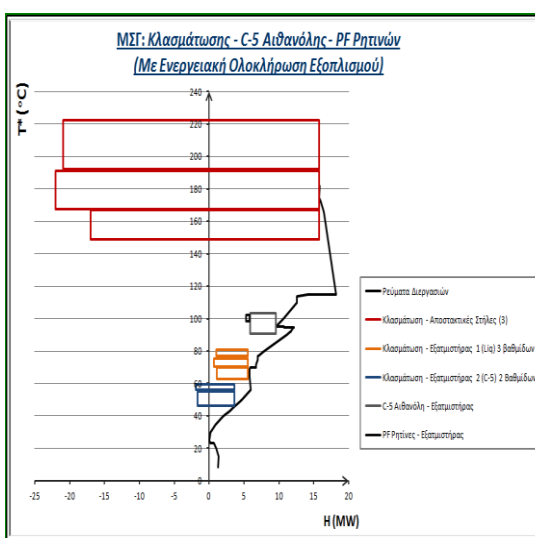
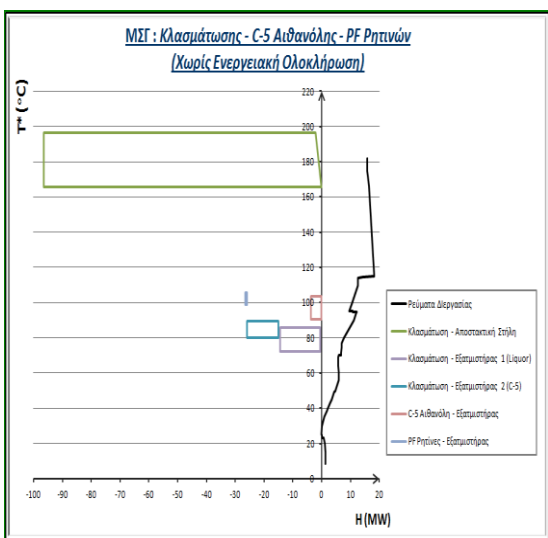
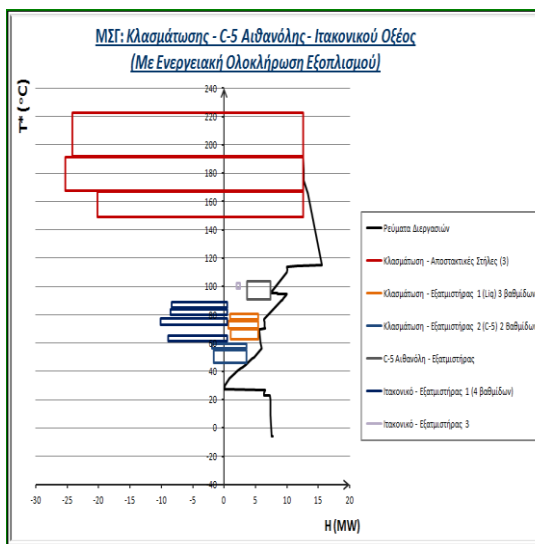
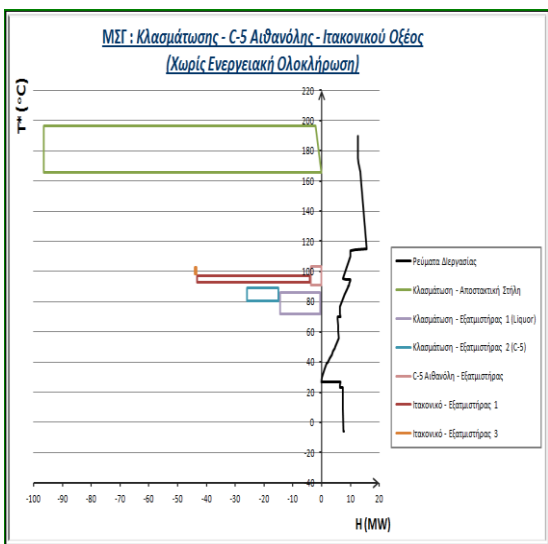
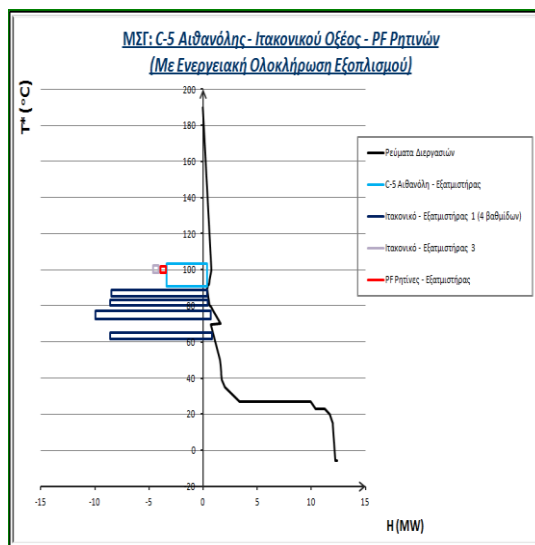
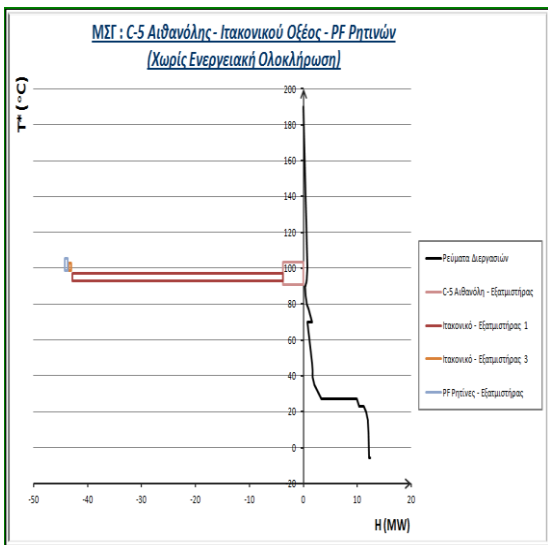


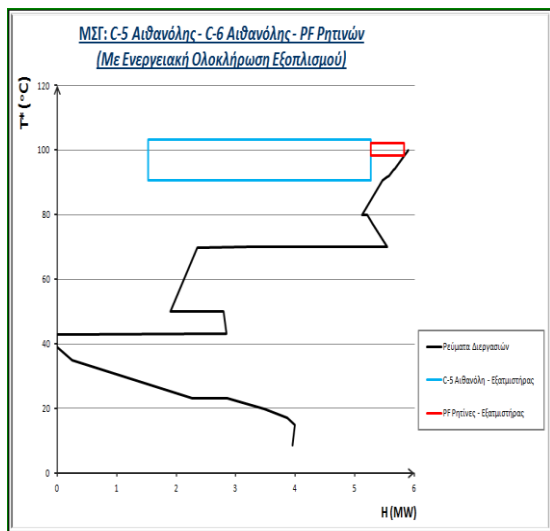
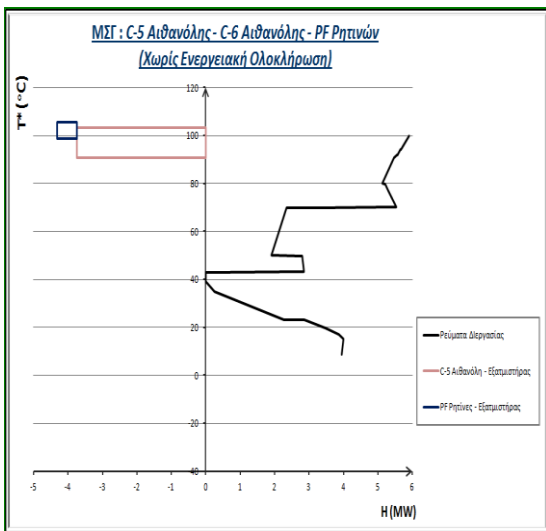
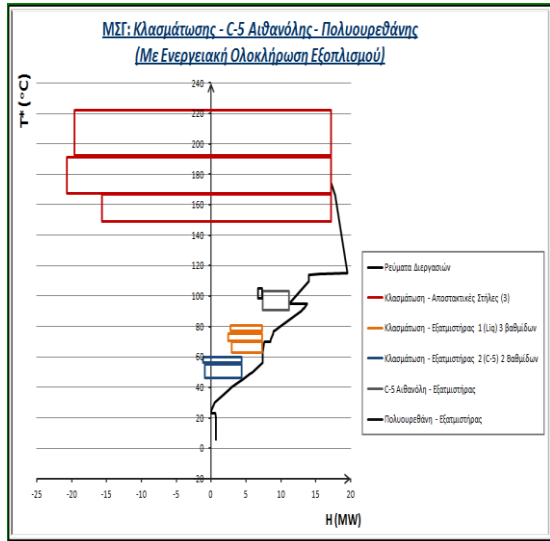
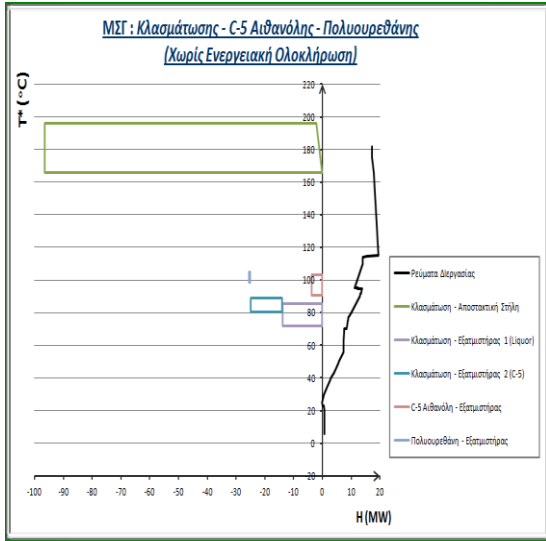
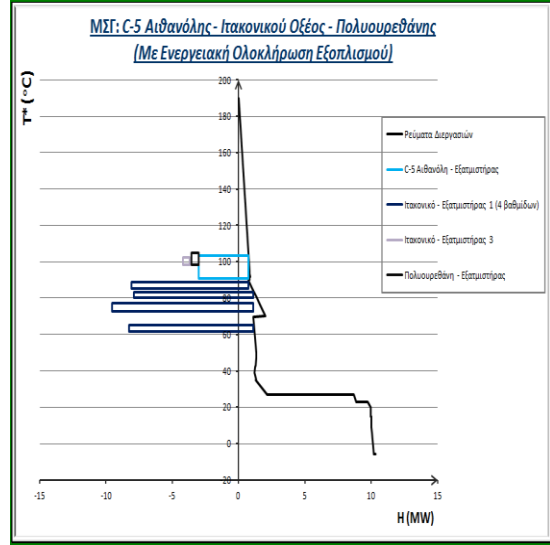
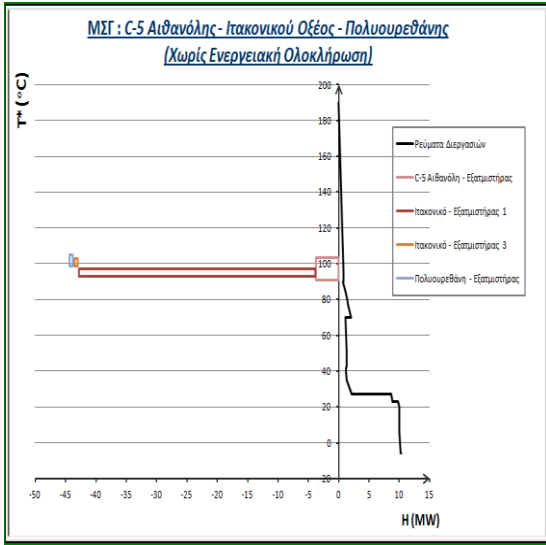


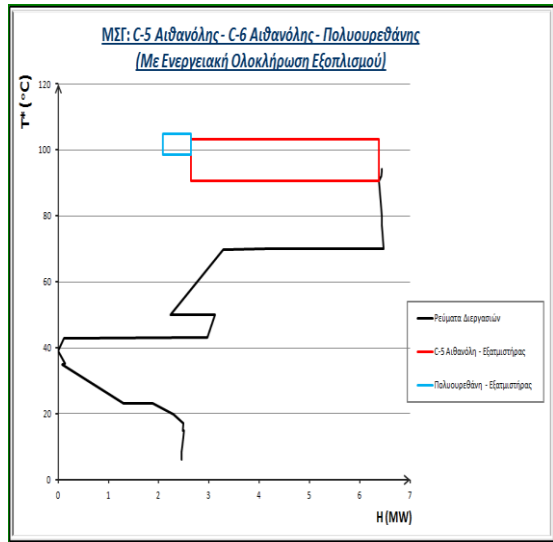
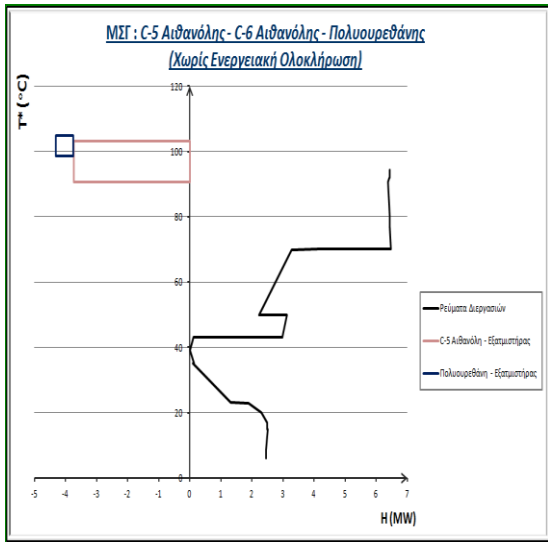
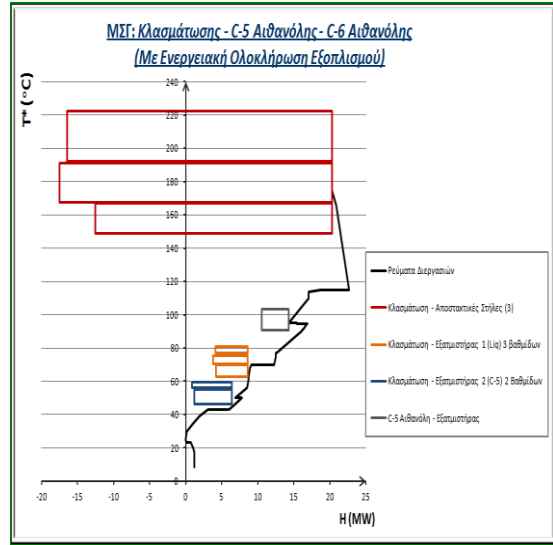
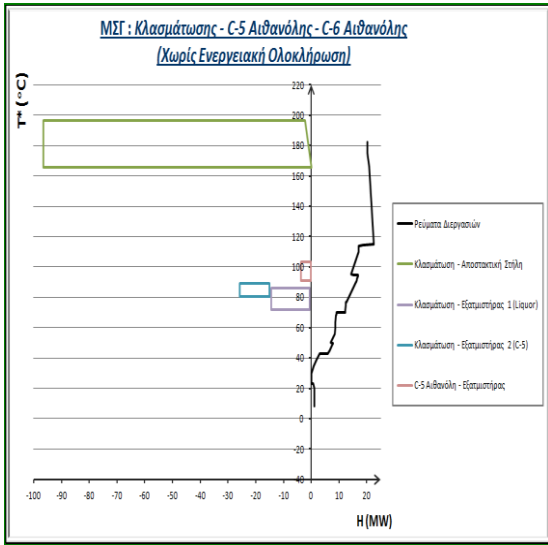




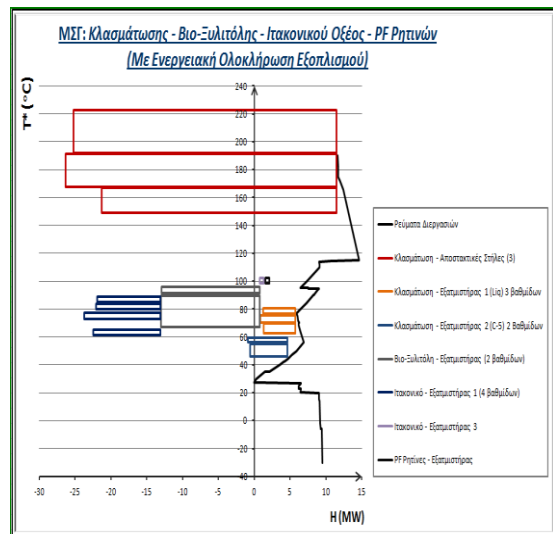
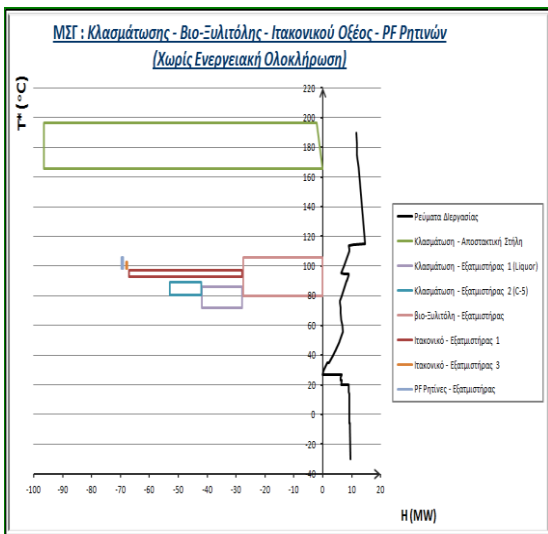


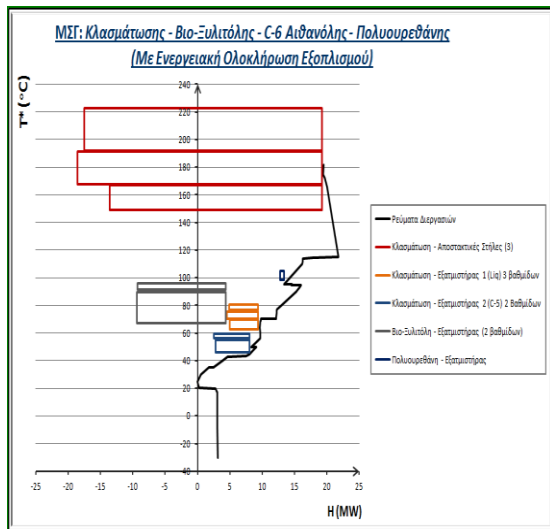
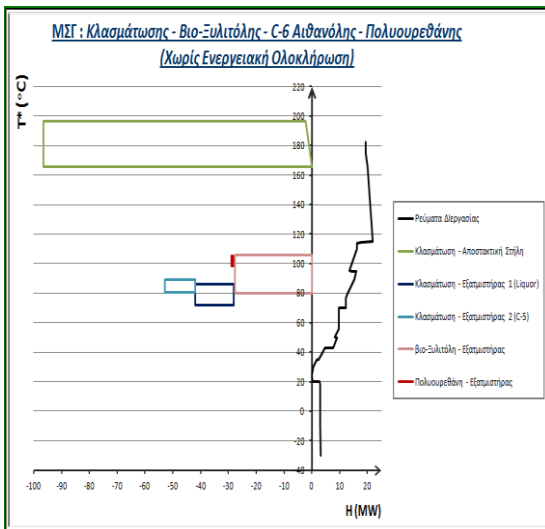
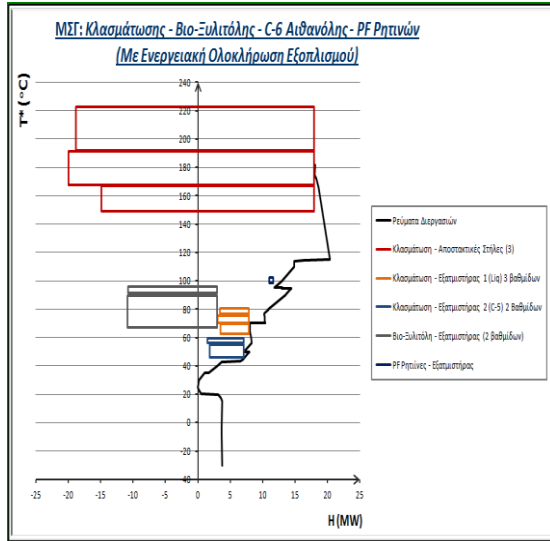
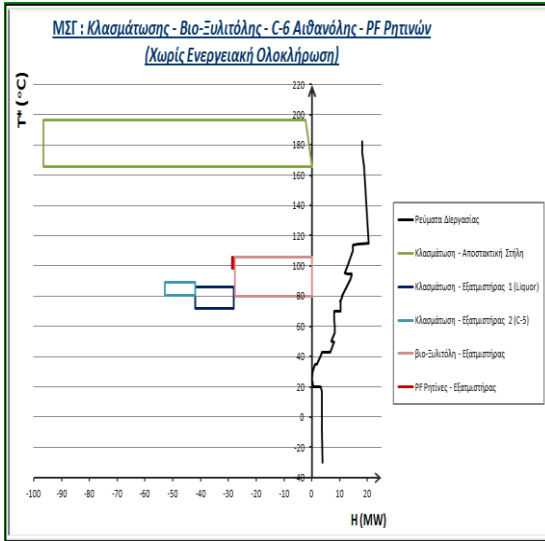
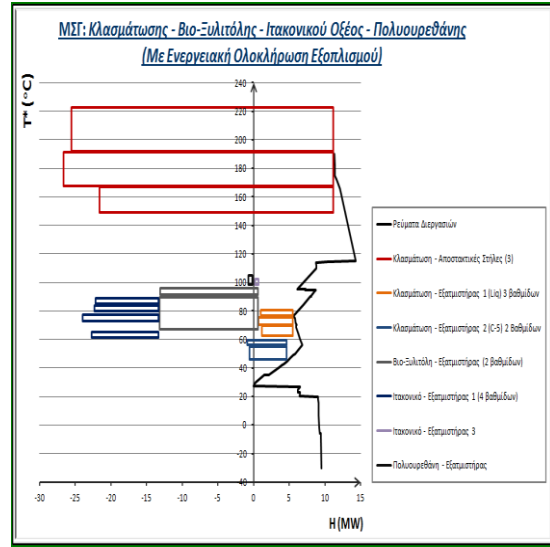
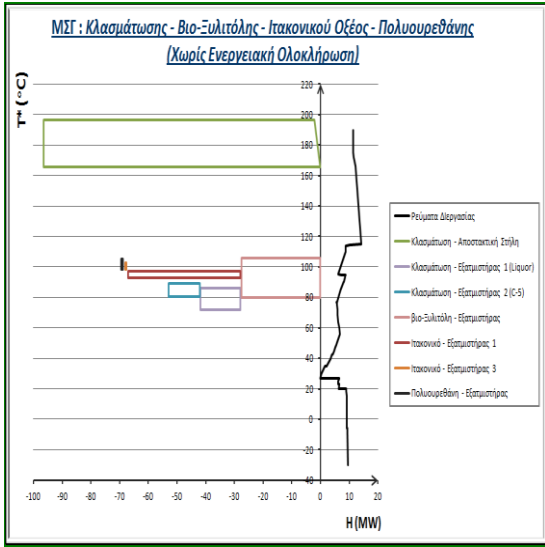


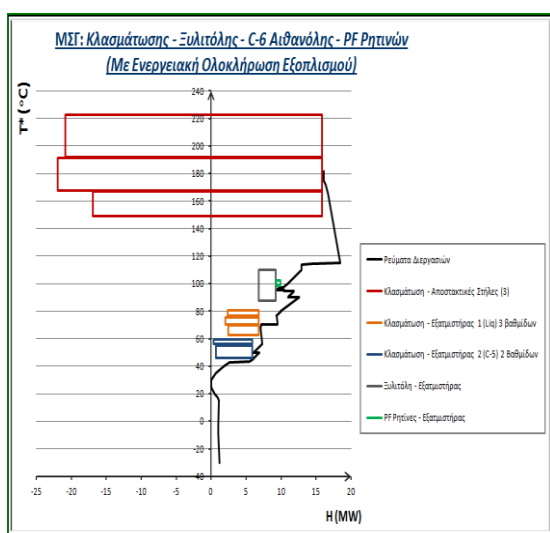
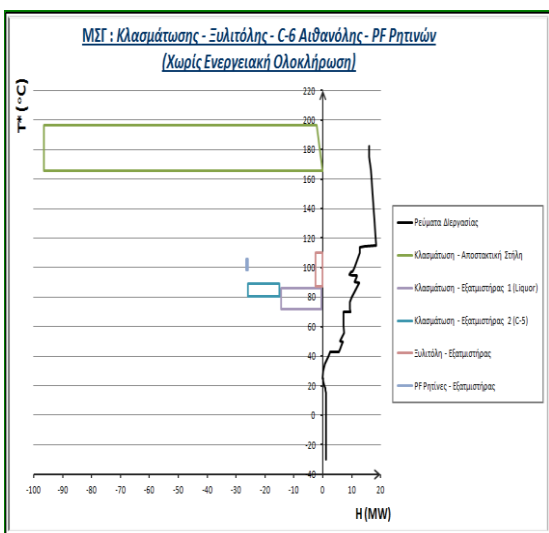
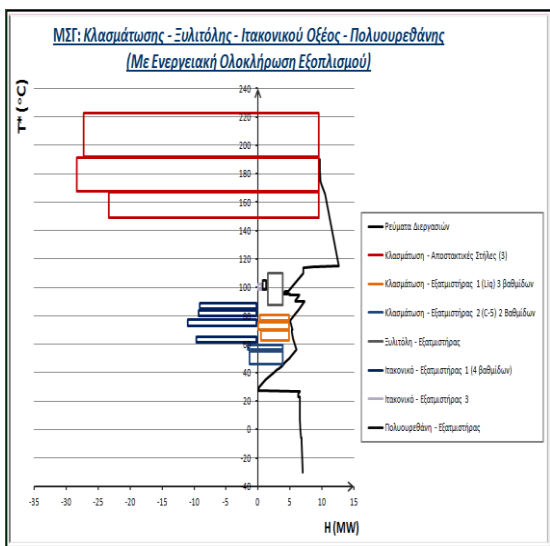
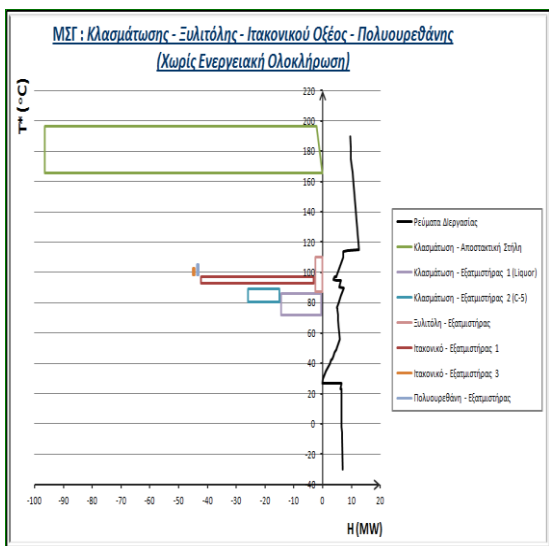
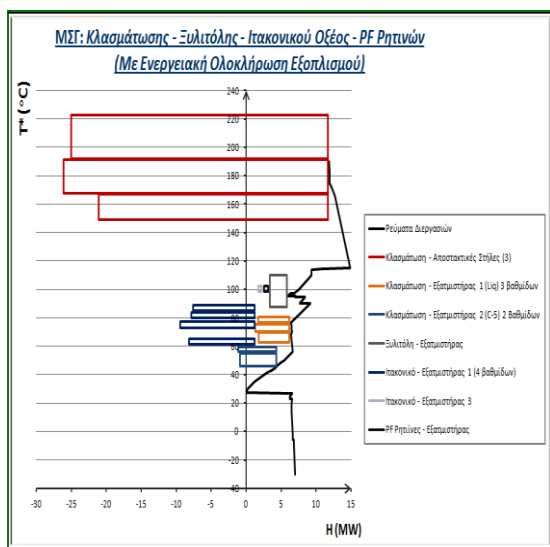
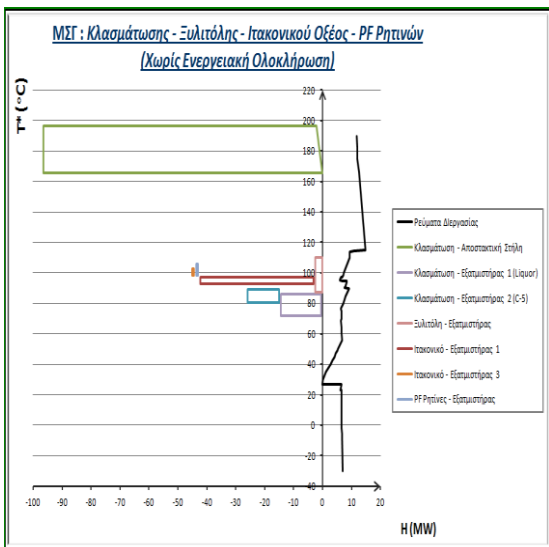


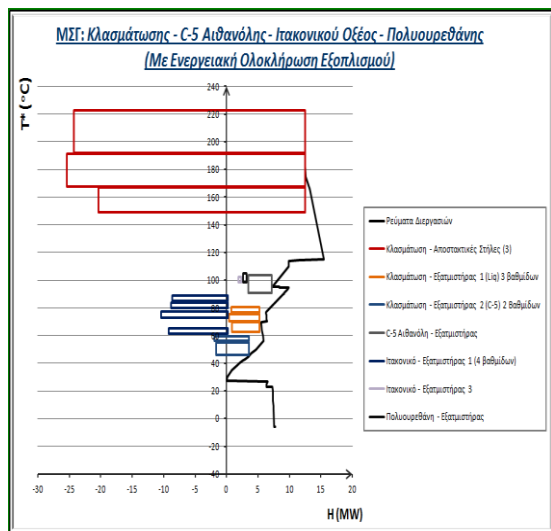
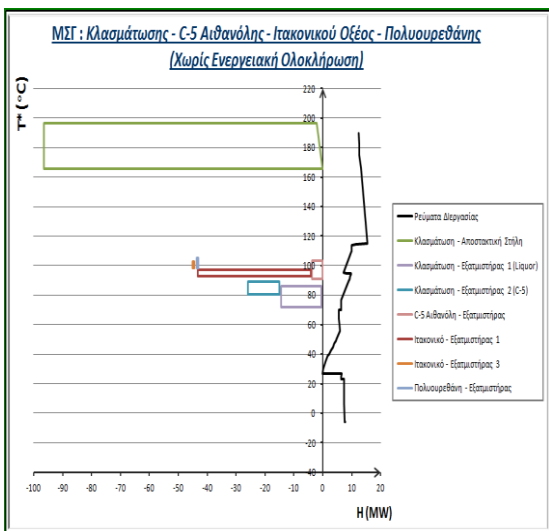
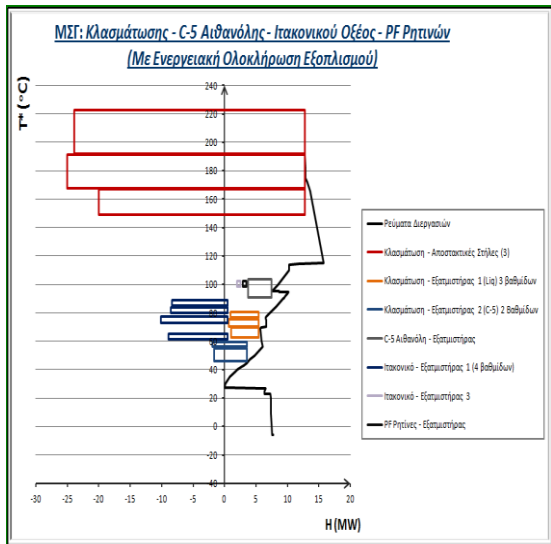
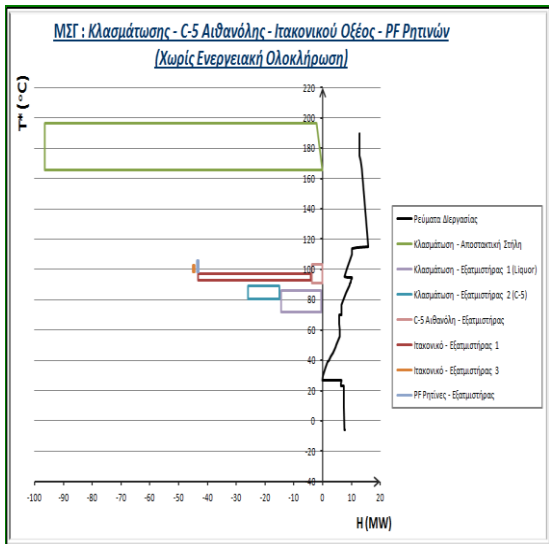
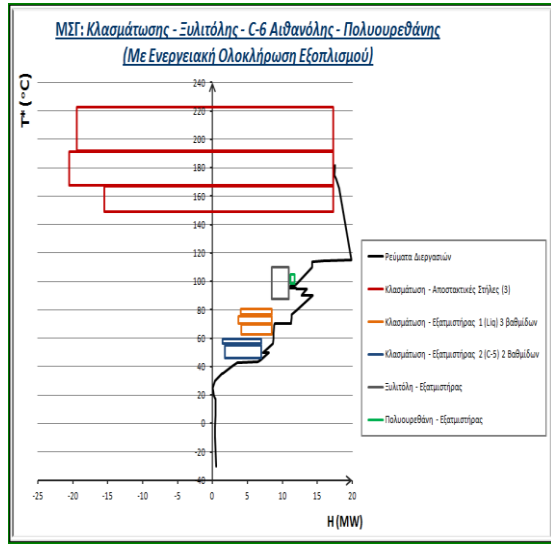
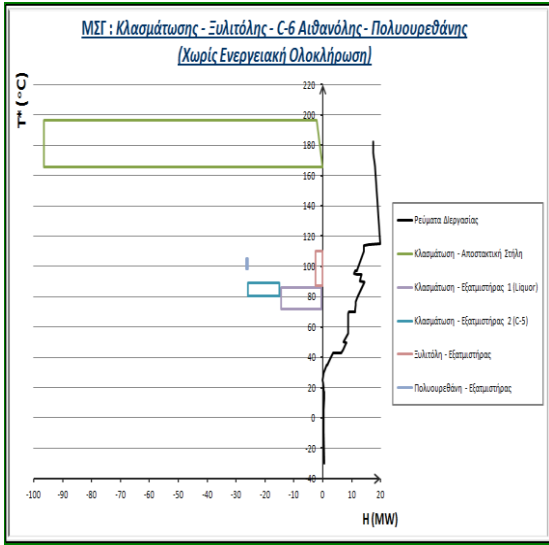


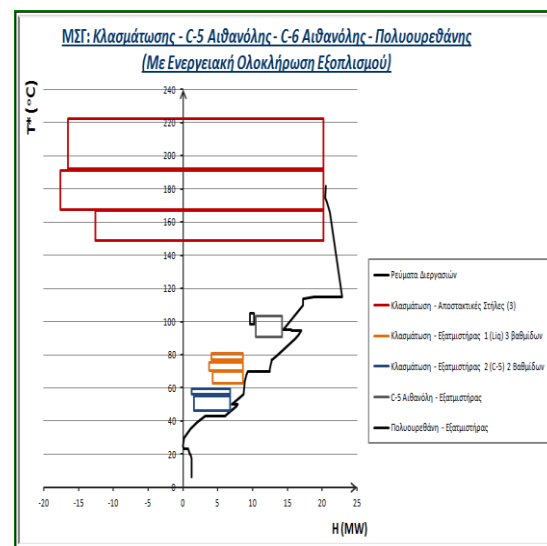
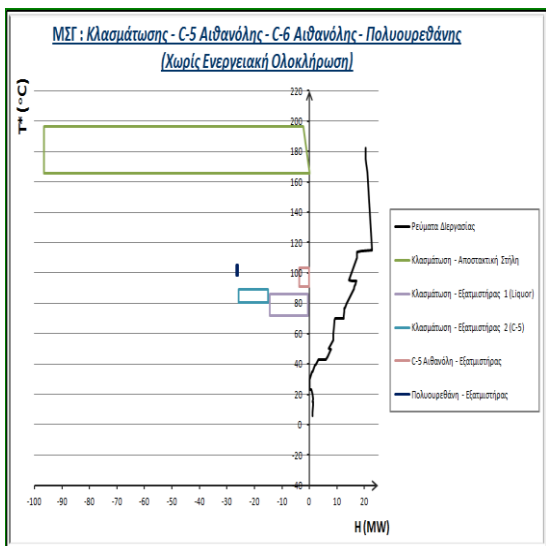
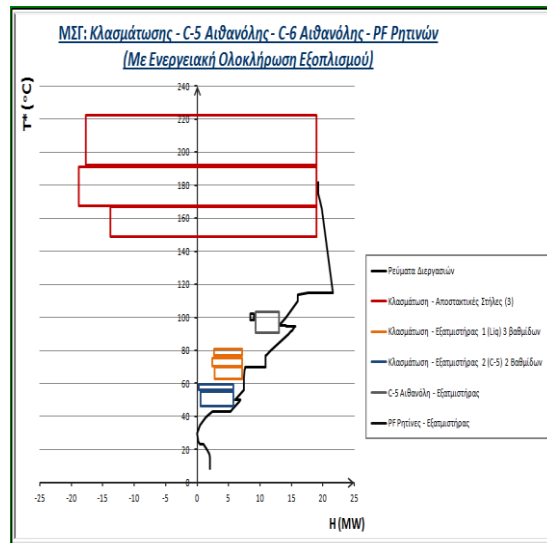
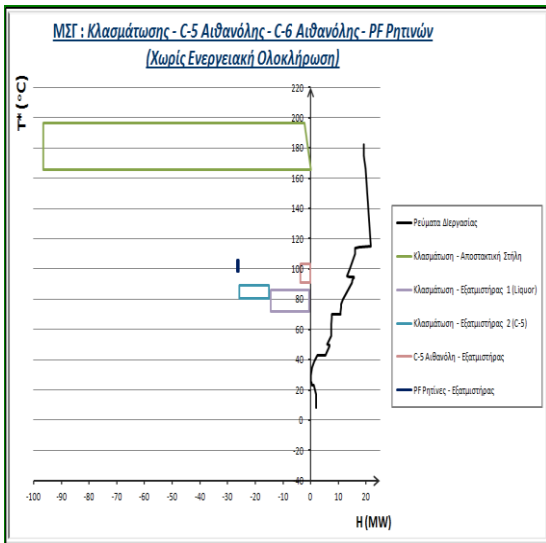
A-4. $N_{\text{διεργασιών}} = 4$











ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ανάλυσης Συνολικής Μονάδας

Πίνακας Β-1 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα για το 1^ο Μονοπάτι

1ο Μονοπάτι: ORGANOSOLV ---> bio-XYLITOL + ITACONIC ACID + PF RESINS														
A/A	ΜΟΝΑΔΑ 1	ΜΟΝΑΔΑ 2	ΜΟΝΑΔΑ 3	ΜΟΝΑΔΑ 4	HOT 1 (kW)	HOT 2 (kW)	HOT 3 (kW)	HOT 4 (kW)	COLD 1 (kW)	COLD 2 (kW)	COLD 3 (kW)	COLD 4 (kW)	TOTAL HOT (kW)	TOTAL COLD (kW)
1	ORGANOSOLV	XYL BIO	ITAC	PF RES	37873	9530	8548	753	22730	11316	20156	2652	56704	56854
2	ORGANOSOLV - XYL BIO	ITAC	PF RES	-	37873	8548	753	0	24365	20156	2652	0	47174	47173
3	ORGANOSOLV - ITAC	XYL BIO	PF RES	-	37830	9530	753	0	34143	11316	2652	0	48113	48111
4	ORGANOSOLV - PF RES	XYL BIO	ITAC	-	37873	9530	8548	0	24477	11316	20156	0	55951	55949
5	ORGANOSOLV - XYL BIO	ITAC - PF RES	-	-	37873	8798	0	0	24365	24148	0	0	46671	48513
6	ORGANOSOLV - ITAC	XYL BIO - PF RES	-	-	37830	14535	0	0	34143	18219	0	0	52365	52362
7	ORGANOSOLV - PF RES	XYL BIO - ITAC	-	-	37873	23637	0	0	24477	36216	0	0	61510	60693
8	ORGANOSOLV - XYL BIO - ITAC	PF RES	-	-	37830	753	0	0	35929	2652	0	0	38583	38581
9	ORGANOSOLV - XYL BIO - PF RES	ITAC	-	-	37873	8548	0	0	26262	20156	0	0	46421	46418
10	ORGANOSOLV - ITAC - PF RES	XYL BIO	-	-	37830	9530	0	0	36042	11316	0	0	47360	47358
11	XYL BIO - ITAC - PF RES	ORGANOSOLV	-	-	24010	37873	0	0	39302	22730	0	0	61883	62032
12	ORGANOSOLV - XYL BIO - ITAC - PF RES	-	-	-	37830	0	0	0	35752	0	0	0	37830	35752
Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες													226436	228593
Μέγιστο Ποσοστό Εξοικονόμησης													83.3%	84.4%

Πίνακας Β-2 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα για το 2ο Μονοπάτι

2ο Μονοπάτι: ORGANOSOLV ---> bio-XYLITOL + ITACONIC ACID + POLYURETHANE														
A/A	ΜΟΝΑΔΑ 1	ΜΟΝΑΔΑ 2	ΜΟΝΑΔΑ 3	ΜΟΝΑΔΑ 4	HOT 1 (kW)	HOT 2 (kW)	HOT 3 (kW)	HOT 4 (kW)	COLD 1 (kW)	COLD 2 (kW)	COLD 3 (kW)	COLD 4 (kW)	TOTAL HOT (kW)	TOTAL COLD (kW)
1	ORGANOSOLV	XYL BIO	ITAC	PU	37873	9530	8548	178	22730	11316	20156	43	56129	54245
2	ORGANOSOLV - XYL BIO	ITAC	PU	-	37873	8548	178	0	24365	20156	43	0	46599	44564
3	ORGANOSOLV - ITAC	XYL BIO	PU	-	37830	9530	178	0	34143	11316	43	0	47538	45502
4	ORGANOSOLV - PU	XYL BIO	ITAC	-	37873	9530	8548	0	22443	11316	20156	0	55951	53915
5	ORGANOSOLV - XYL BIO	ITAC - PU	-	-	37873	8758	0	0	24365	20231	0	0	46631	44596
6	ORGANOSOLV - ITAC	XYL BIO - PU	-	-	37830	13804	0	0	34143	15455	0	0	51634	49598
7	ORGANOSOLV - PU	XYL BIO - ITAC	-	-	37873	23637	0	0	22443	36216	0	0	61510	58659
8	ORGANOSOLV - XYL BIO - ITAC	PU	-	-	37830	178	0	0	35929	43	0	0	38008	35972
9	ORGANOSOLV - XYL BIO - PU	ITAC	-	-	37873	8548	0	0	24229	20156	0	0	46421	44385
10	ORGANOSOLV - ITAC - PU	XYL BIO	-	-	37830	9530	0	0	34008	11316	0	0	47360	45324
11	XYL BIO - ITAC - PU	ORGANOSOLV	-	-	23566	37873	0	0	36824	22730	0	0	61439	59554
12	ORGANOSOLV - XYL BIO - ITAC - PU	-	-	-	37830	0	0	0	36154	0	0	0	37830	36154
Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες													224098	224222
Μέγιστο Ποσοστό Εξοικονόμησης													83.1%	83.9%

Πίνακας Β-3 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα για το 3ο Μονοπάτι

3ο Μονοπάτι: ORGANOSOLV ---> bio-XYLITOL + C6 ETHANOL + PF RESINS														
A/A	ΜΟΝΑΔΑ 1	ΜΟΝΑΔΑ 2	ΜΟΝΑΔΑ 3	ΜΟΝΑΔΑ 4	HOT 1 (kW)	HOT 2 (kW)	HOT 3 (kW)	HOT 4 (kW)	COLD 1 (kW)	COLD 2 (kW)	COLD 3 (kW)	COLD 4 (kW)	TOTAL HOT (kW)	TOTAL COLD (kW)
1	ORGANOSOLV	XYL BIO	C6 ETH	PF RES	37873	9530	19833	753	22730	11316	16412	2652	67989	53110
2	ORGANOSOLV - XYL BIO	C6 ETH	PF RES	-	37873	19833	753	0	24365	16412	2652	0	58459	43429
3	ORGANOSOLV - C6 ETH	XYL BIO	PF RES	-	53718	9530	753	0	35003	11316	2652	0	64001	48971
4	ORGANOSOLV - PF RES	XYL BIO	C6 ETH	-	37873	9530	19833	0	24477	11316	16412	0	67236	52205
5	ORGANOSOLV - XYL BIO	C6 ETH - PF RES	-	-	37873	19501	0	0	24365	17978	0	0	57374	42343
6	ORGANOSOLV - C6 ETH	XYL BIO – PF RES	-	-	53718	14535	0	0	35003	18219	0	0	68253	53222
7	ORGANOSOLV - PF RES	XYL BIO – C6 ETH	-	-	37873	31351	0	0	24477	29716	0	0	69224	54193
8	ORGANOSOLV - XYL BIO – C6 ETH	PF RES	-	-	53718	753	0	0	36788	2652	0	0	54471	39440
9	ORGANOSOLV - XYL BIO – PF RES	C6 ETH	-	-	37873	19833	0	0	26262	16412	0	0	57706	42674
10	ORGANOSOLV - C6 ETH - PF RES	XYL BIO	-	-	53718	9530	0	0	36901	11316	0	0	63248	48217
11	XYL BIO – C6 ETH - PF RES	ORGANOSOLV	-	-	31626	37873	0	0	31889	22730	0	0	69499	54619
12	ORGANOSOLV - XYL BIO – C6 ETH - PF RES	-	-	-	53718	0	0	0	38845	0	0	0	53718	38845
Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες													207363	194491
Μέγιστο Ποσοστό Εξοικονόμησης													74.1%	80.0%

Πίνακας Β-4 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα για το 4ο Μονοπάτι

4ο Μονοπάτι: ORGANOSOLV ---> bio-XYLITOL + C6 ETHANOL + POLYURETHANE														
A/A	ΜΟΝΑΔΑ 1	ΜΟΝΑΔΑ 2	ΜΟΝΑΔΑ 3	ΜΟΝΑΔΑ 4	HOT 1 (kW)	HOT 2 (kW)	HOT 3 (kW)	HOT 4 (kW)	COLD 1 (kW)	COLD 2 (kW)	COLD 3 (kW)	COLD 4 (kW)	TOTAL HOT (kW)	TOTAL COLD (kW)
1	ORGANOSOLV	XYL BIO	C6 ETH	PU	37873	9530	19833	178	22730	11316	16412	43	67414	50501
2	ORGANOSOLV - XYL BIO	C6 ETH	PU	-	37873	19833	178	0	24365	16412	43	0	57884	40820
3	ORGANOSOLV - C6 ETH	XYL BIO	PU	-	53718	9530	178	0	35003	11316	43	0	63426	46362
4	ORGANOSOLV - PU	XYL BIO	C6 ETH	-	37873	9530	19833	0	22443	11316	16412	0	67236	50171
5	ORGANOSOLV - XYL BIO	C6 ETH - PU	-	-	37873	19933	0	0	24365	16377	0	0	57806	40742
6	ORGANOSOLV - C6 ETH	XYL BIO - PU	-	-	53718	13804	0	0	35003	15455	0	0	67522	50458
7	ORGANOSOLV - PU	XYL BIO - C6 ETH	-	-	37873	31351	0	0	22443	29716	0	0	69224	52159
8	ORGANOSOLV - XYL BIO - C6 ETH	PU	-	-	53718	178	0	0	36788	43	0	0	53896	36831
9	ORGANOSOLV - XYL BIO - PU	C6 ETH	-	-	37873	19833	0	0	24229	16412	0	0	57706	40641
10	ORGANOSOLV - C6 ETH - PU	XYL BIO	-	-	53718	9530	0	0	34867	11316	0	0	63248	46183
11	XYL BIO - C6 ETH - PU	ORGANOSOLV	-	-	30209	37873	0	0	27868	22730	0	0	68082	50598
12	ORGANOSOLV - XYL BIO - C6 ETH - PU	-	-	-	53718	0	0	0	36844	0	0	0	53718	36844
Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες													205025	190120
Μέγιστο Ποσοστό Εξοικονόμησης													73.8%	80.6%

Πίνακας Β-5 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα για το 5ο Μονοπάτι

5ο Μονοπάτι: ORGANOSOLV ---> XYLITOL + ITACONIC ACID + PF RESINS														
A/A	ΜΟΝΑΔΑ 1	ΜΟΝΑΔΑ 2	ΜΟΝΑΔΑ 3	ΜΟΝΑΔΑ 4	HOT 1 (kW)	HOT 2 (kW)	HOT 3 (kW)	HOT 4 (kW)	COLD 1 (kW)	COLD 2 (kW)	COLD 3 (kW)	COLD 4 (kW)	TOTAL HOT (kW)	TOTAL COLD (kW)
1	ORGANOSOLV	XYL CAT	ITAC	PF RES	37873	609	8548	753	22730	1729	20156	2652	47783	47267
2	ORGANOSOLV - XYL CAT	ITAC	PF RES	-	37873	8548	753	0	23699	20156	2652	0	47174	46507
3	ORGANOSOLV - ITAC	XYL CAT	PF RES	-	37830	609	753	0	34143	1729	2652	0	39192	38524
4	ORGANOSOLV - PF RES	XYL CAT	ITAC	-	37873	609	8548	0	24477	1729	20156	0	47030	46362
5	ORGANOSOLV - XYL CAT	ITAC - PF RES	-	-	37873	8798	0	0	23699	24148	0	0	46671	47847
6	ORGANOSOLV - ITAC	XYL CAT - PF RES	-	-	37830	2090	0	0	34143	5108	0	0	39920	39251
7	ORGANOSOLV - PF RES	XYL CAT - ITAC	-	-	37873	9521	0	0	24477	22149	0	0	47394	46626
8	ORGANOSOLV - XYL CAT - ITAC	PF RES	-	-	37830	753	0	0	35263	2652	0	0	38583	37915
9	ORGANOSOLV - XYL CAT - PF RES	ITAC	-	-	37873	8548	0	0	25597	20156	0	0	46421	45753
10	ORGANOSOLV - ITAC - PF RES	XYL CAT	-	-	37830	609	0	0	36042	1729	0	0	38439	37771
11	XYL CAT - ITAC - PF RES	ORGANOSOLV	-	-	9778	37873	0	0	24404	22730	0	0	47651	47134
12	ORGANOSOLV - XYL CAT - ITAC - PF RES	-	-	-	37830	0	0	0	33092	0	0	0	37830	33092
Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες													200807	202299
Μέγιστο Ποσοστό Εξοικονόμησης													81.2%	83.6%

Πίνακας Β-6 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα για το 6ο Μονοπάτι

6ο Μονοπάτι: ORGANOSOLV ---> XYLITOL + ITACONIC ACID + POLYURETHANE														
A/A	ΜΟΝΑΔΑ 1	ΜΟΝΑΔΑ 2	ΜΟΝΑΔΑ 3	ΜΟΝΑΔΑ 4	HOT 1 (kW)	HOT 2 (kW)	HOT 3 (kW)	HOT 4 (kW)	COLD 1 (kW)	COLD 2 (kW)	COLD 3 (kW)	COLD 4 (kW)	TOTAL HOT (kW)	TOTAL COLD (kW)
1	ORGANOSOLV	XYL CAT	ITAC	PU	37873	609	8548	178	22730	1729	20156	43	47208	44658
2	ORGANOSOLV - XYL CAT	ITAC	PU	-	37873	8548	178	0	23699	20156	43	0	46599	43898
3	ORGANOSOLV - ITAC	XYL CAT	PU	-	37830	609	178	0	34143	1729	43	0	38617	35915
4	ORGANOSOLV - PU	XYL CAT	ITAC	-	37873	609	8548	0	22443	1729	20156	0	47030	44328
5	ORGANOSOLV - XYL CAT	ITAC - PU	-	-	37873	8758	0	0	23699	20231	0	0	46631	43930
6	ORGANOSOLV - ITAC	XYL CAT - PU	-	-	37830	645	0	0	34143	1630	0	0	38475	35773
7	ORGANOSOLV - PU	XYL CAT - ITAC	-	-	37873	9521	0	0	22443	22149	0	0	47394	44592
8	ORGANOSOLV - XYL CAT - ITAC	PU	-	-	37830	178	0	0	35263	43	0	0	38008	35306
9	ORGANOSOLV - XYL CAT - PU	ITAC	-	-	37873	8548	0	0	23564	20156	0	0	46421	43720
10	ORGANOSOLV - ITAC - PU	XYL CAT	-	-	37830	609	0	0	34008	1729	0	0	38439	35737
11	XYL CAT - ITAC - PU	ORGANOSOLV	-	-	9384	37873	0	0	21977	22730	0	0	47257	44707
12	ORGANOSOLV - XYL CAT - ITAC - PU	-	-	-	37830	0	0	0	35294	0	0	0	37830	35294
Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες													198469	197927
Μέγιστο Ποσοστό Εξοικονόμησης													80.9%	82.2%

Πίνακας Β-7 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα για το 7ο Μονοπάτι

7ο Μονοπάτι: ORGANOSOLV ---> XYLITOL + C6 ETHANOL + PF RESINS														
A/A	ΜΟΝΑΔΑ 1	ΜΟΝΑΔΑ 2	ΜΟΝΑΔΑ 3	ΜΟΝΑΔΑ 4	HOT 1 (kW)	HOT 2 (kW)	HOT 3 (kW)	HOT 4 (kW)	COLD 1 (kW)	COLD 2 (kW)	COLD 3 (kW)	COLD 4 (kW)	TOTAL HOT (kW)	TOTAL COLD (kW)
1	ORGANOSOLV	XYL CAT	C6 ETH	PF RES	37873	609	19833	753	22730	1729	16412	2652	59068	43523
2	ORGANOSOLV - XYL CAT	C6 ETH	PF RES	-	37873	19833	753	0	23699	16412	2652	0	58459	42763
3	ORGANOSOLV - C6 ETH	XYL CAT	PF RES	-	53718	609	753	0	35003	1729	2652	0	55080	39384
4	ORGANOSOLV - PF RES	XYL CAT	C6 ETH	-	37873	609	19833	0	24477	1729	16412	0	58315	42618
5	ORGANOSOLV - XYL CAT	C6 ETH - PF RES	-	-	37873	19501	0	0	23699	17978	0	0	57374	41677
6	ORGANOSOLV - C6 ETH	XYL CAT - PF RES	-	-	53718	2090	0	0	35003	5108	0	0	55808	40111
7	ORGANOSOLV - PF RES	XYL CAT - C6 ETH	-	-	37873	18854	0	0	24477	16553	0	0	56727	41030
8	ORGANOSOLV - XYL CAT - C6 ETH	PF RES	-	-	53718	753	0	0	36123	2652	0	0	54471	38775
9	ORGANOSOLV - XYL CAT - PF RES	C6 ETH	-	-	37873	19833	0	0	25597	16412	0	0	57706	42009
10	ORGANOSOLV - C6 ETH - PF RES	XYL CAT	-	-	53718	609	0	0	36901	1729	0	0	54327	38630
11	XYL CAT - C6 ETH - PF RES	ORGANOSOLV	-	-	18411	37873	0	0	18008	22730	0	0	56284	40738
12	ORGANOSOLV - XYL CAT - C6 ETH - PF RES	-	-	-	53718	0	0	0	38260	0	0	0	53718	38260
Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες													181734	168197
Μέγιστο Ποσοστό Εξοικονόμησης													70.4%	77.3%

Πίνακας Β-8 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα για το 8ο Μονοπάτι

8ο Μονοπάτι: ORGANOSOLV ---> XYLITOL + C6 ETHANOL + POLYURETHANE														
A/A	ΜΟΝΑΔΑ 1	ΜΟΝΑΔΑ 2	ΜΟΝΑΔΑ 3	ΜΟΝΑΔΑ 4	HOT 1 (kW)	HOT 2 (kW)	HOT 3 (kW)	HOT 4 (kW)	COLD 1 (kW)	COLD 2 (kW)	COLD 3 (kW)	COLD 4 (kW)	TOTAL HOT (kW)	TOTAL COLD (kW)
1	ORGANOSOLV	XYL CAT	C6 ETH	PU	37873	609	19833	178	22730	1729	16412	43	58493	40914
2	ORGANOSOLV - XYL CAT	C6 ETH	PU	-	37873	19833	178	0	23699	16412	43	0	57884	40154
3	ORGANOSOLV - C6 ETH	XYL CAT	PU	-	53718	609	178	0	35003	1729	43	0	54505	36775
4	ORGANOSOLV - PU	XYL CAT	C6 ETH	-	37873	609	19833	0	22443	1729	16412	0	58315	40584
5	ORGANOSOLV - XYL CAT	C6 ETH - PU	-	-	37873	19933	0	0	23699	16377	0	0	57806	40076
6	ORGANOSOLV - C6 ETH	XYL CAT - PU	-	-	53718	645	0	0	35003	1630	0	0	54363	36633
7	ORGANOSOLV - PU	XYL CAT - C6 ETH	-	-	37873	18854	0	0	22443	16553	0	0	56727	38996
8	ORGANOSOLV - XYL CAT - C6 ETH	PU	-	-	53718	178	0	0	36123	43	0	0	53896	36166
9	ORGANOSOLV - XYL CAT - PU	C6 ETH	-	-	37873	19833	0	0	23564	16412	0	0	57706	39976
10	ORGANOSOLV - C6 ETH - PU	XYL CAT	-	-	53718	609	0	0	34867	1729	0	0	54327	36596
11	XYL CAT - C6 ETH - PU	ORGANOSOLV	-	-	18851	37873	0	0	16415	22730	0	0	56724	39145
12	ORGANOSOLV - XYL CAT - C6 ETH - PU	-	-	-	53318	0	0	0	36160	0	0	0	53318	36160
Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες													179396	163825
Μέγιστο Ποσοστό Εξοικονόμησης													70.3%	77.9%

Πίνακας Β-9 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα για το 9ο Μονοπάτι

9ο Μονοπάτι: ORGANOSOLV ---> C5 ETHANOL + ITACONIC ACID + PF RESINS														
A/A	ΜΟΝΑΔΑ 1	ΜΟΝΑΔΑ 2	ΜΟΝΑΔΑ 3	ΜΟΝΑΔΑ 4	HOT 1 (kW)	HOT 2 (kW)	HOT 3 (kW)	HOT 4 (kW)	COLD 1 (kW)	COLD 2 (kW)	COLD 3 (kW)	COLD 4 (kW)	TOTAL HOT (kW)	TOTAL COLD (kW)
1	ORGANOSOLV	C5 ETH	ITAC	PF RES	37873	23438	8548	753	22730	22492	20156	2652	70612	68030
2	ORGANOSOLV - C5 ETH	ITAC	PF RES	-	58690	8548	753	0	42462	20156	2652	0	67991	65270
3	ORGANOSOLV - ITAC	C5 ETH	PF RES	-	37830	23438	753	0	34143	22492	2652	0	62021	59287
4	ORGANOSOLV - PF RES	C5 ETH	ITAC	-	37873	23438	8548	0	24477	22492	20156	0	69859	67125
5	ORGANOSOLV - C5 ETH	ITAC - PF RES	-	-	58690	8798	0	0	42462	24148	0	0	67488	66610
6	ORGANOSOLV - ITAC	C5 ETH - PF RES	-	-	37830	25248	0	0	34143	26171	0	0	63078	60314
7	ORGANOSOLV - PF RES	C5 ETH - ITAC	-	-	37873	30388	0	0	24477	41020	0	0	68261	65497
8	ORGANOSOLV - C5 ETH - ITAC	PF RES	-	-	58690	753	0	0	54027	2652	0	0	59443	56679
9	ORGANOSOLV - C5 ETH - PF RES	ITAC	-	-	58733	8548	0	0	44361	20156	0	0	67281	64517
10	ORGANOSOLV - ITAC - PF RES	C5 ETH	-	-	37830	23438	0	0	36042	22492	0	0	61268	58534
11	C5 ETH - ITAC - PF RES	ORGANOSOLV	-	-	30786	37873	0	0	43312	22730	0	0	68659	66042
12	ORGANOSOLV - C5 ETH - ITAC - PF RES	-	-	-	58690	0	0	0	53809	0	0	0	58690	53809
Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες													226910	226306
Μέγιστο Ποσοστό Εξοικονόμησης													74.1%	76.2%

Πίνακας Β-10 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα για το 10ο Μονοπάτι

10ο Μονοπάτι: ORGANOSOLV ---> C5 ETHANOL + ITACONIC ACID + POLYURETHANE														
A/A	ΜΟΝΑΔΑ 1	ΜΟΝΑΔΑ 2	ΜΟΝΑΔΑ 3	ΜΟΝΑΔΑ 4	HOT 1 (kW)	HOT 2 (kW)	HOT 3 (kW)	HOT 4 (kW)	COLD 1 (kW)	COLD 2 (kW)	COLD 3 (kW)	COLD 4 (kW)	TOTAL HOT (kW)	TOTAL COLD (kW)
1	ORGANOSOLV	C5 ETH	ITAC	PU	37873	23438	8548	178	22730	22492	20156	43	70037	65421
2	ORGANOSOLV - C5 ETH	ITAC	PU	-	58690	8548	178	0	42462	20156	43	0	67416	62661
3	ORGANOSOLV - ITAC	C5 ETH	PU	-	37830	23438	178	0	34143	22492	43	0	61446	56678
4	ORGANOSOLV - PU	C5 ETH	ITAC	-	37873	23438	8548	0	22443	22492	20156	0	69859	65091
5	ORGANOSOLV - C5 ETH	ITAC - PU	-	-	58690	8758	0	0	42462	20231	0	0	67448	62693
6	ORGANOSOLV - ITAC	C5 ETH - PU	-	-	37830	24681	0	0	34143	23570	0	0	62511	57713
7	ORGANOSOLV - PU	C5 ETH - ITAC	-	-	37873	30388	0	0	22443	41020	0	0	68261	63463
8	ORGANOSOLV - C5 ETH - ITAC	PU	-	-	58690	178	0	0	54027	43	0	0	58868	54070
9	ORGANOSOLV - C5 ETH - PU	ITAC	-	-	58733	8548	0	0	42328	20156	0	0	67281	62484
10	ORGANOSOLV - ITAC - PU	C5 ETH	-	-	37830	23438	0	0	34008	22492	0	0	61268	56500
11	C5 ETH - ITAC - PU	ORGANOSOLV	-	-	30395	37873	0	0	40892	22730	0	0	68268	63622
12	ORGANOSOLV - C5 ETH - ITAC - PU	-	-	-	58690	0	0	0	54135	0	0	0	58690	54135
Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες													224572	221935
Μέγιστο Ποσοστό Εξοικονόμησης													73.9%	75.6%

Πίνακας Β-11 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα για το 11ο Μονοπάτι

11ο Μονοπάτι: ORGANOSOLV ---> C5 ETHANOL + C6 ETHANOL + PF RESINS														
A/A	ΜΟΝΑΔΑ 1	ΜΟΝΑΔΑ 2	ΜΟΝΑΔΑ 3	ΜΟΝΑΔΑ 4	HOT 1 (kW)	HOT 2 (kW)	HOT 3 (kW)	HOT 4 (kW)	COLD 1 (kW)	COLD 2 (kW)	COLD 3 (kW)	COLD 4 (kW)	TOTAL HOT (kW)	TOTAL COLD (kW)
1	ORGANOSOLV	C5 ETH	C6 ETH	PF RES	37873	23438	19833	753	22730	22492	16412	2652	81897	64286
2	ORGANOSOLV - C5 ETH	C6 ETH	PF RES	-	58690	19833	753	0	42462	16412	2652	0	79276	61526
3	ORGANOSOLV - C6 ETH	C5 ETH	PF RES	-	53718	23438	753	0	35003	22492	2652	0	77909	60147
4	ORGANOSOLV - PF RES	C5 ETH	C6 ETH	-	37873	23438	19833	0	24477	22492	16412	0	81144	63381
5	ORGANOSOLV - C5 ETH	C6 ETH - PF RES	-	-	58690	19501	0	0	42462	17978	0	0	78191	60440
6	ORGANOSOLV - C6 ETH	C5 ETH - PF RES	-	-	53718	25248	0	0	35003	26171	0	0	78966	61174
7	ORGANOSOLV - PF RES	C5 ETH - C6 ETH	-	-	37873	40883	0	0	24477	40104	0	0	78756	64581
8	ORGANOSOLV - C5 ETH - C6 ETH	PF RES	-	-	74578	753	0	0	54887	2652	0	0	75331	57539
9	ORGANOSOLV - C5 ETH - PF RES	C6 ETH	-	-	58733	19833	0	0	44361	16412	0	0	78566	60773
10	ORGANOSOLV - C6 ETH - PF RES	C5 ETH	-	-	53718	23438	0	0	36901	22492	0	0	77156	59393
11	C5 ETH - C6 ETH - PF RES	ORGANOSOLV	-	-	41074	37873	0	0	40104	22730	0	0	78947	62834
12	ORGANOSOLV - C5 ETH - C6 ETH - PF RES	-	-	-	74178	0	0	0	56785	0	0	0	74178	56785
Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες													207837	192204
Μέγιστο Ποσοστό Εξοικονόμησης													64.3%	70.5%

Πίνακας Β-12 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα για το 12ο Μονοπάτι

12ο Μονοπάτι: ORGANOSOLV ---> C5 ETHANOL + C6 ETHANOL + POLYURETHANE														
A/A	ΜΟΝΑΔΑ 1	ΜΟΝΑΔΑ 2	ΜΟΝΑΔΑ 3	ΜΟΝΑΔΑ 4	HOT 1 (kW)	HOT 2 (kW)	HOT 3 (kW)	HOT 4 (kW)	COLD 1 (kW)	COLD 2 (kW)	COLD 3 (kW)	COLD 4 (kW)	TOTAL HOT (kW)	TOTAL COLD (kW)
1	ORGANOSOLV	C5 ETH	C6 ETH	PU	37873	23438	19833	178	22730	22492	16412	43	81322	61677
2	ORGANOSOLV - C5 ETH	C6 ETH	PU	-	58690	19833	178	0	42462	16412	43	0	78701	58917
3	ORGANOSOLV - C6 ETH	C5 ETH	PU	-	53718	23438	178	0	35003	22492	43	0	77334	57538
4	ORGANOSOLV - PU	C5 ETH	C6 ETH	-	37873	23438	19833	0	22443	22492	16412	0	81144	61347
5	ORGANOSOLV - C5 ETH	C6 ETH - PU	-	-	58690	19933	0	0	42462	16377	0	0	78623	58839
6	ORGANOSOLV - C6 ETH	C5 ETH - PU	-	-	53718	24681	0	0	35003	23570	0	0	78399	58573
7	ORGANOSOLV - PU	C5 ETH - C6 ETH	-	-	37873	40883	0	0	22443	40104	0	0	78756	62547
8	ORGANOSOLV - C5 ETH - C6 ETH	PU	-	-	74578	178	0	0	54887	43	0	0	74756	54930
9	ORGANOSOLV - C5 ETH - PU	C6 ETH	-	-	58733	19833	0	0	42328	16412	0	0	78566	58740
10	ORGANOSOLV - C6 ETH - PU	C5 ETH	-	-	53718	23438	0	0	34867	22492	0	0	77156	57359
11	C5 ETH - C6 ETH - PU	ORGANOSOLV	-	-	41063	37873	0	0	38612	22730	0	0	78936	61342
12	ORGANOSOLV - C5 ETH - C6 ETH - PU	-	-	-	74178	0	0	0	54752	0	0	0	74178	54752
Αρχικές Ενεργειακές Ανάγκες													205499	187833
Μέγιστο Ποσοστό Εξοικονόμησης													63.9%	70.9%

Επεξήγηση Συντομογραφιών Πινάκων

ORGANOSOLV = Κλασμάτωση Βιομάζας με Οργανικά Οξέα

XYL BIO = Ξυλιτόλη από τη βιοτεχνολογική διεργασία

XYL CAT = Ξυλιτόλη από τη καταλυτική διεργασία

ITAC = Ιτακονικό Οξύ

PF RES = Ρητίνες Φαινόλης – Φορμαλδεύδης

PU = Πολυουρεθάνη

C5 ETH = Αιθανόλη από C5 σάκχαρα

C6 ETH = Αιθανόλη από C6 σάκχαρα