



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Ολοκληρωμένος Σχεδιασμός Βιοδιυλιστηρίων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ Α. ΠΥΡΓΑΚΗ

Διπλωματούχου Χημικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

Διπλωματούχου Δ.Π.Μ.Σ. «Υπολογιστική Μηχανική» Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Αντώνης Κοκόσης

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάιος 2020



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

Ολοκληρωμένος Σχεδιασμός Βιοδιυλιστηρίων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ Α. ΠΥΡΓΑΚΗ

Διπλωματούχου Χημικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

Διπλωματούχου Δ.Π.Μ.Σ. «Υπολογιστική Μηχανική» Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Α. Κοκόσης, Καθ. Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)
2. Ν. Παπαγιαννάκος, Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Ε. Βουτσάς, Καθ. Ε.Μ.Π.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Α. Κοκόσης, Καθ. Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)
2. Ε. Βουτσάς, Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Ν. Παπαγιαννάκος, Καθ. Ε.Μ.Π.
4. Ν. Μαρκάτος, Ομότιμος Καθ. Ε.Μ.Π.
5. Χ. Κυρανούδης, Καθ. Ε.Μ.Π.
6. Γ. Λυμπεράτος, Καθ. Ε.Μ.Π.
7. Ε. Τόπακας, Αναπληρωτής Καθ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2020

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανωτάτη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα. (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Α. ΠΥΡΓΑΚΗΣ

© 2020 – All rights reserved

*Αφιερωμένο στην οικογένειά μου,
τον Τάσο, τη Χαρά, τον Παναγιώτη, τη Μελίνα*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθ. Αντώνη Κοκόση (επιβλέπων) για την αφοσίωση, την καθοδήγηση και κυρίως την εμπιστοσύνη του σε μένα τόσο για την ανάθεση της παρούσας διατριβής, όσο και σε κάθε στιγμή της συνεργασίας μας. Νοιώθω πολύ τυχερός για την ελευθερία που μου προσέφερε, ώστε να ακολουθήσω τις ερευνητικές μου ιδέες και ανησυχίες, χωρίς ωστόσο να λείπει η επιστημονική υποστήριξή του. Επίσης, είμαι ευγνώμων για τις ευκαιρίες που μου έδωσε, ώστε να δοκιμάσω τον εαυτό μου σε πολλές και ποικίλες προκλήσεις προσφέροντάς μου εμπειρίες που αποτελούν πολύτιμα εφόδια ζωής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου, και μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής της παρούσας διατριβής, Νικόλαο Παπαγιαννάκο και Επαμεινώνδα Βουτσά, για τη διδασκαλία, την εμπιστοσύνη, την έμπνευση και τις ευκαιρίες που μου προσέφεραν πριν και κατά τη διάρκεια της διατριβής.

Ευχαριστώ τη Dr. Bouchra Benjelloun-Mlayah της CIMV (France) για τις γνώσεις, τα δεδομένα και την έμπνευση που μου μετέφερε από τον χώρο της βιομηχανίας και των βιοδιυλιστηρίων, τα οποία έπαιξαν σημαντικό ρόλο για τη διεξαγωγή της παρούσας έρευνας. Επίσης, ευχαριστώ τους συνεργάτες μου Μαρινέλλα Τσακάλοβα, Αικατερίνη Μουντράκη, Θανάση Νικολακόπουλο και Φιλοποίμην Λικοκανέλλο για την εξαιρετική συνεργασία μας και το ευχάριστο φιλικό κλίμα που επικράτησε στην ερευνητική μας ομάδα.

Ως υπότροφος του Κοινοφελούς Ιδρύματος Αλέξανδρος Σ. Ωνάσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το ίδρυμα για την εμπιστοσύνη και την οικονομική υποστήριξη που έλαβα για την διεξαγωγή της παρούσας έρευνας. Επίσης, η διατριβή χρηματοδοτήθηκε στα πλαίσια των ευρωπαϊκών και εθνικών ερευνητικών προγραμμάτων BIOCORE (FP7-241566), ADNANCE-FSP (FP7-228885), D-Factory (FP7-613870), AI4B (ΕΣΠΑ 2007-2013) και IBISBA (H2020-730976).

Τέλος, είμαι ευγνώμων για την ύπαρξη και κάθε μορφή υποστήριξης από τους γονείς μου Τάσο και Χαρά, τον αδερφό μου Παναγιώτη και τη σύντροφο της ζωής μου Μελίνα Ψύχα, οι οποίοι βρίσκονται στο πλευρό μου κάθε στιγμή της ζωής μου. Η αγάπη τους και η συμπαράστασή τους αρκούν, ώστε όλα να είναι δυνατά.

Περίληψη

Ο ανερχόμενος κλάδος των βιοδιυλιστηρίων και της κυκλικής οικονομίας φέρνει στην επιφάνεια νέες προκλήσεις και προβλήματα σχεδιασμού, τα οποία δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν επαρκώς με τα συμβατικά εργαλεία ανάλυσης και βελτιστοποίησης διεργασιών. Το παρόν έργο παρουσιάζει τρεις γενικευμένες μεθοδολογίες και υπολογιστικά εργαλεία σχεδιασμού που συνδυάζουν τεχνολογίες σύνθεσης και ενεργειακής ολοκλήρωσης για τη διερεύνηση συμπληρωματικών διεργασιών και την ενίσχυση των ενεργειακών αποδόσεων και της βιωσιμότητας ανερχόμενων εφαρμογών βιοδιυλιστηρίων, καθώς και την αναβάθμιση υφιστάμενων βιομηχανικών εγκαταστάσεων.

Οι προκλήσεις εμφανίζονται κατά την ανάλυση αλυσίδων αξίας προϊόντων (value chains), οι οποίες περιλαμβάνουν όλα τα υποψήφια χημικά, βιοχημικά και θερμοχημικά μονοπάτια αναβάθμισης υπολειμματικών ροών και τροφοδοσιών βιομάζας σε προϊόντα υψηλής αξίας, όπως διαλύτες, καύσιμα, υλικά, συμπληρώματα διατροφής, κ.ά. Το πρόβλημα καλεί τη διερεύνηση άπειρων επιλογών σύνθεσης υποψήφιων και ανταγωνιστικών μονοπατιών και τον εντοπισμό βέλτιστων βιοδιυλιστηριακών μονάδων που ολοκληρώνονται με τον αποδοτικότερο τρόπο τόσο μεταξύ τους όσο και με παρακείμενες, καταμεμημένες διεργασίες της υφιστάμενης βιομηχανίας. Τα προτεινόμενα εργαλεία ολοκλήρωσης αποτελούν ιδανική λύση για τον εντοπισμό βιώσιμων σεναρίων βιοδιυλιστηρίων και εφαρμογών κυκλικής οικονομίας σε πρόωρα στάδια σχεδιασμού, ενώ η γενικευμένη διατύπωση των μεθοδολογιών επιτρέπει την αντιμετώπιση κάθε υποπερίπτωσης σχεδιασμού της συμβατικής βιομηχανίας.

Οι μεθοδολογίες εντοπίζουν βαθμούς ελευθερίας ζωτικής σημασίας που σχετίζονται με συνδέσεις υποψήφιων και υφιστάμενων διεργασιών προετοιμάζοντας τις συνθήκες ανταλλαγής ροών χημικών και ενέργειας μεταξύ τους στα πλαίσια ανάπτυξης βιώσιμων εφαρμογών κυκλικής οικονομίας. Οι διεργασίες παρουσιάζουν διαφορετικές αποδόσεις όταν ολοκληρώνονται μέσω εναλλακτικών συνδυασμών, τους οποίους ο μηχανικός καλείται να αξιολογήσει συστημικά και να επιλέξει (τα πιο) βιώσιμα σενάρια χαρτοφυλακίων τροφοδοσιών, διεργασιών και προϊόντων υψηλής απόδοσης, εξοικονόμησης κόστους και κερδοφορίας, σε πρώιμα στάδια σχεδιασμού. Πραγματικές περιπτώσεις βιοδιυλιστηρίων παρουσιάζουν υψηλά κόστη ενέργειας, που συνήθως απειλούν τη βιωσιμότητα των εγχειρημάτων, ενισχύοντας τα κίνητρα για τον εντοπισμό ενεργειακά συμπληρωματικών διεργασιών και την κατάλληλη και αυστηρή εφαρμογή τεχνικών ολοκλήρωσης.

Οι υπάρχουσες τεχνικές ολοκλήρωσης βασίζονται σε γραφικές μεθόδους ανάλυσης, οι οποίες εφαρμόζονται ως ξεχωριστά στάδια μελέτης, καθένα από τα οποία αφορά διαφορετικά επίπεδα

ολοκλήρωσης: το πρώτο, για την άμεση ολοκλήρωση θερμών-ψυχρών ρευμάτων εντός κάθε διεργασίας και το δεύτερο, για έμμεση ολοκλήρωση (μέσω ατμού) διεργασίας-με-διεργασία. Υπό αυτές τις συνθήκες, οι γραφικές μέθοδοι προορίζονται αυστηρά για την ολοκλήρωση γνωστών και προεπιλεγμένων διεργασιών, αδυνατώντας να αντιμετωπίσουν περιπτώσεις υποψήφιων χημικών μονοπατιών. Στο παρόν έργο παρουσιάζονται συστήματα αναπαραστάσεων για την αντιμετώπιση της συνδυαστικής φύσης του προβλήματος σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών, ενσωματώνοντας τις διεργασίες ως επιπλέον βαθμούς ελευθερίας του γενικότερου προβλήματος ολοκλήρωσης.

Η μεθοδολογία χρησιμοποιεί έναν γενικευμένο γράφο χαρτογράφησης όλων των επιλογών σύνθεσης μεταξύ υποψήφιων και δεδομένων (προαιρετικά) κατανεμημένων διεργασιών, οι οποίες μπορούν να ανταλλάσσουν ροές χημικών μεταξύ τους με οποιονδήποτε τρόπο. Ο γράφος ενσωματώνει επιπλέον επιλογές για την αντιμετώπιση προβλημάτων εποχικής διαθεσιμότητας των ποικιλιών βιομάζας, αντιμετωπίζοντας τις ανταγωνιστικές τροφοδοσίες ως επιπλέον βαθμούς ελευθερίας του συνολικού προβλήματος. Επίσης, διαθέτει επιλογές αποθήκευσης τροφοδοσιών και προϊόντων με στόχο τον βέλτιστο χρονοπρογραμματισμό της λειτουργίας βιοδιυλιστηρίων πολλαπλών-διεργασιών και πολλαπλών-τροφοδοσιών. Ενώ ο γράφος αναλαμβάνει τη σύνθεση όλων των υποψήφιων χαρτοφυλακίων διεργασιών, τεχνικές ολοκλήρωσης αναλαμβάνουν την αξιολόγηση και τη βελτιστοποίηση των αποδόσεων των υποψηφίων.

Στο παρόν έργο παρουσιάζονται αναπαραστάσεις ενεργειακής ολοκλήρωσης – βασισμένες στις έννοιες των μοντέλων μεταφόρτωσης – οι οποίες επεκτείνουν τις δυνατότητες των συμβατικών εργαλείων ολοκλήρωσης και ενσωματώνουν τις ξεχωριστές διαδικασίες άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης, ως ένα ενιαίο, συντομευμένο και γραμμικό μοντέλο ενεργειακής βελτιστοποίησης. Τα προτεινόμενα μοντέλα μεταφόρτωσης επιτρέπουν κάθε επιλογή ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ των υποψήφιων διεργασιών των βιοδιυλιστηρίων και των παρακείμενων υφιστάμενων βιομηχανιών. Η μεθοδολογία συνδυάζει και συγχρονίζει κατάλληλα τον γράφο με τα μοντέλα μεταφόρτωσης για τη συστημική αξιολόγηση όλων των συνδυασμών ανταγωνιστικών διεργασιών και το συνολικό πρόβλημα σύνθεσης και ολοκλήρωσης διατυπώνεται ως ένα γραμμικό μοντέλο βελτιστοποίησης.

Τα προτεινόμενα αναβαθμισμένα μοντέλα μεταφόρτωσης ενσωματώνουν επιπλέον δυνατότητες για την διαχείριση του φρέσκου ατμού (από το φούρνο τη μονάδας) και του παραγόμενου ατμού (από περίσσεια θερμότητα διεργασιών) επιτρέποντας την ταυτόχρονη μελέτη και βελτιστοποίηση των αποδόσεων συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση τουρμπίνων. Οι κλασικές στρατηγικές εκτίμησης της συμπαραγωγής χρησιμοποιούν γραφικές ή υπολογιστές διαδικασίες πολλαπλών

σταδίων, οι οποίες δεν ανταπεξέρχονται στις ειδικές ανάγκες σχεδιασμού των ανερχόμενων βιομηχανιών και σε ορισμένες περιπτώσεις παρουσιάζουν μειωμένη ακρίβεια. Τα ζητήματα αυτά αντιμετωπίζονται συνδυάζοντας κατάλληλα τις δυνατότητες των αναβαθμισμένων μοντέλων μεταφόρτωσης με νέες στρατηγικές που προτείνονται για την εκτίμηση της συμπαραγωγής ισχύος με χρήση τουρμπίνων και τη βελτιστοποίηση των επιπέδων ατμού της βιομηχανίας. Το αρχικό πρόβλημα σχεδιασμού βιοδιυλιστηρίων επεκτείνεται συνδυάζοντας όλους τους βαθμούς ελευθερίας που σχετίζονται με τη σύνθεση, την ολοκλήρωση και τη συμπαραγωγή για τον εντοπισμό συγκροτημάτων διεργασιών υψηλής ενεργειακής απόδοσης, εισάγοντας (και βελτιστοποιώντας) την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ως επιπλέον προϊόν των βιοδιυλιστηρίων.

Τέλος, το παρόν έργο αντιμετωπίζει προβλήματα σχεδιασμού και ενεργειακής βελτιστοποίησης συστημάτων απόσταξης. Η μεθοδολογία εστιάζει στη χρήση σχημάτων απόσταξης πολλαπλών-επιπέδων (στηλών), τα οποία μοιράζονται την τροφοδοσία και λειτουργούν σε διαφορετικές πιέσεις επιτρέποντας την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ συμπυκνωτήρων-αναβραστήρων και ρευμάτων της υπόλοιπης διεργασίας. Η συμβατική διαδικασία σχεδιασμού αποστάξεων και ολοκλήρωσής τους διεξάγεται αποκλειστικά με τη χρήση γραφικών εργαλείων, τα οποία είναι χρονοβόρα, δεν εγγυώνται την εύρεση βέλτιστων λύσεων και αντιμετωπίζουν ζητήματα μεροληψίας. Η μεθοδολογία εντοπίζει και συστηματοποιεί τις επιλογές σχεδιασμού των αποστάξεων μέσω ενός γενικευμένου γράφου λήψης αποφάσεων, που επιτρέπει την μαθηματική προτυποποίηση του προβλήματος σχεδιασμού. Ο γράφος συνδυάζεται κατάλληλα με κλασσικά μοντέλα ενεργειακής μεταφόρτωσης ενσωματώνοντας (στο πρόβλημα σχεδιασμού) τους επιπλέον βαθμούς ελευθερίας ολοκλήρωσης των συστημάτων απόσταξης τόσο μεταξύ τους όσο και με τα θερμά/ψυχρά ρεύματα της υπόλοιπης διεργασίας. Το συνολικό πρόβλημα κατασκευάζεται ως ένα συντομευμένο, γραμμικό και εύκολα προσαρμόσιμο μοντέλο βελτιστοποίησης για τον σχεδιασμό πλήρως ενεργειακά ολοκληρωμένων συστημάτων απόσταξης.

Τα τρία εργαλεία σχεδιασμού: (α) σύνθεσης και ενεργειακής ολοκλήρωσης διεργασιών, (β) εκτίμησης και βελτιστοποίησης της συμπαραγωγής και (γ) σχεδιασμού ολοκληρωμένων συστημάτων απόσταξης, εφαρμόζονται για την επίλυση προβλημάτων σχεδιασμού πραγματικών βιοδιυλιστηρίων αποδίδοντας καλύτερες (μη-προφανείς) λύσεις που δεν μπορούν να εντοπιστούν με τη χρήση των κλασσικών εργαλείων της βιβλιογραφίας.

Extended abstract

The upcoming field of biorefineries and the implementation of circular economy appear new challenges and design problems that cannot be effectively addressed by the conventional engineering tools of literature. This work presents three generalized methodologies and computational tools that combine process synthesis and integration technologies in order to detect complementary processes, to improve energy efficiencies and sustainability margins of upcoming biorefineries and to upgrade performance of existing industry.

New challenges arise originated from the analysis of value chains, which include numerous candidate chemical, biochemical and thermochemical paths that upgrade waste flows and/or biomass feedstocks into added value chemicals, like solvents, fuels, materials, nutraceuticals, etc. The design problem involves infinite synthesis options of candidate, competitive and existing paths that need to be evaluated and screened in order to reveal best biorefining routes that effectively integrate among them and with adjacent, distributed industries. The proposed methodologies are generalized and become an ideal solution to detect high sustainable biorefining strategies ahead of detailed design, as well as to address any case of conventional industry.

The methodologies focus on key degrees of freedom related with connections among upcoming and existing processes and industries preparing the conditions to exchange chemicals and energy among them in the scope of viably applying circular economy. Each process results in different efficiencies when integrated across alternative process combinations, which need to be systematically screened and evaluated to detect promising biorefinery portfolios (feedstocks, processes and products) in terms of energy savings and profitability margins. High energy costs reported in real-life biorefinery cases are unable to support the selected production paths, unless proper and strong energy integration is provided.

Common process-to-process integration methodologies are based on graphical tools, that apply as separate analysis stages, each referring to different levels of integration: the first, for direct integration of hot-cold streams within each process and the second, for indirect (via steam) process-to-process integration. Under these conditions, the conventional graphical tools are strictly applied for known and preselected process portfolios, rather than for candidate chemical paths. This work presents systems

representations to address the combinatorial nature of the process synthesis and integration problem, incorporating processes as additional degrees of freedom in integration procedure.

The methodology utilizes a generalized graph that maps all synthesis options among candidate/variable and existing/fixed distributed processes, which are expected to exchange chemical flows and energy in any way and combination. The graph also includes options to address problems subjected to seasonal availability of biomass varieties considering competitive feedstocks as additional degrees of freedom of the overall problem. In this scope, storage options for feedstocks and refinery chemicals are used with the purpose to optimize the seasonal operation plan of multiple-feedstock and multiple-process biorefineries. While the graph develops feasible biorefinery portfolios, integration technologies are systematically applied to build and evaluate efficiencies of all candidate biorefinery sites.

In this scope, this work introduces energy integration representations – based on key concepts of heat transshipment models – that extend common integration capabilities by combining direct and indirect integration stages as a single, linear energy optimization problem. The proposed heat transshipment models enable any feasible heat exchange option among all candidate biorefining paths, as well as with distributed processes of existing industry. The overall synthesis and integration methodology combines and synchronizes the graph with the proposed heat transshipment models to systematically evaluate all (infinite) process combinations and the overall problem is constructed as a linear optimization model.

The revised transshipment models also include options to manage heat loads of fresh steam (from furnace) and generated steam (using available process energy) enabling the analysis and the optimization of power cogeneration using turbines. The existing literature strategies used for the approximation of turbine power output and isentropic efficiency are commonly based on graphical and multi-stage computational procedures, which are inefficient to address the combinatorial nature of the biorefinery problem; they also appear limited accuracy under extreme turbine operating conditions. These issues are addressed by combining the revised transshipment models with new computational strategies proposed for robust optimization of power cogeneration and steam utility levels. The original biorefinery problem finally combines the degrees of freedom related with process synthesis, integration and cogeneration to investigate efficient strategies to implement circular economy; also incorporating electric power as an additional biorefinery product.

In addition, this work addresses the design of fully integrated distillation systems. The methodology focuses on the use of multiple-effect (column) distillation systems, which utilize parallel columns that

share the overall distillation feed and operate at various pressures enabling heat exchange among condensers-reboilers, as well as with hot/cold streams of the rest of process. The conventional literature approaches are exclusively based on the use of graphical tools that are time consuming, do not guarantee optimality and subject to partiality. The methodology detects, systematizes and mathematically models the design options of multiple-effect distillation systems with the use of a generalized graph. The graph is appropriately combined with common heat transshipment models to incorporate (to the distillation design problem) the degrees of freedom for the integration of distillation effects among them and with hot/cold streams of the rest of process. As a result, the problem is constructed as a linear optimization model for the design of fully energy integrated distillation systems.

The three engineering tools: (a) process synthesis and integration, (b) cogeneration and utility levels optimization and (c) design of integrated distillation systems, have been applied to address real-life biorefinery problems resulting in better (not obvious) solutions that cannot be detected by means of existing literature methodologies.

ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

Συντομογραφίες

aBBR	advanced-Biomass Bipartite graph Representation
AD	Anaerobic Digestion
BBR	Biomass Bipartite graph Representation
CGCC	Column Grand Composite Curves
CHP	Combined Heat and Power system
CIT	Cross-Interval Transshipment model
DMR	Distillation Mapping graph Representation
GCC	Grand Composite Curve
HTL	Hydro-Thermal Liquefaction
ICT	Inter-Cascade Transshipment model
M&S	Marshall and Swift Cost Index
MED	Multiple-Effect Distillation system
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MINLP	Mixed Integer Non-Linear Programming
SSSP	Site Sources and Sinks Profile
SUGCC	Site Utility Grand Composite Curves
TAC	Total Annualized Cost
TCDS	Thermally Coupled Distillation Systems
TCP	Total Cost Performance
THM	Turbine Hardware Model
TSA	Total Site Analysis
TSC	Total Site Cascade
TSR	Total Site Representation
USS	Utilities Storage System

Σύμβολα

A, B	παράμετροι παλινδρόμησης
A_n, B_n	παράμετροι παλινδρόμησης στο επίπεδο n
a_i, b_i	παράμετροι παλινδρόμησης
$A^{\text{COND/REB}}$	επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας συμπυκνωτήρα/αναβραστήρα
BF	ενεργειακό περιεχόμενο βιοκαυσίμων
BL	ενεργειακό περιεχόμενο λιγνίνης
$capex$	κόστος επένδυσης
$CAPEX_p$	κόστος επένδυσης διεργασίας p
c_{cogen}	μοναδιαίο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας
C_d^{EF}	υποσύνολο ψυχρών ρευμάτων (αναβραστήρων) στηλών που επεξεργάζονται την τροφοδοσία d
C_d^{HE}	υποσύνολο ψυχρών ρευμάτων που μεταβάλλουν την θερμική κατάσταση της τροφοδοσίας d
CF	συντελεστής διόρθωσης λόγου αναρροής
c_m, c_n	μοναδιαίο κόστος θερμών, ψυχρών βοηθητικών παροχών
$Cost^{\text{COL}}, Cost^{\text{COND}}, Cost^{\text{REB}}$	επιμέρους κόστη επένδυσης: κολώνας, αναβραστήρα, συμπυκνωτήρα
$Cost^{\text{OPEX}}, Cost^{\text{CAPEX}}$	κόστος λειτουργίας, επένδυσης επιλεγμένων στηλών απόσταξης
c_p	ειδική θερμοχωρητικότητα νερού
CP	ροή θερμοχωρητικότητας
C^{PR}	υποσύνολο ψυχρών ρευμάτων του υποβάθρου
CS	σύνολο ψυχρών ρευμάτων
CS_{pk}	υποσύνολο ψυχρών ρευμάτων της διεργασίας p που βρίσκονται στο ενδιάμεσο k
d	σύνολο μιγμάτων τροφοδοσίας συστημάτων απόσταξης
D	διάμετρος στήλης
D_p	ποσοστό περιοδικών διακυμάνσεων της δυναμικότητας της διεργασίας p
\bar{E}	ειδική παραγόμενη ισχύς τουρμπίνας
E^b	όριο παραγόμενης ισχύος για την εναλλαγή των τιμών των παραμέτρων παλινδρόμησης A, B

E_{cogen}	συνολική παραγόμενη ισχύς
E^{loss}	απώλειες τριβής εντός της τουρμπίνας
E^{max}	μέγιστη παραγόμενη ισχύς τουρμπίνας
E_n^{max}	μέγιστη παραγόμενη ισχύς τουρμπίνας στη ζώνη εκτόνωσης n-n+1
$E_{n',n''}$	μέγιστη παραγόμενη ισχύς τουρμπίνας στη ζώνη εκτόνωσης n'-n''
$\overline{E_{n',n''}^1}, \overline{E_{n',n''}^2}$	εκτιμήσεις παραγόμενης ισχύος τουρμπίνας κάτω, άνω του E^b στη ζώνη εκτόνωσης n'-n''
energy	ενεργειακό κόστος
E^{TS}	ενεργειακό κόστος Συνολικής Μονάδας (TS)
$E^{\text{TS}*}$	ελάχιστο ενεργειακό κόστος της βέλτιστης Συνολικής Μονάδας (TS*)
$E_{\text{se}}^{\text{TS}}$	ενεργειακό κόστος Συνολικής Μονάδας την περίοδο se
E_0	συντελεστής απόδοσης στήλης
$f_{b,se}^w$	ρυθμός ροής απόρριψης της τροφοδοσίας b από το aBBR την περίοδο se
F_c	συντελεστής διόρθωσης που σχετίζεται με τον τύπο, την πίεση και το υλικό του εναλλάκτη
$F_{d,p}$	παροχή τροφοδοσίας d στο επίπεδο πίεσης p
F_d^{FEED}	συνολική παροχή τροφοδοσίας d
feed	κόστος προμήθειας τροφοδοσίας (βιομάζα)
FNG	ενεργειακό περιεχόμενο φυσικού αερίου
F_{pr}	ρυθμός ροής χημικού pr που εξέρχεται από το BBR (τελικό προϊόν)
$f_{pr,se}^{\text{PR}}$	ρυθμός ροής εξαγωγής του προϊόντος pr από το aBBR (τελικό προϊόν) την περίοδο se
F_t	ρυθμός ροής διασύνδεσης t
\bar{F}_t	μέγιστος ρυθμός ροής διασύνδεσης t
F_t^{LB}	κάτω όριο ρυθμού ροής διασύνδεσης t (ως ποσοστό του \bar{F}_t)
$F_{t,se}$	ρυθμός ροής διασύνδεσης t την περίοδο se
$F_{t,z}$	ρυθμός ροής διασύνδεσης t προς το σύστημα διεργασιών z
$f_{tu,b,se}, f_{tl,se}$	ρυθμοί ροής διασυνδέσεων στο άνω, κάτω μέρος του aBBR την περίοδο se
$F^{\text{TOP/BOT}}$	ρυθμός ροής ατμών κορυφής/πυθμένα στήλης
$GCC_{\Delta}^{\text{max}}$	GCC στη μέγιστη δυναμικότητα της διεργασίας Δ

G_p	ποσοστό επιλεχθείσας δυναμικότητας της διεργασίας p ως προς τη μέγιστη δυναμικότητα
H	ύψος στήλης
HCS	ζεύγη θερμών-ψυχρών ρευμάτων που ανήκουν σε διαφορετικές διεργασίες
H_d^{EF}	υποσύνολο θερμών ρευμάτων (συμπυκνωτήρων) στηλών που επεξεργάζονται την τροφοδοσία d
H_d^{HE}	υποσύνολο θερμών ρευμάτων που μεταβάλλουν την θερμική κατάσταση της τροφοδοσίας d
HP	ατμός υψηλής πίεσης
H^{PR}	υποσύνολο θερμών ρευμάτων του υποβάθρου
HS	σύνολο θερμών ρευμάτων
HS'_k	υποσύνολο θερμών ρευμάτων που προσφέρουν θερμότητα στο ενδιάμεσο k και χαμηλότερα ενδιάμεσα
HS_{pk}	υποσύνολο θερμών ρευμάτων της διεργασίας p που βρίσκονται στο ενδιάμεσο k
I	υποσύνολο προϊόντων κλασμάτωσης της βιομάζας
IC_p	μέγιστη δυναμικότητα διεργασίας p
K	σύνολο θερμοκρασιακών ενδιάμεσων από υψηλότερες προς χαμηλότερες θερμοκρασίες
K_p^{UP}, K_p^{DO}	θερμοκρασιακά ενδιάμεσα άνω, κάτω από το pinch της διεργασίας p
K_1, K_2	παράμετροι υπολογισμού ειδικής θερμοχωρητικότητας
LB_p^f	κάτω όρια δυναμικότητας της διεργασίας p
LHV_t	ελάχιστη θερμογόνος δύναμη χημικού που φέρει η διασύνδεση t
LP	ατμός χαμηλής πίεσης
M	ροή ατμού τουρμπίνας
M_G	μέσο μοριακό βάρος ατμών
M^{max}	μέγιστη ροή ατμού τουρμπίνας
M_n^{ind}	ροή παραγόμενου ατμού στο επίπεδο n
M_n^{max}	μέγιστη ροή ατμού στο επίπεδο n
MP	ατμός μέσης πίεσης
N_{act}	πραγματικός αριθμός βαθμίδων

N^H, N^C, N^U	μέγιστος αριθμός επιλεγμένων επιπέδων θερμών παροχών, ψυχρών παροχών, θερμών και ψυχρών παροχών ($N^U = N^H + N^C$)
$n_{is,max}$	μέγιστη ισεντροπική απόδοση τουρμπίνας
N_{min}	ελάχιστος αριθμός βαθμίδων
$opex$	κόστος λειτουργίας
$OPEX_p$	κόστος λειτουργίας διεργασίας p
p	σύνολο υποψήφιων επιπέδων πίεσης του DMR
P	σύνολο χημικών (διεργασίες) αλυσίδας προϊόντων
P_i, P_j	υποσύνολο διεργασιών που κατέχουν το θερμό ρεύμα i, το ψυχρό ρεύμα j
p^{in}	πίεση ατμού στην είσοδο της τουρμπίνας
PR	σύνολο χημικών αλυσίδας προϊόντων
$Preference_p$	ποσοστό προτίμησης της διεργασίας p
$price_{pr}$	τιμή προϊόντος pr
$Profits$	κέρδη από πώληση προϊόντων
PR_p	υποσύνολο προϊόντων της διεργασίας p
PR_{upper}, PR_{lower}	υποσύνολο προϊόντων στο άνω, κάτω μέρος του aBBR
Q	φορτίο θερμότητας
$\overline{Q_{d,p}^{aux}}$	μέγιστες ενεργειακές απαιτήσεις βοηθητικού εναλλάκτη μεταβολής της θερμικής κατάστασης της τροφοδοσίας d στο επίπεδο πίεσης p
$Q_{d,p}^{aux}$	πραγματικές ενεργειακές απαιτήσεις βοηθητικού εναλλάκτη μεταβολής της θερμικής κατάστασης της τροφοδοσίας d στο επίπεδο πίεσης p
$\overline{Q_{d,p}^{reb}}, \overline{Q_{d,p}^{cond}}$	μέγιστες ενεργειακές απαιτήσεις αναβραστήρα/συμπυκνωτήρα απόσταξης στο επίπεδο πίεσης p που επεξεργάζεται την τροφοδοσία d
$Q_{d,p}^{reb}, Q_{d,p}^{cond}$	πραγματικές ενεργειακές απαιτήσεις αναβραστήρα/συμπυκνωτήρα απόσταξης στο επίπεδο πίεσης p που επεξεργάζεται την τροφοδοσία d
Q_{ijk}	ανταλασσομένη θερμότητα μεταξύ θερμού ρεύματος i και ψυχρού ρεύματος j στο ενδιάμεσο k
Q_{ik}^H, Q_{jk}^C	ενεργειακό περιεχόμενο θερμού ρεύματος i, ψυχρού ρεύματος j στο ενδιάμεσο k
q^{in}, q^{out}	ειδική θερμότητα ατμού στην είσοδο, έξοδο της τουρμπίνας

Q_{ink}	ανταλασσομένη θερμότητα μεταξύ θερμού ρεύματος i και ψυχρής παροχής n στο ενδιάμεσο k
Q_{jmk}	ανταλασσομένη θερμότητα μεταξύ θερμής παροχής m και ψυχρού ρεύματος j στο ενδιάμεσο k
Q_m	ενεργειακό φορτίο θερμής παροχής m
Q^{\max}	φορτίο θερμότητας ατμού
Q_{mn}	ενεργειακό φορτίο ψευδο-ψυχρής παροχής n που αποδίδεται στην παραγωγή ατμού επιπέδου m
Q_m^{TS}, Q_n^{TS}	ενεργειακό φορτίο θερμής παροχής m , ψυχρής παροχής n της Συνολικής Μονάδας
q_n^{in}	ειδικό φορτίο θερμότητας ατμού στη ζώνη εκτόνωσης $n-n+1$
$q_{n',n''}^{in}$	ειδικό φορτίο θερμότητας ατμού στη ζώνη εκτόνωσης $n'-n''$
Q_n^{\max}	φορτίο θερμότητας ατμού στο επίπεδο n
Q_n^{TS}	ενεργειακό φορτίο ψυχρής παροχής n της Συνολικής Μονάδας
$\overline{Q_p^H}, \overline{Q_p^C}$	μέγιστο ενεργειακό περιεχόμενο θερμών, ψυχρών ρευμάτων
Q_p^H, Q_p^C	πραγματικό ενεργειακό περιεχόμενο θερμών, ψυχρών ρευμάτων
$\overline{Q_{pr,p}^{H/C}}$	μέγιστο ενεργειακό περιεχόμενο θερμού, ψυχρού ρεύματος ανά προϊόν εξόδου pr της διεργασίας p
$Q_{p,se}^{H/C}$	πραγματικό ενεργειακό περιεχόμενο θερμού, ψυχρού ρεύματος της διεργασίας p την περίοδο se
Q_{pm}^S, Q_{pn}^W	ενεργειακό φορτίο θερμής παροχής m , ψυχρής παροχής n στον ενεργειακό καταρράκτη C_p της διεργασίας p
Q_{pn}^W	ενεργειακό φορτίο ψυχρής παροχής n της διεργασίας p
q_{VHP}^{in}	ειδικό φορτίο θερμότητας ατμού πολύ υψηλής πίεσης (90 bar και 500 °C)
R_{ik}, R_{mk}	ενεργειακά υπόλοιπα θερμού ρεύματος i , θερμής παροχής m στο ενδιάμεσο k
R_n^W	ενεργειακό υπόλοιπο ατμού της ψευδο-ψυχρής παροχής n
R_p	βαθμός μετατροπής της διεργασίας p
R_{pk}	ενεργειακό υπόλοιπο που εξέρχεται του ενδιάμεσου k στον καταρράκτη C_p της διεργασίας p
$R_{pr,b}^{fra}$	απόδοση κλασμάτωσης τροφοδοσίας (βιομάζα) b στο προϊόν pr

RR_{act}	πραγματικός λόγος αναρροής
RR_{min}	ελάχιστος λόγος αναρροής
S	σύνολο θερμών βοηθητικών παροχών
SE	σύνολο περιόδων λειτουργίας σε μόνιμες συνθήκες
S'_k	υποσύνολο θερμών παροχών που τροφοδοτούν θερμότητα στο ενδιάμεσο k και χαμηλότερα ενδιάμεσα
S_k	υποσύνολο θερμών παροχών που εφαρμόζονται στο ενδιάμεσο k
S_n	υποσύνολο θερμών βοηθητικών παροχών που παράγονται από την ψευδο-ψυχρή παροχή n
T	σύνολο διασυνδέσεων μεταξύ χημικών και διεργασιών αλυσίδας προϊόντων
T^*	μετατοπισμένη θερμοκρασία ρεύματος
T_{in}^{sat}	θερμοκρασία κορεσμού του ατμού στην είσοδο της τουρμπίνας
T_n^{sat}	θερμοκρασία κορεσμού ατμού στο επίπεδο n
T_{out}^{sat}	θερμοκρασία κορεσμού του ατμού στην έξοδο της τουρμπίνας
T_p^{in}	υποσύνολο διασυνδέσεων που εισέρχονται στη διεργασία p
T_p^{out}	υποσύνολο διασυνδέσεων που εξέρχονται από τη διεργασία p
T_{pr}^{in}	υποσύνολο διασυνδέσεων που εισέρχονται στο κόμβο pr
T_{pr}^{out}	υποσύνολο διασυνδέσεων που εξέρχονται από τον κόμβο pr
T_{pr}^s	υποσύνολο διασυνδέσεων αποθήκευσης του χημικού pr
T_{upper}, T_{lower}	υποσύνολο διασυνδέσεων στο άνω, κάτω μέρος του aBBR
transport	κόστος μεταφοράς τροφοδοσίας (βιομάζα)
U	πολύ μεγάλος αριθμός
UB_m^S, UB_n^W	άνω όρια θερμής παροχής m , ψυχρής παροχής n
UB_p^f	άνω όρια δυναμικότητας της διεργασίας p
$U^{COND/REB}$	συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας συμπυκνωτήρα/αναβραστήρα
U_{ij}, U_{in} και U_{mj}	άνω όρια ανταλλαγής θερμότητας εναλλάκτη σύνδεσης θερμού-ψυχρού ρεύματος, θερμού ρεύματος-ψυχρής παροχής, θερμής παροχής-ψυχρού ρεύματος
UTILITIES	ενέργεια βοηθητικών παροχών Συνολικής Μονάδας
VHP	ατμός πολύ υψηλής πίεσης

VLP	ατμός πολύ χαμηλής πίεσης
W	σύνολο ψυχρών βοηθητικών παροχών
W'	υποσύνολο πραγματικών βοηθητικών παροχών ψύξης
W _k	υποσύνολο ψυχρών παροχών που εφαρμόζονται στο ενδιάμεσο k
W _m	υποσύνολο ψευδο-ψυχρών βοηθητικών παροχών που παράγουν το επίπεδο ατμού m
w ₁ , w ₂	συντελεστές στάθμισης όρων κόστους λειτουργίας και επένδυσης
Y _{d,p}	κλάσμα διαίρεσης της συνολικής παροχής τροφοδοσίας d στο επίπεδο πίεσης p
y _i	δυναμικές μεταβλητές επιλογής θερμού ρεύματος i (συμπυκνωτήρα) στήλης απόσταξης
Y _i ^H , Y _j ^C	ενεργειακά μερίδια συμπυκνωτήρα, αναβραστήρα
y _{ij} ^{HC} , y _{in} ^{HU} , y _{mj} ^{CU}	δυναμικές μεταβλητές επιλογής εναλλάκτη σύνδεσης θερμού-ψυχρού ρεύματος, θερμού ρεύματος-ψυχρής παροχής, θερμής παροχής-ψυχρού ρεύματος
Y ^{LB}	ελάχιστη επιτρεπόμενη δυναμικότητα στήλης απόσταξης
y _m , y _n	δυναμικές μεταβλητές επιλογής θερμής παροχής m, ψυχρής παροχής n
y _{n',n''}	δυναμική μεταβλητή επιλογής της ζώνης εκτόνωσης n'-n''
y _{n',n''} ^C	δυναμική μεταβλητή πρόβλεψης της παραγόμενης ισχύος πάνω/κάτω του ορίου E ^b
Y _p	βαθμός μετατροπής της διεργασίας p
y _t	δυναμικές μεταβλητές επιλογής διασύνδεσης t
Z	σύνολο συστημάτων διεργασιών που ολοκληρώνονται μεταξύ τους

Ελληνικά σύμβολα

a ₀ -a ₇	συντελεστές υπολογισμού παραμέτρων παλινδρόμησης A, B
$\overline{\Delta H}_{is}$	ισεντροπική μεταβολή της ειδικής ενθαλπίας ατμού
$\overline{\Delta H}_{is_{n',n''}}$	ισεντροπική μεταβολή της ειδικής ενθαλπίας ατμού στη ζώνη εκτόνωσης n'-n''

ΔH^{lg}	ειδική λανθάνουσα θερμότητα κορεσμένου νερού
$\overline{\Delta H}_{\text{real}}$	πραγματική μεταβολή της ειδικής ενθαλπίας ατμού
$\overline{\Delta H}_{\text{VAP}}^{\text{COND/REB}}$	ειδική ενθαλπία εξάτμισης μίγματος συμπυκνωτήρα/αναβραστήρα
ΔT	θερμοκρασιακή διαφορά
ΔT^{sat}	διαφορά θερμοκρασίας κορεσμού του ατμού στην είσοδο και έξοδο της τουρμπίνας
$\Delta T_{\text{lm}}^{\text{COND/REB}}$	μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά συμπυκνωτήρα/αναβραστήρα
ΔT_{min}	ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά διεργασίας
$\Delta T_{\text{min}}^{\text{site}}$	ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά Συνολικής Μονάδας
$\Delta T_{n',n''}$	διαφορά θερμοκρασίας κορεσμού του ατμού στη ζώνη εκτόνωσης n'-n''
$\Delta T^{\text{reb/cond}}$	μεταβολή θερμοκρασίας αναβραστήρα/συμπυκνωτήρα
ρ_m	μοριακή πυκνότητα
Φ	παράμετρος λειτουργίας τουρμπίνας

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	v
Περίληψη.....	vi
Extended abstract.....	ix
Ονοματολογία.....	xii
1. Εισαγωγή.....	1
2. Μέθοδοι ενεργειακής ολοκλήρωσης διεργασιών.....	13
3. Η πρόσκληση της ολοκληρωμένης σύνθεσης αλυσίδων προϊόντων.....	28
4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών.....	37
4.1. Γράφος Βιομάζας: Σύνθεση διεργασιών.....	37
4.2. Αναπαράσταση Ολοκλήρωσης Συνολικής Μονάδας.....	42
4.3. Πλαίσιο και παραδείγματα εφαρμογής των αναπαραστάσεων ολοκλήρωσης βιομηχανικών μονάδων.....	52
4.3.1. Αναπαράσταση ολοκλήρωσης πολλαπλών-καταρρακτών.....	52
4.3.2. Αναπαράσταση ολοκλήρωσης Total Site Cascade.....	55
5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης.....	61
5.1. Ονοματολογία.....	61
5.2. Μοντέλο μεταφόρτωσης πολλαπλών-καταρρακτών: Inter-Cascade Transshipment model (ICT).....	63
5.3. Μοντέλο μεταφόρτωσης της αναπαράστασης TSC: Cross-Interval Transshipment model (CIT).....	71
5.4. Αντικατάσταση της κλασσικής γραφικής ανάλυσης από τα αναβαθμισμένα μοντέλα ICT και CIT.....	78
5.5. Παραδείγματα και εφαρμογές.....	83
5.5.1. Εφαρμογή του συνδυαστικού μοντέλου ICT-BBR.....	83
5.5.2. Εφαρμογή του συνδυαστικού μοντέλου CIT-BBR.....	88
5.5.3. Ολοκλήρωση βιομηχανίας ζάχαρης με βιοδιεργασίες: αξιοποίηση υπολειμμάτων επεξεργασίας ζαχαροκάλαμων.....	90
5.5.4. Επέκταση και ολοκλήρωση βιοδιυλιστηρίου παραγωγής 1-2G βιοαιθανόλης.....	103
5.5.5. Αναβάθμιση διυλιστηρίου Φυσικού Αέριου.....	108
5.5.6. Σχεδιασμός ενός νέου και πλήρως ολοκληρωμένου βιοδιυλιστηρίου.....	115
5.5.7. Ειδικές περιπτώσεις ολοκλήρωσης διεργασιών.....	124

6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές	130
6.1. Εποχικότητα βιομάζας και αλυσίδων προϊόντων	130
6.2. Αναπαράσταση αναβαθμισμένου BBR σε προβλήματα εποχικότητας.....	135
6.3. Μαθηματική μοντελοποίηση	142
6.3.1. Ισοζύγια μάζας: Σύνθεση χαρτοφυλακίων βιοδιυλιστηρίων	142
6.3.2. Ισοζύγια ενέργειας: Ενεργειακή ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας υποκείμενη σε εποχικότητα	147
6.4. Παράδειγμα σύνθεσης και ολοκλήρωσης βιοδιυλιστηρίων που υπόκεινται στην εποχική διαθεσιμότητα τροφοδοσιών βιομάζας.....	153
6.4.1. Μελέτη καταλληλότητας ποικιλιών βιομάζας σύμφωνα με ενεργειακά κριτήρια.....	157
6.4.2. Μελέτη καταλληλότητας ποικιλιών βιομάζας σύμφωνα με κριτήρια κερδοφορίας.....	163
6.4.3. Σχεδιασμός και χρονοπρογραμματισμός ενός βιοδιυλιστηρίου στην Ελλάδα με πραγματικά δεδομένα εποχικότητας ποικιλιών βιομάζας	166
7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας	171
7.1. Εισαγωγή.....	171
7.2. Συμβατικές τεχνικές αναπαράστασης του προβλήματος.....	173
7.3. Σύνθεση και ολοκλήρωση διεργασιών: η περίπτωση της συμπαραγωγής.....	184
7.4. Στρατηγικές μαθηματικής μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης της συμπαραγωγής	188
7.4.1. Αναθεώρηση μοντέλου υπολογισμού του ειδικού φορτίου θερμότητας της τουρμπίνας... ..	194
7.4.2. Αναθεώρηση μοντέλων υπολογισμού παραμέτρων του THM	197
7.4.3. Παράλληλο δυναμικό σύστημα βελτιστοποίησης επιπέδων ατμού	200
7.4.4. Προγραμματιστικές τεχνικές εφαρμογής του αναβαθμισμένου μοντέλου THM	204
7.5. Παραδείγματα και εφαρμογές.....	210
7.5.1. Ανταγωνιστικότητα έμμεσης ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής.....	210
7.5.2. Σύνθεση ενεργειακά βέλτιστου βιοδιυλιστηρίου	215
8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών.....	231
8.1. Τεχνικές ενεργειακής ολοκλήρωσης διεργασιών απόσταξης.....	231
8.1.1 Αυτόνομη ολοκλήρωση απόσταξης.....	232
8.1.2 Ολοκλήρωση απόσταξης με την υπόλοιπη διεργασία	236
8.2. Περιγραφή του προβλήματος ολοκλήρωσης της απόσταξης με την υπόλοιπη διεργασία	240

8.3. Μεθοδολογία	244
8.3.1. Γράφος Distillation Mapping Representation.....	244
8.3.2. Ενεργειακή ολοκλήρωση MED με την υπόλοιπη διεργασία.....	247
8.3.3. Προετοιμασία του μοντέλου βελτιστοποίησης.....	252
8.3.4. Μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης	259
8.4. Παραδείγματα.....	263
8.4.1. Παράδειγμα επεξήγησης και προετοιμασίας του προβλήματος βελτιστοποίησης.....	263
8.4.2. Σχεδιασμός και ενεργειακή βελτιστοποίηση συστημάτων απόσταξης ενός πραγματικού λιγνοκυτταρινούχου βιοδιυλιστηρίου.....	266
9. Επίλογος	284
9.1. Συμπεράσματα και επιστημονική συνεισφορά	284
9.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα και εφαρμογή	287
Παράρτημα Α	291
A.1. Εξισώσεις γράφων σύνθεσης διεργασιών.....	291
A.1.1. Biomass Bipartite graph Representation (BBR)	291
A.1.2. advanced Biomass Bipartite graph Representation (aBBR)	292
A.2. Μοντέλα ενεργειακής μεταφόρτωσης	293
A.2.1. Inter-Cascade Transshipment (ICT).....	293
A.2.2. Cross-Interval Transshipment (CIT).....	294
A.2.3: Υπολογισμός αριθμού εναλλακτών ενέργειας της Συνολικής μονάδας	295
A.2.4. Εναλλακτικοί τύποι αντικειμενικών συναρτήσεων	296
A.3: Μοντέλα εκτίμησης της συμπαραγωγής ισχύος με χρήση τουρμπίνων.....	297
A.3.1. THM.v1: Απλουστευμένο μοντέλο εκτίμησης της συμπαραγωγής	297
A.3.2. THM.v2: Αναλυτικό μοντέλο εκτίμησης της συμπαραγωγής	298
A.4. DMR: Σχεδιασμός ενεργειακά ολοκληρωμένων συστημάτων απόσταξης	300
Παράρτημα Β	302
B.1. Δεδομένα επιπέδων βοηθητικών παροχών.....	303
B.2. Θερμικά δεδομένα διεργασιών	303
B.3. Τεχνο-οικονομικά δεδομένα διεργασιών	306
B.4. Παράμετροι κόστους επένδυσης αποστακτικών στηλών.....	307

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Παραδείγματα κυκλικής οικονομίας: Σύνδεση κατανεμημένων βιομηχανιών με ανερχόμενα βιοδιυλιστήρια.	4
Σχήμα 1.2: Παράδειγμα δομής αλυσίδων αξίας προϊόντων (value chains)	5
Σχήμα 2.1: Διάγραμμα T-ΔH για την ολοκλήρωση θερμών-ψυχρών ρευμάτων	14
Σχήμα 2.2: Κατασκευή Σύνθετου Διαγράμματος διεργασίας πολλών ρευμάτων	14
Σχήμα 2.3: Σύνθετο και Μεγάλο Σύνθετο Διάγραμμα	15
Σχήμα 2.4: Σύνθετο Διάγραμμα δύο ρευμάτων (α), κατασκευή ενεργειακού καταρράκτη (β), αποσυμφόρηση ενεργειακού καταρράκτη (γ).....	17
Σχήμα 2.5: Γενικευμένη αναπαράσταση θερμοκρασιακών ενδιαμέσων ενεργειακού καταρράκτη	19
Σχήμα 2.6: Συνολική Μονάδα πολλαπλών διεργασιών: (i) παραγωγή ατμού πολύ υψηλής πίεσης, (ii) σύστημα τουρμπίνων εκτόνωσης ατμού και (iii) ενδιάμεσα επίπεδα ατμού ολοκλήρωσης Συνολικής Μονάδας	20
Σχήμα 2.7: Μεγάλα Σύνθετα Διαγράμματα (GCC) και κατασκευή Προφίλ Πηγών και Καταβοθρών Συνολικής Μονάδας (SSSP).....	22
Σχήμα 2.8: Χρήση SSSP για την εκτίμηση των στόχων συμπαραγωγής έργου	23
Σχήμα 3.1: Αλυσίδα προϊόντων τριών χημικών μονοπατιών	28
Σχήμα 3.2: GCC των Δ1, Δ2 και Δ3 για λειτουργία στη μέγιστη δυναμικότητα	30
Σχήμα 3.3: GCC της Δ3 για λειτουργία σε διαφορετικά ποσοστά δυναμικότητας ως προς τη μέγιστη	31
Σχήμα 3.4: SSSP 11 υποψήφιων συνδυασμών των Δ1-Δ2-Δ3 (Δ1 στο 100%) και ενεργειακό κόστος κάθε υποψήφιας Συνολικής Μονάδας.....	33
Σχήμα 3.5: Ενεργειακό κόστος Συνολικής Μονάδας συναρτήσει των βαθμών ελευθερίας σύνθεσης διεργασιών (διαμοιρασμός του ενδιαμέσου Χημικού 2 στις ανταγωνιστικές διεργασίες Δ2-Δ3)....	34
Σχήμα 4.1: Μετασχηματισμός αλυσίδας προϊόντων σε μορφή BBR	39
Σχήμα 4.2: Παράδειγμα ενεργειακής διασύνδεσης ενεργειακών καταρρακτών 3 διεργασιών (Συνολική Μονάδα) μέσω των επιπέδων ατμού	43
Σχήμα 4.3: Γενικευμένη αναπαράσταση ενεργειακής διασύνδεσης 2 καταρρακτών μίας Συνολικής Μονάδας (2 διεργασιών) μέσω των επιπέδων ατμού	44
Σχήμα 4.4: Παροχή θερμότητας (αριστερά) σε ψυχρό ρεύμα μέσω θερμών παροχών και άντληση θερμότητας (δεξιά) από θερμό ρεύμα μέσω ψευδο-ψυχρών παροχών	45
Σχήμα 4.5: Γενικευμένη αναπαράσταση πολλαπλών-καταρρακτών για την ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας.....	46

Σχήμα 4.6: Διασυνδεδεμένα θερμοκρασιακά ενδιάμεσα διαφορετικών καταρρακτών (της αναπαράστασης ολοκλήρωσης πολλαπλών-καταρρακτών) μέσω των επιπέδων του συστήματος βοηθητικών παροχών USS.	47
Σχήμα 4.7: Απλοποιημένο (α) και λεπτομερές (β) μοντέλο μεταφόρτωσης για κάθε θερμοκρασιακό ενδιάμεσο ενός καταρράκτη διεργασίας (από Biegler et al., 1997).	48
Σχήμα 4.8: Γενικευμένος ενιαίος καταρράκτης (Total Site Cascade) ολοκλήρωσης Συνολικής Μονάδας.....	50
Σχήμα 4.9: Παράδειγμα εφαρμογής του σχήματος ολοκλήρωσης πολλαπλών-καταρρακτών (δύο στρατηγικές): (α) πρώτα άμεση, μετά έμμεση ολοκλήρωση και (β) πρώτα έμμεση, μετά άμεση ολοκλήρωση.....	54
Σχήμα 4.10: Total Site Cascade για την ολοκλήρωση 3 υποψήφιων διεργασιών (Πίνακας 4.1) Συνολικής Μονάδας.....	57
Σχήμα 5.1: Ανάπτυξη του μοντέλου μεταφόρτωσης πολλαπλών-καταρρακτών: ενεργειακές διασυνδέσεις μεταξύ 2 οποιονδήποτε καταρρακτών (<i>Cascade 1- Cascade N</i>) μέσω των κόμβων 2, 3.....	64
Σχήμα 5.2: Γενικευμένη αναπαράσταση απλοποιημένου μοντέλου μεταφόρτωσης ολοκλήρωσης Συνολικής Μονάδας, Inter-Cascade Transshipment (ICT).....	67
Σχήμα 5.3: Ενσωμάτωση πολλαπλών-καταρρακτών εντός ενός ενιαίου καταρράκτη ολοκλήρωσης Συνολικής Μονάδας (Total Site Cascade).....	72
Σχήμα 5.4: Ανάπτυξη του μοντέλου μεταφόρτωσης CIT για την ολοκλήρωση ρευμάτων διαφορετικών διεργασιών της Συνολικής Μονάδας μέσω των κόμβων 4, 5.....	73
Σχήμα 5.5: Γενικευμένη αναπαράσταση αναλυτικού μοντέλου μεταφόρτωσης ολοκλήρωσης Συνολικής Μονάδας, Cross-Interval Transshipment (CIT).....	74
Σχήμα 5.6: Ολοκλήρωση πολλαπλών-καταρρακτών (α), ολοκλήρωση με χρήση του TSC (β), κατασκευή SSSP με χρήση του TSC (γ), τσέπη διεργασίας (δ), αναπαράσταση συμβατικού SSSP (ε).....	79
Σχήμα 5.7: Αναπαράσταση πολλαπλών-καταρρακτών για το παράδειγμα του Σχήματος 3.1 χρησιμοποιώντας το μοντέλο ICT.....	84
Σχήμα 5.8: BBR της αλυσίδας προϊόντων του Σχήματος 3.1 και μέγιστες δυναμικότητες υποψήφιων διεργασιών.....	87
Σχήμα 5.9: Βελτιστοποιημένη αλυσίδα προϊόντων και SSSP της βέλτιστης Συνολικής Μονάδας	88
Σχήμα 5.10: Διάγραμμα κόστους ενέργειας και φρέσκων θερμών/ψυχρών παροχών συναρτήσει της κατανομής της κοινής τροφοδοσίας στις ανταγωνιστικές διεργασίες.	88
Σχήμα 5.11: Αναπαράσταση TSC για το παράδειγμα του Σχήματος 3.1 χρησιμοποιώντας το μοντέλο CIT.....	89

Σχήμα 5.12: BBR της υπάρχουσας ζαχαροβιομηχανίας (πράσινο) και των υποψήφιων βιοδιεργασιών (πορτοκαλί)	92
Σχήμα 5.13: SSSP της βέλτιστης Συνολικής Μονάδας (παραγωγή και εξοικονόμηση ατμού)	95
Σχήμα 5.14: Αποτελέσματα προτιμήσεων βιοδιεργασιών για την επέκταση υπάρχουσας ζαχαροβιομηχανίας βασισμένα σε ενεργειακά κριτήρια.....	98
Σχήμα 5.15: Ενεργειακά αποτελέσματα και αντικειμενική συνάρτηση (ενεργειακό κόστος) των 100 καλύτερων λύσεων.....	99
Σχήμα 5.16: Αποτελέσματα προτιμήσεων βιοδιεργασιών για την επέκταση υπάρχουσας ζαχαροβιομηχανίας βασισμένα σε οικονομικά κριτήρια.....	101
Σχήμα 5.17: Ενεργειακά αποτελέσματα και αντικειμενική συνάρτηση (ενεργειακό κόστος) των 100 καλύτερων λύσεων.....	102
Σχήμα 5.18: BBR της υπάρχουσας παραγωγής 1-2G βιοαιθανόλης (πράσινο) και των υποψήφιων βιοδιεργασιών (πορτοκαλί).	104
Σχήμα 5.19: Αποτελέσματα προτιμήσεων βιοδιεργασιών για την επέκταση βιοδιυλιστηρίου 1-2G αιθανόλης βασισμένα σε ενεργειακά κριτήρια	106
Σχήμα 5.20: Αποτελέσματα προτιμήσεων βιοδιεργασιών για την επέκταση βιοδιυλιστηρίου 1-2G αιθανόλης βασισμένα σε οικονομικά κριτήρια	108
Σχήμα 5.21: BBR επέκτασης διυλιστηρίου φυσικού αερίου με ανανεώσιμα καύσιμα	110
Σχήμα 5.22: Επιλογές διεργασιών (α), κερδοφορία (β) και περιβαλλοντικός στόχος (γ) συναρτήσει της παροχής βιομάζας	114
Σχήμα 5.23: BBR υποψήφιων διεργασιών αξιοποίησης βιομάζας για την ανάπτυξη ενός νέου βιοδιυλιστηρίου	117
Σχήμα 5.24: Προτιμήσεις ενσωμάτωσης βιοπροϊόντων σε βιοδιυλιστήρια σύμφωνα με ενεργειακά κριτήρια	119
Σχήμα 5.25: Προτιμήσεις ενσωμάτωσης βιοπροϊόντων σε βιοδιυλιστήρια σύμφωνα με κριτήρια κερδοφορίας	124
Σχήμα 5.26: Ειδικές περιπτώσεις ολοκλήρωσης: (α) αποκλεισμός διεργασίας, (β) ολοκλήρωση υπό περιορισμούς	125
Σχήμα 5.27: Στρατηγικές αντιμετώπισης ολοκλήρωσης διεργασιών υπό περιορισμούς με τη χρήση πολλαπλών-καταρρακτών	127
Σχήμα 5.28: Στρατηγικές αντιμετώπισης ολοκλήρωσης διεργασιών υπό περιορισμούς με τη χρήση TSC	128
Σχήμα 6.1: Αναβαθμισμένο BBR για την αντιμετώπιση προβλημάτων εποχικότητας	133
Σχήμα 6.2: BBR πολλαπλών-τροφοδοσιών: προ-επεξεργασία και αναβάθμιση ποικιλιών βιομάζας	136

Σχήμα 6.3: Ετήσια (2017) συνολική διαθεσιμότητα λιγνοκυτταρινούχων ποικιλιών τεσσάρων βασικών χωρών-παραγωγών βιομάζας: Γαλλία, Γερμανία, Ουγγαρία, Ινδία (BIOCORE, 2014)	137
Σχήμα 6.4: Αποδόσεις κλασμάτων ποικιλιών λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας (BIOCORE, 2014).....	137
Σχήμα 6.5: Στάδια ξήρανσης-αποθήκευσης (άνω-BBR) και αναβάθμισης βιομάζας (κάτω-BBR)...	139
Σχήμα 6.6: Γενικευμένη αναπαράσταση aBBR: συνδυαστικά στάδια ξήρανσης-αποθήκευσης και αναβάθμισης βιομάζας.....	140
Σχήμα 6.7: Γενικευμένη αναπαράσταση aBBR: άνω-aBBR προ-επεξεργασίας βιομάζας και κάτω-aBBR χημικών μονοπατιών αναβάθμισης βιομάζας	145
Σχήμα 6.8: aBBR που υπόκειται σε εποχική διαθεσιμότητα πολλαπλών-τροφοδοσιών βιομάζας (b1, b2, b3) και GCC διεργασιών του aBBR για κάθε περίοδο λειτουργίας (se1, se2, se3, se4)	148
Σχήμα 6.9: Διαδικασία ολοκλήρωσης με χρήση πολλαπλών-καταρρακτών σε διαφορετικές περιόδους λειτουργίας της επιλεχθείσας Συνολικής Μονάδας	149
Σχήμα 6.10: Διαδικασία ολοκλήρωσης με χρήση του ενιαίου καταρράκτη TSC σε διαφορετικές περιόδους λειτουργίας της επιλεχθείσας Συνολικής Μονάδας	149
Σχήμα 6.11: aBBR υποψήφιων διεργασιών αξιοποίησης υποψήφιων ποικιλιών βιομάζας για την ανάπτυξη ενός νέου βιοδιυλιστηρίου	156
Σχήμα 6.12: Αποτελέσματα προτιμήσεων ποικιλιών και διεργασιών για την παραγωγή βιοκαυσίμων σύμφωνα με ενεργειακά κριτήρια.....	158
Σχήμα 6.13: Αποτελέσματα προτιμήσεων ποικιλιών και διεργασιών για την παραγωγή προϊόντων υψηλής αξίας σύμφωνα με ενεργειακά κριτήρια.....	160
Σχήμα 6.14: Αποτελέσματα καλύτερων λύσεων βιοδιυλιστηρίων για το aBBR του Σχήματος 6.11 σύμφωνα με ενεργειακά κριτήρια: (α) χαρτοφυλάκια διεργασιών και τροφοδοσιών, (β) ενεργειακό κόστος και εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) προτιμήσεις διεργασιών, (δ) προτιμήσεις ποικιλιών βιομάζας	162
Σχήμα 6.15: Αποτελέσματα προτιμήσεων ποικιλιών και διεργασιών για την παραγωγή βιοκαυσίμων σύμφωνα με κριτήρια κερδοφορίας: (α) χαρτοφυλάκια διεργασιών, (β) κερδοφορία και εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) προτιμήσεις διεργασιών βιοκαυσίμων, (δ) προτιμήσεις ποικιλιών βιομάζας	164
Σχήμα 6.16: Αποτελέσματα ποικιλιών και διεργασιών για το aBBR του Σχήματος 6.11 σύμφωνα με κριτήρια κερδοφορίας: : (α) χαρτοφυλάκια διεργασιών και τροφοδοσιών, (β) κερδοφορία και εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) προτιμήσεις διεργασιών, (δ) προτιμήσεις ποικιλιών βιομάζας.....	165
Σχήμα 6.17: Εποχική διαθεσιμότητα τροφοδοσιών βιομάζας για την περίπτωση της Ελλάδας	166
Σχήμα 6.18: Αποτελέσματα ποικιλιών και διεργασιών για την περίπτωση της Ελλάδας σύμφωνα με κριτήρια κερδοφορίας: : (α) χαρτοφυλάκια διεργασιών, (β) κερδοφορία και εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) προτιμήσεις διεργασιών, (δ) προτιμήσεις ποικιλιών βιομάζας	167

Σχήμα 6.19: Χρονοπρογραμματισμός λειτουργίας επιλεγμένων διεργασιών και τροφοδοσιών βιομάζας για την περίπτωση της Ελλάδας σύμφωνα με κριτήρια κερδοφορίας.....	169
Σχήμα 6.20: Εποχική διαχείριση τροφοδοσιών βιομάζας και χημικών βιοδιυλιστηρίου στην Ελλάδα	170
Σχήμα 7.1: Διάγραμμα SSSP (α), Περιθώρια συμπαραγωγής (β), Διάγραμμα SUGCC (γ).....	173
Σχήμα 7.2: Διάγραμμα ισεντροπικής απόδοσης-Ισχύος (α), Willan’s line (β)	176
Σχήμα 7.3: (α) Κύλινδροι σύνθετης τουρμπίνας, (β) ισοδύναμος καταρράκτης απλών τουρμπίνων	177
Σχήμα 7.4: Πειραματικά αποτελέσματα τουρμπίνων των Peterson and Mann (1985) (α) και μετασηματισμός αποτελεσμάτων (β) από Manromatis and Kokossis (1998).....	177
Σχήμα 7.5: Ειδικό φορτίο θερμότητας (<i>q_{in}</i>) ατμού στην είσοδο-έξοδο της τουρμπίνας	180
Σχήμα 7.6: Εφαρμογή THM για την αξιολόγηση σεναρίων για δεδομένες διεργασίες Συνολικής Μονάδας και επίπεδα ατμού.....	181
Σχήμα 7.7: Σκαρήφιμα υποψήφια επιπέδων σε κάθε περιοχή υψηλής (HP), μέσης (MP) και χαμηλής (LP) πίεσης ατμού (α) και αναπαράσταση τριπλού-καταρράκτη (β) (από Shank and Kokossis, 2004)	182
Σχήμα 7.8: Αναπαραστάσεις ICT (α) και CIT (β) για ταυτόχρονη εκτίμηση της συμπαραγωγής.....	186
Σχήμα 7.9: Αναλυτικό σύστημα υποψήφια επιπέδων βοηθητικών παροχών	189
Σχήμα 7.10: Πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα ισεντροπικής απόδοσης-ισχύος	190
Σχήμα 7.11: Διάγραμμα ισεντροπικής απόδοσης-ισχύος τουρμπίνας για $T_{in}^{sat}=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $\Delta T^{sat}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$	196
Σχήμα 7.12: Πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα ισεντροπικής απόδοσης-ισχύος	198
Σχήμα 7.13: Πυκνό σύστημα υποψήφια επιπέδων βοηθητικών παροχών (α) και ανάπτυξη παράλληλου δυναμικού συστήματος ζωνών εκτόνωσης ατμού (β).....	201
Σχήμα 7.14: Αποκλεισμός επικαλυπτόμενων ζωνών εκτόνωσης.....	203
Σχήμα 7.15: Ανταγωνιστικότητα έμμεσης ολοκλήρωσης-συμπαραγωγής: (α) μόνο έμμεση ολοκλήρωση, (β) έμμεση ολοκλήρωση και συμπαραγωγή	211
Σχήμα 7.16: Ανταγωνιστικότητα έμμεσης ολοκλήρωσης-συμπαραγωγής: (α) μόνο έμμεση ολοκλήρωση, (β) προτεραιότητα αξιοποίησης συμπαραγωγής, (γ) υποψήφιο σενάριο συνδυαστικής ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής, (δ) βαθμοί ελευθερίας προβλήματος βελτιστοποίησης.	212
Σχήμα 7.17: Παράδειγμα βελτιστοποίησης αποδόσεων ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής: (α) μόνο έμμεση ολοκλήρωση, (β) βέλτιστη λύση και αποτελέσματα μοντέλου	214
Σχήμα 7.18: GCC διεργασίας αεριοποίησης: ενεργειακές τσέπες και δυναμικό συμπαραγωγής ..	217

Σχήμα 7.19: Αποτελέσματα προτιμήσεων διεργασιών των BBR του Σχήματος 5.23 σύμφωνα με κριτήρια ενεργειακού κόστους και συμπαραγωγής	219
Σχήμα 7.20: Πορεία αντικειμενικής συνάρτησης υπολογισμού ενεργειακού κόστους και συμπαραγωγής για τις 30 καλύτερες λύσεις	220
Σχήμα 7.21: Βιοδουλιστήριο μέγιστων ενεργειακών αποδόσεων και σύστημα συμπαραγωγής έργου	221
Σχήμα 7.22: Αποτελέσματα χρήσης πυκνού (Σχήμα 7.13) και χαλαρού (Σχήμα 7.9) συστήματος υποψήφια επιπέδων	223
Σχήμα 7.23: Αποτελέσματα προτιμήσεων διεργασιών των BBR του Σχήματος 5.23 σύμφωνα με κριτήρια κερδοφορίας βιοδουλιστηρίου	226
Σχήμα 7.24: Πορεία αντικειμενικής συνάρτησης υπολογισμού κερδοφορίας για τις 30 καλύτερες λύσεις.....	226
Σχήμα 7.25: Αποτελέσματα προτιμήσεων επιπέδων ατμού σύμφωνα με κριτήρια κερδοφορίας βιοδουλιστηρίου	227
Σχήμα 7.26: Ισοζύγια μάζας, ενεργειακές αποδόσεις και συστήματα βοηθητικών παροχών θέρμανσης και ψύξης βιοδουλιστηρίου μέγιστης κερδοφορίας	229
Σχήμα 8.1: Σχήμα αυτόνομης ολοκλήρωσης πολλαπλών-επιπέδων απόσταξης (MED).....	235
Σχήμα 8.2: Ολοκλήρωση συστημάτων MED με την υπόλοιπη διεργασία (υπόβαθρο): (α) πλήρως ενεργειακά ολοκληρωμένο MED 3-επιπέδων, (β) μερικώς ενεργειακά ολοκληρωμένο MED 2-επιπέδων.....	237
Σχήμα 8.3: Γραφική ανάλυση σχεδιασμού και ολοκλήρωσης MED: κατανομή επιπέδων ατμού για μείωση του ενεργειακού κόστους.....	240
Σχήμα 8.4: Τοπολογική συμπεριφορά επιπέδων απόσταξης MED συναρτήσει του GCC του υποβάθρου	243
Σχήμα 8.5: (α) οριακές πιέσεις DMR, (β) υποψήφια επίπεδα DMR, (γ) γράφος DMR, (δ) σενάρια MED	244
Σχήμα 8.6: Σύνθετα Διαγράμματα ρευμάτων του υποβάθρου και των στηλών απόσταξης στα υποψήφια επίπεδα πίεσης του DMR και υποψήφια επίπεδα βοηθητικών παροχών	248
Σχήμα 8.7: Επιλογή και συνεισφορά συμπυκνωτήρων/αναβραστήρων για την ολοκλήρωση MED με την υπόλοιπη διεργασία και καταρράκτης ολοκλήρωσης της συνολικής διεργασίας	249
Σχήμα 8.8: (α) αρχικό σενάριο απόσταξης, (β) υποψήφια επίπεδα πίεσης αποστακτικών στηλών MED, (γ) σενάρια σύνθεσης MED και ολοκλήρωση με το υπόβαθρο της διεργασίας	251
Σχήμα 8.9: Περιπτώσεις βελτιστοποίησης συστημάτων MED.....	257
Σχήμα 8.10: Οριακές τιμές κόστους ενέργειας και επένδυσης και στόχοι βελτιστοποίησης	258
Σχήμα 8.11: Λιγνοκυτταρινούχο βιοδουλιστήριο παραγωγής βιοαιθανόλης.....	267

Σχήμα 8.12: Αρχικός σχεδιασμός (τροφοδοσίες, προϊόντα, πιέσεις) αποστάξεων βιοδιυλιστηρίου: (α) ανάκτηση οργανικών διαλυτών, (β) καθαρισμός βιοαιθανόλης.....	267
Σχήμα 8.13: Αρχικό σενάριο ολοκλήρωσης αποστάξεων βιοδιυλιστηρίου με το υπόβαθρο	268
Σχήμα 8.14: Διαμόρφωση των επιπέδων πίεσης του DMR της D1: (α) οριακές πιέσεις DMR-D1, (β) διάγραμμα απόσταξης τριαδικού μίγματος τροφοδοσίας της D1	270
Σχήμα 8.15: Διαμόρφωση των επιπέδων πίεσης του DMR της D2: (α) οριακές πιέσεις DMR-D2, (β) διάγραμμα απόσταξης δυαδικού μίγματος τροφοδοσίας της D2	271
Σχήμα 8.16: Κόστος επένδυσης συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας για κάθε περίπτωση απόσταξης	272
Σχήμα 8.17: Γραμμικοποίηση κόστους επένδυσης συναρτήσει της παροχής τροφοδοσίας για κάθε περίπτωση απόσταξης	272
Σχήμα 8.18: Πορεία κόστους ενέργειας και επένδυσης συναρτήσει του χρόνου απόσβεσης	275
Σχήμα 8.19: Βέλτιστο σχέδιο ολοκλήρωσης συστημάτων MED (D1 και D2) με το υπόβαθρο της διεργασίας	277
Σχήμα 8.20: (α) σενάριο ολοκλήρωσης ελάχιστου κόστους επένδυσης, (β) σενάριο ολοκλήρωσης ελάχιστου κόστους ενέργειας, (γ) βέλτιστο σενάριο σχεδιασμού και ολοκλήρωσης MED	279
Σχήμα 8.21: Αρχικό σενάριο σχεδιασμού (βάσει Σχήματος 8.13) και βέλτιστο σενάριο επανασχεδιασμού (βάσει Σχήματος 8.19) των αποστάξεων του βιοδιυλιστηρίου, ύστερα από την εφαρμογή της μεθοδολογίας σύνθεσης και ολοκλήρωσης MED με το υπόβαθρο της διεργασίας	281

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 3.1: Θερμικά δεδομένα ρευμάτων και βοηθητικών παροχών	29
Πίνακας 4.1: Θερμικά δεδομένα διεργασιών	56
Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικός πίνακας ενεργειακών αναγκών Συνολικής Μονάδας	58
Πίνακας 5.1: Υποψήφια επίπεδα βοηθητικών παροχών θέρμανσης και ψύξης.....	93
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα 5 καλύτερων λύσεων του προβλήματος ενεργειακής βελτιστοποίησης	94
Πίνακας 5.3: Επιλογή διεργασιών και κατανομή ενδιάμεσων χημικών στις 100 καλύτερες λύσεις	97
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα των 5 πιο κερδοφόρων λύσεων	100
Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα 5 καλύτερων λύσεων του προβλήματος ενεργειακής βελτιστοποίησης	105
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα των 5 πιο κερδοφόρων λύσεων	107
Πίνακας 5.7: Επιλογές διεργασιών, στόχου και κερδοφορίας για διάφορες τιμές παροχής βιομάζας	112
Πίνακας 5.8: Συνεισφορά διαφορετικών λύσεων στον περιβαλλοντικό στόχο	115
Πίνακας 5.9: Σύνολο 5 καλύτερων λύσεων βιοδιυλιστηρίων ελάχιστου ενεργειακού κόστους	118
Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα εναλλακτών θερμότητας από τη χρήση του αναλυτικού μοντέλου CIT	122
Πίνακας 5.11: Σύνολο 5 καλύτερων λύσεων βιοδιυλιστηρίων μέγιστης κερδοφορίας	123
Πίνακας 7.1: Παράμετροι υπολογισμού των παραμέτρων παλινδρόμησης A και B	187
Πίνακας 7.2: Συγκριτικά αποτελέσματα ισχύος και ισεντροπικής απόδοσης διαφορετικών τεχνικών υπολογισμού της συμπαραγωγής.....	192
Πίνακας 7.3: Βελτιωμένοι παράμετροι υπολογισμού των παραμέτρων παλινδρόμησης A και B .	198
Πίνακας 7.4: Σύγκριση εκτιμήσεων της q_{in} με τη χρήση του συντομευμένου μοντέλου, του αναλυτικού μοντέλου και της υπόθεσης σταθερής τιμής.....	199
Πίνακας 7.5: Αποτελέσματα 5 καλύτερων λύσεων ενεργειακών αποδόσεων	216
Πίνακας 7.6: Αποτελέσματα 5 καλύτερων λύσεων υψηλής κερδοφορίας	224
Πίνακας 8.1: Χαρακτηριστικά υποψήφια σιηλών σε διάφορα επίπεδα πίεσης των DMR (D1 και D2)	273
Πίνακας 8.2: Αποτελέσματα βέλτιστων λύσεων MED για διαφορετικές τιμές χρόνου απόσβεσης	274
Πίνακας 8.3: Στρατηγικές κατανομής τροφοδοσίας βέλτιστων λύσεων MED	275
Πίνακας 8.4: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης των σεναρίων ολοκλήρωσης του Σχήματος 8.20 ..	279

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

B.1. Δεδομένα επιπέδων βοηθητικών παροχών.....	302
B.2. Θερμικά δεδομένα διεργασιών	303
B.3. Τεχνο-οικονομικά δεδομένα διεργασιών	306
B.4. Παράμετροι κόστους επένδυσης αποστακτικών στηλών.....	307

Κεφάλαιο 1.

Εισαγωγή

Η σταδιακή μείωση των πηγών ορυκτού πλούτου, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη χρήση προϊόντων βασισμένα σε αυτόν και τις επιπτώσεις της στην Κλιματική Αλλαγή, αποτελούν βασικά κίνητρα για την εντατικοποίηση της έρευνας για την αξιοποίηση βιοανανεώσιμων πηγών. Η EIA (2016) προβλέπει αύξηση των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών κατά 48% για την περίοδο 2012-2040 και αντίστοιχη αύξηση εκπομπών CO₂ κατά 34%. Επίσης, εκτιμώνται σημαντικές αυξήσεις στην κατανάλωση φυσικού αερίου και καυσίμων μεταφοράς κατά 70% και 40%, αντίστοιχα. Οι βιοανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν την μόνη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας βασισμένη στον άνθρακα και θα αποτελέσουν το θεμέλιο για την ανάπτυξη της πράσινης και βιώσιμης βιο-οικονομίας (IEA, 2018). Η ένταξή τους στην παραγωγή χημικών, υλικών και καυσίμων ολοκληρώνει με φυσικό τρόπο παραδείγματα Κυκλικής Οικονομίας (Cecelja et al., 2015; Rafat et al., 2012; Trokanas et al., 2013) και αναμένεται να πρωτοστατήσει στον περιορισμό της παγκόσμιας ρύπανσης μέσω καινοτόμων παραδειγμάτων Βιομηχανικής Οικολογίας. Μια ολόκληρη γενιά αξιοποίησης βιομάζας βασιζόταν στην αξιοποίηση βρώσιμων καλλιεργειών, όπως καλαμπόκι, ζαχαροκάλαμα και φυτικά λάδια, με στόχο την παραγωγή 1^{ης} γενιάς βιοκαυσίμων (αιθανόλη, βιοντίζελ και βιοαέριο). Ωστόσο, η παραγωγή τους σταδιακά καταργείται ενόψει της δικαιολογημένης κριτικής που δέχονται ως μη βιώσιμες εφαρμογές ανάπτυξης διεργασιών.

Η χρήση βρώσιμων καλλιεργειών μπορεί να φαίνεται η ευκολότερη προσέγγιση αξιοποίησης της βιομάζας, ωστόσο, ανταγωνίζεται την αγορά τροφίμων και ζωοτροφών και περιορίζεται από την εκτενή χρήση γης και πόρων. Επίσης, συχνά τίθεται υπό αμφισβήτηση η θετική συνεισφορά τους στην μείωση εκπομπών του θερμοκηπίου (Sims and Taylor, 2008), σε αντίθεση με τις αρχικές προσδοκίες. Ως εκ τούτου, η έρευνα σήμερα μετατοπίζεται προς μη-βρώσιμες πηγές άνθρακα (2^{ης} γενιάς βιομάζα), και

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

στοχεύει σε πιο δύσκολα και απαιτητικά συστατικά της βιομάζας (Sims et al., 2010). Μη-βρώσιμα λιγνοκυτταρινούχα υπολείμματα αγροκαλλιέργειας και δασοκομίας, σε συνδυασμό με αστικά και βιομηχανικά απόβλητα, γίνονται όλο και περισσότερο αποδεκτές πηγές άνθρακα για την αντικατάσταση του πεπερασμένου ορυκτού πλούτου για την παραγωγή βιοκαυσίμων και βιοχημικών (Chandel et al., 2018; Nizami et al., 2017). Την τελευταία δεκαετία, νέοι τύποι βιομάζας (3^{ης} γενιάς βιομάζα) και καινοτόμες τεχνολογίες αξιοποίησής της παρουσιάζουν ιδιαίτερη άνοδο και προσοχή από την επιστημονική κοινότητα και αφορούν υδάτινες καλλιέργειες ανάπτυξης μικρο-φυκών και μακρο-φυκών. Οι τεχνολογίες αυτές αξιοποιούν μη συμβατικές πηγές άνθρακα, όπως το CO₂, και μπορούν να συμβάλουν με άμεσο τρόπο στην μείωση εκπομπών του θερμοκηπίου για την παραγωγή καυσίμων και πολύ υψηλής αξίας χημικών (Psycha et al., 2018; Hughes et al., 2013). Σε κάθε περίπτωση, οφείλει να διασφαλιστεί η ολιστική αξιοποίηση της βιομάζας και οι μέγιστες αποδόσεις χρήσης ενέργειας και βοηθητικών υλών, ώστε να καταστεί οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμη η ανάπτυξη καινοτόμων εφαρμογών παραγωγής βιο-προϊόντων.

Η συντριπτική πλειοψηφία των εφαρμογών, σήμερα, επικεντρώνεται στην αξιοποίηση 2^{ης} γενιάς μη-βρώσιμων λιγνοκυτταρινούχων τροφοδοσιών, από τις οποίες εξάγονται πολύτιμες χημικές δομές, όπως η κυτταρίνη (σάκχαρο C6), η ημι-κυτταρίνη (σάκχαρο C5) και η λιγνίνη. Τα τρία κλάσματα της λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας αποτελούν βασικά χημικά ενδιάμεσα για τη παραγωγή εμπορικών χημικών (π.χ. διαλύτες, βιοκαύσιμα, μονομερή), εξειδικευμένων και υψηλής αξίας χημικών (π.χ. παρα-/φαρμακευτικά) και μεγάλου εύρους πολυμερών (π.χ. επιφανειοδραστικά, δομικά υλικά, ρητίνες, ένζυμα, κ.ά.).

Σε αυτό το πλαίσιο, η έρευνα αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις όσον αφορά την βιωσιμότητα και την εντατικοποίηση τεχνικών επεξεργασίας της βιομάζας, οι οποίες κατηγοριοποιούνται σε χημικές, βιο-χημικές (ζυμώσεις), και θερμο-χημικές (Jin et al., 2018; Kokossis and Yang, 2010). Κλασσικές τεχνολογίες ζύμωσης συνήθως στοχεύουν στην παραγωγή βιοκαυσίμων (αλκοόλες, ντίζελ και βιοαέριο) και τη χρήση τους ως καύσιμα μεταφοράς ή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Sims et al., 2008; Chandel et al., 2018; Gupta and Verna, 2015; Jin et al., 2018). Εναλλακτικά, ευρέως γνωστές θερμο-χημικές διεργασίες, όπως η πυρόλυση, η αεριοποίηση, η υδροθερμική υγροποίηση, η Fischer-Tropsch, η υδρογονοκατεργασία, η σύνθεση μεθανόλης, κ.ά., συχνά παρουσιάζουν διαφορετικές αποδόσεις και περιβαλλοντικές επιπτώσεις αναλόγως την τροφοδοσία που αξιοποιείται κάθε φορά και εφαρμόζονται για την παραγωγή και αναβάθμιση συνθετικού αερίου και βιο-ελαίων, αλκανίων, αλκοολών και αρωματικών ενώσεων στοχεύοντας κυρίως στην ανάπτυξη μιγμάτων υγρών καυσίμων (Hughes et al.,

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

2013). Καινοτόμες χημικές διεργασίες συνήθως απατώνται σε επόμενα στάδια μεταποίησης και αναβάθμισης συστατικών της βιομάζας για την παραγωγή μονομερών/πολυμερών, τα οποία συναντώνται σε πολλαπλές εφαρμογές στους τομείς της υγείας, των κατασκευών, και της τεχνολογίας.

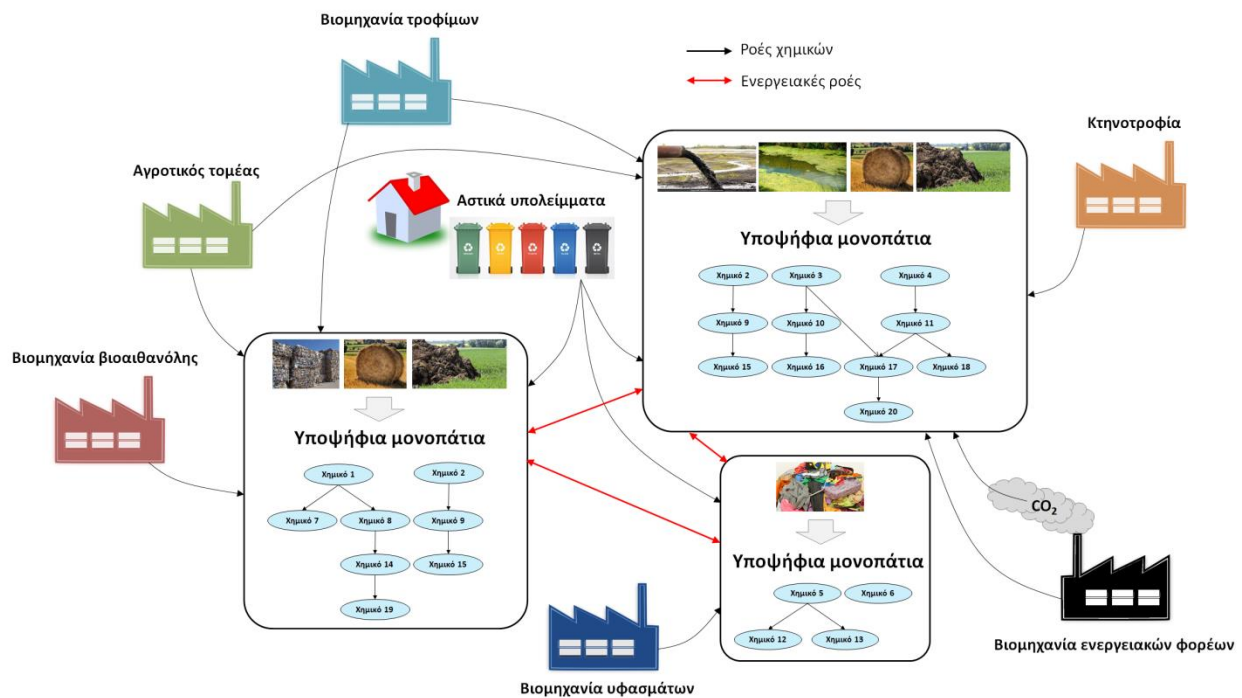
Σύγχρονα επιτεύγματα έρευνας (BIOCORE, 2014; EuroBioref, 2014; Suprabio, 2014; EuropaBio, 2011) επεκτείνουν τα συμβατικά χαρτοφυλάκια βιοκαυσίμων και ενεργειακών φορέων (Sims et al., 2008; Repeseng, 2013; Jin et al., 2018; Raman et al., 2018) φέρνοντας στην επιφάνεια καινοτόμα βιοχημικά ενδιάμεσα, βιοπροϊόντα και τεχνολογίες αναβάθμισης. Ωστόσο, τόσο οι υφιστάμενες όσο και οι νέες τεχνολογίες δεν εξασφαλίζουν, κατ' ανάγκη, βιώσιμα σχέδια αξιοποίησης τροφοδοσιών βιομάζας σε κάθε περίπτωση, καθότι η ενσωμάτωση συνδυασμών τροφοδοσιών και τεχνολογιών σε ένα βιοδιυλιστήριο χαρακτηρίζεται από διαφορετικά επίπεδα ολοκλήρωσης, απόδοσης, εξοικονόμησης πόρων και κερδοφορίας.

Η πλειοψηφία των υφιστάμενων εφαρμογών βιοτεχνολογίας – αν και πλέον αμφισβητήσιμες σε οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο – στοχεύουν σχεδόν αποκλειστικά στην παραγωγή ενεργειακών φορέων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η παραγωγή βιοαιθανόλης, η οποία παρότι δεν δικαιολογείται σε οικονομικούς όρους (πολύ χαμηλότερη τιμή έναντι άλλων βιοχημικών), παραμένει στις πρώτες θέσεις λόγω των κατανοητών και καλά μελετημένων σταδίων παραγωγής της. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην περιορισμένη γνώση των αποδόσεων και στα χαμηλά επίπεδα ωριμότητας (TRL) των καινοτόμων βιοδιεργασιών, σε συνδυασμό με τις ευμετάβλητες οικονομίες που αντιπροσωπεύουν τα νέα βιοπροϊόντα. Αν και τα υφιστάμενα βιοδιυλιστήρια επικεντρώνονται στην παραγωγή 2^{ης} γενιάς αιθανόλης (Gurta and Verma, 2015; Han et al., 2015a; Khoo, 2015) ή μεικτών βιοκαυσίμων (Baliban et al., 2013; Lauven, 2014; Mahmoud and Shuhaimi, 2013; Ng and Maravelias, 2017), τα βιοδιυλιστήρια πολλαπλών-προϊόντων (καυσίμων και χημικών) αποτελούν πλέον μονόδρομο για την διασφάλιση της αειφόρου ανάπτυξης (Gunukula et al., 2018; Han et al., 2015b; Hrnčić et al., 2016; Jin et al., 2018; Moncada et al., 2016; Pyrgakis et al., 2016).

Η βιομάζα αντιπροσωπεύει ένα πλήθος πρώτων υλών, χαμηλού κόστους, βασισμένες στον άνθρακα, οι οποίες ενδείκνυνται για την παραγωγή πολλών ελκυστικών προϊόντων υψηλής αξίας. Η εμφάνιση νέων τεχνολογιών αντιστρέφει σταδιακά τους κανόνες και τις συνήθειες πρακτικής εφαρμογής της βιοοικονομίας καθιστώντας την παραγωγή βιοχημικών ως κύριες επιλογές για τη διασφάλιση της βιωσιμότητας, και τους ενεργειακούς φορείς ως δευτερεύοντα συμπαράγωγα της ανερχόμενης βιομηχανίας.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Τα πιο ελπιδοφόρα σενάρια αναβάθμισης τέτοιων τροφοδοσιών συνδυάζουν υπολειμματικές ροές του αγροτικού τομέα και κατανεμημένων βιομηχανιών με βιοδυλιστηριακές μονάδες ως παραδείγματα κυκλικής οικονομίας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1, το πρόβλημα περιλαμβάνει υποψήφια χημικά μονοπάτια για την αξιοποίηση διαφορετικών υποβαθμισμένων τροφοδοσιών που προκύπτουν από διαφορετικές υφιστάμενες γραμμές παραγωγής, και τα οποία οφείλουν να επιλεγθούν και να ολοκληρωθούν κατάλληλα μεταξύ τους σε συνδυασμό με τις αποδόσεις που προκύπτουν από την ολοκλήρωσή τους με παρακείμενες διεργασίες της υφιστάμενης βιομηχανίας.



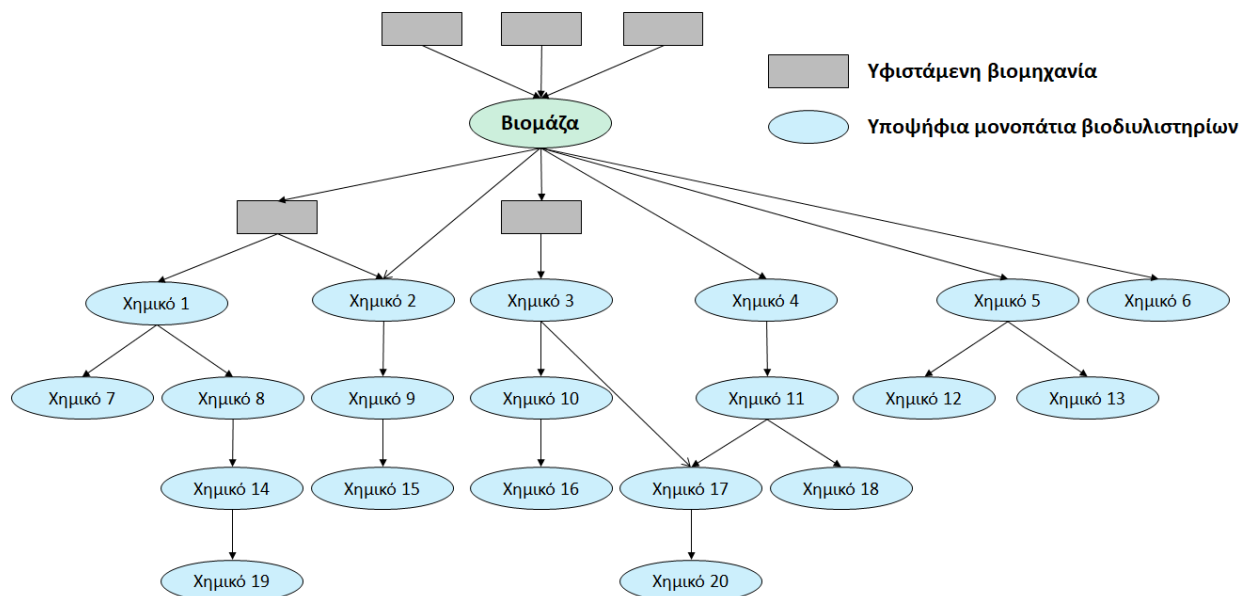
Σχήμα 1.1: Παραδείγματα κυκλικής οικονομίας: Σύνδεση κατανεμημένων βιομηχανιών με ανερχόμενα βιοδυλιστήρια.

Η συστημική διερεύνηση του πλήθους των επιλογών ενσωμάτωσης υποψήφιων διεργασιών εφαρμόζοντας κριτήρια οικονομικής, ενεργειακής ή/και περιβαλλοντικής απόδοσης αποτελεί ένα μεγάλο και σύνθετο πρόβλημα, το οποίο φέρνει νέες προσκλήσεις όσον αφορά την ανάλυση, το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση συνδέσεων διεργασία-προς-διεργασία. Οι κύριοι βαθμοί ελευθερίας του σχεδιαστικού προβλήματος πηγάζουν από τις επιμέρους αλυσίδες προϊόντων (value chains), οι οποίες περιλαμβάνουν τις επιλογές αναβάθμισης των εκάστοτε τροφοδοσιών βιομάζας σε τελικά προϊόντα. Στη γενική τους μορφή, τα παραδείγματα σύνδεσης μεταξύ κατανεμημένων και υποψήφιων

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

διεργασιών, όπως αυτά του Σχήματος 1.1, παίρνουν τη μορφή της αλυσίδας προϊόντων του Σχήματος 1.2, η οποία περιλαμβάνει το σύνολο των επιλογών σύνθεσης.

Όταν το πρόβλημα δεν αφορά αποκλειστικά το σχεδιασμό αυτόνομων βιοδιυλιστηρίων, αλλά περιπτώσεις εφαρμογών κυκλικής οικονομίας, τότε τμήματα των αλυσίδων προϊόντων (Σχήμα 1.2) μπορούν να αναφέρονται σε δεδομένα χημικά μονοπάτια που αντιπροσωπεύουν υφιστάμενες βιομηχανίες, οι οποίες μπορούν να ανταλλάξουν ροές χημικών και ενέργειας με οποιοδήποτε τρόπο τόσο μεταξύ τους όσο και με διεργασίες του ανερχόμενου βιοδιυλιστηρίου, στο βαθμό που το επιτρέπουν πρακτικοί περιορισμοί. Το πρόβλημα απαιτεί τη συστηματική αξιολόγηση όλων των επιλογών σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών με στόχο την ανάδειξη ελπιδοφόρων χαρτοφυλακίων διεργασιών και «κοκτέιλ» τροφοδοσιών για την ανάπτυξη βιώσιμων βιοδιυλιστηρίων.



Σχήμα 1.2: Παράδειγμα δομής αλυσίδων αξίας προϊόντων (value chains)

Οι Kokossis and Yang (2010) παρουσίασαν τις δυνατότητες εργαλείων και συστημάτων μηχανικής διεργασιών (process systems engineering tools) για την αντιμετώπιση των ανάλογων προκλήσεων που εμφανίζονται κατά το σχεδιασμό βιοδιεργασιών και βιοδιυλιστηρίων και ανέδειξαν την ανάγκη συνδυαστικής χρήσης διαφορετικών μεθόδων σύνθεσης, ανάλυσης, ολοκλήρωσης και βελτιστοποίησης διεργασιών για τον εντοπισμό βέλτιστων και βιώσιμων λύσεων. Αργότερα, οι Kokossis et al. (2015) ανέπτυξαν και εφάρμοσαν μια μεθοδολογία πολλαπλών σταδίων σχεδιασμού, η οποία συνδυάζει διαδικασίες σύνθεσης, ανάπτυξης ροοδιαγραμμάτων, ενεργειακής ολοκλήρωσης και ανάλυσης κύκλου

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

ζωής βιοδιεργασιών, με στόχο την εμβάθυνση στις αποδόσεις των υποψήφιων χημικών μονοπατιών των αλυσίδων προϊόντων και την αξιολόγηση χαρτοφυλακίων προϊόντων και διεργασιών εξετάζοντας πολλαπλά κριτήρια. Οι Garcia et al., (2016) παρουσίασαν μία ανασκόπηση των συστημάτων μηχανικής διεργασιών και της εφαρμογής τους σε παραδείγματα Κυκλικής Οικονομίας για τη βιώσιμη αξιοποίηση πόρων νερού, τροφίμων και ενέργειας (water-food-energy nexus).

Στη βιβλιογραφία εντοπίζεται πλήθος μελετών και μεθοδολογιών αναφορικά με την αντιμετώπιση των προκλήσεων σχεδιασμού βιοδιυλιστηρίων βασισμένες σε μεθόδους προσομοίωσης (Ashraf and Schmidt, 2018; Han et al., 2015b), ενεργειακής ολοκλήρωσης (Celebi et al., 2017 ; Pyrgakis et al., 2015; Pyrgakis and Kokossis, 2016a; 2016b), τεχνικο-οικονομικής ανάλυσης (Demichelis et al., 2018; Gunukula et al., 2018; Pyrgakis et al., 2016), μαθηματικού προγραμματισμού και βελτιστοποίησης υπερδομών (Avraamidou and Pistikopoulos, 2017; Ng et al., 2015; Tsakalova et al., 2015; Zhang et al., 2018). Άλλες μελέτες επικεντρώνονται στη μελέτη των αλυσίδων εφοδιασμού βιομάζας (Nguyen and Chen, 2018; Yue et al., 2014; Holmgren et al., 2015; Mansoornejad et al., 2011; Sammons et al., 2008) συνδυάζοντας τεχνολογίες βελτιστοποίησης υπερδομών και μαθηματικού προγραμματισμού (Bowling et al., 2011; Dansereau et al., 2014) ή ακόμα και τεχνολογίες GIS (Geographic Information Systems) (Ng et al., 2018). Σε κάθε περίπτωση, η εφαρμογή τεχνολογιών ολοκλήρωσης διεργασιών (process integration) αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τον εντοπισμό και τη διασφάλιση των μέγιστων αποδόσεων χρήσης πρώτων υλών και ενέργειας.

Η **ολοκλήρωση διεργασιών** περιλαμβάνει μία πολυδύναμη εργαλειοθήκη μεθόδων ανάλυσης, (επανα)σχεδιασμού και βελτιστοποίησης διεργασιών **για τον υπολογισμό των μέγιστων εφικτών στόχων ανταλλαγής υλών και ενέργειας μεταξύ τους**. Αφορά τεχνολογίες εξοικονόμησης νερού και ενέργειας, μεγιστοποίησης της συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τον επανασχεδιασμό ενεργοβόρων διαχωρισμών (όπως της απόσταξης) και συνδυαστικές τεχνικές ολοκλήρωσης και βελτιστοποίησης διεργασιών. Ο συνδυασμός τεχνολογιών **σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών** μπορεί να αναδείξει συνδυασμούς συμπληρωματικών διεργασιών, οι οποίες παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά ανταλλαγής και εξοικονόμησης πρώτων υλών και ενέργειας και εκ πρώτης όψης (και εν τη απουσία ολοκλήρωσης) δεν φαίνονται βιώσιμες.

Παραδείγματα εφαρμογής τεχνολογιών ολοκλήρωσης αναφέρουν δραστικές μειώσεις στο κόστος επένδυσης και λειτουργίας έως και 90% και 15%, αντίστοιχα (EuropaBio, 2011; Gunukula et al., 2018). Άλλες μελέτες παρουσιάζουν στόχους ενεργειακής εξοικονόμησης έως 84% (Stefanakakis et al., 2014) και εξοικονόμησης σε νερό διεργασίας κατά 58% (Nikolakopoulos and Kokossis, 2017). Τεχνολογίες

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

ολοκλήρωσης διεργασιών, σε συνδυασμό με τη χρήση προσομοιώσεων και τεχνο-οικονομικής ανάλυσης έχουν εφαρμοστεί σε πολλές εφαρμογές βιοτεχνολογίας, όπως για την παραγωγή βιοαλκοολών (Pyrgakis et al., 2016) και άλλων εμπορικών και εξειδικευμένων χημικών από λιγνοκυτταρινούχο βιομάζα (Tsakalova et al., 2015), φαρμακευτικών προϊόντων από μικρο-φύκη (Psycha and Kokossis, 2016; 2017), ή και για την ολοκλήρωση βιοδιυλιστηρίων 1^{ης} και 2^{ης} γενιάς (Mountraki et al., 2016). Μεγάλα και σύνθετα μη-γραμμικά προβλήματα σχεδιασμού (MINLPs) έχουν χρησιμοποιηθεί για τον, κατά περίπτωση, σχεδιασμό συγκεκριμένων εφαρμογών παραγωγής βιοκαυσίμων (Baliban et al., 2013, Mahmoud και Shuhaimi, 2013) και προϊόντων υψηλής αξίας (Prieto et al., 2017), ενώ μεθοδολογίες πολλαπλών σταδίων έχουν παρουσιαστεί από τους Bertran et al. (2017) και Kokossis et al. (2015) παρουσιάζοντας πιο ολιστικές προσεγγίσεις αντιμετώπισης του προβλήματος σχεδιασμού βιοδιυλιστηρίων εφαρμόζοντας πολλαπλά κριτήρια αξιολόγησης (οικονομικά, ενεργειακά, περιβαλλοντικά). Μόνο η εφαρμογή ενεργειακής ολοκλήρωσης σε ένα διυλιστήριο βιοαιθανόλης αρκούσε για την επίτευξη σημαντικών στόχων εξοικονόμησης ενεργειακού κόστους κατά 50% (Oliveira et al., 2016). Ομοίως, οι Pyrgakis and Kokossis (2016a, 2016b, 2019) αναφέρουν μειώσεις 24%-87% στην ενεργειακή κατανάλωση κατά την αξιολόγηση και ενεργειακή ολοκλήρωση εναλλακτικών σεναρίων χημικών μονοπατιών με στόχο την ένταξή τους σε ένα πραγματικό λιγνοκυτταρινούχο βιοδιυλιστήριο (BIOCORE, 2014). Μάλιστα, υπογραμμίζουν την αναγκαιότητα εφαρμογής τεχνικών ενεργειακής ολοκλήρωσης, δεδομένου ότι στην συντριπτική πλειοψηφία των πραγματικών σεναρίων που μελετήθηκαν, το ενεργειακό κόστος εμφανίζεται εξίσου σημαντικό όσο τα περιθώρια κερδοφορίας του βιοδιυλιστηρίου.

Όταν το πρόβλημα σχεδιασμού αφορά την επέκταση υφιστάμενων διυλιστηρίων ή την ανάπτυξη εξολοκλήρου νέων βιοδιυλιστηρίων, των οποίων τα προϊόντα και οι διεργασίες δεν αποτελούν δεδομένα αλλά ζητούμενα του προβλήματος, ο μηχανικός καλείται να ερευνήσει τις αποδόσεις κάθε πιθανού χαρτοφυλακίου διεργασιών που εντοπίζεται μέσω των αλυσίδων προϊόντων (Kokossis et al., 2015). Η εφαρμογή τεχνικών ολοκλήρωσης για κάθε υποψήφιο βιοδιυλιστήριο πολλαπλών-προϊόντων βελτιώνουν τις αποδόσεις των διεργασιών και εντοπίζουν οφέλη από την συνδυαστική τους εφαρμογή καταλήγοντας σε μη προφανείς και ελπιδοφόρες λύσεις σχεδιασμού. Το μέγεθος και η πολυπλοκότητα του προβλήματος μεγαλώνει σημαντικά, καθώς εντοπίζονται άπειροι συνδυασμοί βιοδιεργασιών, όταν πρώτες ύλες (βιομάζα) και χημικά ενδιάμεσα των αλυσίδων μπορούν να διαμοιράζονται με κάθε τρόπο προς κατάντη ανταγωνιστικές διεργασίες (αξιοποιούν κοινές τροφοδοσίες), όπως π.χ. τα μονοπάτια παραγωγής των Χημικών 7 και 8 από το Χημικό 1 του Σχήματος 1.2. **Το γεγονός αυτό καθιστά**

απαραίτητη τη συστημική ανάλυση και αξιολόγηση άπειρων σεναρίων βιοδιυλιστηρίων συνδυάζοντας τεχνικές σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών με τον μαθηματικό προγραμματισμό.

Στην πλειοψηφία των προβλημάτων σύνθεσης διεργασιών, οι αλυσίδες προϊόντων επαναδιατυπώνονται (συνήθως εύκολα) – άλλοτε κατά περίπτωση και άλλοτε με γενικευμένο τρόπο με τη χρήση γράφων – σε υπερδομές, οι οποίες υποστηρίζουν επιλογές (ροές χημικών και αποδόσεις διεργασιών) για τη διαμόρφωση και τη βελτιστοποίηση ισοζυγίων μάζας κατά μήκος των αλυσίδων. Συνήθως, τα κριτήρια αξιολόγησης και βελτιστοποίησης είναι οικονομικά ή/και περιβαλλοντικά, λαμβάνοντας υπόψη κόστη επένδυσης και λειτουργίας και κέρδη από την πώληση προϊόντων, είτε δείκτες περιβαλλοντικών αποτυπωμάτων (συνήθως CO₂). Ωστόσο, η απευθείας αξιολόγηση τέτοιων κριτηρίων δεν αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα, όταν στο πρόβλημα δεν εμπλέκονται δυνατότητες ολοκλήρωσης διεργασιών, οι οποίες βελτιώνουν τις αποδόσεις αξιοποίησης πρώτων υλών και ενέργειας αποδίδοντας καλύτερους στόχους και περιθώρια κερδοφορίας. Παραδείγματος χάριν, η εφαρμογή ενεργειακής ολοκλήρωσης σε κάθε υποψήφιο σενάριο βιοδιυλιστηρίου που εντοπίζεται στις αλυσίδες προϊόντων θα επιφέρει (συνήθως) σημαντικές μειώσεις στο κόστος ενέργειας ενισχύοντας άμεσα τόσο τους περιβαλλοντικούς δείκτες (χρήση καυσίμων, νερού ψύξης και εκπομπές CO₂), όσο και την κερδοφορία μέσω της μείωσης του κόστους λειτουργίας. Έτσι, τα οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή ενεργειακής ολοκλήρωσης (κατά τη σύνθεση διεργασιών) αναμένεται να αλλάξουν τις τελικές αποφάσεις διεργασιών και προϊόντων του βιοδιυλιστηρίου, σε σχέση με τις αποφάσεις που λαμβάνονται εν τη απουσία ολοκλήρωσης.

Η εφαρμογή της ενεργειακής ολοκλήρωσης είναι απαιτητική και διεξάγεται σε πολλαπλά στάδια, πολλά από τα οποία εφαρμόζονται με τη χρήση γραφικών εργαλείων, ενώ πολλές φορές επηρεάζεται από την κρίση του μηχανικού. Η μεγαλύτερη πρόκληση αφορά τη συστηματοποίηση των διαφορετικών σταδίων ολοκλήρωσης και τη μαθηματική τους διατύπωση, με απώτερο στόχο την αυτοματοποίηση της διαδικασίας ολοκλήρωσης ταυτόχρονα με την διαδικασία σύνθεσης διεργασιών. Αν και η διαδικασία εφαρμογής των σταδίων ολοκλήρωσης είναι καλά και πλήρως ορισμένη στην βιβλιογραφία (Kemp, 2007) για την βελτίωση των αποδόσεων μίας δεδομένης βιομηχανικής εγκατάστασης, η εφαρμογή τους δεν είναι προφανής, και συχνά αναποτελεσματική, όταν η βιομηχανική εγκατάσταση αποτελεί βαθμό ελευθερίας του προβλήματος, όπως στην περίπτωση των βιοδιυλιστηρίων (αλυσίδες υποψήφιων χημικών μονοπατιών).

Καθώς χαρτοφυλάκια διεργασιών επιλέγονται για αξιολόγηση μέσω της ανάλυσης υπερδομών (αλυσίδων προϊόντων), οι τεχνικές ενεργειακής ολοκλήρωσης μεγιστοποιούν τις αποδόσεις

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

επεξεργασίας κάθε υποψήφιου χαρτοφυλακίου, μειώνοντας το κόστος λειτουργίας, επένδυσης και περιβαλλοντικών αποτυπωμάτων προσφέροντας καλύτερες λύσεις. Για αυτό το σκοπό, η μαθηματική και γενικευμένη διατύπωση των προβλημάτων ολοκλήρωσης είναι απαραίτητη για την ταυτόχρονη αντιμετώπιση του συνδυαστικού προβλήματος σύνθεσης, ολοκλήρωσης και βελτιστοποίησης υποψήφιων διεργασιών.

Τα επόμενα κεφάλαια αφιερώνονται σε μία εκτενή παρουσίαση κλασικών και νέων μεθόδων ολοκλήρωσης με στόχο να προετοιμάσουν το θεωρητικό υπόβαθρο για την μεταφορά των συμβατικών γραφικών εργαλείων ολοκλήρωσης σε μαθηματική μορφή. Η μαθηματική διατύπωση των προβλημάτων ενεργειακής ολοκλήρωσης με συντομευμένο και γενικευμένο τρόπο αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή των νέων μεθοδολογιών ολοκλήρωσης σε μεγάλο εύρος κλασικών και σύγχρονων προβλημάτων σχεδιασμού. Οι μεθοδολογίες και τα μοντέλα που παρουσιάζονται αντιμετωπίζουν ένα ευρύ φάσμα βαθμών ελευθερίας με στόχο τον σχεδιασμό (από την αρχή) ή τον επανασχεδιασμό (υφιστάμενων) διεργασιών και την βελτιστοποίηση διαγραμμάτων ροής, φυσικών διαχωρισμών (αποστάξεις) και της συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Βιβλιογραφία

1. Ashraf, M.T., Schmidt, J.E., 2018. Process simulation and economic assessment of hydrothermal pretreatment and enzymatic hydrolysis of multi-feedstock lignocellulose – Separate vs combined processing. *Bioresource Technology* 249m 835–843
2. Avraamidou, S., Pistikopoulos, E.N., 2017. A Multiparametric Mixed-integer Bi-level Optimization Strategy for Supply Chain Planning Under Demand Uncertainty. *IFAC PapersOnLine* 50-1, 10178–10183
3. Baliban, R.C., Elia, J.A., Floudas, C.A., 2013. Biomass to liquid transportation fuels (BTL) systems: process synthesis and global optimization framework. *Energy Environ. Sci.* 6, 267-287
4. Bertran, M.O., Frauzem, R., Sanchez-Arcilla, A.S., Zhang, L., Woodley, J.M., Gani, R., 2017. A generic methodology for processing route synthesis and design based on superstructure optimization. *Computers and Chemical Engineering* 106, 892–910
5. BIOCORE, a biorefinery concept, 2014. www.biocore-europe.org (accessed 17 January 2020).
6. Bowling, I.M., Ponce-Ortega, J.M., El-Halwagi, M.M., 2011. Facility Location and Supply Chain Optimization for a Biorefinery. *Ind. Eng. Chem. Res.* 50, 6276–6286
7. Cecelja, F., Raafat, T., Trokanas, N., Innes, S., Smith, M., Yang, A., Zorgios, Y., Korkofygas, A., Kokossis, A., 2015. E-Symbiosis: Technology-enabled support for Industrial Symbiosis targeting Small and Medium Enterprises and innovation. *Journal of Cleaner Production*, 98, 336-352
8. Celebi, A.D., Ensinas, A.V., Sharma, S., Marechal, F., 2017. Early-stage decision making approach for the selection of optimally integrated biorefinery processes. *Energy* 137, 908-916

9. Chandel, A.K., Garlapati, V.K., Singh, A.K., Antunes, F.A.F., da Silva, S.S., 2018. The path forward for lignocellulose biorefineries: Bottlenecks, solutions, and perspective on commercialization. *Bioresource Technology* 264, 370–381
10. Dansereau, L.P., El-Halwagi, M., Mansoornejad, B., Stuart, P., 2014. Framework for margins-based planning: Forest biorefinery case study. *Computers and Chemical Engineering* 63, 34–50
11. Demichelis, F., Fiore, S., Pleissner, D., Venus, J., 2018. Technical and economic assessment of food waste valorization through a biorefinery chain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94, 38–48
12. Energy Information Administration (EIA), 2016. International Energy Outlook 2016, Available from: [https://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](https://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf) (accessed 21 August 2018)
13. EuroBioRef, European Multilevel Integrated Biorefinery Design for Sustainable Biomass Processing, 2014. <http://www.eurobioref.org/> (accessed 21 August 2018)
14. EuropaBio, 2011, Dalberg, Biorefinery Feasibility study, Amsterdam, 2011
15. Garcia, D.J., You, F., 2016. The water-energy-food nexus and process systems engineering: A new focus. *Computers and Chemical Engineering* 91, 49–67
16. Gunukula, S., Klein, S.J.W., Pendse, H.P., DeSisto, W.J., Wheeler, M.C., 2018. Techno-economic analysis of thermal deoxygenation based biorefineries for the coproduction of fuels and chemicals. *Applied Energy* 214, 16–23
17. Gupta, A., Verma, J.P., 2015. Sustainable bio-ethanol production from agro-residues: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, 550–567
18. Han, J., Luterbacher, J.S., Alonso, D.M., Dumesic, J.A., Maravelias, C.T., 2015a. A lignocellulosic ethanol strategy via nonenzymatic sugar production: Process synthesis and analysis. *Bioresource Technology* 182, 258–266
19. Han, J., Sen, S.M., Luterbacher, J.S., Alonso, D.M., Dumesic, J.A., Maravelias, C.T., 2015b. Process systems engineering studies for the synthesis of catalytic biomass-to-fuels strategies. *Computers and Chemical Engineering* 81, 57–69
20. Holmgren, K.M., Berntsson, T.S., Andersson, E., Rydberg, T., 2015. The influence of biomass supply chains and by-products on the greenhouse gas emissions from gasification-based bio-SNG production systems. *Energy* 90, 148–162
21. Hrnčić, M.K., Kravanja, G., Knez, Z., 2016. Hydrothermal treatment of biomass for energy and chemicals. *Energy* 116, 1312–1322
22. Hughes, S.R., Gibbons, W.R., Moser, B.R., Rich, J.O., 2013. Sustainable Multipurpose Biorefineries for Third-Generation Biofuels and Value-Added Co-Products. <http://dx.doi.org/10.5772/54804>
23. IEA Bioenergy, Task 38, 2018, Climate Change Effects of Biomass and Bioenergy Systems
24. Jin, Q., Yang, L., Poe, N., Huang, H., 2018. Integrated processing of plant-derived waste to produce value-added products based on the biorefinery concept. *Trends in Food Science & Technology* 74, 119–131
25. Khoo, H.H., 2015. Review of bio-conversion pathways of lignocellulose-to-ethanol: Sustainability assessment based on land footprint projections. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 46, 100–119
26. Kokossis, A.C., Yang A., 2010. On the use of systems technologies and a systematic approach for the synthesis and the design of future biorefineries. *Computers & Chemical Engineering* 34, 9, 1397–1405
27. Kokossis, A.C., Tsakalova, M., Pyrgakis, K., 2015. Design of integrated biorefineries. *Computers & Chemical Engineering* 81, 40–56
28. Lauen, L.P., 2014. An optimization approach to biorefinery setup planning. *Biomass and Bioenergy* 70, 440–451

29. Mahmoud, A., Shuhaimi, M., 2013. Systematic methodology for optimal enterprise network design between bio-refinery and petroleum refinery for the production of transportation fuels. *Energy* 59, 224-232
30. Mansoornejad, B., Pistikopoulos, E.N., Stuart, P., 2011. Incorporating Flexibility Design Into Supply Chain Design For Forest Biorefinery. *Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes* 1, 2, 54-66
31. Moncada, J., Cardona, C.A., Higueta, J.C., Vélez, J.J., López-Suarez, F.E., 2016. Wood residue (Pinus patula bark) as an alternative feedstock for producing ethanol and furfural in Colombia: experimental, techno-economic and environmental assessments. *Chemical Engineering Science* 140, 309–318
32. Mountraki, A.D., Bouchra, B.M., Kokossis, A.C., 2016. A Study on the Endogenous Symbiosis of First and Second Generation Biorefineries: Towards a Systematic Methodology. *Computer Aided Chemical Engineering*, 38, 2181–2186
33. Ng, L.Y., Andiappan, V., Chemmangattuvalappil, N.G., Ng, D.K.S., 2015. A systematic methodology for optimal mixture design in an integrated biorefinery. *Computers and Chemical Engineering* 81, 288–309
34. Ng, R.T.L., Maravelias, C.T., 2017. Economic and energetic analysis of biofuel supply chains. *Applied Energy* 205, 1571–1582
35. Ng, R.T.L., Kurniawan, D., Wang, H., Mariska, B., Wu, W., Maravelias, C.T., 2018. Integrated framework for designing spatially explicit biofuel supply chains. *Applied Energy* 216, 116–131
36. Nguyen, D.H., Chen, H., 2018. Supplier selection and operation planning in biomass supply chains with supply uncertainty. *Computers and Chemical Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.07.012>, in press
37. Nikolakopoulos, A., Kokossis, A., 2017. A Problem Decomposition Approach for Developing Total Water Networks in Lignocellulosic Biorefineries. *Process Safety and Environmental Protection* 109, 732-752
38. Nizami, A.S., Shahzad, K., Rehan, M., Ouda, O.K.M., Khan, M.Z., Ismail, I.M.I., Almeelbi, T., Basahi, J.M., Demirbas, A., 2017. Developing waste biorefinery in Makkah: A way forward to convert urban waste into renewable energy. *Applied Energy* 186, 189–196
39. Oliveira, C.M., Cruz, A.J.G., Costa, C.B.B., 2016. Improving second generation bioethanol production in sugarcane biorefineries through energy integration. *Applied Thermal Engineering* 109, 819-827
40. Prieto, C.V.G., Ramos, F.D., Estrada, V., Villar, M.A., Diaz, M.S., 2017. Optimization of an integrated algae-based biorefinery for the production of biodiesel, astaxanthin and PHB. *Energy* 139, 1159-1172
41. Psycha, M., Kokossis, A.C., 2016. Synthesis and Optimization of Microalgae Biorefineries. *Computer Aided Chemical Engineering* 38, 325–330
42. Psycha, M., Kokossis, A., 2017. Techno-economic Evaluation of an Integrated Microalga Biorefinery Targeting the Co-production of Specialty Chemicals. *Computer Aided Chemical Engineering*, 40, 1981-1986
43. Psycha, M., Kapnisi, M., Kokossis, A.C., 2018. Extended Value Chain Synthesis towards the Design of Multi-Feedstock Algae Biorefineries. *Computer Aided Chemical Engineering*, 43, 645-650
44. Pyrgakis, K.A., Kipouros, P.I., Kokossis, A.C., 2015. A MILP Transshipment Model to Integrate and Re-Engineer Distillation Columns into Overall Processes. *Computer Aided Chemical Engineering* 37, 2015–2020
45. Pyrgakis, K.A., de Vrije, T., Budde, M.A.W., Kyriakou, K., López-Contreras, A.M., Kokossis, A.C., 2016. A process integration approach for the production of biological iso-propanol, butanol and

- ethanol using gas stripping and adsorption as recovery methods. *Biochemical Engineering Journal* 116, 176-194
46. Pyrgakis, K.A., Kokossis, A.C., 2016a. Total site analysis as a synthesis model to select, optimize and integrate processes in multiple-product plants. *Chemical Engineering transactions*, 52, 913-918
 47. Pyrgakis, K.A., Kokossis, A.C., 2016b. A New Methodology to Apply Total Site Analysis as a Synthesis Tool to Select and Integrate Processes in Multiple-Product Biorefinery Plants. *Computer Aided Chemical Engineering* 38, 2073-2078
 48. Pyrgakis, A.K., Kokossis, C.A., 2019. A Total Site Synthesis approach for the selection, integration and planning of multiple-feedstock biorefineries. *Computers and Chemical Engineering*, 122, 326–355
 49. Raafat, T., Trokanas, N., Cecelja, F., Kokossis A., Yang, A., 2012. Semantically-enabled Formalisation to Support and Automate the Application of Industrial Symbiosis. *Computer Aided Chemical Engineering* 31, 1055-1059
 50. Raman, J.K., Alves, C.M., Gnansounou, E., 2018. A review on moringa tree and vetiver grass – Potential biorefinery feedstocks. *Bioresource Technology* 249, 1044–1051
 51. RENESENG-Renewable Systems Engineering; 2013. www.reneseng.com
 52. Sammons, N.E. Jr., Yuan, W. , Eden, M.R., Aksoy, B., Cullinan, H.T., 2008. Optimal biorefinery product allocation by combining process and economic modeling. *Chemical Engineering Research and Design* 86, 7, 800–808
 53. Sims, R., Taylor, M., 2008. From 1st-to 2nd-generation biofuel technologies: An overview of current industry and RD&D activities. *OECD/IEA Bioenergy*.
 54. Sims, R.E.H., Mabee, W., Saddler, J.N., Taylor, M., 2010. An overview of second generation biofuel technologies. *Bioresource Technology* 101, 1570–1580
 55. Stefanakis, M.E., Pyrgakis, K.A., Kokossis, A., 2014. Screening and assessing product portfolios in biorefineries combining Total Site Analysis and process synthesis. *Computer Aided Chemical Engineering* 34, Pages 621–626
 56. SUPRABIO, developing the integrated biorefinery, 2014, <http://www.suprabio.eu/> (2016)
 57. Tsakalova, M., Lin, T.C., Yang, A., Kokossis, A.C. , 2015. A decision support environment for the high-throughput model-based screening and integration of biomass processing paths. *Industrial Crops and Products* 75, Part B, 103–113
 58. Trokanas, N., Raafat, T., Cecelja, F., Kokossis, A., 2013. OFIS - Ontological Framework for Industrial Symbiosis. *Computer Aided Chemical Engineering*, 32, 523-528
 59. Yue, D., You, F., Snyder, S.W., 2014. Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges. *Computers & Chemical Engineering*, 66, 36–56
 60. Zhang, Q., Martín, M., Grossmann, I.E., 2018. Integrated design and operation of renewables-based fuels and power production networks. *Computers and Chemical Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.06.018>, in press

Κεφάλαιο 2.

Μέθοδοι ενεργειακής ολοκλήρωσης διεργασιών

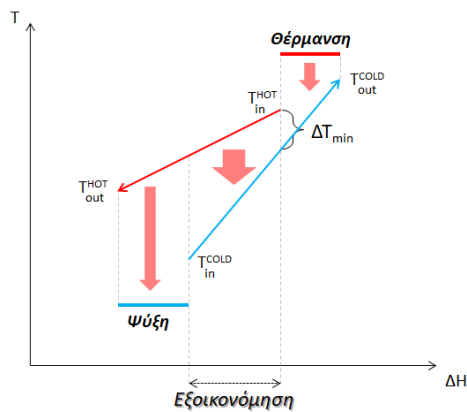
Η ενεργειακή ολοκλήρωση εφαρμόζεται ως μία διαδικασία πολλαπλών βημάτων ανάλυσης και σχεδιασμού. Οι βασικές αρχές και η μεθοδολογία ολοκλήρωσης διαμορφώθηκαν από τον Bodo Linnhoff και παρουσιάστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του '80, από τους Linnhoff and Flower (1978), Linnhoff et al. (1979) και στη διατριβή του Linnhoff (1979).

Η βασική μεθοδολογία ενεργειακής ολοκλήρωσης είναι γνωστή με την ονομασία Μεθοδολογία Ανάσχεσης Κόμβου, αγγλιστί Pinch Analysis (δεύτερη έκδοση του εγχειριδίου ενεργειακής ολοκλήρωσης από τον Kemp, 2007), και κύριο στόχο έχει την εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της άμεσης ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ πηγών-καταβοθρών θερμότητας. Ως πηγή καλείται κάθε θερμό ρεύμα διεργασίας, το οποίο παρουσιάζει ανάγκες ψύξης, ενώ ως καταβόθρα κάθε ψυχρό ρεύμα που απαιτεί θερμότητα. Ως εκ τούτου, κάθε θερμό και ψυχρό ρεύμα της διεργασίας χαρακτηρίζεται από τις θερμοκρασίες εισόδου-εξόδου και το θερμικό φορτίο που απαιτεί για ψύξη και θέρμανση, αντίστοιχα. Η θερμοδυναμική εφικτότητα μεταφοράς θερμότητας μεταξύ θερμών και ψυχρών ρευμάτων καθορίζεται από τα θερμοκρασιακά εύρη τους, και μπορεί να ελεγχθεί γραφικά στο διάγραμμα θερμοκρασίας-ενθαλπίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.

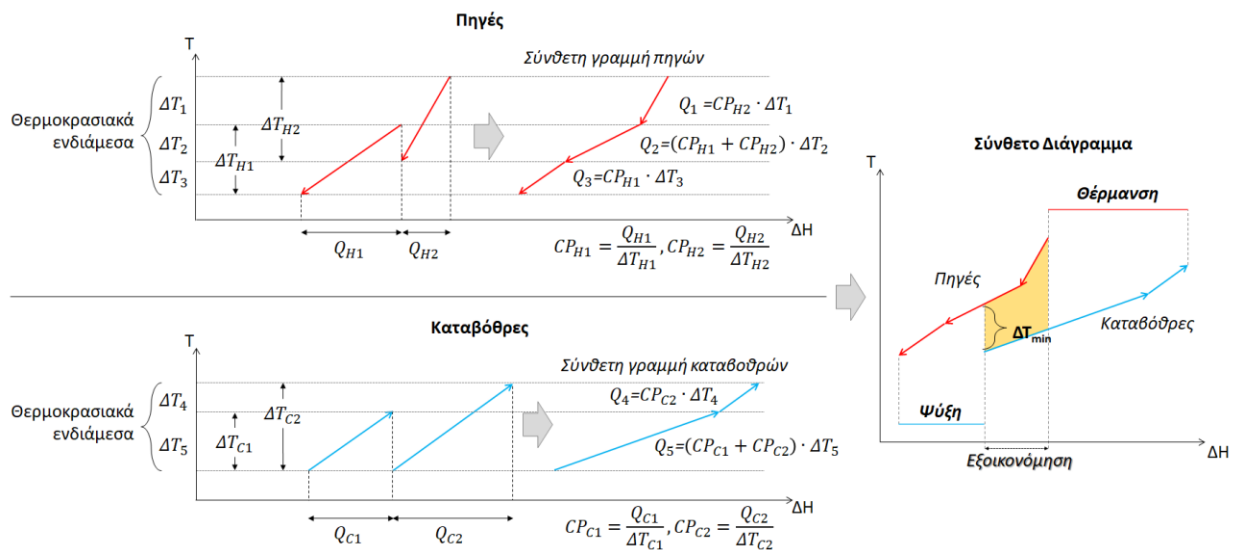
Το διάγραμμα (Σχήμα 2.1) παρουσιάζει τις αρχικές και τελικές θερμοκρασίες ενός θερμού και ενός ψυχρού ρεύματος καθώς και το ενεργειακό φορτίο που απαιτείται για τη μεταβολή της θερμικής τους κατάστασης. Τα ρεύματα μπορούν να μετατοπιστούν παράλληλα με τον οριζόντιο άξονα – χωρίς να επηρεάζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά τους – μέχρις ότου διασφαλιστεί η επιθυμητή ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά (ΔT_{\min}) μεταξύ τους, η οποία ορίζεται από τον χρήστη. Η παράμετρος ΔT_{\min} αφορά τη λειτουργία ενός εναλλάκτη ολοκλήρωσης των δύο ρευμάτων, όπου το θερμό ρεύμα χρησιμοποιείται ως μέσο θέρμανσης για το ψυχρό. Ακολούθως, στο διάγραμμα T-ΔH εντοπίζεται το

Κεφάλαιο 2. Μέθοδοι ενεργειακής ολοκλήρωσης διεργασιών

μέγιστο φορτίο θερμότητας που μπορεί να μεταφερθεί από το θερμό ρεύμα στο ψυχρό και αντικατοπτρίζει τον βέλτιστο στόχο εξοικονόμησης ενέργειας. Οι υπόλοιπες ενεργειακές ανάγκες των ρευμάτων καλύπτονται από τις βοηθητικές παροχές θέρμανσης και ψύξης (Σχήμα 2.1), οι οποίες αντικατοπτρίζουν το ενεργειακό κόστος της διεργασίας, ύστερα από την εφαρμογή ολοκλήρωσης. Εν τη απουσία ολοκλήρωσης, το ενεργειακό κόστος των βοηθητικών παροχών είναι φαινομενικά μεγαλύτερο και αφορά τις συνολικές ανάγκες θέρμανσης και ψύξης και των δύο ρευμάτων. Όταν το πρόβλημα αφορά περισσότερα του ενός θερμού/ψυχρού ρεύματος, το Διάγραμμα του Σχήματος 2.1 παίρνει τη μορφή του Σύνθετου Γραφήματος (Composite Curve) του Σχήματος 2.2.



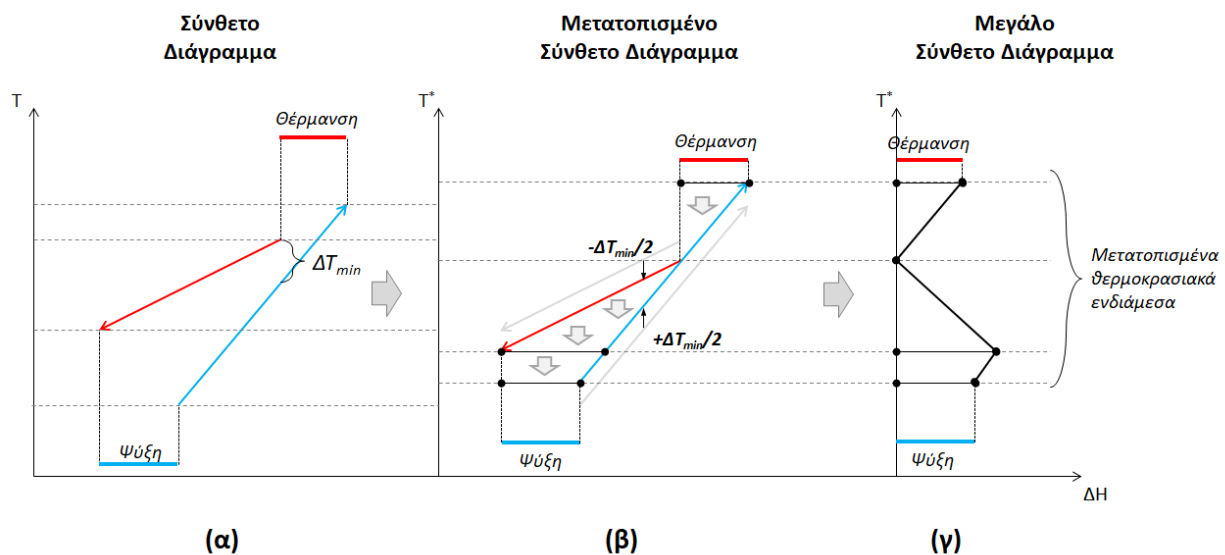
Σχήμα 2.1: Διάγραμμα T-ΔH για την ολοκλήρωση θερμών-ψυχρών ρευμάτων



Σχήμα 2.2: Κατασκευή Σύνθετου Διαγράμματος διεργασίας πολλών ρευμάτων

Κεφάλαιο 2. Μέθοδοι ενεργειακής ολοκλήρωσης διεργασιών

Στόχος του Σύνθετου Διαγράμματος είναι η ενοποίηση πολλαπλών θερμών και ψυχρών ρευμάτων για το υπολογισμό της μέγιστης εφικτής ενεργειακής επικάλυψης μεταξύ του συνόλου των ενεργειακών πηγών και καταβοθρών, όπως εφαρμόστηκε στο παράδειγμα του Σχήματος 2.1. Στα αριστερά του Σχήματος 2.2, εντοπίζονται όλα τα θερμοκρασιακά ενδιάμεσα ($\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3, \Delta T_4, \Delta T_5$) σύμφωνα με τις θερμοκρασίες εισόδου-εξόδου των ρευμάτων. Ακολούθως, υπολογίζεται το θερμικό φορτίο (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5) που φέρει κάθε ενδιάμεσο και αφορά την ενεργειακή συνεισφορά όλων των ρευμάτων που φιλοξενεί. Το θερμικό φορτίο υπολογίζεται βάσει της ροής θερμοχωρητικότητας ($CP = \frac{Q}{\Delta T}$) κάθε συνεισφερόμενου ρεύματος (στο ενδιάμεσο) και της θερμοκρασιακής διαφοράς του ενδιαμέσου. Τα μεμονωμένα ρεύματα ενοποιούνται σε κάθε ενδιάμεσο που συνεισφέρουν σχηματίζοντας τις σύνθετες γραμμές πηγών και καταβοθρών, των οποίων η έκταση (σε κάθε ενδιάμεσο) είναι ίση με το θερμικό φορτίο που υπολογίστηκε προηγουμένως. Οι σύνθετες γραμμές αποτελούν το Σύνθετο Διάγραμμα της διεργασίας (δεξιά του Σχήματος 2.2). Ύστερα από οριζόντια μετατόπιση των σύνθετων γραμμών – για την διασφάλιση της επιθυμητής ΔT_{min} – υπολογίζεται η μέγιστη ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ πηγών-καταβοθρών και οι ανάγκες των βοηθητικών παροχών θέρμανσης και ψύξης. Η παραπάνω διαδικασία εντοπισμού της μέγιστης εξοικονόμησης ενέργειας και των ελάχιστων βοηθητικών παροχών διατυπώνεται μαθηματικά μέσω της καταγραφής ισοζυγίων ενέργειας σε κάθε θερμοκρασιακό ενδιάμεσο της διεργασίας. Για αυτήν την ανάλυση χρησιμοποιείται το απλό παράδειγμα του Σχήματος 2.1, το οποίο επανεξετάζεται στα Σχήματα 2.3 και 2.4.



Σχήμα 2.3: Σύνθετο και Μεγάλο Σύνθετο Διάγραμμα

Κεφάλαιο 2. Μέθοδοι ενεργειακής ολοκλήρωσης διεργασιών

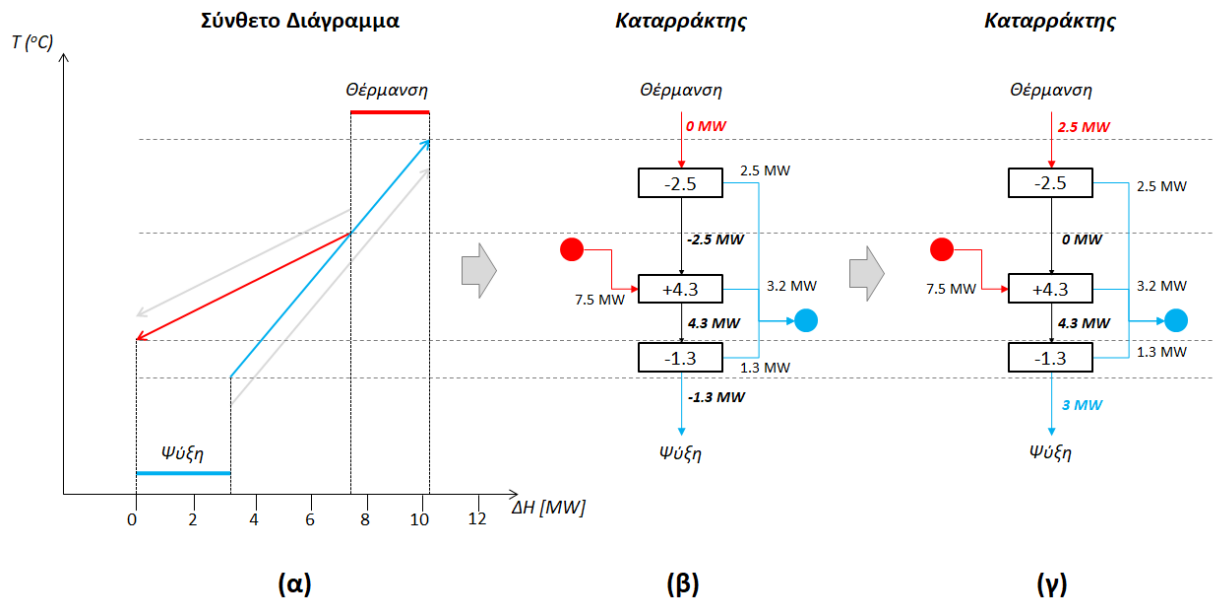
Οι γραμμές του Σύνθετου Διαγράμματος του Σχήματος 2.3α μετατοπίζονται κατακόρυφα κατά $\pm\Delta T_{\min}/2$, διαμορφώνοντας το Μετατοπισμένο (T^*) Σύνθετο Διάγραμμα του Σχήματος 2.3β. Φαινομενικά, τα αρχικά θερμοκρασιακά ενδιάμεσα της διεργασίας επαναπροσδιορίζονται ως θερμοκρασιακά μετατοπισμένα ενδιάμεσα. Λόγω της κατακόρυφης μετατόπισης των θερμών ρευμάτων κατά $-\Delta T_{\min}/2$ και των ψυχρών ρευμάτων κατά $+\Delta T_{\min}/2$ διασφαλίζεται η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ θερμών και ψυχρών ρευμάτων σε κάθε μετατοπισμένο ενδιάμεσο που συνεισφέρουν. Η θερμική συνεισφορά των ρευμάτων σε κάθε μετατοπισμένο ενδιάμεσο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ τους (σε κάθε ενδιάμεσο).

Στο μετατοπισμένο σύνθετο διάγραμμα οι γραμμές θερμών/ψυχρών ρευμάτων εφάπτονται σε ένα μόνο σημείο, τον Κόμβο Ανάσχεσης (Pinch point), το οποίο χωρίζει το διάγραμμα σε δύο μέρη. Πάνω από το pinch υπερिशύει η συνεισφορά των ψυχρών ρευμάτων και τα ισοζύγια ενέργειας ολοκληρώνονται με τη χρήση θερμών παροχών. Κάτω από το pinch υπερिशύει η συνεισφορά των θερμών και τα ισοζύγια ενέργειας ολοκληρώνονται με τη χρήση ψυχρών παροχών. Η θερμοκρασία του pinch αποτελεί το θερμοκρασιακό φράγμα μεταφοράς θερμότητας από τις πηγές προς τις καταβόθρες. Οι θερμές και ψυχρές παροχές που εντοπίζονται πάνω και κάτω από το pinch, αντίστοιχα, αντικατοπτρίζουν τις ελάχιστες εφικτές βοηθητικές παροχές που χρεώνεται η διεργασία. Μεταφορά θερμότητας διαμέσου του pinch θα προκαλέσει την άσκοπη αύξηση των βοηθητικών παροχών.

Οι αποστάσεις (οριζόντιες διαφορές) μεταξύ των μετατοπισμένων σύνθετων γραμμών αντικατοπτρίζουν τις βοηθητικές παροχές που απαιτούνται σε κάθε μετατοπισμένο θερμοκρασιακό ενδιάμεσο. Οι διαφορές αυτές σε κάθε μετατοπισμένη θερμοκρασία (T^*) δίνουν τη μορφή του Μεγάλου Σύνθετου Διαγράμματος (ΜΣΔ) του Σχήματος 2.3γ (αγγλιστί Grand Composite Curve, εφεξής θα καλείται ως GCC), στο οποίο αποτυπώνονται οι ενεργειακές απαιτήσεις (α) των καταβοθρών σε θέρμανση πάνω από το pinch και (β) των πηγών σε ψύξη κάτω από το pinch σε κάθε θερμοκρασία. Η ροή θερμότητας από τις υψηλότερες προς τις χαμηλότερες θερμοκρασίες της διεργασίας, όπως φαίνεται στο Μετατοπισμένο Σύνθετο Διάγραμμα του Σχήματος 2.3, ορίζει έναν ενεργειακό καταρράκτη (Kemp, 2007), και το πρόβλημα εύρεσης των ελάχιστων βοηθητικών παροχών της διεργασίας διαμορφώνεται ως ένα πρόβλημα ενεργειακής αποσυμφόρησης, όπως εξηγείται παρακάτω.

Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η ενεργειακή συνεισφορά (σε MW) των ρευμάτων σε κάθε θερμοκρασιακό ενδιάμεσο του Μετατοπισμένου Σύνθετου Διαγράμματος σχηματίζοντας τον ενεργειακό καταρράκτη (αγγλιστί heat cascade) του Σχήματος 2.4β. Η ενεργειακή συνεισφορά

υπολογίζεται όπως στην περίπτωση του Σχήματος 2.2, δηλαδή μέσω της ροής θερμοχωρητικότητας κάθε ρεύματος και της θερμοκρασιακής διαφοράς του ενδιαμέσου. Ακολούθως, σε κάθε ενδιαμέσο του καταρράκτη υπολογίζεται η λογιστική διαφορά της συνεισφερόμενης θερμότητας πηγών και καταβόθρων, με τις πηγές να συνεισφέρουν θετικά και τις καταβόθρες αρνητικά. Θετικές λογιστικές διαφορές σε κάθε ενδιαμέσο αφορούν την ύπαρξη περίσσειας θερμότητας θερμών ρευμάτων, η οποία δύναται να καταρρεύσει σε χαμηλότερα ενδιαμέσα μέσω των υπολοίπων θερμότητας, τα οποία ενώνουν διαδοχικά ενδιαμέσα του καταρράκτη. Αρνητικές διαφορές αφορούν τις επιπλέον απαιτήσεις των ψυχρών ρευμάτων για παροχή θέρμανσης με στόχο την πλήρωση των ισοζυγίων ενέργειας του ενδιαμέσου. Σημειώνεται ότι όλες οι ενεργειακές ροές (υπόλοιπα) κατά μήκος του καταρράκτη ορίζονται ως μη αρνητικές, δηλαδή η ενέργεια ρέει με φυσικό τρόπο από τις υψηλότερες προς τις χαμηλότερες θερμοκρασίες.



Σχήμα 2.4: Σύνθετο Διάγραμμα δύο ρευμάτων (α), κατασκευή ενεργειακού καταρράκτη (β), αποσυμφόρηση ενεργειακού καταρράκτη (γ)

Θέτοντας την παροχή θερμότητας στην κορυφή του καταρράκτη του Σχήματος 2.4β ίση με μηδέν προκύπτουν αρνητικές τιμές στα υπόλοιπα του πρώτου (-2.5 MW) και τρίτου (-1.3 MW) ενδιαμέσου, οι οποίες υποδεικνύουν τις ανάγκες επιπλέον θέρμανσης για την πλήρωση των ισοζυγίων ενέργειας του καταρράκτη. Έτσι, θέτοντας (στο Σχήμα 2.4γ) ως παροχή θέρμανσης στην κορυφή του καταρράκτη την μεγαλύτερη αρνητική τιμή που παρατηρείται στα υπόλοιπα του Σχήματος 2.4β, όλες οι ροές γίνονται

θετικές, ενώ μηδενίζεται το υπόλοιπο που καταρρέει στη θερμοκρασία του pinch. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει το παραπάνω επιχείρημα, ότι θερμότητα δεν μεταφέρεται μέσω του pinch, ειδικά, μία τέτοια ενέργεια θα απαιτούσε την άσκοπη χρέωση επιπλέον βοηθητικών παροχών. Στο δεύτερο ενδιάμεσο του Σχήματος 2.4γ πραγματοποιείται ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ των δύο ρευμάτων, ενώ όποια περίσσεια θερμότητα συγκεντρώνεται στο τελευταίο ενδιάμεσο απομακρύνεται μέσω ψυχρών παροχών. **Τα ενεργειακά υπόλοιπα κατά μήκος του καταρράκτη και η παροχή θέρμανσης του Σχήματος 2.4γ αντιπροσωπεύουν τα σημεία του GCC του Σχήματος 2.3, τα οποία εκφράζουν τις ενεργειακές απαιτήσεις της διεργασίας σε βοηθητικές παροχές σε κάθε (μετατοπισμένη) θερμοκρασία.**

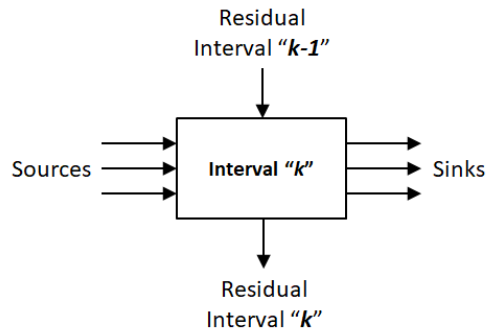
Η αναπαράσταση του ενεργειακού καταρράκτη χρησιμοποιείται για την μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος ενεργειακής αποσυμφόρησης και εύρεσης των ελάχιστων εφικτών παροχών θέρμανσης και ψύξης. Η γενικευμένη αναπαράσταση του καταρράκτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5, η οποία περιλαμβάνει όλες τις ροές γύρω από κάθε ενδιάμεσο. Η θερμική συνεισφορά θερμών/ψυχρών ρευμάτων είναι δεδομένη από τη διεργασία, ενώ βαθμοί ελευθερίας είναι οι παροχές θέρμανσης και τα ενεργειακά υπόλοιπα. Το μοντέλο ενεργειακής αποσυμφόρησης περιλαμβάνει τα ισοζύγια ενέργειας που καταγράφονται σε κάθε ενδιάμεσο και στη γενικευμένη του μορφή ορίζεται ως εξής:

$$Q_{k=1}^{heat} + \sum_{sources} Q_k^{source} + Q_{k-1}^{residual} = \sum_{sinks} Q_k^{sink} + Q_k^{residual} + Q_{k=NK}^{cool} \quad \forall k \in K \quad Eq. 2.1$$

όπου $K = \{k | k = 1, NK\}$ το σύνολο των ενδιάμεσων k από την υψηλότερη στη χαμηλότερη θερμοκρασία, και $Q_{k=1}^{heat}$ και $Q_{k=NK}^{cool}$ οι βοηθητικές παροχές θέρμανσης και ψύξης που τροφοδοτούνται στο υψηλότερο και χαμηλότερο ενδιάμεσο του καταρράκτη, όπως στο Σχήμα 2.4γ. Η διατύπωση της Eq.2.1 ενσωματώνει τις βασικές έννοιες των μοντέλων ενεργειακής μεταφόρτωσης πηγών-καταβοθρών και κατασκευάζεται ως ένα γραμμικό μαθηματικό μοντέλο ελαχιστοποίησης των βοηθητικών παροχών, οι οποίες υπολογίζονται από την αντικειμενική συνάρτηση (Eq.2.2), ως εξής:

$$Min \quad Z = Q_{k=1}^{heat} \cdot c_{heat} + Q_{k=NK}^{cool} \cdot c_{cool} \quad Eq. 2.2$$

όπου c_{heat} και c_{cool} τα μοναδιαία κόστη θέρμανσης και ψύξης. Η παραπάνω ιδέα παρουσιάστηκε από τους Papoulias and Grossmann (1983) και βασίζεται στην γενικευμένη αναπαράσταση κάθε θερμοκρασιακού ενδιάμεσου του Σχήματος 2.5.

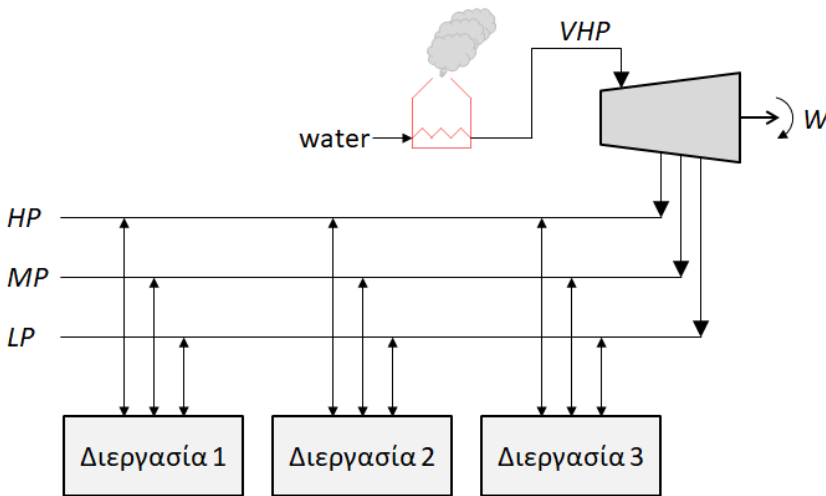


Σχήμα 2.5: Γενικευμένη αναπαράσταση θερμοκρασιακών ενδιαμέσων ενεργειακού καταρράκτη

Η εξοικονόμηση ενέργειας εντός κάθε διεργασίας επιτυγχάνεται ύστερα από την **άμεση ολοκλήρωση (ανταλλαγή θερμότητας) μεταξύ θερμών-ψυχρών ρευμάτων της διεργασίας**. Όταν το πρόβλημα περιλαμβάνει περισσότερες από μία διεργασίες, τότε η ολοκλήρωση θερμών-ψυχρών ρευμάτων, που ανήκουν σε διαφορετικές διεργασίες, πραγματοποιείται με τη χρήση ενδιαμέσων μέσω **θέρμανσης**. Ο ατμός αποτελεί το πιο διαδεδομένο μέσο που χρησιμοποιείται σε μεγάλες και σύνθετες βιομηχανικές μονάδες, οι οποίες υποστηρίζουν συστήματα διαχείρισης επιπέδων ατμού, ενώ άλλοτε το λάδι ή το ζεστό νερό μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ειδικές περιπτώσεις μεταφοράς θερμότητας. Το έμμεσο σχήμα ολοκλήρωσης διεργασιών επιλέγεται (έναντι της άμεσης ανταλλαγής θερμότητας) για την αποφυγή (α) του υψηλού κόστους σωληνώσεων άμεσης σύνδεσης των διεργασιών μεταξύ τους, (β) της πτώσης πίεσης θερμών ρευμάτων (όπως ατμοί) κατά την απομακρυσμένη λειτουργία καθώς και για (γ) λόγους ανεξαρτησίας κάθε διεργασίας, ιδιαίτερα σε περιόδους shut down/start-up.

Διαθέσιμη, ή αλλιώς περίσσεια, θερμότητα πηγών (κάποιων διεργασιών) αξιοποιείται για παραγωγή ατμού, ο οποίος προορίζεται για την κάλυψη αναγκών καταβοθρών σε άλλες διεργασίες της Συνολικής Μονάδας, συνεισφέροντας στην εξοικονόμηση φρέσκου ατμού της βιομηχανικής εγκατάστασης. Με τον όρο «Συνολική Μονάδα» νοείται κάθε σύμπλεγμα διεργασιών (τουλάχιστον δύο), για το οποίο η ολοκλήρωση ρευμάτων, που ανήκουν σε διαφορετικές διεργασίες, πραγματοποιείται με έμμεσο τρόπο (παραγωγή ατμού). Ο όρος «φρέσκος ατμός» αφορά ατμό που παράγεται στο κεντρικό σύστημα βοηθητικών παροχών και χρεώνεται στην Συνολική Μονάδα, σε αντίθεση με τον ατμό που παράγεται από περίσσεια θερμότητα θερμών ρευμάτων της Συνολικής Μονάδας και αντικαθιστά χρεώσεις φρέσκου ατμού.

Όλες οι διεργασίες της Συνολικής Μονάδας επικοινωνούν ενεργειακά μόνο μέσω του κεντρικού συστήματος βοηθητικών παροχών, δηλαδή του κέντρου παραγωγής και διαχείρισης ατμού. Η διαδικασία ολοκλήρωσης διεργασία-προς-διεργασία μέσω ατμού ονομάζεται έμμεση ολοκλήρωση (θερμό-ατμός-ψυχρό) και προτάθηκε από τους Linnhoff et al. (1982) – εκτενείς περιγραφές της μεθοδολογίας παρουσιάζονται από τους Dhole and Linnhoff (1993a) και Kemp (2007) – και επικρατεί με την ονομασία Ανάλυση Συνολικής Μονάδας, ή Total Site Analysis (εφεξής **TSA**). Το Σχήμα 2.6 παρουσιάζει ένα σύστημα πολλαπλών διεργασιών κατάλληλα ολοκληρωμένο μέσω του κεντρικού συστήματος βοηθητικών παροχών.



Σχήμα 2.6: Συνολική Μονάδα πολλαπλών διεργασιών: (i) παραγωγή ατμού πολύ υψηλής πίεσης, (ii) σύστημα τουρμπίνων εκτόνωσης ατμού και (iii) ενδιάμεσα επίπεδα ατμού ολοκλήρωσης Συνολικής Μονάδας

Στο σκαρίφημα του Σχήματος 2.6, νερό θερμαίνεται στον φούρνο για την παραγωγή ατμού πολύ υψηλής πίεσης (VHP), ο οποίος εκτονώνεται (μέσω του συστήματος τουρμπίνων) παράγοντας ενδιάμεσα επίπεδα ατμού – υψηλής (HP), μέσης (MP) και χαμηλής (LP) πίεσης – τα οποία τροφοδοτούν τις εμπλεκόμενες διεργασίες. Πολύπλοκα συστήματα τουρμπίνων μπορούν να αξιοποιούν ατμό όλων των επιπέδων, πέραν του VHP. Παράλληλα, οι διεργασίες συνεισφέρουν με θερμότητα για την παραγωγή ατμού στα διάφορα επίπεδα πίεσης ατμού αναλόγως τα θερμοκρασιακά εύρη λειτουργίας των ρευμάτων των διεργασιών, τροφοδοτώντας τα επίπεδα του κεντρικού συστήματος βοηθητικών παροχών και εξοικονομώντας ανάγκες παραγωγής φρέσκου ατμού. Για ένα γνωστό και δεδομένο σύνολο διεργασιών, το πρόβλημα ολοκλήρωσης Συνολικής Μονάδας αφορά την επιλογή πιέσεων των επιπέδων ατμού και την κατανομή του ατμού στα επιμέρους επίπεδα με στόχο την ελαχιστοποίηση του

Κεφάλαιο 2. Μέθοδοι ενεργειακής ολοκλήρωσης διεργασιών

ενεργειακού κόστους (καύσιμο φούρνου), και την ενίσχυση της συμπαραγωγής έργου από το σύστημα τουρμπίνων. Τα δύο προβλήματα βελτιστοποίησης του ενεργειακού κόστους και της συμπαραγωγής θα μελετηθούν εκτενώς και θα αντιμετωπιστούν, στα επόμενα κεφάλαια, στα πλαίσια ανάπτυξης βιοδιυλιστηρίων.

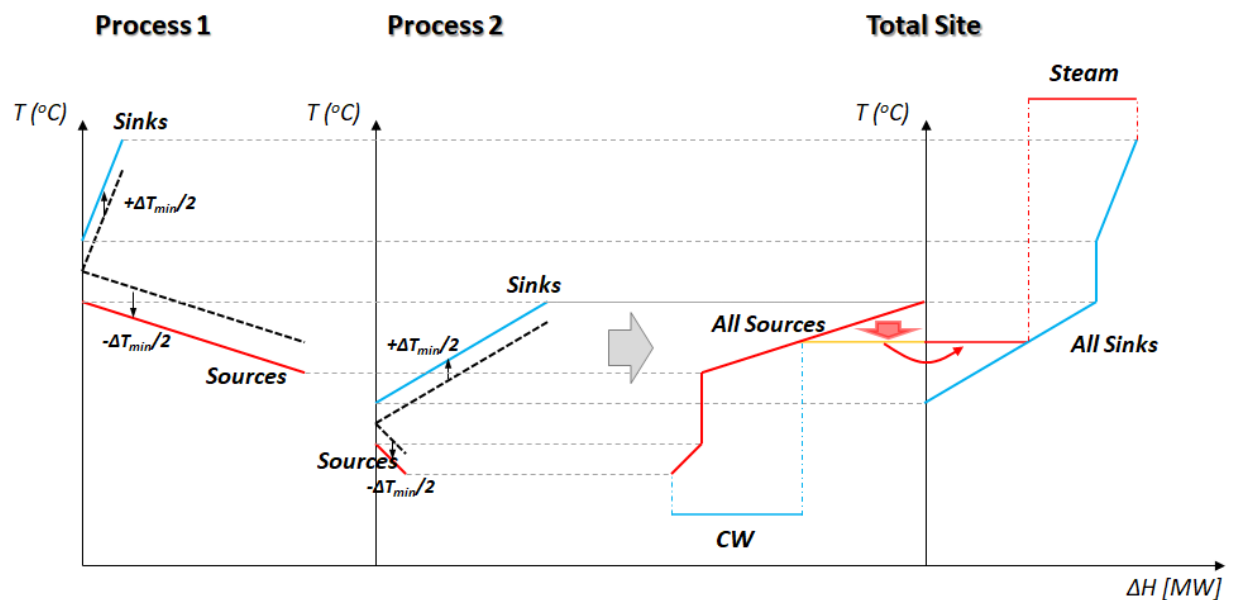
Η εύρεση των βέλτιστων ενεργειακών στόχων μίας Συνολικής Μονάδας πολλαπλών διεργασιών διεξάγεται με τη χρήση γραφικών αναπαραστάσεων, σε αντίθεση με την εφαρμογή άμεσης ολοκλήρωσης μεταξύ των ρευμάτων κάθε εμπλεκόμενης διεργασίας, η οποία διατυπώνεται συστηματικά και με μαθηματικό τρόπο με τη χρήση του Σχήματος 2.5 και το σύστημα εξισώσεων Eq.2.1 και Eq.2.2.

Η ιδέα έμμεσης ολοκλήρωσης βασίζεται στην αξιοποίηση περίσσειας ενέργειας των διεργασιών της Συνολικής Μονάδας με στόχο την παραγωγή ατμού. Ο μηχανικός καλείται να επισκοπήσει τα GCC κάθε εμπλεκόμενης διεργασίας στη Συνολική Μονάδα, στα οποία αποτυπώνονται τα ενεργειακά υπόλοιπα των ρευμάτων κάθε διεργασίας, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Στο GCC του Σχήματος 2.3 εμφανίζονται τα ενεργειακά υπόλοιπα των καταβοθρών και των πηγών, πάνω και κάτω από το pinch, αντίστοιχα. Οι γραμμές πάνω από το pinch κάθε διεργασίας περιγράφουν τις ανάγκες θέρμανσης των ρευμάτων-καταβοθρών, ενώ οι γραμμές κάτω από το pinch εκφράζουν τις δυνατότητες παραγωγής ατμού (από περίσσεια θερμότητα πηγών), αντί της χρήσης ψυχρών παροχών για την απομάκρυνση της περίσσειας θερμότητας κάτω από το pinch. Εφόσον τα θερμοκρασιακά εύρη των ρευμάτων που χρησιμοποιεί το GCC είναι μετατοπισμένα μόνο κατά $\pm\Delta T_{\min}/2$, οι γραμμές του GCC μετατοπίζονται επιπλέον κατά $\pm\Delta T_{\min}/2$, μεταφράζοντας τα θερμοκρασιακά εύρη των ρευμάτων σε θερμοκρασιακά επίπεδα εφαρμογής των παροχών θέρμανσης και ψύξης. Υπενθυμίζεται ότι η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ ρευμάτων και βοηθητικών παροχών είναι θερμοδυναμικά εφικτή όταν τηρείται ο περιορισμός ΔT_{\min} . Η διαδικασία αυτή περιγράφεται μέσω του Σχήματος 2.7.

Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται μία Συνολική Μονάδα δύο διεργασιών με τα αντίστοιχα GCC κάθε διεργασίας. Οι αρχικές (μαύρες διακεκομμένες) γραμμές εκατέρωθεν του Pinch κάθε GCC μετατοπίζονται παράλληλα με τον κατακόρυφο άξονα. Οι γραμμές καταβοθρών προς τα πάνω ($+\Delta T_{\min}/2$) και οι γραμμές πηγών προς τα κάτω ($-\Delta T_{\min}/2$), εκφράζοντας αντίστοιχα τα θερμοκρασιακά επίπεδα των βοηθητικών παροχών που απαιτούνται από τα ρεύματα κάθε διεργασίας. Ακολούθως, οι μετατοπισμένες ανάγκες βοηθητικών παροχών των πηγών (sources) και καταβοθρών (sinks) αθροίζονται ξεχωριστά παράγοντας (στα δεξιά του Σχήματος 2.7) τις συνολικές γραμμές πηγών και καταβοθρών της Συνολικής Μονάδας, ή Site Sources and Sinks Profiles (εφεξής SSSP). Μέσω των SSSP, ο

Κεφάλαιο 2. Μέθοδοι ενεργειακής ολοκλήρωσης διεργασιών

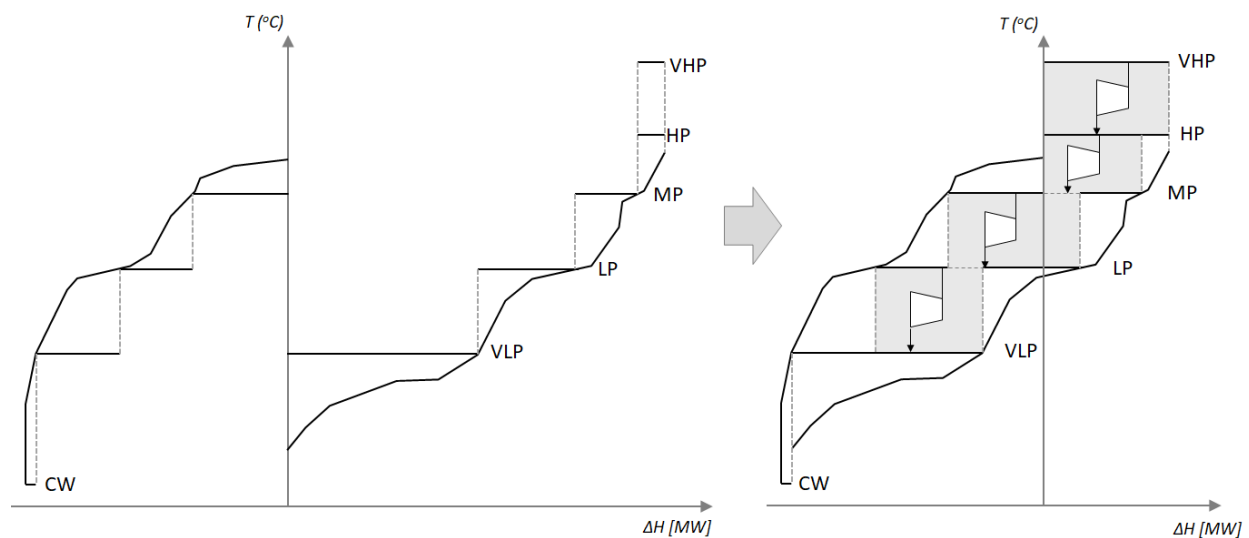
μηχανικός δύναται να ερευνήσει τα περιθώρια παραγωγής ατμού από τις πηγές και την επαναχρησιμοποίησή του στις καταβόθρες, εξοικονομώντας κόστος παραγωγής φρέσκου ατμού, όπως φαίνεται στο SSSP του Σχήματος 2.7. Τα SSSPs αποδίδουν μία συνολική ενεργειακή εικόνα της Συνολικής Μονάδας και χρησιμοποιούνται για την επιλογή των κατάλληλων θερμοκρασιακών επιπέδων θέρμανσης και ψύξης, με στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ατμού και την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους βοηθητικών παροχών. Για ένα δοσμένο σύνολο διεργασιών (και των ρευμάτων τους) προκύπτει ένα συγκεκριμένο σύστημα γραμμών SSSP και περιθωρίων εξοικονόμησης ατμού. Όταν το πρόβλημα αντιμετωπίζει υποψήφιες διεργασίες προς ολοκλήρωση, τότε η Συνολική Μονάδα αποτελεί βαθμό ελευθερίας και υφίσταται ένα διαφορετικό SSSP για κάθε συνδυασμό διεργασιών.



Σχήμα 2.7: Μεγάλα Σύνθετα Διαγράμματα (GCC) και κατασκευή Προφίλ Πηγών και Καταβοθρών Συνολικής Μονάδας (SSSP)

Σε επόμενο στάδιο, ο μηχανικός καλείται να επισκοπήσει γραφικά μέσω του γραφήματος SSSP, τα περιθώρια συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση τουρμπίνων. Τα SSSP αντικατοπτρίζουν τα θερμοκρασιακά επίπεδα και τα ενεργειακά φορτία των εμπλεκόμενων επιπέδων πίεσης ατμού, όπως φαίνεται στα αριστερά του Σχήματος 2.8. Ύστερα από οριζόντια μετατόπιση των συνολικών γραμμών των πηγών και καταβοθρών του SSSP (δεξιά του Σχήματος 2.8) εντοπίζονται τα ενεργειακά διαθέσιμα κάθε επιπέδου ατμού που μπορούν να διατεθούν για εκτόνωση και παραγωγή έργου μεταξύ

διαδοχικών επιπέδων. Η εύρεση των μέγιστων στόχων συμπαραγωγής της Συνολικής Μονάδας αποτελεί το τρίτο στάδιο ενεργειακής μελέτης, και έπεται των σταδίων άμεσης (GCC) και έμμεσης (SSSP) ολοκλήρωσης. Για ένα δοσμένο σύστημα διεργασιών, δηλαδή για ένα γνωστό σύστημα SSSP όπως αυτό του Σχήματος 2.8, το πρόβλημα αντιμετωπίζεται ως βαθμούς ελευθερίας μόνον τα επίπεδα ατμού για την μεγιστοποίηση των συνολικών ωφελειών από την εξοικονόμηση ατμού και την συμπαραγωγή έργου. Όταν το πρόβλημα μελετά υποψήφιες διεργασίες, τότε τα επίπεδα ατμού, τα περιθώρια εξοικονόμησης ατμού, οι παροχές των βοηθητικών παροχών και τα αποτελέσματα συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν βαθμούς ελευθερίας που μεταβάλλονται σύμφωνα με τις επιλογές των εμπλεκόμενων διεργασιών στην υπο-κατασκευή Συνολική Μονάδα.



Σχήμα 2.8: Χρήση SSSP για την εκτίμηση των στόχων συμπαραγωγής έργου

Εκ φύσεως, η γραφική Ανάλυση Συνολικής Μονάδας αφορά αποκλειστικά περιπτώσεις γνωστών και δεδομένων διεργασιών και διεξάγεται σε τρία διαδοχικά στάδια: (1) άμεση ολοκλήρωση κάθε διεργασίας (GCC), (2) έμμεση ολοκλήρωση της Συνολικής Μονάδας (SSSP) και (3) ανάλυση SSSP για την εύρεση στόχων συμπαραγωγής. Η ολοκλήρωση Συνολικών Μονάδων έχει εφαρμοστεί εκτενώς για δοσμένες βιομηχανικές μονάδες, ενώ έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες γραφικές και αριθμητικές μέθοδοι και εργαλεία βελτιστοποίησης με στόχο την επιλογή των επιπέδων ατμού και την ελαχιστοποίηση των βοηθητικών παροχών (Shang and Kokossis, 2004, 2005; Mavromatis and Kokossis, 1998; Liew et al. 2013, Tarighaleslami et al., 2017). Ωστόσο, η χρήση του γραφικού εργαλείου SSSP δεν

Κεφάλαιο 2. Μέθοδοι ενεργειακής ολοκλήρωσης διεργασιών

δύναται να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά τους επιπλέον βαθμούς ελευθερίας (Σχήμα 1.2) που εμφανίζονται σε προβλήματα ανάπτυξης νέων βιοδιυλιστηρίων.

Σύμφωνα με την ανάλυση του προηγούμενου Κεφαλαίου 1, η ανάπτυξη βιοδιυλιστηρίων αποτελεί ένα συνδυαστικό πρόβλημα σύνθεσης και ολοκλήρωσης υποψήφιων συνδυασμών διεργασιών που προέρχονται μέσω των αλυσίδων προϊόντων. Η επιλογή διεργασιών και η κατανομή κοινών τροφοδοσιών προς ανταγωνιστικές διεργασίες με κάθε τρόπο παράγει άπειρους συνδυασμούς διεργασιών, δυναμικότητων και ενεργειακών προφίλ Συνολικών Μονάδων. Η Ανάλυση Συνολικής Μονάδας αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις κατά την συστηματική αξιολόγηση των μεταβαλλόμενων SSSP, τα οποία συμπεριφέρονται ως συνεχείς μεταβλητές. Ενώ το πρόβλημα σύνθεσης διεργασιών μπορεί να προσεγγιστεί συστηματικά με τη χρήση γράφων, ισοζυγίων μάζας και βελτιστοποίησης υπερδομών, το πρόβλημα ολοκλήρωσης περιορίζεται από τη χρήση γραφικών εργαλείων, που έχουν εφαρμογή μόνο σε περιπτώσεις γνωστών/δεδομένων διεργασιών.

Τα ερωτήματα ολοκλήρωσης που εμφανίζονται αφορούν κυρίως την επιλογή και συνεγκατάσταση ανταγωνιστικών διεργασιών καθώς και το σχέδιο διαμοιρασμού κοινών τροφοδοσιών μεταξύ τους. Το τελευταίο – αφορά ροές χημικών κατά μήκος των αλυσίδων προϊόντων και συνεχείς μεταβλητές – καθορίζει τις δυναμικότητες των εμπλεκόμενων διεργασιών της Συνολικής Μονάδας, και κατ' επέκταση το ενεργειακό τους περιεχόμενο και το πλαίσιο έμμεσης ολοκλήρωσης. Στόχος είναι η εύρεση ενεργειακά συμπληρωματικών διεργασιών που ευνοούν την παραγωγή ατμού, την εξοικονόμηση ενέργειας, την μείωση των βοηθητικών παροχών και ενισχύουν τη συμπαραγωγή. Μάλιστα, η έμμεση ολοκλήρωση μπορεί να διασφαλίσει την ένταξη διεργασιών στη Συνολική Μονάδα χωρίς (ή με πολύ μικρό) ενεργειακό κόστος, αξιοποιώντας παροχές παραγόμενου ατμού από άλλες διεργασίες με υψηλά ποσοστά διαθέσιμης ενέργειας. Για την αντιμετώπιση των νέων προκλήσεων, τα υπάρχοντα μοντέλα και μεθοδολογίες ολοκλήρωσης χρειάζεται να επανεξετασθούν, ώστε (1) να αντιμετωπίσουν τις εμπλεκόμενες διεργασίες ως επιπλέον βαθμούς ελευθερίας και (2) να συμπεριλάβουν επιπλέον επιλογές για τη συστηματική και ταυτόχρονη περιγραφή της άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης ως ένα ενιαίο μοντέλο βελτιστοποίησης, παρά ως επάλληλα βήματα ενεργειακής ανάλυσης και σχεδιασμού.

Αν και οι υπάρχουσες τεχνολογίες ολοκλήρωσης παρουσιάζουν λύσεις για την μαθηματική διατύπωση του προβλήματος άμεσης ολοκλήρωσης με τη χρήση ενεργειακών καταρρακτών (Σχήμα 2.4 και 2.5) και μοντέλων ενεργειακής μεταφόρτωσης (Eq.2.1), η έμμεση ολοκλήρωση ακόμα αντιμετωπίζεται με χρήση γραφικών εργαλείων (Dhole and Linnhoff, 1993a) είτε μοντέλων που προϋποθέτουν δεδομένες διεργασίες (Shang and Kokossis, 2004).

Κεφάλαιο 2. Μέθοδοι ενεργειακής ολοκλήρωσης διεργασιών

Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται νέα συστήματα γενικευμένων αναπαραστάσεων και προσεγγίσεων ολοκλήρωσης προσφέροντας νέες προοπτικές στις συμβατικές μεθόδους. Οι νέες τεχνικές αφορούν την ταυτόχρονη αντιμετώπιση του προβλήματος άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης Συνολικών Μονάδων ως μία ενιαία διαδικασία, ικανή να αντικαταστήσει τα διαδοχικά στάδια της συμβατικής μεθοδολογίας. Τα κλασσικά συστήματα καταρρακτών άμεση ολοκλήρωσης των ρευμάτων μίας διεργασίας **αναβαθμίζονται σε καταρράκτες ολοκλήρωσης πολλαπλών-διεργασιών** και συνδυάζονται με γράφους απεικόνισης, επιτρέποντας την καταγραφή ισοζυγίων μάζας (των αλυσίδων προϊόντων) και ενέργειας (της Συνολικής Μονάδας) διατυπώνοντας το συνολικό πρόβλημα σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών ως ένα μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης που λύνεται με χρήση μεικτού-ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού. Τα γενικευμένα και συντομευμένα μαθηματικά μοντέλα ολοκλήρωσης και βελτιστοποίησης συνδυάζουν βασικούς κανόνες θερμοδυναμικής με το γραμμικό προγραμματισμό και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό βιομηχανικών μονάδων πάσης φύσεως (βιοδιυλιστήρια, πετρελαϊκή βιομηχανία, φαρμακοβιομηχανία, βιομηχανία τροφίμων, κ.α.), ενώ μπορούν να συνδεθούν και με άλλα μοντέλα ανάλυσης και σχεδιασμού διεργασιών.

Στο ίδιο πλαίσιο εφαρμογής τεχνικών ολοκλήρωσης, τα επόμενα κεφάλαια εμβαθύνουν και δίνουν λύσεις σε επιπλέον θέματα και προκλήσεις που εντοπίζονται κατά την ανάπτυξη βιοδιυλιστηρίων, όπως:

- (1) ζητήματα εποχικής διαθεσιμότητας των τροφοδοσιών βιομάζας, η οποία επηρεάζει, ως επιπλέον παράγον, τις ροές κατά μήκος των αλυσίδων προϊόντων, και κατ' επέκταση τις ενεργειακές αποδόσεις των Συνολικών Μονάδων και τη λήψη αποφάσεων αναφορικά με τις διεργασίες των βιοδιυλιστηρίων.
- (2) το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση συστημάτων συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, παράλληλα με το πρόβλημα σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών.
- (3) τον ενεργειακό σχεδιασμό ενεργοβόρων συστημάτων απόσταξης, τα οποία συχνά εμφανίζονται στην ανερχόμενη βιομηχανία.

Όσον αφορά το (1), η μεθοδολογία επικεντρώνεται στην αντιμετώπιση προβλημάτων εποχικής διαθεσιμότητας ανταγωνιστικών ποικιλιών βιομάζας, οι οποίες προκαλούν διακυμάνσεις στις δυναμικότητες των διεργασιών και στην ενεργειακή συνεισφορά τους στην Συνολική Μονάδα. Οι εναλλακτικές ποικιλίες βιομάζας αποτελούν επιπλέον βαθμούς ελευθερίας του συνολικού προβλήματος και το πρόβλημα θέτει ερωτήματα όσον αφορά τις βέλτιστες αποδόσεις της Συνολικής

Μονάδας και το πλάνο χρονοπρογραμματισμού της λειτουργίας βιομηχανιών πολλαπλών-διεργασιών και πολλαπλών-τροφοδοσιών. Τα αναβαθμισμένα μοντέλα ενεργειακής ολοκλήρωσης πολλαπλών-διεργασιών, συνδυάζονται με έναν γενικευμένο γράφο που περιλαμβάνει επιπλέον επιλογές σύνθεσης, αποθήκευσης και εποχικής διαχείρισης των πρώτων υλών και ενδιάμεσων χημικών της βιομηχανίας, επιτρέποντας την ενεργειακή βελτιστοποίηση της Συνολικής Μονάδας σε διαφορετικά χρονικά ενδιάμεσα.

Στο (2), θα αντιμετωπιστεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης των επιπέδων ατμού και της συμπαραγωγής ταυτόχρονα με το πρόβλημα σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών. Το αναβαθμισμένο μοντέλο άμεσης-έμμεσης ολοκλήρωσης θα συνδυαστεί με νέες στρατηγικές εκτίμησης και βελτιστοποίησης της συμπαραγωγής, οι οποίες βελτιώνουν την ακρίβεια των υπάρχοντων βιβλιογραφικών μοντέλων σχεδιασμού τουρμπίνων. Το συνολικό μοντέλο βελτιστοποίησης (MILP) αναζητά το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο διεργασιών, προϊόντων και επιπέδων ατμού, με στόχο την βελτιστοποίηση του κόστους ενέργειας, της συμπαραγωγής και της κερδοφορίας της υπο-κατασκευή Συνολικής Μονάδας.

Τέλος στο (3), θα εξετασθούν στρατηγικές σχεδιασμού και ενεργειακής ολοκλήρωσης διεργασιών απόσταξης, οι οποίες, έως τώρα, αντιμετωπίζονται με τη χρήση γραφικών εργαλείων (Linnhoff et al., 1983; Dhole and Linnhoff, 1993b). Η μεθοδολογία συστηματοποιεί τα βήματα της γραφικής ανάλυσης και αυτοματοποιεί τη λήψη αποφάσεων κατά το σχεδιασμό αποστακτικών στηλών λαμβάνοντας, ταυτόχρονα, υπόψη επιπλέον βαθμούς ελευθερίας που προκύπτουν κατά την ενεργειακή ολοκλήρωση συστημάτων απόσταξης με την υπόλοιπη διεργασία. Το μαθηματικό πρόβλημα (MILP) σύνθεσης, σχεδιασμού και ολοκλήρωσης αποστακτικών στηλών αποδίδει λύσεις, οι οποίες δεν είναι προφανείς μέσω των γραφικών εργαλείων ανάλυσης, ενώ στόχος είναι η μεγιστοποίηση των ενεργειακών αποδόσεων της συνολικής διεργασίας (αποστάξεις και υπόλοιπη διεργασία) με το ελάχιστο δυνατό κόστος επένδυσης για τις στήλες απόσταξης.

Βιβλιογραφία

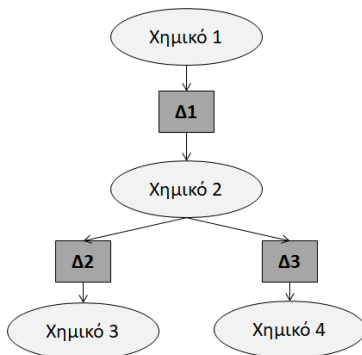
1. Dhole, V.R., Linnhoff, B., 1993a. Total site targets for fuel, co-generation, emissions, and cooling. *Computers & Chemical Engineering*, 17, 1, S101-S109
2. Dhole, V.R., Linnhoff, B., 1993b. Distillation column targets. *Computers & Chemical Engineering*, 17, 5–6, 549-560
3. Kemp, IC, 2007. *Pinch Analysis And Process Integration. A User Guide On Process Integration For The Efficient Use Of Energy* (2nd edition). Oxford: Butterworth-Heinemann, Elsevier.

4. Liew, P.Y., Wan Alwi, S.R., Varbanov, P.S., Manan, Z.A., Klemeš, J.J., 2013. Centralised utility system planning for a Total Site Heat Integration network. *Computers and Chemical Engineering* 57, 104–111
5. Linnhoff, B. and Flower, J.R., 1978. Synthesis of heat exchanger networks. Part I: Systematic generation of energy optimal networks, *AIChE J*, 24, 4, 633–642.
6. Linnhoff, B., 1979. *Thermodynamic Analysis in the Design of Process Networks*, PhD Thesis, University of Leeds.
7. Linnhoff, B., Mason, D.R., Wardle, I., 1979. Understanding heat exchanger networks, *Comp Chem Eng*, 3, 295.
8. Linnhoff, B., Townsend, D.W., Boland, D., Hewitt, G.F., Thomas, B.E.A., Guy, A.R., Marsland, R.H., 1982. *User guide on process integration for the efficient use of energy*. Institution of Chemical Engineers, Rugby. U.K.
9. Linnhoff, B., Dunford, H., Smith, R., 1983. Heat integration of distillation columns into overall processes. *Chemical Engineering Science*, 38, 8, 1175-1188
10. Mavromatis S.P. and Kokossis A.C. 1998. Conceptual optimisation of utility networks for operational variations-I. Targets and level optimisation. *Chemical Engineering Science*, 53, 8, 1585-1608.
11. Papoulias, A., Grossmann, I.E., 1983. A structural optimization approach in process synthesis—II: Heat recovery networks. *Computers & Chemical Engineering* 7, 6, 707-721
12. Shang, Z., Kokossis, A. 2004. A transshipment model for the optimisation of steam levels of total site utility system for multiperiod operation. *Computers and Chemical Engineering*. 28, 1673–1688
13. Shang, Z., Kokossis, A., 2005. A systematic approach to the synthesis and design of flexible site utilities systems. *Chemical Engineering Science* 60, 4431 – 4451
14. Tarighaleslami, A.H., Walmsley, T.G., Atkins, M.J., Walmsley, M.R.W., Neale, J.R., 2017. Total Site Heat Integration: Utility selection and optimisation using cost and exergy derivative analysis. *Energy* 141, 949-963

Κεφάλαιο 3.

Η πρόσκληση της ολοκληρωμένης σύνθεσης αλυσίδων προϊόντων

Το συνδυαστικό πρόβλημα σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών και οι βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος αναλύονται μέσω του ακόλουθου παραδείγματος αλυσίδας προϊόντων. Θεωρείται η αλυσίδα προϊόντων του Σχήματος 3.1, όπου το Χημικό 1 (π.χ. βιομάζα) μετατρέπεται στο Χημικό 2 (π.χ. γλυκόζη) μέσω της διεργασίας Δ1. Ακολούθως, το Χημικό 2 δύναται να μετατραπεί στο Χημικό 3 (π.χ. αιθανόλη) και το Χημικό 4 (π.χ. ιτακονικό οξύ) μέσω δύο ανταγωνιστικών διεργασιών Δ2 και Δ3. Η διαθεσιμότητα $\left(\frac{kg_{\text{τροφοδοσίας}}}{hr}\right)$ του Χημικού 1, ως ρεύμα εισόδου της Δ1, και οι αποδόσεις μετατροπής $\left(\frac{kg_{\text{εξόδου}}}{kg_{\text{εισόδου}}}\right)$ των Δ1, Δ2 και Δ3 αποτελούν δεδομένα του προβλήματος.



Σχήμα 3.1: Αλυσίδα προϊόντων τριών χημικών μονοπατιών

Κεφάλαιο 3. Η πρόσκληση της ολοκληρωμένης σύνθεσης αλυσίδων προϊόντων

Τα θερμικά δεδομένα του προβλήματος (θερμά/ψυχρά ρεύματα κάθε διεργασίας), παρατίθενται στο Πίνακα 3.1. Τα ενεργειακά περιεχόμενα (MW) κάθε ρεύματος αναφέρονται σε λειτουργία μέγιστης δυναμικότητας κάθε διεργασίας, δηλαδή όταν η Δ1 λαμβάνει όλη το διαθέσιμο Χημικό 1, και όταν οι Δ2 ή Δ3 λαμβάνουν, αντίστοιχα, όλο το παραγόμενο Χημικό 2. Στο πρόβλημα εμπλέκονται 3 επίπεδα ατμού (θερμοκρασίας 100 °C, 130 °C και 180 °C) για την παροχή θέρμανσης και κρύο νερό (25 °C) για την παροχή αναγκών ψύξης. Το ερώτημα του προβλήματος αφορά τη σύνθεση του βιοδιυλιστηρίου με το ελάχιστο ενεργειακό κόστος. Ως επιπλέον στόχος θα μπορούσε να εξετασθεί η επιλογή κατάλληλων επιπέδων ατμού, τα οποία ως ενεργειακές πύλες άντλησης και παροχής θερμότητας από/προς τις διεργασίες, μπορούν να ενισχύσουν την ανταλλαγή θερμότητας και τη μείωση του ενεργειακού κόστους. Ωστόσο, το πρόβλημα αυτό θα αντιμετωπιστεί σε επόμενα κεφάλαια. Στο παράδειγμα του Σχήματος 3.1, τα επίπεδα ατμού αποτελούν δεδομένα του προβλήματος.

Πίνακας 3.1: Θερμικά δεδομένα ρευμάτων και βοηθητικών παροχών

	Θερμά			Ψυχρά		
	T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	Q [MW]	T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	Q [MW]
Δ1	155.01	80.00	20	40.00	160.00	17
Δ2	147.88	40.00	3.2	30.00	137.88	12
Δ3	160.00	105.00	3	95.00	170.00	9

Βοηθητικές παροχές				
Θερμοκρασία	Θέρμανση			Ψύξη
	180 °C	130 °C	100 °C	25 °C
Κόστος [M€/MW/yr]	0.1987	0.1564	0.1310	0.0125

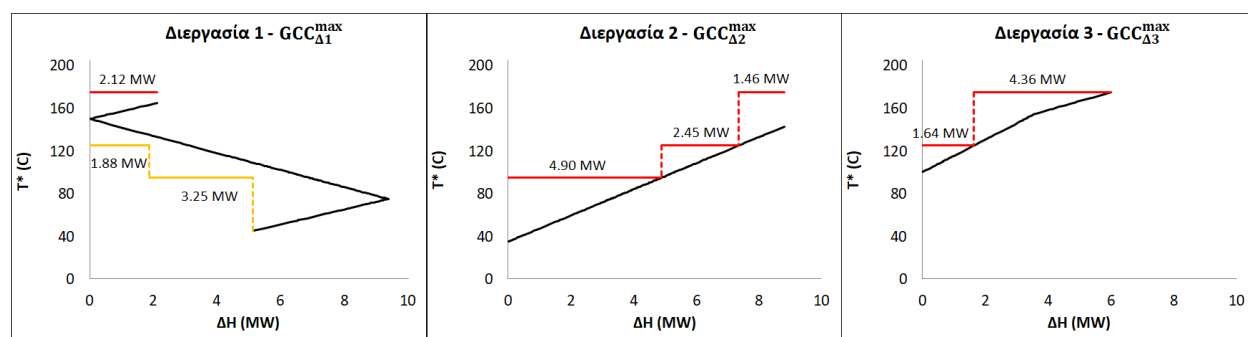
Ενώ η χρήση της Δ1 είναι δεδομένη (ειδάλλως δεν υφίσταται διυλιστήριο), το βασικό ερώτημα στοχεύει στην αναζήτηση συνδυασμών, ή και όχι, των Δ2 και Δ3 εντός της Συνολικής Μονάδας που ευνοούν το ενεργειακό κόστος. Τα υποψήφια συστήματα διεργασιών που δύναται να αναπτυχθούν, βάσει της αλυσίδας προϊόντων του Σχήματος 3.1, περιλαμβάνουν τις διεργασίες: Δ1-Δ2 ή Δ1-Δ3 ή Δ1-Δ2-Δ3, με το τελευταίο σύστημα να αντιπροσωπεύει άπειρες λύσεις αναλόγως το διαμοιρασμό του Χημικού 2 (κοινή τροφοδοσία) προς τις ανταγωνιστικές διεργασίες Δ2 και Δ3. Η δυναμικότητα και τα ενεργειακά περιεχόμενα των ρευμάτων της Δ1 παραμένουν σταθερά δεδομένης της ροής βιομάζας στην είσοδό της. Οι δυναμικότητες και οι ροές των ρευμάτων εντός των Δ2 και Δ3 – και ως εκ τούτου τα ενεργειακά περιεχόμενα των θερμών/ψυχρών ρευμάτων τους – ρυθμίζονται σύμφωνα με τις

Κεφάλαιο 3. Η πρόσκληση της ολοκληρωμένης σύνθεσης αλυσίδων προϊόντων

στρατηγικές διαμοιρασμού του ενδιάμεσου Χημικού 2. Αναλόγως, διαμορφώνεται η διαθέσιμη ενέργεια κάθε διεργασίας και τα περιθώρια παραγωγής ατμού και ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ τους.

Ακολουθώντας την κλασική διαδικασία ενεργειακής ανάλυσης (βλ. Κεφάλαιο 2), η αναζήτηση ενεργειακών στόχων κάθε υποψήφιας Συνολικής Μονάδας απαιτεί, πρώτον, την άμεση ολοκλήρωση (κατασκευή των GCC) και, δεύτερον, την έμμεση ολοκλήρωση (κατασκευή των SSSP) μεταξύ θερμών-ψυχρών ρευμάτων κάθε εμπλεκόμενης διεργασίας. Κυρίαρχοι βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος είναι η ροές του Χημικού 2 προς στις Δ2 και Δ3 καθορίζοντας τη θερμική συνεισφορά κάθε διεργασίας στην Συνολική Μονάδα και το ενεργειακό κόστος. Σημειώνεται ότι μεταβολές στις ροές επιφέρουν αλλαγές μόνον στο ενεργειακό περιεχόμενο των θερμών/ψυχρών ρευμάτων των Δ2 και Δ3 και όχι στα θερμοκρασιακά εύρη λειτουργίας τους. Τα ρεύματα της Δ1 παραμένουν αμετάβλητα σε κάθε σενάριο Συνολικής Μονάδας.

Ο μηχανικός καλείται σε πρώτο στάδιο να κατασκευάσει τα GCC κάθε διεργασίας, ενώ έπειτα το πρόβλημα σύνθεσης διεργασιών απαιτεί το συνδυασμό των εκάστοτε GCC παράγοντας τα SSSP κάθε υποψήφιας Συνολικής Μονάδας. Το Σχήμα 3.2 παρουσιάζει τα GCC κάθε διεργασίας θεωρώντας λειτουργία στη μέγιστη δυναμικότητά τους (GCC^{\max}), σύμφωνα με τα ενεργειακά δεδομένα του Πίνακα 3.1. Στα GCC κάθε διεργασίας παρουσιάζονται οι δυνατότητες παραγωγής ατμού στα επιλεγμένα επίπεδα ατμού κάτω από το pinch κάθε διεργασίας, καθώς επίσης και οι ανάγκες ατμού πάνω από αυτό. Η ενεργειακή συνεισφορά του $GCC_{\Delta 1}^{\max}$ είναι σταθερή, ενώ η συνεισφορά των $GCC_{\Delta 2}^{\max}$ και $GCC_{\Delta 3}^{\max}$ για την ανάπτυξη του SSSP κάθε υποψήφιας Συνολικής Μονάδας καθορίζεται από το ποσοστό διαμοιρασμού του Χημικού 2.

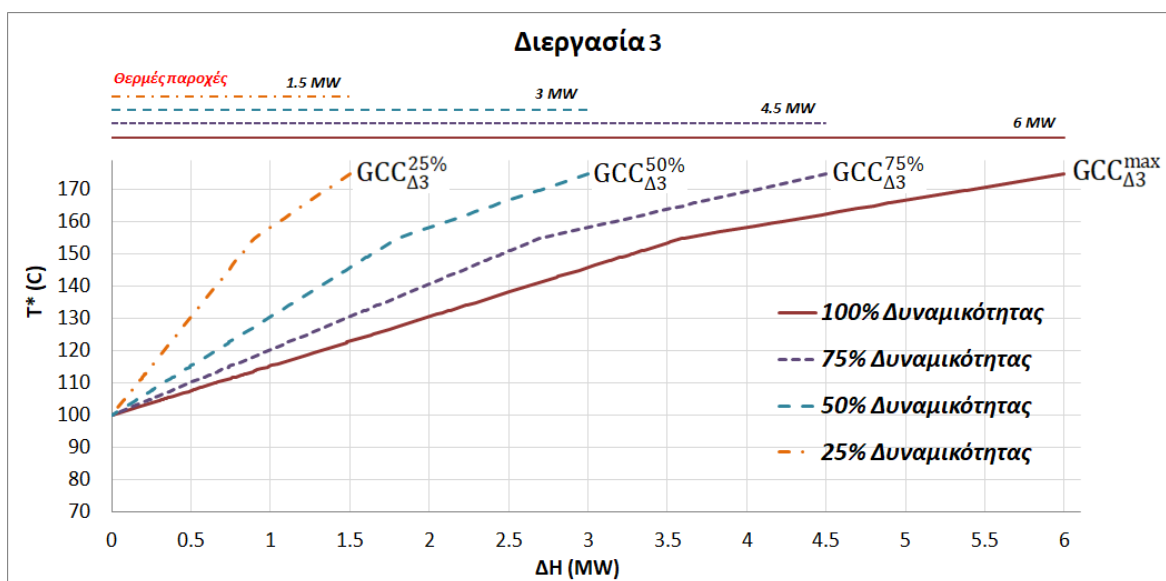


Σχήμα 3.2: GCC των Δ1, Δ2 και Δ3 για λειτουργία στη μέγιστη δυναμικότητα

Κεφάλαιο 3. Η πρόσκληση της ολοκληρωμένης σύνθεσης αλυσίδων προϊόντων

Για την ενεργειακή ανάλυση Συνολικής Μονάδας θεωρείται μία γραμμική συσχέτιση μεταξύ των ενεργειακών αναγκών των ρευμάτων κάθε διεργασίας με τη δυναμικότητά της. Παραδείγματος χάριν, η ενεργειακή συνεισφορά των ρευμάτων της Δ2, όταν αυτή λειτουργεί στο 20% της μέγιστης δυναμικότητάς της, υπολογίζεται ως εξής, για το θερμό: $3.2 \text{ MW} \cdot 20\% = 0.64 \text{ MW}$ και για το ψυχρό: $12 \text{ MW} \cdot 20\% = 2.4 \text{ MW}$. Ακολούθως, οι ενεργειακές απαιτήσεις των $GCC_{\Delta 2}^{\max}$ και $GCC_{\Delta 3}^{\max}$ θα συνεισφέρουν κατά αναλογία 20-80% στο SSSP ενός σεναρίου που περιλαμβάνει τις Δ1 (100%) – Δ2 (20%) – Δ3 (80%).

Οποιοσδήποτε μεταβολές στις στρατηγικές διαμοιρασμού του Χημικού 2 δεν επηρεάζουν ούτε τα ποσοστά εξοικονόμησης λόγω άμεσης ολοκλήρωσης εντός κάθε διεργασίας ούτε τα σημεία των pinch των GCCs. Αντίθετα, επιβάλλουν μεταβολές στις ανάγκες των βοηθητικών παροχών των διεργασιών, οι οποίες απεικονίζονται ως οριζόντια συρρίκνωση των GCC^{\max} , όπως φαίνεται στο παράδειγμα του Σχήματος 3.3 για την Δ3. Στο Σχήμα 3.3, τα ποσοστά διαμοιρασμού του Χημικού 2 οδηγούν σε ισάξια ποσοστά δυναμικότητας ως προς την μέγιστη και ακολούθως σε ισάξια ποσοστά συνεισφοράς θερμότητας (ως προς τα μέγιστα) στην συνολική μονάδα. Οι ανάγκες παροχών θέρμανσης για την Δ3 υπολογίζονται στο 100%, 75%, 50% ή 25% των μέγιστων αναγκών της, όταν το ενδιάμεσο Χημικό 2 κατανέμεται κατά 100%, 75%, 50% ή 25% προς αυτήν. Αντίστοιχα, το χημικό ενδιάμεσο θα κατανέμεται κατά 0%, 25%, 50% ή 75% προς την Δ2 επιφέροντας ανάλογες συνεισφορές της Δ2 εντός της Συνολικής Μονάδας.



Σχήμα 3.3: GCC της Δ3 για λειτουργία σε διαφορετικά ποσοστά δυναμικότητας ως προς τη μέγιστη

Κεφάλαιο 3. Η πρόσκληση της ολοκληρωμένης σύνθεσης αλυσίδων προϊόντων

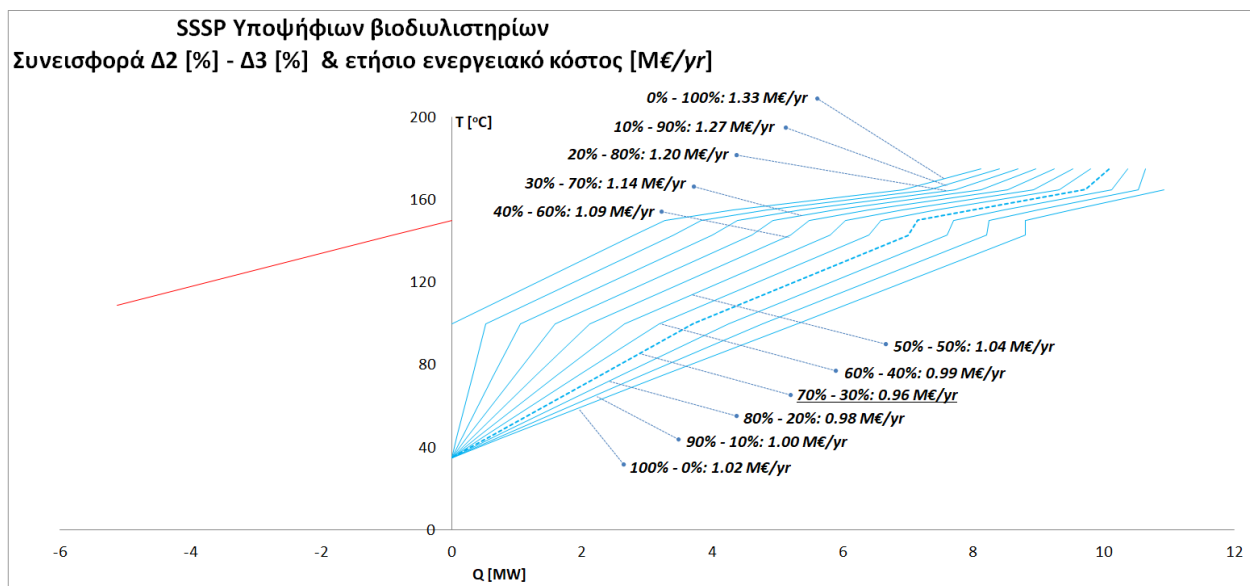
Στα πλαίσια του παρόντος προβλήματος σύνθεσης, η γραφική ανάλυση δεν καθίσταται αποτελεσματική για την συστηματική αξιολόγηση των άπειρων συνδυασμών διεργασιών που εμφανίζονται για κάθε στρατηγική διαμοιρασμού του Χημικού 2, ακόμα και για το πολύ απλό δέντρο προϊόντων του Σχήματος 3.1. Η συμβατική διαδικασία άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης δύναται να εφαρμοστεί μόνο για ένα σύνολο πεπερασμένων συνδυασμών στην προσπάθεια εξαντλητικής προσέγγισης του προβλήματος. Για αυτόν το λόγο, επιλέγεται μία στρατηγική ανάπτυξης συνδυασμών διεργασιών υποθέτοντας ένα βήμα διαμοιρασμού της κοινής τροφοδοσίας (Χημικό 2) κατά 10% ανάμεσα στις ανταγωνιστικές διεργασίες (Δ2-Δ3). Στην περίπτωση του Σχήματος 3.1, η στρατηγική καταλήγει στην ανάπτυξη 11 σεναρίων Συνολικών Μονάδων, όπου οι Δ2-Δ3 συνυπάρχουν σε αναλογίες 0-100%, 10-90%, 20-80%, 30-70%, 40-60%, 50-50%, 60-40%, 70-30%, 80-20%, 90-10% και 100-0% των μέγιστων δυναμικότητων τους, ενώ η Δ1 συνεγκαθίσταται πάντα στο 100% της μέγιστης δυναμικότητάς της, εφόσον δεν ανταγωνίζεται άλλες διεργασίες. Σε μεγαλύτερες και πολυπλοκότερες αλυσίδες προϊόντων πολλών ανταγωνιστικών διεργασιών, ο αριθμός των υποψήφια Συνολικών Μονάδων που καλούνται να εξεταστούν είναι υπερβολικά μεγάλος – ακόμα και με τη χρήση βήματος 10% μεταξύ ανταγωνιστικών διεργασιών – καθιστώντας τη εξαντλητική χρήση της γραφικής διαδικασίας μη πρακτική και αποτελεσματική όσον αφορά την εύρεση βέλτιστων λύσεων.

Σύμφωνα με την παραπάνω στρατηγική, τα GCC^{max} των διεργασιών (Σχήμα 3.2) συνδυάζονται κατάλληλα για την ανάπτυξη 11 σεναρίων SSSP των συνδυασμών Δ1-Δ2-Δ3 και την εφαρμογή έμμεσης ολοκλήρωσης στα 3 επίπεδα ατμού που διατίθενται. Ακολούθως, υπολογίζεται το ενεργειακό κόστος κάθε βελτιστοποιημένου σεναρίου σύμφωνα με τα μοναδιαία κόστη κάθε βοηθητικής παροχής (βλ. Πίνακα 3.1). Στο Σχήμα 3.5 συνοψίζονται τα αποτελέσματα ενεργειακού κόστους κάθε σεναρίου συναρτήσει των βαθμών ελευθερίας του προβλήματος σύνθεσης, δηλαδή των ποσοστών διαμοιρασμού του Χημικού 2. Το Σχήμα 3.5 αναδεικνύει την ύπαρξη βέλτιστης λύσης κοντά στην περιοχή διαμοιρασμού 70-30% στις Δ2-Δ3, ενισχύοντας τα επιχειρήματα για αναζήτηση βέλτιστων λύσεων ολοκλήρωσης διεργασιών, οι οποίες δεν είναι προφανείς μέσω της εποπτείας των ενεργειακών διαθεσίμων επί του γραφικού εργαλείου SSSP. Ο διαμοιρασμός κοινών τροφοδοσιών αποτελεί ζωτικής σημασίας βαθμούς ελευθερίας για την βελτίωση της ενεργειακής εξοικονόμησης και την ενίσχυση των περιθωρίων βιωσιμότητας.

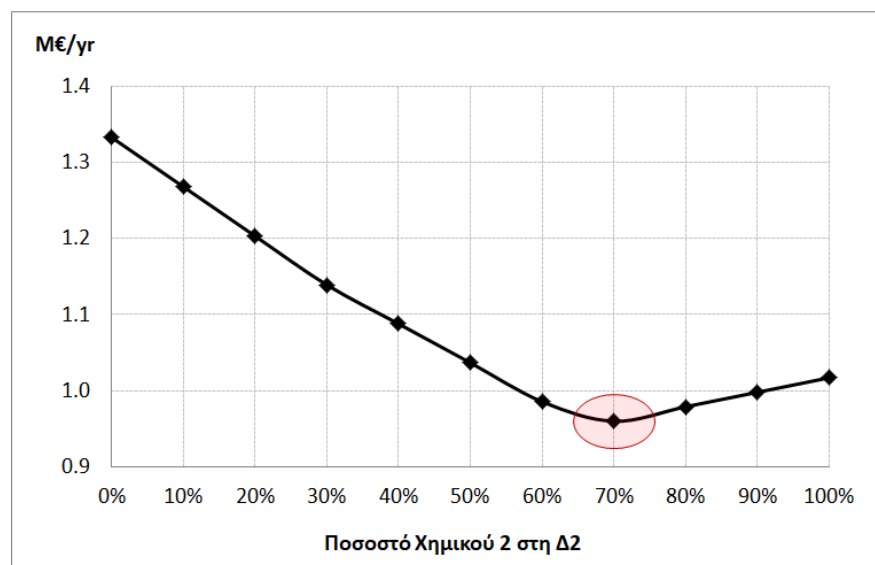
Η προσέγγιση, αλλά όχι η ακριβής εύρεση, της βέλτιστης λύσης μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση αυστηρότερων στρατηγικών διαμοιρασμού (όπως βήματα της τάξης του 1%), οι οποίες απαιτούν τον υπολογισμό εκατοντάδων, χιλιάδων ή και ακόμα εκατομμυρίων SSSP σε μεγαλύτερα και

Κεφάλαιο 3. Η πρόσκληση της ολοκληρωμένης σύνθεσης αλυσίδων προϊόντων

πολυπλοκότερα προβλήματα, καθιστώντας ασύμφορη, χρονοβόρα και αναποτελεσματική τη χρήση της γραφικής διαδικασίας. Μάλιστα, στην περίπτωση όπου το πρόβλημα υπόκειται σε εποχική διαθεσιμότητα ποικιλιών βιομάζας, οι οποίες χρίζουν ανάλυσης, βελτιστοποίησης και χρονοπρογραμματισμού, το μέγεθος του προβλήματος πολλαπλασιάζεται και η χρήση της γραφικής ανάλυσης καθίσταται εντελώς μη πρακτική. Στην περίπτωση όπου η ένταξη των διεργασιών Δ1-Δ2-Δ3 αφορά προσθήκες σε υπάρχουσες βιομηχανίες, η ανταλλαγή θερμότητας γενικεύεται μεταξύ υφιστάμενων και υποψήφιων διεργασιών και το πρόβλημα αποκτά νέες διαστάσεις ολοκλήρωσης, επανασχεδιασμού του συστήματος βοηθητικών παροχών και του δικτύου εναλλακτών, και αξιοποίησης της διαθέσιμης ενέργειας (από υφιστάμενες και υποψήφιες διεργασίες) για την ένταξη των Δ1-Δ2-Δ3, και είναι πολύ πιθανόν ότι αναμένονται εντελώς διαφορετικές στρατηγικές από αυτές που επιλέχθηκαν παραπάνω (αναλογία 70-30% των Δ2-Δ3, βλ. Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.4: SSSP 11 υποψήφιων συνδυασμών των Δ1-Δ2-Δ3 (Δ1 στο 100%) και ενεργειακό κόστος κάθε υποψήφιας Συνολικής Μονάδας



Σχήμα 3.5: Ενεργειακό κόστος Συνολικής Μονάδας συναρτήσει των βαθμών ελευθερίας σύνθεσης διεργασιών (διαμορισμός του ενδιάμεσου Χημικού 2 στις ανταγωνιστικές διεργασίες Δ2-Δ3)

Οι προκλήσεις που παρουσιάζονται κατά την αντιμετώπιση του συνδυαστικού προβλήματος σύνθεσης, ολοκλήρωσης και αξιολόγησης υποψήφιων διεργασιών οφείλονται στην αδυναμία συστηματοποίησης της διαδικασίας έμμεσης ολοκλήρωσης. Το υφιστάμενο σύστημα ενεργειακών καταρρακτών και η χρήση μοντέλων ενεργειακής μεταφόρτωσης προσφέρουν επιλογές (βαθμούς ελευθερίας) ανταλλαγής θερμότητας μόνον σε επίπεδο άμεσης ολοκλήρωσης. Οι βαθμοί ελευθερίας που αξιοποιούνται κατά την έμμεση ολοκλήρωση αντιμετωπίζονται μόνο μέσω της γραφικής ανάλυσης των SSSP. Για την διερεύνηση των συνολικών αποδόσεων ολοκλήρωσης κάθε υποψήφιου χαρτοφυλακίου διεργασιών απαιτείται η ενοποίηση των δύο διαδικασιών άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης ως μία διαδικασία, η οποία θα υποστηρίζει την συστημική καταγραφή όλων των επιλογών (άμεσης και έμμεσης) ολοκλήρωσης μεταξύ των συνεισφερόμενων ρευμάτων της Συνολικής Μονάδας. Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται νέες γενικευμένες αναπαραστάσεις με στόχο:

- i) την καταγραφή των επιλογών σύνθεσης διεργασιών, προϊόντων και τροφοδοσιών των αλυσίδων προϊόντων και
- ii) την ταυτόχρονη αντιμετώπιση άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης μέσω ενός ενιαίου αναβαθμισμένου καταρράκτη.

Όσον αφορά το (i), προτείνεται ένας γράφος βιομάζας (Biomass Bipartite Representation-BBR) με τη χρήση του οποίου όλα τα δεδομένα των αλυσίδων προϊόντων μεταφράζονται σε αναπαραστάσεις, οι

Κεφάλαιο 3. Η πρόσκληση της ολοκληρωμένης σύνθεσης αλυσίδων προϊόντων

οποίες έχουν τη μορφή και φέρουν τα χαρακτηριστικά των υπερδομών. Ο γράφος υποστηρίζει την ανάπτυξη ισοζυγίων μάζας για την περιγραφή των αποδόσεων μετατροπής των διεργασιών και των ροών χημικών κατά μήκος των αλυσίδων προϊόντων, και είναι υπεύθυνος για τη σύνθεση όλων των (άπειρων) εφικτών σεναρίων διυλιστηρίων πολλαπλών-διεργασιών (Συνολικές Μονάδες). Όσον αφορά το (ii), η αναπαράσταση καταρράκτη αναβαθμίζει τις δυνατότητες των συμβατικών καταρρακτών άμεσης ολοκλήρωσης (Σχήμα 2.4) προσφέροντας επιπλέον επιλογές ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ ρευμάτων διαφορετικών διεργασιών μέσω ατμού (έμμεση ολοκλήρωση), όπως εφαρμόζεται στα SSSP. Η αναπαράσταση συνολικής μονάδας (Total Site Representation-TSR) υποστηρίζει την ανάπτυξη ισοζυγίων ενέργειας με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους βοηθητικών παροχών και τη βελτιστοποίηση των επιπέδων βοηθητικών παροχών, ενώ επίσης ενσωματώνει επιλογές για την ταυτόχρονη μελέτη του προβλήματος συμπαραγωγής.

Η διατύπωση των ισοζυγίων ενέργειας πραγματοποιείται με τη χρήση δύο εναλλακτικών προσεγγίσεων κατάλληλα τροποποιημένων μοντέλων μεταφόρτωσης. Το πρώτο, αποτελεί ένα πιο ευέλικτο μοντέλο και προτείνεται ως εργαλείο γρήγορης στόχευσης, που παρακάμπτει λεπτομέρειες στην ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ ρευμάτων και βοηθητικών παροχών. Το δεύτερο, αποτελεί ένα λεπτομερές μοντέλο που περιγράφει όλες τις επιλογές ενεργειακής διαχείρισης κατάλληλο για την ανάπτυξη αναλυτικών αποτελεσμάτων ολοκλήρωσης που χρησιμεύουν σε επόμενα απαιτητικά στάδια σχεδιασμού. Το πλεονέκτημα των αναβαθμισμένων μοντέλων μεταφόρτωσης έγκειται στο γεγονός ότι αντιμετωπίζουν τις διεργασίες (και τα θερμά/ψυχρά ρεύματα που περιλαμβάνουν) ως επιπλέον βαθμούς ελευθερίας, πέραν των βαθμών ελευθερίας (ενεργειακές ροές) που αφορούν τα προβλήματα άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης. Η γενικευμένη διατύπωση των μοντέλων μεταφόρτωσης επιτρέπει την εφαρμογή τους σε πάσης φύσεως προβλημάτων ολοκλήρωσης ενεργειακών πηγών-καταβοθρών, συνδυάζοντας θερμοδυναμικούς κανόνες με τον μαθηματικό προγραμματισμό, και δεν περιορίζονται στις περιπτώσεις των βιοδιυλιστηρίων ή αλυσίδων υποψήφιων προϊόντων.

Ο γράφος βιομάζας συνδυάζεται κατάλληλα με τα ενεργειακά δεδομένα του καταρράκτη Συνολικής Μονάδας για την συστημική αξιολόγηση όλων των συνδυασμών διεργασιών. Τα ισοζύγια μάζας (BBR) και ενέργειας (TSR) κατασκευάζονται ως ένα γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης για την επιλογή διεργασιών, προϊόντων και τροφοδοσιών βιομάζας, τον σχεδιασμό των επιπέδων θέρμανσης/ψύξης και των τουρμπίνων συμπαραγωγής, συνθέτοντας ολοκληρωμένες λύσεις βιοδιυλιστηρίων μέγιστων αποδόσεων.

Κεφάλαιο 3. Η πρόσκληση της ολοκληρωμένης σύνθεσης αλυσίδων προϊόντων

Οι Kokossis et al. (2015) αρχικά αντιμετώπισαν το πρόβλημα σύνθεσης και ολοκλήρωσης χρησιμοποιώντας δυαδικές μεταβλητές για τη χαρτογράφηση των χημικών μονοπατιών και την επιλογή διεργασιών, αποκλείοντας την συνύπαρξη ανταγωνιστικών διεργασιών στην τελική λύση. Το κενό αυτό αντιμετωπίστηκε σε επόμενη εργασία τους (Pyrgakis and Kokossis, 2019), όπου οι ροές χημικών των αλυσίδων και οι δυναμικότητες των διεργασιών αντιμετωπίζονται ως συνεχείς μεταβλητές (οριοθετούνται από τη διαθεσιμότητα των πρώτων υλών), επιτρέποντας την ενσωμάτωση ανταγωνιστικών διεργασιών προς όφελος των ενεργειακών στόχων ολοκλήρωσης. Επιπλέον, ενσωμάτωσαν τη δυνατότητα βελτιστοποίησης υποψήφιων επιπέδων ατμού, την αξιολόγηση ανταγωνιστικών τροφοδοσιών βιομάζας και την βελτιστοποίηση χρονικά μεταβαλλόμενων προβλημάτων ενεργειακής ολοκλήρωσης.

Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται τα συστήματα ανάλυσης BBR και TSR (Κεφάλαια 4 και 5), υποκαθιστώντας τη συμβατική γραφική ανάλυση με χρήση των SSSPs. Επίσης, εισάγονται νέες τεχνικές χρονοπρογραμματισμού βιοδιυλιστηρίων (Κεφάλαιο 6), σχεδιασμού τουρμπίνων συμπαραγωγής (Κεφάλαιο 7), και σύνθεσης πλήρως ενεργειακά ολοκληρωμένων συστημάτων απόσταξης (Κεφάλαιο 8).

Βιβλιογραφία

1. Pyrgakis, A.K., Kokossis, C.A., 2019. A Total Site Synthesis approach for the selection, integration and planning of multiple-feedstock biorefineries. *Comp. & Chem. Eng.*, 122, 326–355
2. Kokossis, C.A., Tsakalova, M., Pyrgakis, K., 2015. Design of integrated biorefineries. *Comp. & Chem.*, 81, 40–56

Κεφάλαιο 4.

Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών

Για την αντιμετώπιση του συνδυαστικού προβλήματος σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών εισάγονται δύο γενικευμένα συστήματα αναπαραστάσεων. Η πρώτη αφορά έναν γράφο χαρτογράφησης όλων των εφικτών επιλογών σύνθεσης μονάδων επεξεργασίας, με στόχο την ανάπτυξη κάθε εφικτής σύνδεσης μεταξύ υποψήφιων ανταγωνιστικών ή/και υφιστάμενων διεργασιών, οι οποίες εμφανίζουν κοινές ροές εισόδου-εξόδου. Η δεύτερη αναπαράσταση αφορά ένα αναβαθμισμένο σύστημα ενεργειακής ολοκλήρωσης, το οποίο ενσωματώνει κατάλληλα δυνατότητες άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης, ξεπερνώντας τους πρακτικούς περιορισμούς εφαρμογής των γραφικών μεθόδων ολοκλήρωσης της βιβλιογραφίας. Τόσο ο γράφος, όσο και τα μοντέλα ενεργειακής ολοκλήρωσης χρησιμοποιούν βαθμούς ελευθερίας που επιτρέπουν την ανταλλαγή ροών χημικών και ενέργειας μεταξύ οποιουδήποτε συνδυασμού (υποψήφιων/δεδομένων) διεργασιών με σκοπό την εύρεση των βέλτιστων συνδέσεων μεταξύ τους. Η μεθοδολογία συγχρονίζει κατάλληλα τις δύο αναπαραστάσεις για το εντοπισμό των πιο ελπιδοφόρων χαρτοφυλακίων διεργασιών και των αποδοτικότερων σεναρίων ολοκλήρωσής τους.

4.1. Γράφος Βιομάζας: Σύνθεση διεργασιών

Ο γράφος παρουσιάστηκε αρχικά από τους Kokossis et al. (2015), οι οποίοι θεμελίωσαν τα βασικά δομικά στοιχεία για την ανάλυση των αλυσίδων αξίας προϊόντων. Ο διμερής γράφος (BBR)

Κεφάλαιο 4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών

χρησιμοποιεί σύνολα για τις διεργασίες και τα προϊόντα των αλυσίδων και ορίζεται ως εξής:
 $BBR = (M, T, P, w)$, όπου:

- M αντιπροσωπεύει σημεία/κόμβους του γράφου, τα οποία αφορούν τα χημικά των αλυσίδων προϊόντων
- T αντιπροσωπεύει σημεία μετάβασης του γράφου, τα οποία αφορούν τις διεργασίες/τεχνολογίες των αλυσίδων προϊόντων
- P αντιπροσωπεύει βέλη του γράφου, που συνδέουν κατάλληλα τους κόμβους με τα σημεία μετάβασης.
- w αφορούν βάρη που αποδίδονται σε (δυαδικές) μεταβλητές απόφασης στη διατύπωση του προβλήματος.

Η παρούσα έκδοση του BBR βασίζεται στις προτάσεις των Kokossis et al. (2015), ωστόσο στο επόμενο Κεφάλαιο 5 η σημειογραφία και τα σύνολα επεκτείνονται (Pyrgakis and Kokossis, 2019) για την αντιμετώπιση προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού και επιλογής πολλαπλών τροφοδοσιών βιομάζας, πέραν του προβλήματος σύνθεσης διεργασιών που αντιμετωπίζεται στο παρόν κεφάλαιο.

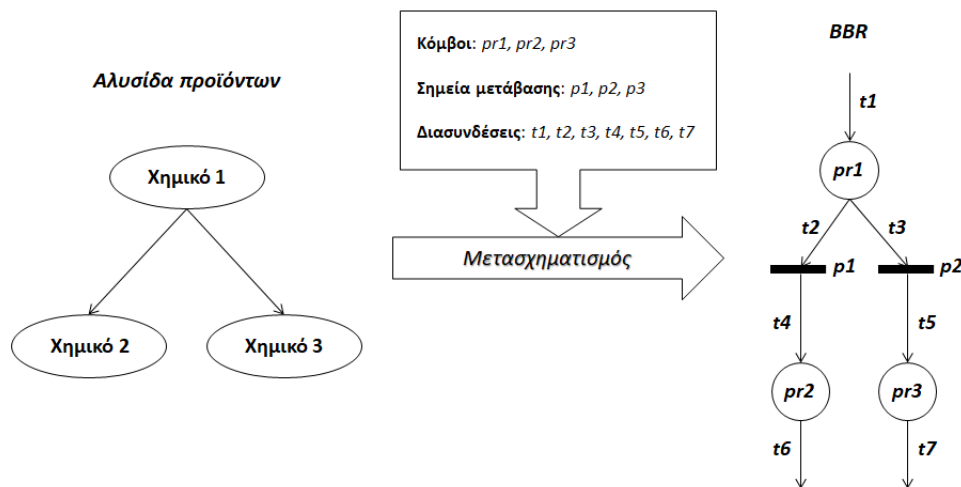
Κάθε αλυσίδα προϊόντων μπορεί να χαρτογραφηθεί ως ένα BBR. Οι κόμβοι (M) χρησιμοποιούνται για την διατύπωση των επιλογών συλλογής και διανομής χημικών της αλυσίδας προϊόντων, ενώ τα σημεία μετάβασης (T) αφορούν στάδια μετατροπής χημικών (διεργασίες) και περιγράφουν τους δρόμους αξιοποίησης της πρώτης ύλης και ενδιάμεσων χημικών. Ο γράφος BBR είναι απαραίτητος για την μετάφραση όλων των πιθανών διαδρομών που εμφανίζονται στις αλυσίδες προϊόντων υπό τη μορφή αναπαραστάσεων – όπως αυτές των υπερδομών – χρησιμοποιώντας συνδέσεις μεταξύ χημικών και διεργασιών για την καταγραφή των ροών χημικών και τη χαρτογράφηση όλων των εφικτών επιλογών σύνθεσης διεργασιών. Για την ανάπτυξη του BBR, εισάγονται τα ακόλουθα σύνολα:

- $P = \{p \mid p = 1, NP\}$, οι διεργασίες μετατροπής χημικών της αλυσίδας προϊόντων.
- $PR = \{pr \mid pr = 1, NPR\}$, τα χημικά που περιλαμβάνονται στην αλυσίδα προϊόντων και
- $T = \{t \text{ ή } t' \mid t = 1, NT\}$, οι διασυνδέσεις μεταξύ διεργασιών, p , και χημικών, pr , οι οποίες εκφράζουν την πορεία και τους ρυθμούς ροής χημικών από τις πρώτες ύλες προς ενδιάμεσα και τελικά προϊόντα της αλυσίδας.

Κεφάλαιο 4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών

Τα μεγέθη των συνόλων P, PR και T καθορίζονται από το μέγεθος των αλυσίδων προϊόντων.

Στα αριστερά του Σχήματος 4.1 παρουσιάζεται η κλασική μορφή στην οποία διατίθενται οι αλυσίδες προϊόντων, ενώ στα δεξιά απεικονίζονται τα χημικά μονοπάτια της αλυσίδας υπό τη μορφή αναπαράστασης BBR. Τα Χημικά 1, 2 και 3 αποδίδονται στους κόμβους προϊόντων $pr1$, $pr2$ και $pr3$, ενώ τα μονοπάτια-διεργασίες (Χημικό 1 προς Χημικό 2 και Χημικό 1 προς Χημικό 3) συμβολίζονται μέσω των μονάδων μετάβασης $p1$ και $p2$. Οι διασυνδέσεις $t1-t7$ αποτελούν τις απαραίτητες συνδέσεις μεταξύ κόμβων και διεργασιών για την απόδοση των ροών, όπως παρουσιάζονται στην αλυσίδα προϊόντων. Η αναπαράσταση και η διαδικασία ανάπτυξης του BBR είναι γενικευμένη και προσαρμόσιμη σύμφωνα με τους ειδικούς περιορισμούς κάθε τύπου αλυσίδας προϊόντων, είτε αφορά βιοδιυλιστήρια (1^{ης}, 2^{ης}, 3^{ης} γενιάς) ή άλλους τύπους βιομηχανίας (πετρελαιοειδών, φαρμάκων, τροφίμων, μετάλλων, κ.ά.).



Σχήμα 4.1: Μετασχηματισμός αλυσίδας προϊόντων σε μορφή BBR

Η χρήση αναπαραστάσεων BBR, έναντι των αλυσίδων προϊόντων, καθιστά εφικτή τη συστηματική καταγραφή όλων των εφικτών συνδέσεων μεταξύ ανταγωνιστικών, παράλληλων, δεδομένων και υποψήφιας αλυσίδων προϊόντων που αφορούν το συνολικό πρόβλημα, όπως π.χ. των αλυσίδων και των γραμμών παραγωγής του Σχήματος 1.1. Το BBR μπορεί να φιλοξενήσει διαφορετικά προβλήματα αλυσίδων προϊόντων, παραθέτοντας και επιτρέποντας εφικτές συνδέσεις μεταξύ τους – ακόμα και αν αφορούν διαφορετικές/ανταγωνιστικές τροφοδοσίες βιομάζας (θα συζητηθεί στο επόμενο Κεφάλαιο 6) – προετοιμάζοντας τις συνθήκες για την εφαρμογή τεχνικών ενεργειακής ολοκλήρωσης μεταξύ τους.

Κεφάλαιο 4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών

Οι διασυνδέσεις μεταξύ προϊόντων και διεργασιών επιτρέπουν την ανάπτυξη ισοζυγίων μάζας για την βελτιστοποίηση των συνδέσεων. Το BBR μπορεί να αντιμετωπίσει όλες τις πιθανές διασυνδέσεις ως βαθμούς ελευθερίας, ενώ στην περίπτωση που κάποιες από αυτές εφαρμόζονται με συγκεκριμένο τρόπο για πρακτικούς λόγους, ο χρήστης μπορεί να ορίσει ως δεδομένες επιλογές ή να απενεργοποιήσει τις αντίστοιχες διασυνδέσεις κατά το δοκούν.

Τα ισοζύγια μάζας εισόδου-εξόδου αναπτύσσονται γύρω από κάθε κόμβο (pr) και διεργασία (p) του BBR. Για αυτό το σκοπό, εισάγονται τα ακόλουθα υποσύνολα των διασυνδέσεων T , ως εξής:

- T_{pr}^{in} : διασύνδεση t που εισέρχεται στο κόμβο pr
- T_{pr}^{out} : διασύνδεση t που εξέρχεται από τον κόμβο pr
- T_p^{in} : διασύνδεση t που εισέρχεται στη διεργασία p
- T_p^{out} : διασύνδεση t που εξέρχεται από τη διεργασία p

Επίσης, εισάγεται ο ρυθμός ροής, F_t , κάθε διασύνδεσης t ως βασική (συνεχής) μεταβλητή απόφασης και επιλογής μονοπατιών κατά μήκος του BBR. Η ανάλυση προϋποθέτει γνωστούς και σταθερούς βαθμούς απόδοσης για κάθε υποψήφια διεργασία, είτε ως αποτέλεσμα προσομοίωσης είτε πραγματικών δεδομένων της βιομηχανίας, πειραμάτων, πιλότων κ.ά. Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου, η διαθεσιμότητα της βασικής τροφοδοσίας της αλυσίδας προϊόντων (όπως το $pr1$ του Σχήματος 4.1) θεωρείται σταθερή και γνωστή (π.χ. άχυρα σιταριού διαθεσιμότητας 100.000 tn/yr). Δεδομένων των συντελεστών μετατροπής κάθε διεργασίας του BBR και της διαθεσιμότητας των πρώτων υλών μπορούν να εκτιμηθούν οι μέγιστοι ρυθμοί ροής, \bar{F}_t , κάθε διασύνδεσης t ακολουθώντας όλες τις πιθανές διαδρομές κατά μήκος του BBR. Έστω, $A_t = \frac{1}{\bar{F}_t}$, τότε τα ισοζύγια μάζας που αναπτύσσονται γύρω από κάθε διεργασία του BBR έχουν την εξής μορφή:

$$A_t \cdot F_t = A_{t'} \cdot F_{t'} \quad \forall p \in P, t \in T_p^{in}, t' \in T_p^{out} \quad Eq. 4.1$$

Ακολούθως, τα ισοζύγια μάζας γύρω από κάθε κόμβο του BBR δίνονται ως εξής:

$$\sum_{t \in T_{pr}^{in}} F_t = \sum_{t \in T_{pr}^{out}} F_t + F_{pr} \quad \forall pr \in PR \quad Eq. 4.2$$

Κεφάλαιο 4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών

όπου F_{pr} αντιπροσωπεύει το ρυθμό ροής εξόδου του χημικού pr εκτός BBR ως τελικό προϊόν και χρησιμοποιείται για λόγους χαλάρωσης της εξίσωσης Eq.4.2 σε περιπτώσεις μελέτης κερδοφορίας.

Δυναμικές μεταβλητές, y_t , εισάγονται για την επιλογή κάθε διασύνδεσης t ελέγχοντας τη ροή χημικών κατά μήκος του BBR. Όταν επιλέγεται μία διασύνδεση, ο ρυθμός ροής F_t οριοθετείται από τον μέγιστο ρυθμό \bar{F}_t και τον ελάχιστο ρυθμό F_t^{LB} – για την αποφυγή επιλογής πολύ μικρών και μη πρακτικών λύσεων – ο οποίος ορίζεται ως ποσοστό του μέγιστου ρυθμού (\bar{F}_t), π.χ. 10% του μέγιστου ρυθμού ροής. Ακολούθως, εισάγονται οι λογικοί περιορισμοί:

$$F_t \geq y_t \cdot F_t^{LB} \cdot \bar{F}_t \quad \forall t \in T \quad \text{Eq. 4.3}$$

$$F_t \leq y_t \cdot \bar{F}_t \quad \forall t \in T \quad \text{Eq. 4.4}$$

Τα ισοζύγια μάζας κατά μήκος κάθε BBR εκφράζονται μέσω των εξισώσεων Eq.4.1-Eq.4.4 και χρησιμοποιούνται για την επιλογή και τη ρύθμιση των ροών και των δυναμικοτήτων των διεργασιών καθορίζοντας τις ροές εισόδου-εξόδου κάθε διεργασίας. Ακολούθως, τα ενεργειακά περιεχόμενα θερμών (Q_p^H) και ψυχρών (Q_p^C) ρευμάτων των επιλεγμένων διεργασιών ρυθμίζονται σύμφωνα με τις επιλεγμένες δυναμικότητες – συγκεκριμένα τις ροές εξόδου των διεργασιών – και υποθέτοντας γραμμική σχέση μεταξύ της δυναμικότητας και της ενεργειακής κατανάλωσης, ως εξής:

$$Q_p^{H/C} = F_t \cdot A_t \cdot \overline{Q_p^{H/C}} \quad \forall p \in P, t \in T_p^{out} \quad \text{Eq. 4.5}$$

όπου τα $\overline{Q_p^{H/C}}$ αντιπροσωπεύουν τα ενεργειακά περιεχόμενα θερμών/ψυχρών ρευμάτων, όταν η διεργασία λειτουργεί σε συνθήκες μέγιστης δυναμικότητας, δηλαδή για $F_t = \bar{F}_t$, $\forall p \in P, t \in T_p^{out}$. Ο όρος $A_t \cdot \overline{Q_p^{H/C}}$ της Eq.4.5 αντικατοπτρίζει την ενεργειακή κατανάλωση των ρευμάτων ανά μονάδα

δυναμικότητας της διεργασίας $\left[\frac{MW}{kg \text{ εξόδου} / hr} \text{ ή } \frac{MJ}{kg \text{ εξόδου}} \right]$ και αποτελεί παράμετρο της διεργασίας, η οποία προκύπτει από προσομοιώσεις, πραγματικά αποτελέσματα της βιομηχανίας ή κλιμάκωση πειραμάτων.

Στην ειδική περίπτωση, όπου μία διεργασία παρουσιάζει πολλαπλά προϊόντα, τότε το ενεργειακό περιεχόμενο των θερμών/ψυχρών ρευμάτων υπολογίζεται κατ' αναλογία κάθε προϊόντος εξόδου ($\overline{Q_{pr,p}^{H/C}}$) της διεργασίας, ως εξής:

$$Q_p^{H/C} = \sum_{pr \in PR_p} \left(\overline{Q_{pr,p}^{H/C}} \cdot \sum_{t \in T_{pr}^{out}} F_t \cdot A_t \right) \quad \forall p \in P \quad Eq. 4.6$$

όπου $PR_p \in PR$ και περιλαμβάνει τα προϊόντα που παράγει η διεργασία p .

Οι εξισώσεις Eq.4.5 και Eq.4.6 συνδέουν το πρόβλημα σύνθεσης διεργασιών του BBR με την ενεργειακή ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας επιτρέποντας την αντιμετώπιση των διεργασιών και της ενεργειακής συνεισφοράς τους ($Q_p^{H/C}$) ως επιπλέον βαθμούς ελευθερίας του προβλήματος ολοκλήρωσης.

4.2. Αναπαράσταση Ολοκλήρωσης Συνολικής Μονάδας

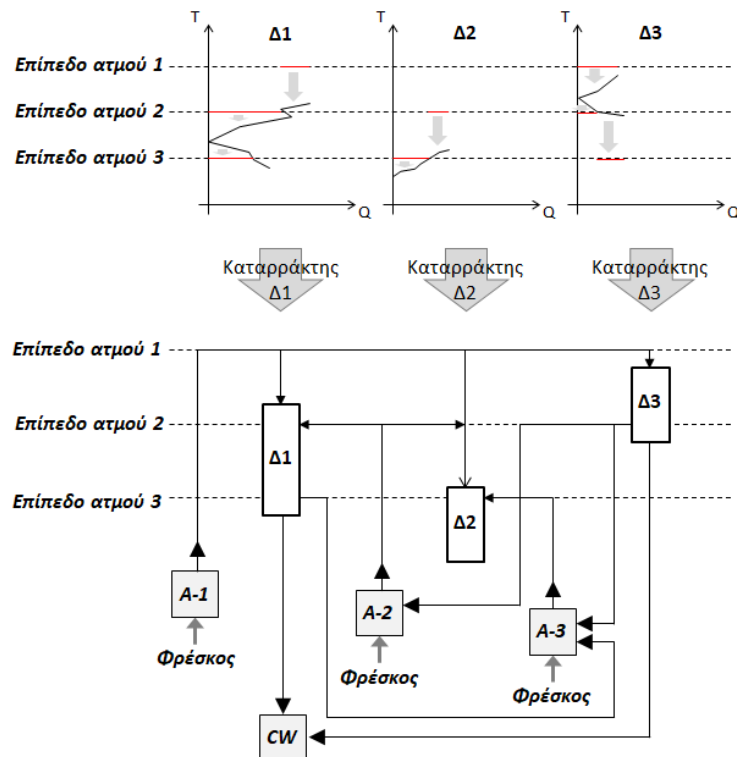
Η Αναπαράσταση Ολοκλήρωσης Συνολικής Μονάδας ενσωματώνει διαδικασίες άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης σε ένα ενιαίο σύστημα ανάλυσης, το οποίο υποστηρίζει όλες τις επιλογές διαχείρισης θερμότητας και επιτρέπει τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος ολοκλήρωσης πολλαπλών-διεργασιών για την εύρεση ενεργειακών στόχων. Υπάρχει ήδη εκτεταμένη βιβλιογραφία θερμοδυναμικών μεθόδων και μαθηματικών μοντέλων που αφορούν την εφαρμογή άμεσης ολοκλήρωσης, από τα οποία έχουν επικρατήσει τα μοντέλα μεταφόρτωσης (transshipment) και μεταφοράς (transportation). Η περίπτωση της έμμεσης ολοκλήρωσης αντιμετωπίζεται με τεχνικές γραφικής ανάλυσης (SSSP), ενώ το μοντέλο των Shang and Kokossis (2004) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μαθηματική διατύπωση των ισοζυγίων ενέργειας στα θερμοκρασιακά ενδιάμεσα των γραμμών των SSSP. Η μεθοδολογία των Shang and Kokossis (2004) αντλεί απευθείας δεδομένα (θερμές και ψυχρές παροχές), όπως αυτά αποτυπώνονται στο διάγραμμα SSSP, το οποίο προκύπτει ύστερα από άμεση ολοκλήρωση γνωστών διεργασιών. Ωστόσο, η προσέγγιση ολοκλήρωσης δεν ενσωματώνει ενεργειακές διαδικασίες άμεσης ολοκλήρωσης και αντιμετωπίζει τα SSSP ως παραμέτρους του προβλήματος, αδυνατώντας να αντιμετωπίσει συνθήκες μεταβαλλόμενων διεργασιών στη Συνολική Μονάδα. Οι τεχνικές έμμεσης ολοκλήρωσης πολλαπλών-διεργασιών της βιβλιογραφίας έχουν εφαρμοστεί αποκλειστικά για ένα δεδομένο σύνολο διεργασιών και αδυνατούν να αντιμετωπίσουν περιπτώσεις μεταβαλλόμενων SSSP, όπου οι διεργασίες αποτελούν επιπλέον βαθμούς ελευθερίας.

Για την ταυτόχρονη αντιμετώπιση της άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης, η μεθοδολογία βασίζεται στην θεωρία των κλασικών ενεργειακών καταρρακτών (βλ. Σχήμα 2.4) και αξιοποιεί τεχνικές ενεργειακής μεταφόρτωσης για την μαθηματική διατύπωση του προβλήματος ενεργειακής ανταλλαγής μεταξύ πηγών-ατμού-καταβοθρών.

Κεφάλαιο 4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών

Το Σχήμα 4.2 παρουσιάζει την ολοκλήρωση μίας Συνολικής Μονάδας τριών διεργασιών. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα GCC κάθε διεργασίας, καθώς και οι ενεργειακοί καταρράκτες σε σχέση με τα επίπεδα ατμού και κρύου νερού που εφαρμόζονται για θέρμανση και ψύξη. Ύστερα από επισκόπηση των GCC εντοπίζονται τα ενεργειακά διαθέσιμα (κάτω από τα pinch των διεργασιών) που μπορούν να αξιοποιηθούν για παραγωγή ατμού και προκύπτουν τα ακόλουθα ενεργειακά συμπεράσματα για κάθε διεργασία:

- Η Δ1 λαμβάνει ατμό από τα επίπεδα 1 και 2 και δύναται να παράξει ατμό επιπέδου 3.
- Η Δ2 λαμβάνει ατμό από τα επίπεδα 2 και 3 και δεν δύναται να παράξει ατμό.
- Η Δ3 λαμβάνει ατμό επιπέδου 1 και δύναται να παράξει ατμό στα επίπεδα 2 και 3.



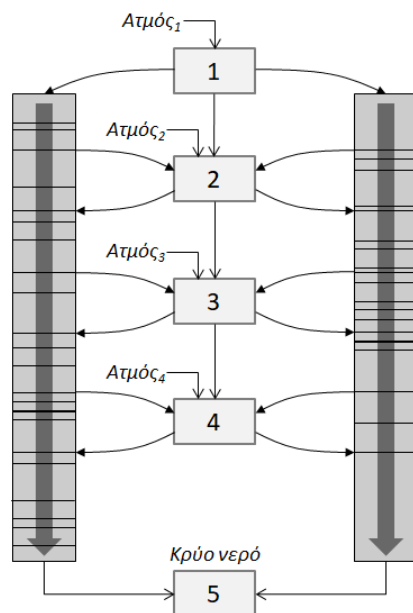
Σχήμα 4.2: Παράδειγμα ενεργειακής διασύνδεσης ενεργειακών καταρρακτών 3 διεργασιών (Συνολική Μονάδα) μέσω των επιπέδων ατμού

Στην περίπτωση του Σχήματος 4.2 περίσσεια θερμότητα διατίθενται από τις Δ1 και Δ3. Σύμφωνα με αυτές τις επιλογές προκύπτουν όλες οι εφικτές συνδέσεις μεταξύ των καταρρακτών μέσω των επιπέδων 1, 2 και 3 όπως φαίνονται στο κάτω μέρος του Σχήματος 4.2. Ενεργειακές ροές εξέρχονται

Κεφάλαιο 4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών

από τους καταρράκτες των Δ1 και Δ3, αντλώντας υπόλοιπα θερμότητας που εντοπίζονται στα αντίστοιχα ενδιάμεσα των καταρρακτών τροφοδοτώντας με θερμότητα το 2^ο και 3^ο επίπεδο ατμού, αντίστοιχα, παράγοντας ατμό. Ο παραγόμενος ατμός προστίθεται στον φρέσκο ατμό (κόστος θέρμανσης) και διατίθεται προς όλες τις διεργασίες. Τέλος, ατμός των επιπέδων 1, 2 και 3 τροφοδοτείται προς τα αντίστοιχα ενδιάμεσα των καταρρακτών και των τριών διεργασιών, ενώ ενεργειακά υπόλοιπα χαμηλής θερμικής αξίας (δεν ευδοκιμούν για παραγωγή ατμού) απομακρύνονται μέσω του κρύου νερού ψύξης (CW).

Οι ενεργειακές ροές κατά μήκος των καταρρακτών (αφορούν άμεση ολοκλήρωση) διατυπώνονται με τη χρήση μοντέλων μεταφόρτωσης. Παράλληλα, ενεργειακά διαθέσιμα των υπολοίπων εξάγονται από τους καταρράκτες και επαναχρησιμοποιούνται σε άλλους καταρράκτες για σκοπούς έμμεσης ολοκλήρωσης αναπτύσσοντας ενεργειακές γέφυρες που συνδέουν τους καταρράκτες μεταξύ τους μέσω των επιπέδων ατμού. Η εννοιολογική βάση διατύπωσης της έμμεσης ολοκλήρωσης ανάμεσα σε τουλάχιστον δύο οποιουσδήποτε καταρράκτες παρουσιάζεται μέσω του Σχήματος 4.3.



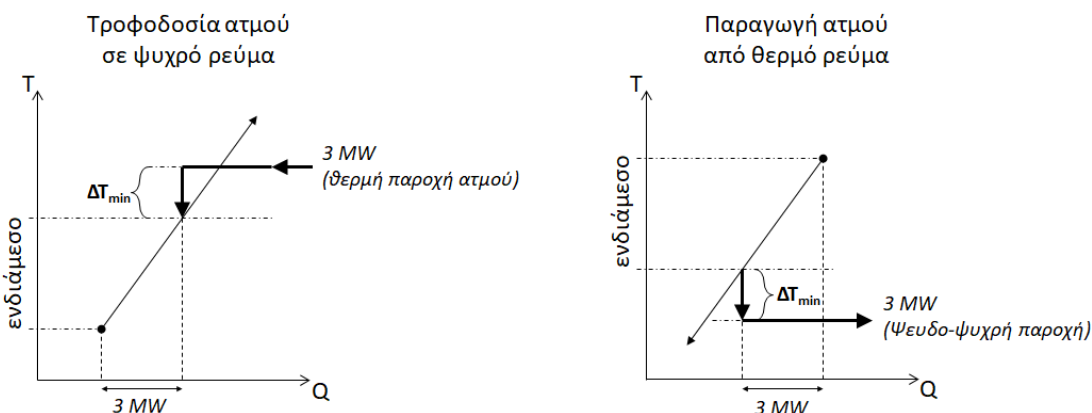
Σχήμα 4.3: Γενικευμένη αναπαράσταση ενεργειακής διασύνδεσης 2 καταρρακτών μίας Συνολικής Μονάδας (2 διεργασιών) μέσω των επιπέδων ατμού

Κατά τη συμβατική μεθοδολογία άμεσης ολοκλήρωσης, κάθε καταρράκτης του Σχήματος 4.3 αναλαμβάνει την ολοκλήρωση των θερμών-ψυχρών ρευμάτων στα θερμοκρασιακά ενδιάμεσα κάθε διεργασίας. Η έμμεση ολοκλήρωση διεξάγεται διάμεσου του δικτύου θερμών παροχών στα επίπεδα

Κεφάλαιο 4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών

ατμού 2, 3 και 4 του Σχήματος 4.3. Περίσσεια θερμότητα θερμών ρευμάτων – που δεν ολοκληρώνεται άμεσα με ψυχρά ρεύματα της διεργασίας – και των δύο διεργασιών αξιοποιείται για παραγωγή ατμού στα θερμοκρασιακά επίπεδα που διατίθεται η θερμότητα. Ο παραγόμενος ατμός κάθε επιπέδου μπορεί να είτε διανεμηθεί στους καταρράκτες αντικαθιστώντας ανάγκες φρέσκου ατμού του ίδιου επιπέδου, είτε να καταρρεύσει σε χαμηλότερα επίπεδα ατμού για τον ίδιο σκοπό. Η επιλογή της ενεργειακής κατάρρευσης είναι ισοδύναμη με την εκτόνωση ατμού υψηλότερης προς χαμηλότερη πίεση και μπορεί να αξιοποιηθεί για την εκτίμηση της συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση τουρμπίνων.

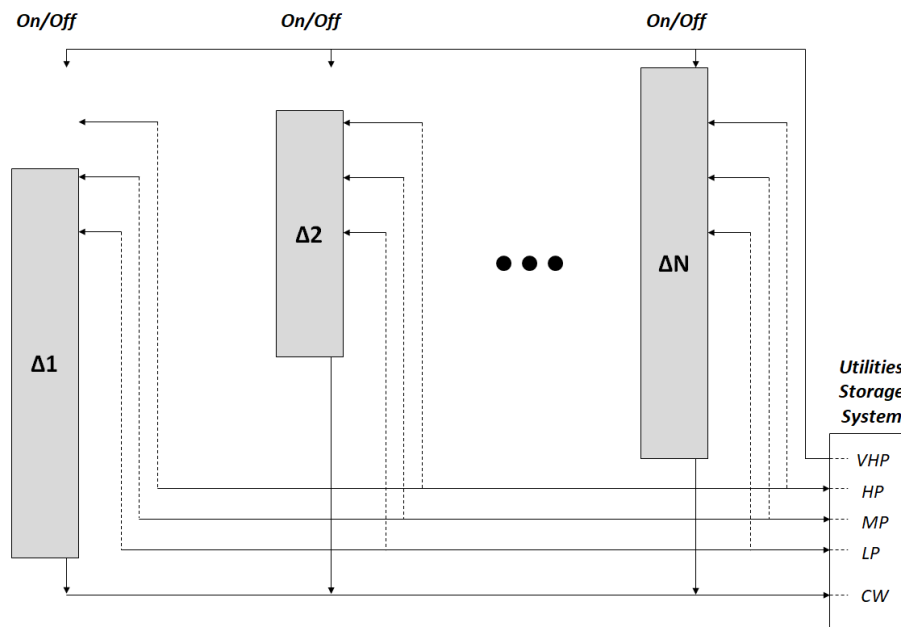
Βάση σύμβασης, η εξαγωγή θερμότητας από τα θερμοκρασιακά ενδιάμεσα των καταρρακτών πραγματοποιείται μέσω ψυχρών παροχών. Αναλόγως, η άντληση θερμότητας σε υψηλές θερμοκρασίες με σκοπό την παραγωγή ατμού – όπου δεν έχει πρακτική σημασία η εφαρμογή πραγματικών παροχών ψύξης (π.χ. κρύο νερό) – διεξάγεται μέσω ψευδο-ψυχρών βοηθητικών παροχών, οι οποίες αντιστοιχίζονται με τα επίπεδα ατμού. Για κάθε επίπεδο ατμού, υπάρχει ένα επίπεδο ψευδο-ψυχρής παροχής που μπορεί να αντλήσει θερμότητα από τις διεργασίες για την παραγωγή ατμού του ίδιου επιπέδου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4. Δεδομένης της ελάχιστης θερμοκρασιακής διαφοράς, ΔT_{min} , τα επίπεδα ατμού τροφοδοτούν ενέργεια σε θερμοκρασιακά ενδιάμεσα των καταρρακτών χαμηλότερα της θερμοκρασίας ατμού κατά ΔT_{min} , ενώ οι ψευδο-ψυχρές παροχές αντλούν θερμότητα από ενδιάμεσα υψηλότερα της θερμοκρασίας ατμού κατά ΔT_{min} . Σύμφωνα με τις παραπάνω συμβάσεις καθορίζεται το εννοιολογικό πλαίσιο μετάφρασης της περίσσειας θερμότητας σε παραγόμενο ατμό προετοιμάζοντας τη γενίκευση των διασυνδέσεων μεταξύ καταρρακτών.



Σχήμα 4.4: Παροχή θερμότητας (αριστερά) σε ψυχρό ρεύμα μέσω θερμών παροχών και άντληση θερμότητας (δεξιά) από θερμό ρεύμα μέσω ψευδο-ψυχρών παροχών

Κεφάλαιο 4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών

Οι διασυνδέσεις των καταρρακτών του παραδείγματος του Σχήματος 4.3 μπορούν να γενικευτούν για πολλά επίπεδα ατμού και πολλούς καταρράκτες παίρνοντας τη μορφή του Σχήματος 4.5. Κάθε καταρράκτης αναλαμβάνει την άμεση ολοκλήρωση των ρευμάτων κάθε διεργασίας, ενώ η έμμεση διεξάγεται μέσω των επιπέδων του Συστήματος Βοηθητικών Παροχών (Utilities Storage Systems – **USS**), το οποίο περιλαμβάνει όλα τα επίπεδα ατμού, ψευδο-ψυχρών και ψυχρών παροχών της Συνολικής Μονάδας. Τα επίπεδα παροχών του USS εποπτεύουν τα ενδιάμεσα κάθε καταρράκτη με τα οποία συσχετίζονται σύμφωνα με τους θερμοδυναμικούς περιορισμούς που ορίζονται από το επιλεχθέν ΔT_{\min} (βλ. Σχήμα 4.4) με σκοπό τη συλλογή περίσσειας ενέργειας, την οποία μεταφράζει (το USS) σε ατμό. Στην περίπτωση όπου οι διεργασίες του Σχήματος 4.5 αφορούν χημικά μονοπάτια αλυσίδων προϊόντων, κάθε καταρράκτης αποτελεί βαθμό ελευθερίας, και το ενεργειακό περιεχόμενό του καθορίζεται από τις επιλογές του BBR (Eq.4.1-Eq.4.4) και ρυθμίζεται μέσω των εξισώσεων Eq.4.5 και Eq.4.6. Στο Σχήμα 4.5, οι ενεργειακές ροές κατά μήκος κάθε καταρράκτη σε συνδυασμό με τις ενεργειακές ροές (περιφερειακά των καταρρακτών), που συνδέουν τους καταρράκτες μεταξύ τους μέσω του USS, διαμορφώνουν το ισοδύναμο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στα διαγράμματα SSSP.

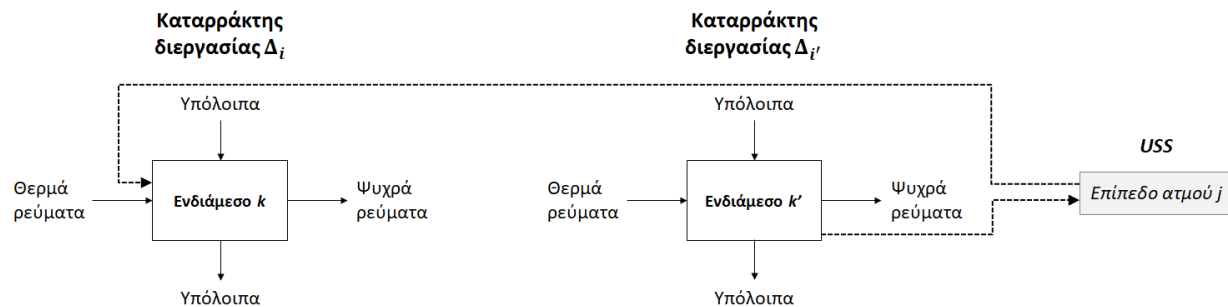


Σχήμα 4.5: Γενικευμένη αναπαράσταση πολλαπλών-καταρρακτών για την ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας

Η περίσσεια θερμότητα και οι ανάγκες θέρμανσης των καταρρακτών του Σχήματος 4.5 συγκεντρώνονται και εκφράζονται στο USS, όπου και υπολογίζεται η αλληλοεπικάλυψή τους. Η

Κεφάλαιο 4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών

κατάσταση αυτή απαιτεί κοινές εισερχόμενες και εξερχόμενες ροές από και προς τα ενδιάμεσα και τα επίπεδα του USS. Εξερχόμενες ροές (ψευδο-ψυχρές παροχές) από τα ενδιάμεσα των καταρρακτών εξάγουν θερμότητα και εισέρχονται στα επίπεδα του USS, ενώ εξερχόμενες ροές (θερμές παροχές) από τα επίπεδα του USS, εισέρχονται στα ενδιάμεσα όλων των καταρρακτών υποδεικνύοντας τις ανάγκες θέρμανσης. Η επέκταση του κλασσικού Σχήματος 2.5 άμεσης ολοκλήρωσης για την περιγραφή της παραπάνω κατάστασης (έμμεσης ολοκλήρωσης) σε ένα οποιοδήποτε ενδιάμεσο των καταρρακτών και ένα οποιοδήποτε επίπεδο του USS παίρνει τη μορφή του Σχήματος 4.6. Η σύνδεση των καταρρακτών μεταξύ τους απαιτεί την προσθήκη ενεργειακών ροών (σε σχέση με το Σχήμα 2.5), οι οποίες εξάγουν και εισάγουν θερμότητα σε κάθε ενδιάμεσο. Θερμότητα εξάγεται τόσο με κατεύθυνση από τα ενδιάμεσα προς τα επίπεδα του USS για παραγωγή ατμού, όσο και από το USS προς τα ενδιάμεσα τροφοδοτώντας ατμό θέρμανσης. Σημειώνεται, η θερμοκρασιακή διαφορά τόσο μεταξύ του ενδιάμεσου k' της διεργασίας Δ_i και του ατμού j , όσο και του ατμού j από το ενδιάμεσο k της διεργασίας Δ_i , είναι τουλάχιστον ΔT_{\min} . Συνολικά, η θερμοκρασιακή διαφορά έμμεσης ολοκλήρωσης μεταξύ των ενδιάμεσων k' και k του Σχήματος 4.6 είναι τουλάχιστον $2 \cdot \Delta T_{\min}$.

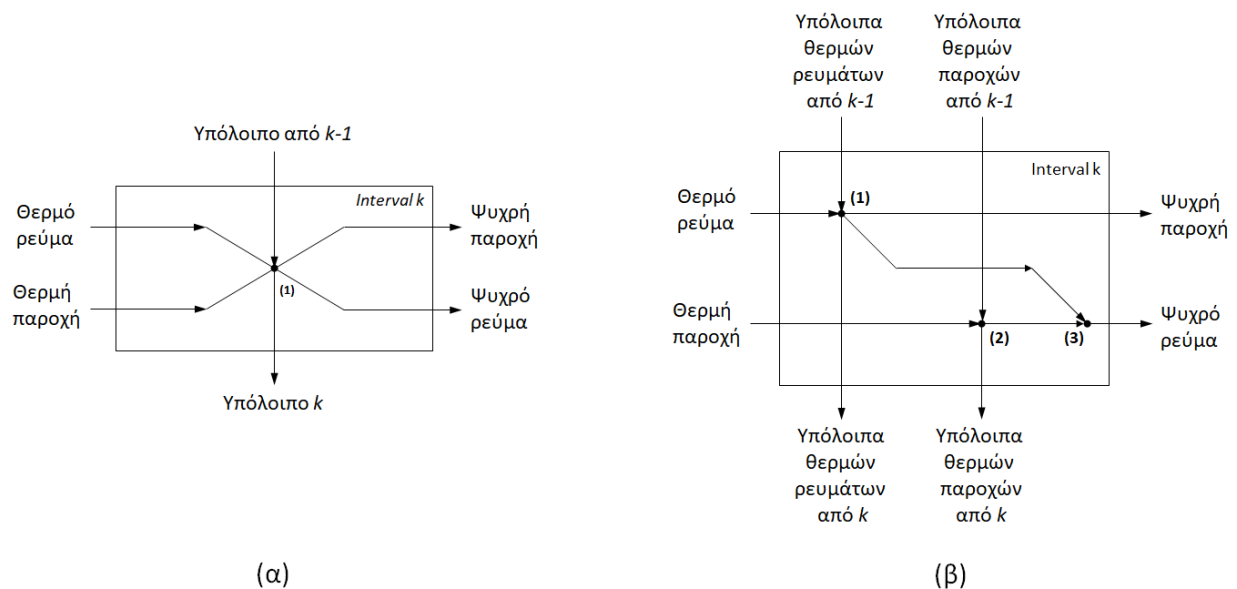


Σχήμα 4.6: Διασυνδεδεμένα θερμοκρασιακά ενδιάμεσα διαφορετικών καταρρακτών (της αναπαράστασης ολοκλήρωσης πολλαπλών-καταρρακτών) μέσω των επιπέδων του συστήματος βοηθητικών παροχών USS.

Στη βιβλιογραφία εντοπίζονται δύο εναλλακτικές διατυπώσεις μοντέλων μεταφόρτωσης (Paroulias and Grossmann, 1983; Biegler et al., 1997) για την περιγραφή των ισοζυγίων ενέργειας σε κάθε θερμοκρασιακό ενδιάμεσο και την εφαρμογή άμεσης ολοκλήρωσης. Η πρώτη (απλή προσέγγιση, βλ. Σχήμα 4.7α) στοχεύει στην ενεργειακή αποσυμφόρηση του καταρράκτη λαμβάνοντας υπόψη αποκλειστικά τη λογιστική διαφορά της συνεισφερόμενης θερμότητας θερμών και ψυχρών ρευμάτων στον κόμβο (1). Η δεύτερη (πιο αναλυτική προσέγγιση, βλ. Σχήμα 4.7β) λαμβάνει υπόψη όλες τις επιλογές ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ ρευμάτων και παροχών, χρησιμοποιώντας αναλυτικές ροές

Κεφάλαιο 4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών

για την ανταλλαγή θερμότητας θερμών-ψυχρών ρευμάτων (κόμβος 1), θερμών ρευμάτων-ψυχρών παροχών (κόμβος 1) και θερμών παροχών-ψυχρών ρευμάτων (κόμβος 3). Παράλληλα, οι κόμβοι 1 και 2 συγκεντρώνουν ενεργειακά διαθέσιμα θερμών ρευμάτων και παροχών, αντίστοιχα, από υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας. Οι βέλτιστες βοηθητικές παροχές που υπολογίζονται και στις δύο περιπτώσεις είναι ίδιες, ωστόσο η αναλυτική προσέγγιση (Σχήμα 4.7β) προσφέρει επιπλέον πληροφορίες και κατευθύνσεις αναφορικά με το δίκτυο εναλλακτών που απαιτούνται σε μετέπειτα απαιτητικά στάδια σχεδιασμού. Επίσης, το πεδίο ορισμού του αναλυτικού σχήματος ολοκλήρωσης (Σχήμα 4.7β) είναι ιδιαίτερα μεγαλύτερο από αυτό του Σχήματος 4.7α με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μεγαλύτερες υπολογιστικές απαιτήσεις και χρόνους επίλυσης.



Σχήμα 4.7: Απλοποιημένο (α) και λεπτομερές (β) μοντέλο μεταφόρτωσης για κάθε θερμοκρασιακό ενδιάμεσο ενός καταρράκτη διεργασίας (από Biegler et al., 1997).

Τα κλασσικά σχήματα ολοκλήρωσης των Σχημάτων 4.7α και 4.β εφαρμόζονται αποκλειστικά για σκοπούς άμεσης ολοκλήρωσης και καθορίζουν τις ροές και τα ισοζύγια ενέργειας κατά μήκος των ενδιάμεσων ενός καταρράκτη μίας διεργασίας. Κάθε σχήμα ολοκλήρωσης (είτε το απλουστευμένο είτε το αναλυτικό) μπορεί να εφαρμοστεί για την περιγραφή των ενεργειακών ροών κάθε καταρράκτη κάθε διεργασίας της Συνολικής Μονάδας του Σχήματος 4.5. Σύμφωνα με τη συζήτηση του Σχήματος 4.6, η έμμεση ολοκλήρωση απαιτεί ενεργειακές συνδέσεις μεταξύ διαφορετικών ενδιάμεσων διαφορετικών καταρράκτων. Ο σκοπός των συνδέσεων είναι η εξαγωγή θερμότητας από τα ενδιάμεσα κάποιων

Κεφάλαιο 4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών

καταρρακτών για παραγωγή ατμού και η επαναφορά της θερμότητας ατμού σε άλλα ενδιάμεσα άλλων καταρρακτών. Τον ρόλο αυτό μπορούν να παίξουν οι ψυχρές και θερμές παροχές που εφαρμόζονται στα κλασσικά Σχήματα 4.7α και 4.7β της βιβλιογραφίας.

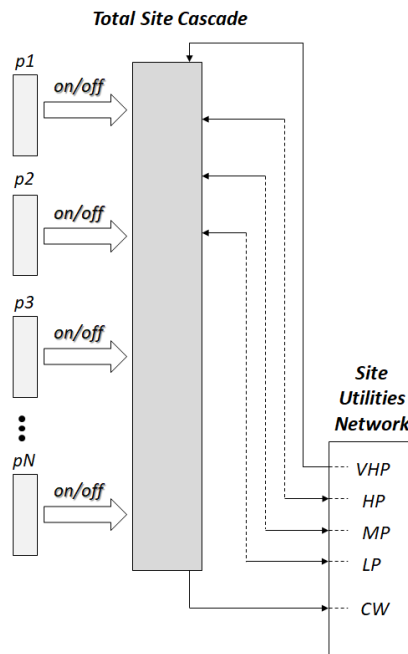
Τα ενεργειακά φορτία θερμών ρευμάτων που εξάγονται μέσω ψυχρών παροχών στους κόμβους 1 των Σχημάτων 4.7α και 4.7β αντικατοπτρίζουν τα περιθώρια παραγωγής ατμού από τις διεργασίες της Συνολικής Μονάδας. Τα φορτία αυτά μπορούν να τροφοδοτούν τα επίπεδα του USS, από όπου παραγόμενος και φρέσκος ατμός μπορούν να τροφοδοτηθούν προς όλους τους καταρράκτες μέσω των θερμών παροχών στον κόμβο 1 του Σχήματος 4.7α ή στον κόμβο 2 του Σχήματος 4.7β. Έτσι, τα συμβατικά σχήματα ολοκλήρωσης, ύστερα από κατάλληλες τροποποιήσεις και επεκτάσεις, μπορούν να αξιοποιηθούν για την προσέγγιση των ενεργειακών ροών που παρουσιάζονται στην έμμεση ολοκλήρωση του Σχήματος 4.6.

Το απλουστευμένο Σχήμα 4.7α αποτελεί ιδανική λύση για την γρήγορη ενεργειακή στόχευση Συνολικών Μονάδων σε πρώιμα στάδια ανάλυσης και σχεδιασμού. Το σχήμα θα πρέπει να εφαρμόζεται ξεχωριστά για κάθε ενεργειακό καταρράκτη του Σχήματος 4.5. Τα ρεύματα κάθε διεργασίας συνεισφέρουν στα ενδιάμεσα κάθε καταρράκτη διασφαλίζοντας του κανόνες άμεσης ολοκλήρωσης, ενώ διαθέσιμη θερμότητα ρευμάτων των καταρρακτών συγκεντρώνονται στο USS μέσω περιφερειακών ροών. Η άμεση ολοκλήρωση μεταξύ ρευμάτων διαφορετικών διεργασιών αποφεύγεται, καθώς τα ρεύματα κάθε διεργασίας συνεισφέρουν σε διαφορετικούς καταρράκτες της Συνολικής μονάδας και οι διεργασίες ανταλλάσσουν θερμότητα μόνο μέσω του USS. Ωστόσο, η χρήση του αναλυτικού σχεδίου ολοκλήρωσης του Σχήματος 4.7β, προσφέρει δυνατότητες για μία εναλλακτική παρουσίαση των ενεργειακών ροών της έμμεσης ολοκλήρωσης.

Το αναλυτικό σχήμα ολοκλήρωσης μπορεί να επιτρέψει τη συνεισφορά των ρευμάτων όλων των διεργασιών στο ίδιο θερμοκρασιακό ενδιάμεσο και η άμεση ολοκλήρωση ρευμάτων διαφορετικών διεργασιών μπορεί να αποφευχθεί απενεργοποιώντας τις αντίστοιχες ροές που συνδέουν τους κόμβους (1)-(3) (βλ. Σχήμα 4.7β). Δηλαδή, θα επιτρέπονται μόνον οι ροές που αφορούν ρεύματα ίδιας διεργασίας. Έτσι, η άμεση ολοκλήρωση των ρευμάτων κάθε διεργασίας και τα διαφορετικά (παράλληλα) προβλήματα ενεργειακής αποσυμφόρησης κάθε διεργασίας μπορούν να εφαρμοστούν ταυτόχρονα χωρίς να επηρεάζονται μεταξύ τους κατά μήκος ενός ενιαίου καταρράκτη, υποκαθιστώντας το σχήμα πολλαπλών-καταρρακτών του Σχήματος 4.5. Περίσσεια θερμότητα θερμών ρευμάτων που εντοπίζεται σε κάθε μεμονωμένο πρόβλημα αποσυμφόρησης (που φιλοξενεί ο καταρράκτης) μπορεί να εξαχθεί μέσω ψυχρών παροχών από τον καταρράκτη, να μεταφραστεί σε παραγόμενο ατμό στο USS

Κεφάλαιο 4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών

και να ενταχθεί πίσω στον καταρράκτη μέσω του κόμβου 2 (Σχήμα 4.7β) με τη μορφή θερμής παροχής, ώστε να χρησιμοποιηθεί ελεύθερα από όλες τις διεργασίες που συνεισφέρουν στο αντίστοιχο θερμοκρασιακό ενδιάμεσο. Η χρήση του αναλυτικού σχήματος ολοκλήρωσης επιτρέπει τη συγχώνευση των πολλαπλών-καταρρακτών του Σχήματος 4.5 στον ενιαίο καταρράκτη του Σχήματος 4.8, ο οποίος μπορεί επίσης εφαρμόζει ταυτόχρονα άμεση και έμμεση ολοκλήρωση.



Σχήμα 4.8: Γενικευμένος ενιαίος καταρράκτης (Total Site Cascade) ολοκλήρωσης Συνολικής Μονάδας

Το εναλλακτικό πρότυπο ολοκλήρωσης του Σχήματος 4.8 προσφέρει επιπλέον βαθμούς ελευθερίας, ικανοί να αντιμετωπίσουν πιο σύνθετα και εξειδικευμένα προβλήματα (έναντι του Σχήματος 4.5), παραδείγματος χάριν την άμεση ολοκλήρωση ρευμάτων ακόμα και διαφορετικών διεργασιών για πρακτικούς (ή/και χωροταξικούς) λόγους που μπορεί να ορίζονται από το πρόβλημα, όπως την αποφυγή υποβάθμισης μεγάλων ενεργειακών φορτίων μέσω της παραγωγής ατμού. Όταν το πρόβλημα αντιμετωπίζει τέτοιους ειδικούς περιορισμούς, οφείλεται να εφαρμόζεται η αναπαράσταση ενιαίου καταρράκτη του Σχήματος 4.8 εκμεταλλευόμενη τη συνεισφορά όλων των ρευμάτων των διεργασιών εντός το ίδιου ενδιάμεσου, και όχι του συστήματος πολλαπλών-καταρρακτών (Σχήμα 4.5), το οποίο είναι κατάλληλο για εφαρμογές που ακολουθούν αυστηρά τους κανόνες άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης.

Κεφάλαιο 4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών

Τα δύο σχήματα ενεργειακής μεταφόρτωσης επιτρέπουν τη διατύπωση του συνδυαστικού προβλήματος άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης μέσω δύο εναλλακτικών αναπαραστάσεων, αναλόγως τις ανάγκες και τους πρακτικούς περιορισμούς του σχεδιαστικού προβλήματος:

- **Total Site Representation-1:** Την αναπαράσταση πολλαπλών-καταρρακτών (multi-cascade representation) του Σχήματος 4.5, όπου διαφορετικοί καταρράκτες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους προσφέροντας και λαμβάνοντας θερμότητα, επιτρέποντας βαθμούς ελευθερίας για την ύπαρξη, ή μη, των καταρρακτών/διεργασιών και την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ τους. Η ανάπτυξη των ενεργειακών ροών κατά μήκος κάθε καταρράκτη βασίζεται στις έννοιες του απλοποιημένου μοντέλου μεταφόρτωσης (Σχήμα 4.7α) και είναι κατάλληλη για γρήγορη επισκόπηση ενεργειακών στόχων και αυστηρή εφαρμογή άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης. Η άμεση ολοκλήρωση κάθε διεργασίας διασφαλίζεται εντός κάθε καταρράκτη, ενώ έμμεση ολοκλήρωση επιτρέπεται μέσω του USS, μέσω του οποίου επικοινωνούν οι καταρράκτες. Υπό το πρίσμα άγνωστων και υποψήφιων διεργασιών, κάθε καταρράκτης θα συνεισφέρει στην αναπαράσταση σύμφωνα με τις επιλογές και τη δυναμικότητα των διεργασιών που επιλέχθηκαν από την αναπαράσταση BBR.
- **Total Site Representation-2:** Μία αναπαράσταση όπου η ενεργειακή αποσυμφόρηση των εμπλεκόμενων διεργασιών πραγματοποιείται κατά μήκος ενός κοινού-ενιαίου καταρράκτη, ονομαζόμενος Καταρράκτης Συνολικής Μονάδας (Total Site Cascade, εφεξής TSC). Ο καταρράκτης TSC χρησιμοποιεί ένα υπερσύνολο θερμοκρασιακών ενδιάμεσων όπως καθορίζονται από τα θερμά και ψυχρά ρεύματα όλων των εμπλεκόμενων διεργασιών (δεδομένες ή υποψήφιες) της Συνολικής Μονάδας. Η ανάπτυξη των ενεργειακών ροών κατά μήκος του TSC βασίζεται στις έννοιες του αναλυτικού μοντέλου μεταφόρτωσης (Σχήμα 4.7β) προσφέροντας όλες τις εφικτές επιλογές ολοκλήρωσης για την αντιμετώπιση εξειδικευμένων, και μη, περιορισμών ολοκλήρωσης. Η άμεση ολοκλήρωση διασφαλίζεται μέσω του αποκλεισμού ενεργειακών ροών που μεταφέρουν θερμότητα μεταξύ ρευμάτων διαφορετικών διεργασιών, ενώ η έμμεση ολοκλήρωση πραγματοποιείται μέσω του USS, το οποίο αντλεί θερμότητα από υψηλότερα θερμοκρασιακά ενδιάμεσα και την επιστρέφει ως παροχή ατμού πίσω σε χαμηλότερα ενδιάμεσα του TSC.

Όταν το πρόβλημα αντιμετωπίζει άγνωστες διεργασίες για σκοπούς σύνθεσης και ολοκλήρωσης, τα θερμικά περιεχόμενα των ρευμάτων κάθε διεργασίας, που συνεισφέρουν

στον καταρράκτη TSC, ρυθμίζονται σύμφωνα με τις δυναμικότητες διεργασιών που επιλέγονται μέσω της αναπαράστασης BBR. Αναλόγως διαμορφώνονται οι ενεργειακές ροές κατά μήκος του TSC και υπολογίζονται οι ενεργειακοί στόχοι κάθε υποψήφιου χαρτοφυλακίου διεργασιών.

Η περιγραφή των ισοζυγίων ενέργειας του TSC είναι εφικτή μόνον με τη χρήση των εννοιών του αναλυτικού μοντέλου μεταφόρτωσης (Σχήμα 4.7β), και όχι του απλοποιημένου μοντέλου (Σχήμα 4.7α), καθότι το τελευταίο δεν δύναται να αποκλείσει την άμεση ολοκλήρωση ρευμάτων διαφορετικών διεργασιών εντός κάθε θερμοκρασιακού ενδιαμέσου. Από την άλλη, η μαθηματική διατύπωση της ολοκλήρωσης πολλαπλών καταρρακτών είναι εφικτή και με τις δύο προσεγγίσεις, ωστόσο για λόγους μείωσης του μεγέθους, της πολυπλοκότητας και του χρόνου επίλυσης του προβλήματος προτιμάται η χρήση του απλοποιημένου μοντέλου μεταφόρτωσης. Πιο σύνθετα και απαιτητικά προβλήματα μπορούν να επιλυθούν με τη χρήση του ενιαίου καταρράκτη TSC.

4.3. Πλαίσιο και παραδείγματα εφαρμογής των αναπαραστάσεων ολοκλήρωσης βιομηχανικών μονάδων

Οι ακόλουθες ενότητες εξηγούν τη εφαρμογή των δύο εναλλακτικών αναπαραστάσεων ολοκλήρωσης πολλαπλών-καταρρακτών (ενότητα 4.3.1) και του ενιαίου καταρράκτη TSC (ενότητα 4.3.2). Τα συστήματα ολοκλήρωσης αναπτύσσονται για παραδείγματα επεξήγησης με σκοπό την περιγραφή των δυνατοτήτων ταυτόχρονης άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης των προτεινόμενων αναπαραστάσεων, αναδεικνύοντας μη προφανείς και καλύτερες λύσεις που δεν εντοπίζονται από τις συμβατικές μεθόδους της βιβλιογραφίας. Τα παραδείγματα παρουσιάζουν τη χειροκίνητη διαδικασία ολοκλήρωσης επί των σχημάτων πολλαπλών-καταρρακτών και του TSC προετοιμάζοντας το έδαφος για την παρουσίαση των μαθηματικών μοντέλων βελτιστοποίησης (στο Κεφάλαιο 5), τα οποία αυτοματοποιούν τη διαδικασία ολοκλήρωσης.

4.3.1. Αναπαράσταση ολοκλήρωσης πολλαπλών-καταρρακτών

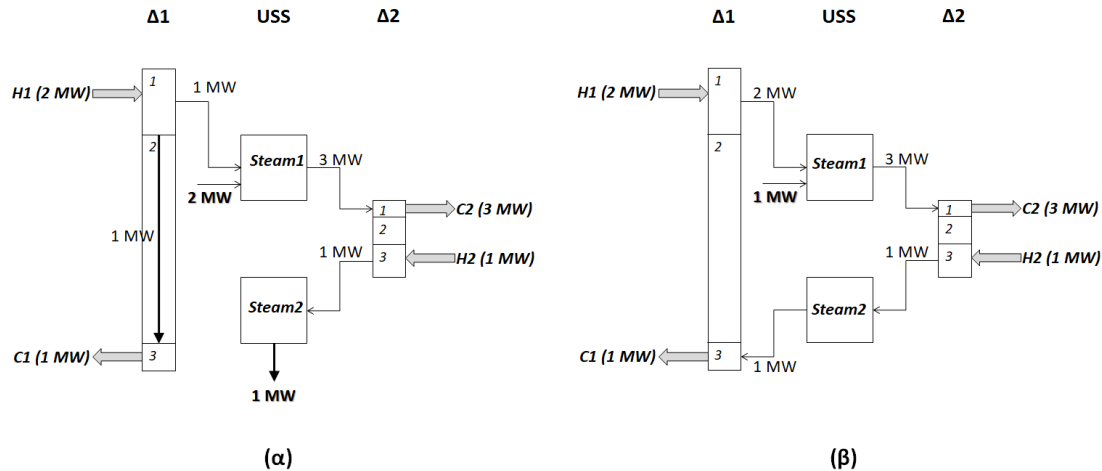
Το παράδειγμα χρησιμοποιεί δυο γνωστές και δεδομένες διεργασίες ($\Delta 1$ και $\Delta 2$) που ολοκληρώνονται ως Συνολική Μονάδα. Κάθε διεργασία περιλαμβάνει ένα θερμό και ένα ψυχρό ρεύμα, με τη $\Delta 1$ να περιλαμβάνει τα $H1$ και $C1$, και τη $\Delta 2$ τα $H2$ και $C2$. Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζονται δύο εναλλακτικά σενάρια και στρατηγικές ολοκλήρωσης (Σχήμα 4.9α και 4.9β) μεταξύ των δύο καταρρακτών αναδεικνύοντας ελπιδοφόρες σχεδιαστικές λύσεις που δεν είναι προφανείς, όταν δεν εφαρμόζονται

Κεφάλαιο 4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών

συνδυαστικά η άμεση και η έμμεση ολοκλήρωση. Η διαφορά στην εφαρμογή κάθε στρατηγικής αφορά την προτεραιότητα εφαρμογής άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης μεταξύ ρευμάτων. Το παρόν επεξηγηματικό παράδειγμα αποτελεί μία ακραία περίπτωση συνθηκών ολοκλήρωσης, όπου αφενός εισάγει τον χρήστη στις λειτουργίες των νέων αναπαραστάσεων ολοκλήρωσης, και αφετέρου τονίζει τη σημασία της ταυτόχρονης αντιμετώπισης άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης με στόχο την ελαχιστοποίηση του ενεργειακού κόστους. Η διαδικασία και οι αποφάσεις ολοκλήρωσης των εμπλεκόμενων ρευμάτων προκύπτουν από χειροκίνητο πειραματισμό επί του σχήματος ολοκλήρωσης πολλαπλών-καταρρακτών και όχι την αυτοματοποιημένη εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων ολοκλήρωσης, τα οποία αποτελούν αντικείμενο του επόμενου Κεφαλαίου 5.

Σύμφωνα με τις κλασικές οδηγίες εφαρμογής άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης, στην προσέγγιση του Σχήματος 4.9α, τα ρεύματα κάθε διεργασίας, **αρχικά**, ολοκληρώνονται άμεσα κατά μήκος κάθε καταρράκτη, και, **έπειτα**, περίσσεια θερμότητα των διεργασιών εξάγεται προς το USS για σκοπούς έμμεσης ολοκλήρωσης. Συγκεκριμένα, θερμότητα 1 MW του θερμού ρεύματος H1 καταρρέει στο 3^ο ενδιάμεσο του πρώτου καταρράκτη Δ1 ολοκληρώνοντας το ψυχρό ρεύμα C1. Έπειτα, περίσσεια θερμότητα 1 MW του ρεύματος H1 χρησιμοποιείται για την παραγωγή 1 MW ατμού Steam1. Ο παραγόμενος ατμός καλύπτει μέρος των αναγκών (1 MW) του ρεύματος C2 στον καταρράκτη Δ2, ενώ οι υπόλοιπες ανάγκες (2 MW) του C2 καλύπτονται από 2 MW φρέσκου ατμού Steam1, που χρεώνεται στη Συνολική Μονάδα. Το περισεύον ενεργειακό περιεχόμενο του ρεύματος H2 δύναται να αξιοποιηθεί για την παραγωγή 1 MW ατμού Steam2, καθότι δεν εμφανίζονται άλλες απαιτήσεις ψυχρών ρευμάτων σε χαμηλότερα ενδιάμεσα της διεργασίας Δ2. Ο παραγόμενος ατμός Steam2 μπορεί να αξιοποιηθεί για συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ειδάλλως οι ανάγκες του θερμού ρεύματος H2 καλύπτονται απευθείας με την εφαρμογή ψυχρής παροχής (κρύο νερό) που επίσης χρεώνεται στη Συνολική Μονάδα. Τα αποτελέσματα του παραδείγματος του Σχήματος 4.9α, περιλαμβάνουν χρέωση 2 MW ατμού Steam1 και 1 MW παροχής κρύου νερού, εφόσον δεν γίνει χρήση τουρμπίνων για συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Κεφάλαιο 4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών



Σχήμα 4.9: Παράδειγμα εφαρμογής του σχήματος ολοκλήρωσης πολλαπλών-καταρρακτών (δύο στρατηγικές): (α) πρώτα άμεση, μετά έμμεση ολοκλήρωση και (β) πρώτα έμμεση, μετά άμεση ολοκλήρωση

Η παραπάνω στρατηγική ολοκλήρωσης (Σχήμα 4.9α) βασίζεται στη συμβατική διαδικασία ολοκλήρωσης Συνολικών Μονάδων, και δίνει προτεραιότητα στην άμεση ολοκλήρωση (έναντι της έμμεσης) για την αποφυγή θερμοκρασιακής υποβάθμισης της διαθέσιμης ενέργειας κατά την ολοκλήρωση μέσω ατμού, η οποία απαιτεί διπλάσια θερμοκρασιακή διαφορά: ΔT_{\min} για την παραγωγή ατμού και ΔT_{\min} για την αξιοποίηση του παραγόμενου ατμού. Η δεύτερη στρατηγική ολοκλήρωσης του Σχήματος 4.9β παρουσιάζει μία ακραία περίπτωση ενεργειακής ολοκλήρωσης της Συνολικής Μονάδας δίνοντας προτεραιότητα στην έμμεση ολοκλήρωση, έναντι της άμεσης.

Στο Σχήμα 4.9β, το θερμό ρεύμα H1 προσφέρει όλο το ενεργειακό του περιεχόμενο (2 MW) για παραγωγή ατμού Steam1, ο οποίος πάλι καλύπτει μερικώς τις ανάγκες του ρεύματος C2. Οι υπόλοιπες ανάγκες (1 MW) του C2 καλύπτονται από 1 MW φρέσκου ατμού Steam1. Το περιεχόμενο του θερμού ρεύματος H2 χρησιμοποιείται για την παραγωγή 1 MW ατμού Steam2, ο οποίος χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αναγκών του ψυχρού ρεύματος C1. Συνολικά, η Συνολική Μονάδα της δεύτερης περίπτωσης χρεώνεται μόλις με 1 MW Steam1, σε αντίθεση με την πρώτη (κλασική) στρατηγική, όπου χρεώνονται 2 MW Steam1 και παράγονται 1 MW Steam2 που μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία ωστόσο **δεν αντισταθμίζει απαραίτητα** τις επιπλέον ανάγκες (κατά 1 MW σε Steam1) του πρώτου σεναρίου.

Κεφάλαιο 4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών

Αν και η δεύτερη (μη συμβατική) στρατηγική φαίνεται να παρουσιάζει καλύτερες αποδόσεις από την πρώτη, η προτεραιότητα εφαρμογής έμμεσης ολοκλήρωσης, έναντι της άμεσης, δεν πρέπει να γενικεύεται για κάθε ζεύγος θερμού-ψυχρού ρεύματος, είτε ανήκουν στην ίδια είτε σε διαφορετικές διεργασίες. Ωστόσο, το ακραίο παράδειγμα ολοκλήρωσης του Σχήματος 4.9 αναδεικνύει τη σημασία ταυτόχρονης μελέτης των αποδόσεων άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης και αντιμετώπισης όλων των βαθμών ελευθερίας ως ένα πρόβλημα προς όφελος του ενεργειακού κόστους (εφόσον εντοπιστούν παρόμοιες ακραίες περιπτώσεις).

Στην κλασική μεθοδολογία (Kemp, 2007), οι βαθμοί ελευθερίας διαχωρίζονται σε δύο διαφορετικά προβλήματα, όπου στο πρώτο βελτιστοποιούνται οι βαθμοί ελευθερίας άμεσης ανταλλαγής, ενώ στο δεύτερο οι επιλογές της έμμεσης. Κατά την εφαρμογή του συστήματος ολοκλήρωσης πολλαπλών-καταρρακτών δεν αποκλείονται παρεκκλίσεις από την κλασική μεθοδολογία σε ειδικές περιπτώσεις ζευγαριών ρευμάτων, εφόσον παρουσιάζουν προοπτικές επίτευξης μικρότερου ενεργειακού κόστους. Ακραίες περιπτώσεις ολοκλήρωσης, παρόμοιες με αυτήν του Σχήματος 4.9β, είναι πιθανόν να εντοπιστούν, όταν το πρόβλημα ολοκλήρωσης συνδυάζεται με τη βελτιστοποίηση της συμπαραγωγής και των θερμοκρασιών επιπέδων ατμού.

Στο επόμενο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο μεταφόρτωσης του σχήματος πολλαπλών-καταρρακτών, όπου η συστημική διερεύνηση όλων των πιθανών (συμβατικών και μη) επιλογών ολοκλήρωσης κατασκευάζεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης του ενεργειακού κόστους Συνολικής Μονάδας, δίνοντας λύσεις στα παραπάνω ερωτήματα του παραδείγματος με αυτοματοποιημένο τρόπο. Ακολούθως, στο Κεφάλαιο 7, το πρόβλημα ολοκλήρωσης επεκτείνεται και συνδυάζεται με το πρόβλημα βελτιστοποίησης της συμπαραγωγής αυτοματοποιώντας τις διαδικασίες ελέγχου και κατανομής θερμότητας στα επίπεδα ατμού και τα ενδιάμεσα των καταρρακτών δίνοντας απαντήσεις σε προβλήματα, όπως αυτό του Σχήματος 4.9α, δηλαδή την αντιστάθμιση του παραπάνω κόστους ατμού Steam1 από την παραγωγή έργου από 1 MW ατμού Steam2.

4.3.2. Αναπαράσταση ολοκλήρωσης Total Site Cascade

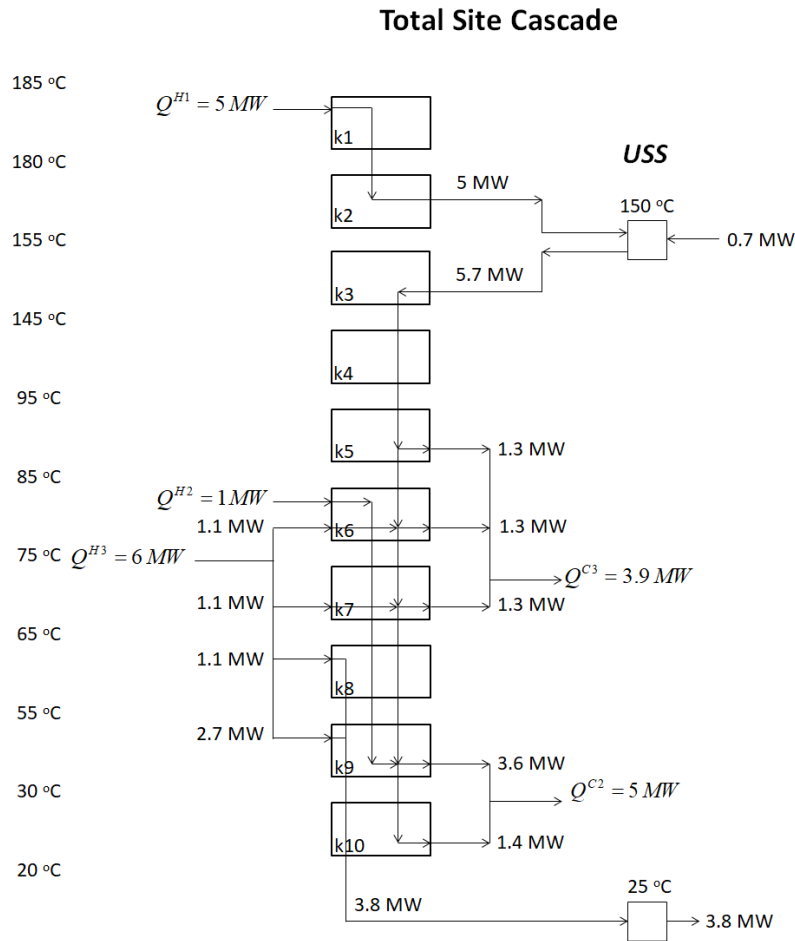
Το παράδειγμα παρουσιάζει την εφαρμογή του ενιαίου καταρράκτη TSC για την ολοκλήρωση τριών υποψήφιων διεργασιών. Τα θερμικά δεδομένα των διεργασιών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Θερμικά δεδομένα διεργασιών

Διεργασία	Θερμά Ρεύματα				Ψυχρά Ρεύματα			
	Ρεύμα	T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	Q [MW]	Ρεύμα	T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	Q [MW]
Δ1	H1	190	185	5	-	-	-	-
Δ2	H2	90	80	1	C2	15	50	5
Δ3	H3	90	35	6	C3	60	90	3.9

Η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά (ΔT_{\min}) επιλέγεται στους 10 °C, ενώ το σύστημα βοηθητικών παροχών USS χρησιμοποιεί ένα επίπεδο ατμού (150 °C) και νερό ψύξης (25 °C). Το επίπεδο ατμού έχει διττή φύση, καθώς, πέραν της τροφοδοσίας ατμού, αναλαμβάνει και την άντληση θερμότητας από τα ενδιάμεσα του TSC ως ψευδο-ψυχρή παροχή. Το κρύο νερό ψύξης αντλεί όλα τα υπόλοιπα θερμότητας θερμών ρευμάτων που δεν μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ατμού.

Τα θερμοκρασιακά ενδιάμεσα του TSC διαμορφώνονται σύμφωνα με τις θερμοκρασίες όλων των ρευμάτων των διεργασιών, είτε αφορούν δεδομένες είτε υποψήφιες επιλογές, εφόσον όλες οι διεργασίες εν δυνάμει συνεισφέρουν στη Συνολική Μονάδα. Στις θερμοκρασίες των ενδιάμεσων προστίθενται και τα θερμοκρασιακά επίπεδα των βοηθητικών παροχών για την διασφάλιση της ελάχιστης θερμοκρασιακής διαφοράς κατά την άντληση/τροφοδοσία θερμότητας από/προς τα ενδιάμεσα του TSC προς/από τα επίπεδα του USS. Για την ενσωμάτωση των θερμοκρασιών των βοηθητικών παροχών στα ενδιάμεσα του TSC, οι θερμές παροχές αντιμετωπίζονται ως θερμά ρεύματα (παροχή θερμότητας), ενώ οι ψευδο-ψυχρές και ψυχρές παροχές ως ψυχρά (άντληση θερμότητας). Ακολούθως, μετατοπίζονται θερμοκρασιακά όλα τα ρεύματα και οι θερμές/ψυχρές παροχές κατά $\pm \Delta T_{\min}/2$ (βλ. Κεφάλαιο 2) και ταξινομούνται από τη μεγαλύτερη προς τη μικρότερη θερμοκρασία διαμορφώνοντας τα θερμοκρασιακά ενδιάμεσα του TSC του Σχήματος 4.10. Η ολοκλήρωση των ρευμάτων διεξάγεται με χειροκίνητο τρόπο.



Σχήμα 4.10: Total Site Cascade για την ολοκλήρωση 3 υποψήφιων διεργασιών (Πίνακας 4.1) Συνολικής Μονάδας

Κατά μήκος του TSC εφαρμόζεται άμεση ολοκλήρωση των εμπλεκόμενων ρευμάτων, ενώ περιφερειακές ροές αντλούν και τροφοδοτούν θερμότητα για σκοπούς έμμεσης ολοκλήρωσης. Η άμεση ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ ρευμάτων διαφορετικών διεργασιών (H1-C2, H1-C3, H2-C3 και H3-C2) αποφεύγεται αποκλείοντας τις αντίστοιχες συνδέσεις ρευμάτων εντός του TSC. Έτσι, άμεση ανταλλαγή θερμότητας επιτρέπεται μεταξύ των H2-C2 και H3-C3, ενώ το H1 παρέχει θερμότητα αποκλειστικά για την παραγωγή ατμού, εφόσον η Δ1 δεν περιλαμβάνει ψυχρά ρεύματα.

Διαθέσιμη θερμότητα του ρεύματος H1 αξιοποιείται για την παραγωγή 5 MW ατμού, ενώ τα ζεύγη H2-C2 και H3-C3 συνεισφέρουν και ανταλλάσσουν θερμότητα εντός των διαστημάτων k9-k10 και k6-k7, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, ανταλλάσσονται 2.2 MW μεταξύ των H3-C3 και 1 MW μεταξύ των H2-C2, με

Κεφάλαιο 4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών

το H2 να εξαντλεί όλη τη περιεχόμενη θερμότητα στο C2. Ύστερα από την εφαρμογή άμεσης ολοκλήρωσης:

- 1) απαιτούνται επιπλέον 5.7 MW για τα ψυχρά ρεύματα C2 (4 MW) και C3 (1.7 MW), τα οποία προσφέρονται μέσω (παραγόμενου και φρέσκου) ατμού στο ενδιάμεσο k3
- 2) 3.8 MW υπόλοιπο θερμότητας του H3 καταρρέει στο τελευταίο ενδιάμεσο του καταρράκτη (k10) και απομακρύνεται μέσω ψυχρής παροχής (κρύο νερό).

Η παραγωγή 5 MW ατμού από τη διαθέσιμη ενέργεια του ρεύματος H1 καλύπτει μεγάλο ποσοστό (88%) των αναγκών των ψυχρών ρευμάτων (5.7 MW) και οι τελικές ανάγκες της Συνολικής Μονάδας υπολογίζονται στα 0.7 MW φρέσκου ατμού 150 °C και 3.8 MW κρύου νερού ψύξης.

Ο Πίνακας 4.2 συνοψίζει τις ενεργειακές ανάγκες κάθε εμπλεκόμενης διεργασίας της Συνολικής Μονάδας, ύστερα από άμεση ολοκλήρωση των ρευμάτων κάθε διεργασίας. Η Δ1 παρουσιάζει 5 MW ψευδο-ψυχρών παροχών, η Δ2 4 MW θερμών παροχών και η Δ3 1.7 MW θερμών παροχών και 3.8 MW ψυχρών παροχών. Η διττή φύση των επιπέδων ατμού είναι ζωτικής σημασίας για την εφαρμογή έμμεσης ολοκλήρωσης στα συστήματα πολλαπλών-καταρρακτών και του TSC.

Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικός πίνακας ενεργειακών αναγκών Συνολικής Μονάδας

Παροχή	Επίπεδα	Δ1	Δ2	Δ3	Συνολική Μονάδα
Θέρμανση	Ατμός (150 °C)		4 MW	1.7 MW	-5+4+1.7 = 0.7 MW
	Ψευδο-ψυχρή παροχή (150 °C)	-5 MW			
Ψύξη	Κρύο νερό			3.8 MW	3.8 MW

Για κάθε επίπεδο ατμού (Πίνακα 4.2) ορίζεται μία ψευδο-ψυχρή παροχή ίδιας θερμοκρασίας με αυτήν του ατμού ως μέσω άντλησης θερμότητας από τα ενδιάμεσα (των πολλαπλών-καταρρακτών ή του TSC) για την παραγωγή του αντίστοιχου επιπέδου ατμού. Η άντληση θερμότητας πραγματοποιείται με όμοιο θερμοδυναμικό τρόπο, όπως εφαρμόζεται από τις ψυχρές παροχές. Ακολούθως, οι ψευδο-ψυχρές παροχές σημειώνονται με αρνητικό πρόσημο ως αντίθετη διαδικασία από αυτή της παροχής ατμού (Πίνακα 4.2). Οι τελικές ανάγκες φρέσκου ατμού **λόγω έμμεσης ολοκλήρωσης** υπολογίζονται ως η λογιστική διαφορά μεταξύ των πραγματικών αναγκών ατμού και των ψευδο-ψυχρών παροχών όλων των διεργασιών για κάθε επίπεδο ατμού. Στο παράδειγμα του Πίνακα 4.2, η λογιστική διαφορά

Κεφάλαιο 4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών

εφαρμόζεται μόνο για το επίπεδο ατμού 150 °C και καταλήγει σε 0.7 MW ανάγκες φρέσκου ατμού Συνολικής Μονάδας.

Γενικεύοντας τη συζήτηση της προηγούμενης παραγράφου για τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.2, ορίζονται τα ακόλουθα σύνολα και υποσύνολα:

- $P = \{p \in P \mid \text{διεργασία } p \text{ Συνολικής Μονάδας}\}$
- $S = \{m \mid m=1, NS: \text{θερμή βοηθητική παροχή } m\}$
- $W = \{n \mid n=1, NW: \text{ψυχρή βοηθητική παροχή } n\}$
- $S_n = \{m \in S \mid \text{επίπεδο ατμού } m, \text{ το οποίο παράγεται από την ψευδο-ψυχρή παροχή } n\}$
- $W_m = \{n \in W \mid \text{ψευδο-ψυχρή παροχή } n, \text{ η οποία παράγει το επίπεδο ατμού } m\}$
- $W' = W - \cup_{m \in S} W_m: \text{υποσύνολο πραγματικών παροχών ψύξης}$

και οι μεταβλητές:

- $Q_{pm}^S = \text{ενεργειακό φορτίο θερμής παροχής } m \text{ της διεργασίας } p$
- $Q_{pn}^W = \text{ενεργειακό φορτίο ψυχρής παροχής } n \text{ της διεργασίας } p$
- $Q_m^{TS} = \text{ενεργειακό φορτίο θερμής παροχής } m \text{ της Συνολικής Μονάδας}$
- $Q_n^{TS} = \text{ενεργειακό φορτίο ψυχρής παροχής } n \text{ της Συνολικής Μονάδας}$

Σύμφωνα με την ανάλυση του Πίνακα 4.2, οι ενεργειακές ανάγκες βοηθητικών παροχών θέρμανσης και ψύξης της Συνολικής Μονάδας ορίζονται ως εξής:

$$Q_m^{TS} = \sum_p \left(Q_{pm}^S - \sum_{n \in W_m} Q_{pn}^W \right) \quad \forall m \in S \quad \text{Eq. 4.7}$$

$$Q_n^{TS} = \sum_p Q_{pn}^W \quad \forall n \in W' \quad \text{Eq. 4.8}$$

Στην εξίσωση 4.1, οι θερμές παροχές της Συνολική Μονάδας υπολογίζονται ως η λογιστική διαφορά μεταξύ θερμών ($m \in S$) και ψευδο-ψυχρών ($n \in W_m$) παροχών, με τις τελευταίες να φέρουν αρνητικό πρόσημο, καθώς εξοικονομούν κόστος φρέσκου ατμού, όπως στο παράδειγμα του Πίνακα 4.2.

Κεφάλαιο 4. Γενικευμένη μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών

Ακολουθως, οι ψυχρές παροχές που αντιστοιχούν αποκλειστικά σε επίπεδα ψύξης, όπως το κρύο νερό και συστήματα κατάψυξης ($\forall n \in W'$), και όχι σε ψευδο-ψυχρές, αθροίζονται στην εξίσωση Eq.4.2 για τον υπολογισμό των αναγκών ψύξης της Συνολικής Μονάδας.

Όταν το πρόβλημα αφορά περιπτώσεις αλυσίδων αξίας, όπου οι διεργασίες συνδυάζονται σύμφωνα με τις οδηγίες που παρέχει το BBR, και ολοκληρώνονται διαμορφώνοντας εναλλακτικές δομές Συνολικών Μονάδων (*Total Site-TS*), η ενεργειακή συνεισφορά των ρευμάτων κάθε εμπλεκόμενης διεργασίας ρυθμίζεται σύμφωνα με τις επιλογές του BBR μέσω των εκφράσεων Eq.4.5 και Eq.4.6. Ακολουθως, διαμορφώνονται:

1. οι ροές κατά μήκος και περιφερειακά του TSC ή του συστήματος πολλαπλών-καταρρακτών
2. η εξοικονόμηση ατμού λόγω έμμεσης ολοκλήρωσης ($Q_{pn}^W \quad \forall n \in W_m, m \in S$)
3. οι απαιτήσεις βοηθητικών παροχών κάθε διεργασίας ($Q_{pm}^S \quad \forall m \in S, Q_{pn}^W \quad \forall n \in W'$)
4. οι ανάγκες Συνολικής Μονάδας σύμφωνα με τις Eq.4.7 και Eq.4.8.

Το συνολικό ενεργειακό κόστος, E^{TS} , κάθε υποψήφιας Συνολικής Μονάδας, TS , υπολογίζεται ως εξής:

$$E^{TS} = \sum_{m \in S} QS_m^{TS} \cdot c_m + \sum_{n \in W'} QW_n^{TS} \cdot c_n \quad \text{Eq. 4.9}$$

όπου c_m και c_n αποτελούν τα μοναδιαία κόστη κάθε θερμής (m) και ψυχρής (n) παροχής. Το συνδυαστικό πρόβλημα σύνθεσης και ολοκλήρωσης διατυπώνεται ως ένα μοντέλο βελτιστοποίησης, το οποίο ψάχνει για τη Συνολική Μονάδα που ελαχιστοποιεί το συνολικό ενεργειακό κόστος, ως εξής:
 $TS^* \in TS: E^{TS^*} = \min[E^{TS}]$.

Βιβλιογραφία

1. Kokossis, A.C., Tsakalova, M., Pyrgakis, K., 2015. Design of integrated biorefineries. *Computers & Chemical Engineering* 81, 40–56
2. Papoulias, A., Grossmann, I.E., 1983. A structural optimization approach in process synthesis—II: Heat recovery networks. *Computers & Chemical Engineering* 7, 6, 707-721
3. Biegler, L.T., Grossmann, I.E., Westerberg, A.W., 1997. *Systematic methods of chemical process design*. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall PTR
4. Pyrgakis, A.K., Kokossis, C.A., 2019. A Total Site Synthesis approach for the selection, integration and planning of multiple-feedstock biorefineries. *Computers and Chemical Engineering*, 122, 326–355
5. Shang, Z., Kokossis, A. 2004. A transshipment model for the optimisation of steam levels of total site utility system for multiperiod operation. *Computers and Chemical Engineering*. 28, 1673–1688

Κεφάλαιο 5.

Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

Η απευθείας εφαρμογή των συμβατικών μοντέλων μεταφόρτωσης των Σχημάτων 4.7α και 4.7β δεν είναι εφικτή για την μαθηματική διατύπωση των αναπαραστάσεων πολλαπλών-καταρρακτών και του TSC. Τα συμβατικά μαθηματικά μοντέλα ενεργειακής μεταφόρτωσης (Paroulias and Grossmann, 1983; Biegler et al., 1997) επαναδιατυπώνονται και επεκτείνονται με την ενσωμάτωση νέων ενεργειακών κόμβων, ρών και κανόνων για την ταυτόχρονη εφαρμογή άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης ρευμάτων πολλών διεργασιών. Για την ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας προτείνονται δύο εναλλακτικές εκδόσεις αναβαθμισμένων μοντέλων μεταφόρτωσης:

- i. το ***Inter-Cascade Transshipment (ICT)***, το οποίο βασίζεται στις έννοιες του σχήματος ολοκλήρωσης πολλαπλών-καταρρακτών και συνδέει διαφορετικούς καταρράκτες μεταξύ τους και
- ii. το ***Cross-Interval Transshipment (CIT)***, το οποίο περιγράφει τις διαδικασίες ολοκλήρωσης μέσω διασταυρούμενων ενδιαμέσων του TSC, τα οποία ανταλλάσσουν θερμότητα μεταξύ τους.

5.1. Ονοματολογία

Για την ανάπτυξη των μοντέλων ICT και CIT εισάγονται τα παρακάτω σύνολα, μεταβλητές και παράμετροι του προβλήματος:

Σύνολα

$K = \{k \mid k=1, NK: \text{θερμοκρασιακά ενδιάμεσα από υψηλότερες προς χαμηλότερες θερμοκρασίες}\}$

$HS \text{ και } CS = \{i \text{ and } j \mid \text{θερμό ρεύμα } i \text{ και ψυχρό ρεύμα } j\}$

$HS_{pk} \text{ και } CS_{pk} = \{i \in HS \text{ and } j \in CS \mid \text{θερμό ρεύμα } i \text{ και ψυχρό ρεύμα } j \text{ της διεργασίας } p, \text{ το οποίο είναι παρόν στο ενδιάμεσο } k\}$

$S = \{m \text{ or } m' \mid m=1, NS: \text{θερμή βοηθητική παροχή } m\}$

$W = \{n \mid n=1, NW: \text{ψυχρή βοηθητική παροχή } n\}$

$S_n = \{m \in S \mid \text{επίπεδο ατμού } m, \text{ που παράγεται από την ψευδο-ψυχρή παροχή } n\}$

$W_m = \{n \in W \mid \text{ψευδο-ψυχρή παροχή } n, \text{ η οποία παράγει το επίπεδο ατμού } m\}$

$W' = \{W - \cup_{m \in S} W_m: \text{κρύο νερό ψύξης και επίπεδα κατάψυξης}\}$

$S_k \text{ και } W_k = \{m \in S \text{ and } n \in W \mid \text{θερμή παροχή } m \text{ και ψυχρή παροχή } n \text{ που τροφοδοτεί και εξάγει, αντίστοιχα, θερμότητα στο ενδιάμεσο } k\}$

$HS'_k = \{i \in HS \mid \text{θερμό ρεύμα } i \text{ παρόν στο ενδιάμεσο } k \text{ ή χαμηλότερο ενδιάμεσο}\}$

$S'_k = \{m \in S \mid \text{θερμή παροχή } m \text{ τροφοδοτεί θερμότητα στο ενδιάμεσο } k \text{ ή χαμηλότερο ενδιάμεσο}\}$

$P_i \text{ και } P_j = \{p \in P \mid \text{διεργασία } p \text{ στην οποία ανήκει το θερμό ρεύμα } i \text{ και το ψυχρό ρεύμα } j\}$

$HCS = \{i, j \mid i \in HS \text{ and } j \in CS: \text{ζεύγος θερμού ρεύματος } i \text{ και ψυχρού ρεύματος } j, \text{ που ανήκουν σε διαφορετικές διεργασίες}\}$

Μη-μηδενικές μεταβλητές

$Q_{pm}^S \text{ και } Q_{pn}^W = \text{ενεργειακό φορτίο θερμής παροχής } m \text{ και ψυχρής παροχής } n \text{ στον ενεργειακό καταρράκτη } C_p \text{ της διεργασίας } p$

$Q_m^{TS} \text{ και } Q_n^{TS} = \text{ενεργειακό φορτίο θερμής παροχής } m \text{ και ψυχρής παροχής } n \text{ Συνολικής Μονάδας}$

$R_{pk} = \text{ενεργειακό υπόλοιπο στον καταρράκτη } C_p \text{ της διεργασίας } p \text{ που εξέρχεται του ενδιάμεσου } k$

$R_n^W = \text{ενεργειακό υπόλοιπο ατμού που εξέρχεται του συστήματος βοηθητικών παροχών}$

(Utility Storage System – εφεξής USS) που φιλοξενεί την ψευδο-ψυχρή παροχή n

Q_{mn} = ενεργειακό φορτίο ψευδο-ψυχρής παροχής n που αποδίδεται στην παραγωγή ατμού επιπέδου m (ενεργειακή γέφυρα)

Q_{ijk} = Θερμότητα ανταλλασσόμενη μεταξύ θερμού ρεύματος i και ψυχρού ρεύματος j στο ενδιάμεσο k

Q_{ink} = Θερμότητα ανταλλασσόμενη μεταξύ θερμού ρεύματος i και ψυχρής παροχής n στο ενδιάμεσο k

Q_{jmk} = Θερμότητα ανταλλασσόμενη μεταξύ ψυχρού ρεύματος j και θερμής παροχής m στο ενδιάμεσο k

Q_m = Ενεργειακό φορτίο θερμής παροχής m

R_{ik} και R_{mk} = Ενεργειακά υπόλοιπα θερμού ρεύματος i και θερμής παροχής m στο ενδιάμεσο k

Διαδικές μεταβλητές

y_m και y_n = μεταβλητές συσχετιζόμενες με την ύπαρξη θερμής παροχής m και ψυχρής παροχής n

Παράμετροι

Q_{ik}^H και Q_{jk}^C = μέγιστο ενεργειακό περιεχόμενο θερμού ρεύματος i και ψυχρού ρεύματος j στο ενδιάμεσο k , όταν η διεργασία λειτουργεί στη μέγιστη δυναμικότητά της

UB_m^S και UB_n^W = άνω όρια θερμής παροχής m και ψυχρής παροχής n , τα οποία ορίζονται από το σύνολο των ενεργειακών περιεχομένων ψυχρών και θερμών ρευμάτων, αντίστοιχα, όλων των εμπλεκόμενων διεργασιών του προβλήματος σύνθεσης

N^H, N^C και N^U = μέγιστος αριθμός επιλεγμένων θερμών παροχών, ψυχρών παροχών και θερμών και ψυχρών παροχών, όπου $N^U = N^H + N^C$

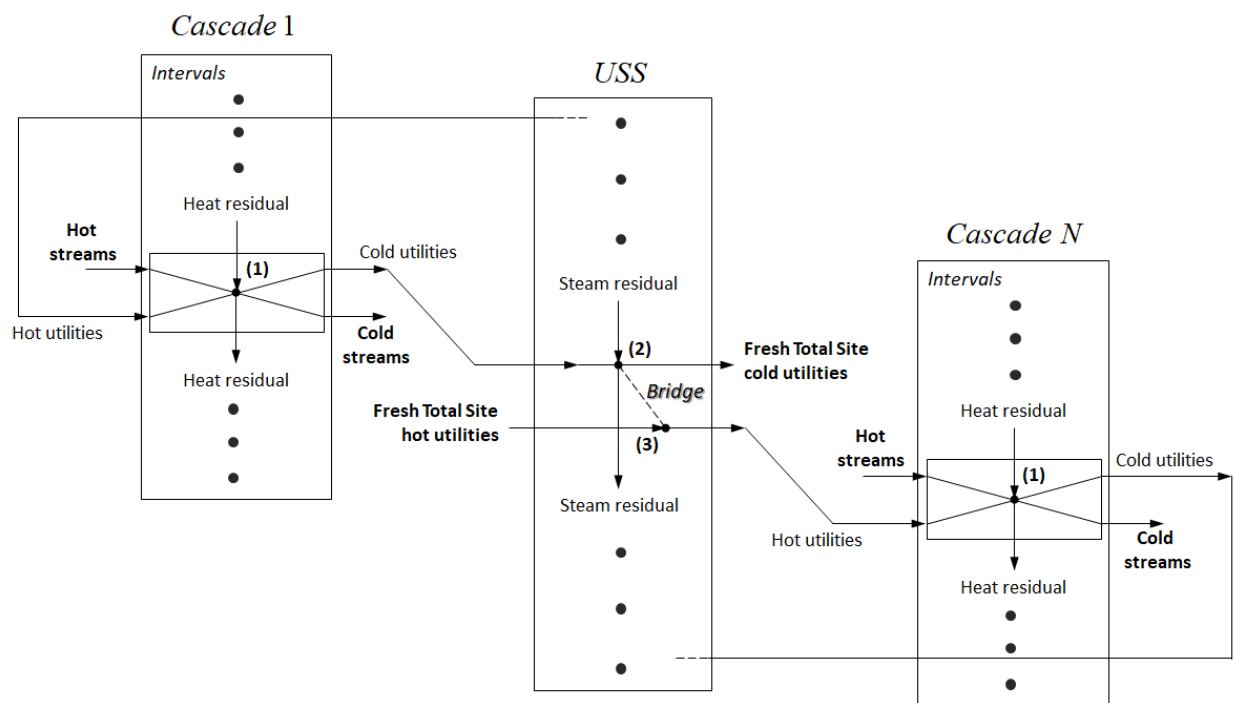
c_m και c_n = μοναδιαίο κόστος θερμής παροχής m και ψυχρής παροχής n

5.2. Μοντέλο μεταφόρτωσης πολλαπλών-καταρρακτών: Inter-Cascade Transshipment model (ICT)

Η αναπαράσταση πολλαπλών-καταρρακτών αναλύεται στο Σχήμα 5.1, όπου καταδεικνύονται οι απαραίτητες επεκτάσεις της βιβλιογραφίας (Σχήμα 4.7α) στα πλαίσια εφαρμογής της ολοκλήρωσης Συνολικής Μονάδας. Διαφορετικοί καταρράκτες αλληλεπιδρούν ανταλλάσσοντας ενέργεια μέσω του συστήματος USS. Κάθε καταρράκτης λειτουργεί ως πηγή ή/και ως καταβόθρα ατμού

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

αποστέλλοντας/λαμβάνοντας θερμότητα προς/από το USS. Η ολοκλήρωση διεργασία-προς-διεργασία απαιτεί τη χρήση ενεργειακών γεφυρών που συνδέουν τους πολλαπλές καταρράκτες μεταξύ τους μέσω των κόμβων (2) και (3) του USS. Οι επεκτάσεις αυτές παρουσιάζονται στο σκαρίφημα του Σχήματος 5.1, το οποίο ενσωματώνει δυνατότητες άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης. Η ενεργειακή αποσυμφόρηση του συνολικού συστήματος πολλαπλών-καταρρακτών (βελτιστοποίηση φρέσκων παροχών) θα καθορίσει την πιο αποτελεσματική στρατηγική ροών από και προς το USS για την ελαχιστοποίηση του ενεργειακού κόστους της Συνολικής Μονάδας.



Σχήμα 5.1: Ανάπτυξη του μοντέλου μεταφόρτωσης πολλαπλών-καταρρακτών: ενεργειακές διασυνδέσεις μεταξύ 2 οποιονδήποτε καταρρακτών (*Cascade 1- Cascade N*) μέσω των κόμβων 2, 3

Ο κόμβος 1 του Σχήματος 5.1 αναλαμβάνει την εφαρμογή άμεσης ολοκλήρωσης των ρευμάτων κάθε διεργασίας της Συνολικής Μονάδας κατά μήκος των ενδιάμεσων κάθε καταρράκτη, με όμοιο τρόπο όπως ο κόμβος 1 του Σχήματος 4.7α. Επιπλέον, ενσωματώνονται οι κόμβοι 2 και 3, για την εξαγωγή και την παροχή, αντίστοιχα, θερμότητας από και προς τους καταρράκτες. Το USS φιλοξενεί όλα τα επίπεδα βοηθητικών παροχών θέρμανσης και ψύξης και εποπτεύει όλους τους καταρράκτες της Συνολικής Μονάδας φέροντας τις εξής δυνατότητες:

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

- Εξαγωγή περίσσειας θερμότητας από τους καταρράκτες μέσω ψευδο-ψυχρών παροχών (Cold utilities) από τον κόμβο 1 προς τον κόμβο 2.
- Αναγωγή περίσσειας θερμότητας καταρρακτών σε παραγόμενο ατμό μέσω της ενεργειακής γέφυρας (Bridge) που σχηματίζουν οι κόμβοι (2)-(3). Η ενέργεια υπόκειται θερμοκρασιακή υποβάθμιση ίση με την οριζόμενη ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά της Συνολικής Μονάδας, ΔT_{min}^{site} , η οποία συνήθως είναι διπλάσια της ΔT_{min} που χρησιμοποιείται για την ολοκλήρωση κάθε διεργασίας.
- Περίσσεια ποσότητα παραγόμενου (και φρέσκου) ατμού δύναται να καταρρεύσει σε χαμηλότερα θερμοκρασιακά επίπεδα του USS μέσω των υπολοίπων ατμού (Steam residuals) και να αξιοποιηθεί σε χαμηλότερα θερμοκρασιακά ενδιάμεσα των καταρρακτών. Η διαδικασία κατάρριψης ατμού μπορεί να αντιμετωπιστεί και ως ισοδύναμο της εκτόνωσης ατμού σε κυλίνδρους τουρμπίνας και να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (θα ζητηθεί στο Κεφάλαιο 7).
- Διοχέτευση θερμών παροχών ατμού από το USS προς τους καταρράκτες με κατεύθυνση από τον κόμβο 3 προς τον κόμβο 1. Η θερμή παροχή αποτελεί μίγμα φρέσκου ατμού που χρεώνεται στη Συνολική Μονάδα (Fresh Total Site hot utilities) και ατμού παραγόμενου από διαθέσιμη θερμότητα των διεργασιών.
- Υπόλοιπα θερμότητας που δεν μπορούν να αξιοποιηθούν για σκοπούς άμεσης ή έμμεσης ολοκλήρωσης απορρίπτονται μέσω πραγματικών ψυχρών παροχών από τον κόμβο (1) προς τον κόμβο (2) και από κει από τις παροχές ψύξης που χρεώνονται στη Συνολική Μονάδα (Fresh Total Site cold utilities).

Οι παραπάνω διαδικασίες μπορούν να συνδυαστούν και να εφαρμοστούν με οποιονδήποτε τρόπο σύμφωνα με τα ενεργειακά περιεχόμενα των θερμών/ψυχρών ρευμάτων των διεργασιών που συμμετέχουν με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους βοηθητικών παροχών (Fresh Total Site hot and cold utilities του Σχήματος 5.1). Σημειώνεται, ότι το ΔT_{min} που επιλέγεται για άμεση ολοκλήρωση μπορεί να διαφέρει από το ΔT_{min}^{site} που χρησιμοποιείται για σκοπούς έμμεσης ολοκλήρωσης. Το ΔT_{min} αφορά τη μετατόπιση των ρευμάτων για τη διαμόρφωση των θερμοκρασιακών ενδιάμεσων κάθε καταρράκτη, ενώ το ΔT_{min}^{site} τη μετατόπιση των θερμοκρασιών των επιπέδων των βοηθητικών παροχών για την εξαγωγή και εισαγωγή θερμότητας από τα ενδιάμεσα. Έτσι,

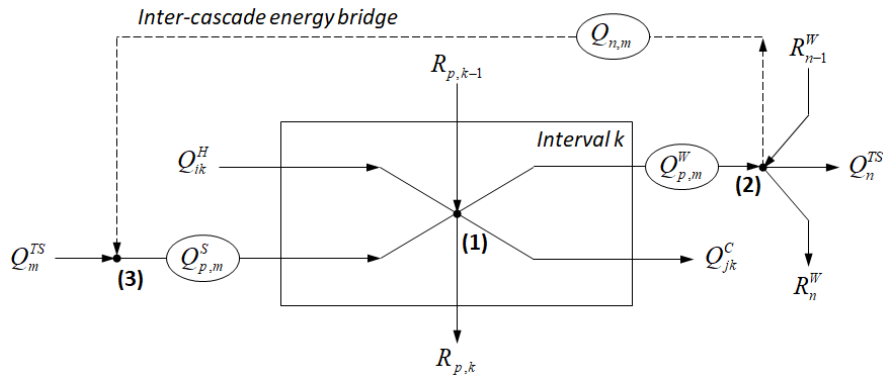
Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

Θερμότητα για παραγωγή ατμού θερμοκρασίας $T1$ εξάγεται μέσω ψευδο-ψυχρής παροχής, η οποία εφαρμόζεται σε ενδιάμεσο με κατώτερη θερμοκρασία $T1 + \Delta T_{min}^{site}/2$. Ακολούθως, ατμός θερμοκρασίας $T2$ τροφοδοτείται μέσω θερμής παροχής σε ενδιάμεσο με ανώτερη θερμοκρασία $T2 - \Delta T_{min}^{site}/2$. Για τον εντοπισμό ενδιάμεσων κάθε καταρράκτη όπου είναι εφικτή η εξαγωγή και παροχή θερμότητας μέσω των βοηθητικών παροχών, οι μετατοπισμένες θερμοκρασίες όλων των παροχών ενσωματώνονται στα ενδιάμεσα όλων των καταρρακτών.

Τα ισοζύγια ενέργειας γύρω από τους κόμβους 1, 2 και 3 προσδιορίζουν το μοντέλο ενεργειακής μεταφόρτωσης Inter-Cascade Transshipment. Ο κόμβος 1 προσδιορίζει τα ισοζύγια ενέργειας άμεσης ολοκλήρωσης για κάθε θερμοκρασιακό ενδιάμεσο και για κάθε καταρράκτη, ενώ οι κόμβοι 2 και 3 ισχύουν για κάθε επίπεδο θερμής (και ψευδο-ψυχρής) και ψυχρής παροχής και αφορούν την έμμεση ολοκλήρωση μεταξύ των διεργασιών. Τα ισοζύγια ενέργειας γύρω από τους κόμβους 1, 2 και 3 καταρτίζουν ένα μοντέλο ενεργειακής βελτιστοποίησης, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί, ως έχει, για την ολοκλήρωση Συνολικών Μονάδων είτε το πρόβλημα αφορά δοσμένες είτε υποψήφιας προς ολοκλήρωση διεργασίες. Σε κάθε περίπτωση, το μοντέλο ICT ενσωματώνει όλες τις διαδικασίες ολοκλήρωσης που προσφέρει η γραφική ανάλυση SSSP και μπορεί να την αντικαταστήσει.

Όταν οι διεργασίες είναι δεδομένες, η αναπαράσταση ολοκλήρωσης αντιμετωπίζει τα ενεργειακά περιεχόμενα ως παραμέτρους, ενώ οι υπόλοιπες ενεργειακές ροές της αναπαράστασης αποτελούν βαθμούς ελευθερίας για την ελαχιστοποίηση του ενεργειακού κόστους της Συνολικής Μονάδας. Όταν το πρόβλημα αντιμετωπίζει υποψήφιας διεργασίες, τότε το μοντέλο ICT συνδυάζεται με τα ισοζύγια μάζας του BBR, το οποίο καθορίζει τις δυναμικότητες των διεργασιών και ρυθμίζει τα ενεργειακά περιεχόμενα των συνεισφερόμενων θερμών/ψυχρών ρευμάτων (επιπλέον βαθμοί ελευθερίας) στα ενδιάμεσα κάθε επιλεγμένου καταρράκτη διεργασίας.

Η αναπαράσταση του Σχήματος 5.1 γενικεύεται στην αναπαράσταση του Σχήματος 5.2, η οποία παρουσιάζει με συμπαγή τρόπο όλους τους κόμβους και τις ροές που εμπλέκονται στα θερμοκρασιακά ενδιάμεσα των πολλαπλών-καταρρακτών και χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου ICT και την ταυτόχρονη εφαρμογή άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης.



Σχήμα 5.2: Γενικευμένη αναπαράσταση απλοποιημένου μοντέλου μεταφόρτωσης ολοκλήρωσης Συνολικής Μονάδας, Inter-Cascade Transshipment (ICT)

Το σύμπλεγμα του Σχήματος 5.2 και ο κόμβος 1 ισχύει για όλα τα ενδιάμεσα κάθε καταρράκτη. Οι κόμβοι 2 και 3 αποτελούν κοινά σημεία επικοινωνίας μεταξύ των καταρρακτών και είναι ίσα σε αριθμό με τα επίπεδα βοηθητικών παροχών που χρησιμοποιούνται στο USS. Η ενεργειακή γέφυρα (διακεκομμένη γραμμή) που ενώνει τους κόμβους 2 και 3 ενώνει ενδιάμεσα διαφορετικών καταρρακτών με θερμοκρασιακή διαφορά τουλάχιστον ΔT_{min}^{site} . Όταν το πρόβλημα ολοκλήρωσης περιλαμβάνει τουλάχιστον μία υποψήφια διεργασία, τότε τα θερμά/ψυχρά ρεύματα αντιμετωπίζονται ως επιπλέον βαθμοί ελευθερίας και οι όροι " Q_{ik}^H " και " Q_{jk}^C " του Σχήματος 5.2 εμπλουτίζονται με στοιχεία του BBR παίρνοντας τη μορφή " $Q_{ik}^H \cdot \sum_{t \in T_p^{out}} A_t \cdot F_t$ " και " $Q_{jk}^C \cdot \sum_{t \in T_p^{out}} A_t \cdot F_t$ ". Οι ρυθμοί ροής ($F_t \forall t \in T_p^{out}$) κάθε διεργασίας p που αφορούν υποψήφιες διεργασίες καθορίζονται από τα ισοζύγια μάζας του BBR, ενώ οι ρυθμοί που αφορούν δεδομένες διεργασίες παίρνουν απευθείας τις γνωστές τιμές δυναμικότητας που δίνονται από το πρόβλημα.

Οι κανόνες λειτουργίας των ενεργειακών ροών που συμμετέχουν στο σύμπλεγμα του μοντέλου ICT είναι οι ακόλουθοι:

Κόμβος 1:

- i) ενεργειακή συνεισφορά θερμών (Q_{ik}^H) και ψυχρών (Q_{jk}^C) ρευμάτων κάθε διεργασίας
- ii) εισαγωγή και εξαγωγή θερμότητας που αναλογεί στις ανάγκες κάθε καταρράκτη p μέσω βοηθητικών θερμών (Q_{pm}^S) και (ψευδο-)ψυχρών (Q_{pn}^W) παροχών

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

- iii) υπόλοιπα θερμότητας (R_{pk}) θερμών ρευμάτων και θερμών παροχών που αξιοποιούνται σε χαμηλότερα ενδιάμεσα.

Κόμβος 2:

- i) θερμότητα που εξάγεται μέσω (ψευδο-)ψυχρών παροχών (Q_{pn}^W), η οποία εν δυνάμει:
 - a) μεταφράζεται σε παραγόμενο ατμό, όταν αφορά επίπεδα ψευδο-ψυχρών παροχών ή
 - b) απάγεται από πραγματικές ψυχρές παροχές (Q_n^{TS}), π.χ. κρύο νερό.
- ii) παραγόμενος ατμός που διανέμεται στα επίπεδα ατμού (προς κόμβο 3) μέσω της ενεργειακής γέφυρας Q_{nm} και επαναχρησιμοποιείται σε ενδιάμεσα άλλων καταρρακτών.
- iii) περίσσεια (παραγόμενου ή/και φρέσκου) ατμού (R_n) που καταρρέει από υψηλότερα σε χαμηλότερα επίπεδα βοηθητικών παροχών. Τα υπόλοιπα R_n αντιπροσωπεύουν το θερμοδυναμικό δυναμικό που μπορεί να αξιοποιηθεί για σκοπούς συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προσφέροντας επιλογές για επεκτάσεις της αναπαράστασης (Κεφάλαιο 7).

Κόμβος 3:

- i) εισαγωγή φρέσκων θερμής παροχών (Q_m^{TS})
- ii) εισαγωγή παραγόμενου ατμού μέσω ενεργειακών γεφυρών (Q_{nm})
- iii) παροχή θερμότητας στα ενδιάμεσα κάθε διεργασίας p μέσω της ροής (Q_{pm}^S)

Οι παραπάνω ροές καταγράφονται με συστημικό τρόπο ως ισοζύγια ενέργειας γύρω από κάθε κόμβο ως εξής:

Κόμβος 1:

$$R_{p,k-1} + \sum_{m \in S_k} Q_{pm}^S + \sum_{\substack{i \in HS_{pk} \\ t \in T_p^{in}}} Q_{ik}^H \cdot A_t \cdot f_t = R_{pk} + \sum_{n \in W_k} Q_{pn}^W + \sum_{\substack{j \in CS_{pk} \\ t \in T_p^{in}}} Q_{jk}^C \cdot A_t \cdot f_t,$$

$$\forall p \in P, k \in K \quad Eq. 5.1$$

Κόμβος 2:

$$R_{n-1}^W + \sum_{p \in P} Q_{pn}^W = \sum_{m \in S_n} Q_{mn} + Q_n^{TS} + R_n^W, \quad \forall n \in W \quad Eq. 5.2$$

Κόμβος 3:

$$Q_m^{TS} + \sum_{n \in W_m} Q_{mn} = \sum_{p \in P} Q_{pm}^S, \quad \forall m \in S \quad Eq. 5.3$$

Τα ισοζύγια ενέργειας γύρω από κάθε κόμβο 1 (Eq.5.1) περιγράφουν κάθε πρόβλημα ενεργειακής αποσυμφόρησης κάθε καταρράκτη, ενώ μέσω των εξισώσεων Eq.5.2 και Eq.5.3 υπολογίζονται τα περιθώρια παραγωγής ατμού και των αναγκών σε βοηθητικές παροχές. Η ενεργειακή γέφυρα Q_{mn} φέρει τα ποσά θερμότητας που εξοικονομούνται λόγω έμμεση ολοκλήρωσης. Ακολουθως, υπολογίζονται οι επιπλέον ανάγκες φρέσκων θερμών (Q_m^{TS}) και ψυχρών (Q_n^{TS}) παροχών για την συμπλήρωση των ισοζυγίων ενέργειας της Συνολικής Μονάδας. Για την εφαρμογή και την ολοκλήρωση των ισοζυγίων ενέργειας του Σχήματος 5.2 απαιτούνται οι ακόλουθοι επιπλέον περιορισμοί για τα υπόλοιπα κάθε καταρράκτη και του USS:

$$R_{p,0} = R_{p,NK} = 0, \quad R_0^W = R_{NW}^W = 0 \quad Eq. 5.4$$

Τα επίπεδα βοηθητικών παροχών που εφαρμόζονται στο USS παίζουν καθοριστικό ρόλο στην αξιοποίηση της διαθέσιμης ενέργειας και την ελαχιστοποίηση του κόστους ενέργειας. Τα επίπεδα δρουν ως ενεργειακές πύλες για την εξαγωγή και την εισαγωγή θερμότητας στη Συνολική Μονάδα και διαχειρίζονται τα ενεργειακά διαθέσιμα ή υπόλοιπα που συγκεντρώνονται σε κάθε θερμοκρασιακό επίπεδο που εφαρμόζονται. Η επιλογή των επιπέδων ατμού και ψύξης παίζουν καθοριστικό ρόλο – αφενός στην αξιοποίηση της διαθέσιμης θερμότητας για παραγωγή ατμού και αφετέρου στην κατανομή του ενεργειακού κόστους στα οικονομικότερα επίπεδα βοηθητικών παροχών – για την ελαχιστοποίηση του συνολικού ενεργειακού κόστους της Συνολικής Μονάδας.

Για τους παραπάνω λόγους, η μεθοδολογία λαμβάνει υπόψη ένα ευρύ σύνολο υποψήφια θερμοκρασιακών επιπέδων θερμών (και ψευδο-ψυχρών) και ψυχρών παροχών για τη διαμόρφωση του USS, τα οποία αντιμετωπίζονται ως επιπλέον βαθμοί ελευθερίας του συνολικού προβλήματος ολοκλήρωσης. Τα υποψήφια επίπεδα βοηθητικών παροχών προτείνεται να ορίζονται μεταξύ της υψηλότερης και χαμηλότερης θερμοκρασίας που εντοπίζονται στη Συνολική Μονάδα, εναλλακτικά ορίζονται σύμφωνα με τις ανάγκες και τις στρατηγικές κάθε προβλήματος ολοκλήρωσης, είτε ακόμα

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

και αυθαίρετα από το χρήστη. Ακολούθως, προστίθενται οι λογικοί περιορισμοί για την λήψη αποφάσεων και τη βελτιστοποίηση των θερμοκρασιακών επιπέδων των βοηθητικών παροχών, ως εξής:

$$Q_{p,m}^S \leq y_m \cdot UB_m^S, \quad p \in P, m \in S \quad Eq. 5.5$$

$$Q_{p,n}^W \leq y_n \cdot UB_n^W, \quad p \in P, n \in W \quad Eq. 5.6$$

$$Q_m^{TS} \leq y_m \cdot UB_m^S, \quad m \in S \quad Eq. 5.7$$

$$Q_n^{TS} \leq y_n \cdot UB_n^W, \quad n \in W \quad Eq. 5.8$$

$$Q_{p,m}^S \leq UB_m^S \cdot \sum_{t \in T_p^{in}} y_t, \quad p \in P, m \in S \quad Eq. 5.9$$

$$Q_{mn} \leq y_n \cdot UB_n^W, \quad m \in S, n \in W_m \quad Eq. 5.10$$

Οι περιορισμοί Eq.5.5 έως Eq.5.10 ενεργοποιούν και απενεργοποιούν υποψήφια επίπεδα βοηθητικών παροχών που χρησιμοποιούνται από το USS με τη χρήση δυαδικών μεταβλητών (y_m και y_n), ενώ η εξίσωση Eq.5.9 απενεργοποιεί τις ενεργειακές ροές (γύρω από τον κόμβο 1) καταρακτών διεργασιών που δεν έχουν επιλεγεί από το BBR.

Συμπληρωματικά, προστίθενται λογικοί περιορισμοί για την αντιστοίχιση ψευδο-ψυχρών και θερμών παροχών που αφορούν το ίδιο επίπεδο ατμού:

$$y_m = y_n, \quad m \in S, n \in W_m \quad Eq. 5.11$$

Επίσης, χρησιμοποιούνται περιορισμοί που θέτουν όρια στον αριθμό των θερμών, ψυχρών ή/και των συνολικών επιπέδων βοηθητικών παροχών που επιλέγονται από το μοντέλο:

$$\sum_{m \in S} y_m \leq N^H \quad and/or \quad \sum_{n \in W} y_n \leq N^C \quad and/or \quad \sum_{m \in S} y_m + \sum_{n \in W} y_n \leq N^U \quad Eq. 5.12$$

Οι παράμετροι N^H και N^C καθορίζονται από τον χρήστη και σύμφωνα με τις ανάγκες και τους περιορισμούς της πραγματικής βιομηχανίας. Σημειώνεται ότι τα επιλεγθέντα επίπεδα ατμού λογαριάζονται διπλά στην εξίσωση $\sum_{m \in S} y_m + \sum_{n \in W} y_n \leq N^U$, δεδομένου ότι η επιλογή ενό επιπέδου ατμού (y_m) συνεπάγεται (μέσω της Eq.5.11) την επιλογή του αντίστοιχου ψευδο-ψυχρού επιπέδου (y_n), το οποίο εξάγει την θερμότητα για την παραγωγή του αντίστοιχου επιπέδου ατμού.

Το μαθηματικό μοντέλο μεταφόρτωσης ICT διαμορφώνεται από τις εξισώσεις Eq.5.1 έως Eq.5.12 και χρησιμοποιεί την ακόλουθη αντικειμενική συνάρτηση για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους των φρέσκων θερμών και ψυχρών παροχών της Συνολικής Μονάδας, ως εξής:

$$\text{Min} \quad E^{TS} = \sum_{m \in S} c_m \cdot Q_m^{TS} + \sum_{n \in W} c_n \cdot Q_n^{TS} \quad \text{Eq.5.13}$$

Το συνδυαστικό πρόβλημα σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών χρησιμοποιεί το σύστημα ICT-BBR και περιλαμβάνει τις γραμμικές εξισώσεις Eq.4.1-Eq.4.4 και Eq.5.1-Eq.5.13. Το πεδίο ορισμού του συνδυαστικού προβλήματος διαμορφώνεται από τις ροές χημικών κατά μήκος του BBR και τις ενεργειακές ροές γύρω από του κόμβους του ICT (Σχήμα 5.2), καθώς επίσης και από τις μεταβλητές απόφασης για την επιλογή διεργασιών και επιπέδων των βοηθητικών παροχών.

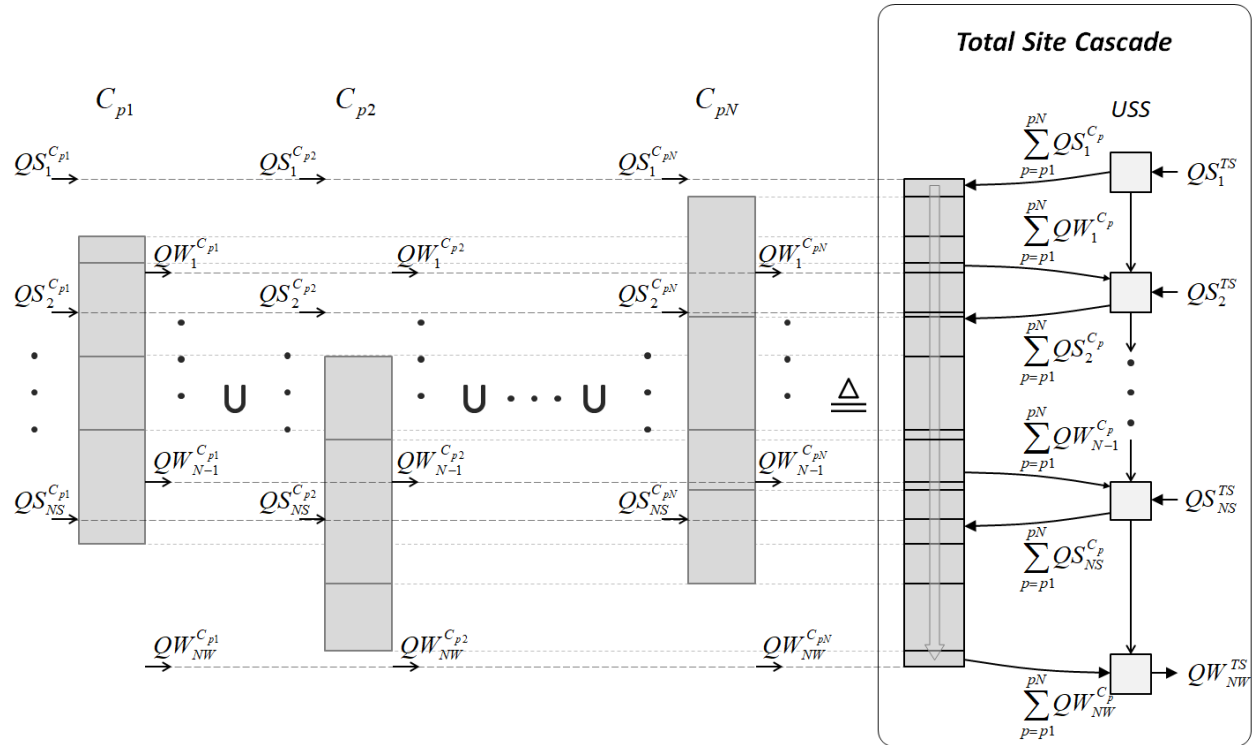
5.3. Μοντέλο μεταφόρτωσης της αναπαράστασης TSC: Cross-Interval Transshipment model (CIT)

Εναλλακτικά του μοντέλου μεταφόρτωσης ICT, χρησιμοποιείται η ενιαία αναπαράσταση καταρράκτη TSC (Kokossis et al., 2015; Pyrgakis and Kokossis, 2019), η οποία ενσωματώνει τις ίδιες, και περισσότερες, δυνατότητες. Για την εννοιολογική περιγραφή του TSC χρησιμοποιούνται οι καταρράκτες C_p του Σχήματος 5.3, καθένας από τους οποίους αφορά μία διεργασία p που εμπλέκεται στη Συνολική Μονάδα, όπως στην αναπαράσταση πολλαπλών-καταρρακτών. Οι ροές $QS_m^{C_p}$ και $QW_n^{C_p}$ αντικατοπτρίζουν αντίστοιχα τις ανάγκες θερμών και ψυχρών παροχών κάθε καταρράκτη C_p , ενώ οι QS_m^{TS} και QW_n^{TS} τις συνολικές βοηθητικές παροχές της Συνολικής Μονάδας. Εισάγεται ο καταρράκτης TSC (στα δεξιά του Σχήματος 5.3), ο οποίος περιλαμβάνει όλα τα θερμοκρασιακά ενδιάμεσα των επιμέρους καταρρακτών και τα θερμοκρασιακά επίπεδα όλων των υποψήφιων βοηθητικών παροχών.

Εν τη απουσία έμμεσης ολοκλήρωσης, οι ανάγκες βοηθητικών παροχών που παρουσιάζει το TSC είναι ίδιες με το άθροισμα των παροχών που απαιτούνται από τους καταρράκτες C_p του Σχήματος 5.3. Η έμμεση ολοκλήρωση επιτυγχάνεται με την εφαρμογή περιφερειακών ροών, που αντλούν και τροφοδοτούν θερμότητα από/προς τα ενδιάμεσα του TSC αναπτύσσοντας συνδέσεις μεταξύ τους. Το USS διαθέτει τις ίδιες δυνατότητες με αυτές του παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο 5.2, με τη μόνη διαφορά ότι κάθε επίπεδο του USS συγκεντρώνει και τροφοδοτεί θερμότητα από/προς ένα ενδιάμεσο (του TSC) κάθε φορά αντί πολλών ενδιάμεσων των πολλαπλών-καταρρακτών. Το USS συγκεντρώνει περίσσεια θερμότητα μέσω ψευδο-ψυχρών παροχών για την παραγωγή ατμού και

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

υπολογίζει την εξοικονόμηση σε παροχές φρέσκου ατμού, ενώ φρέσκες παροχές θέρμανσης (Q_m^{TS}) και ψύξης (Q_n^{TS}) καλύπτουν τις επιπλέον ενεργειακές ανάγκες της Συνολικής Μονάδας. Οι αναλυτικές ροές που εφαρμόζει ο ενιαίος καταρράκτης TSC παρουσιάζονται στο σκαρίφημα του Σχήματος 5.4.



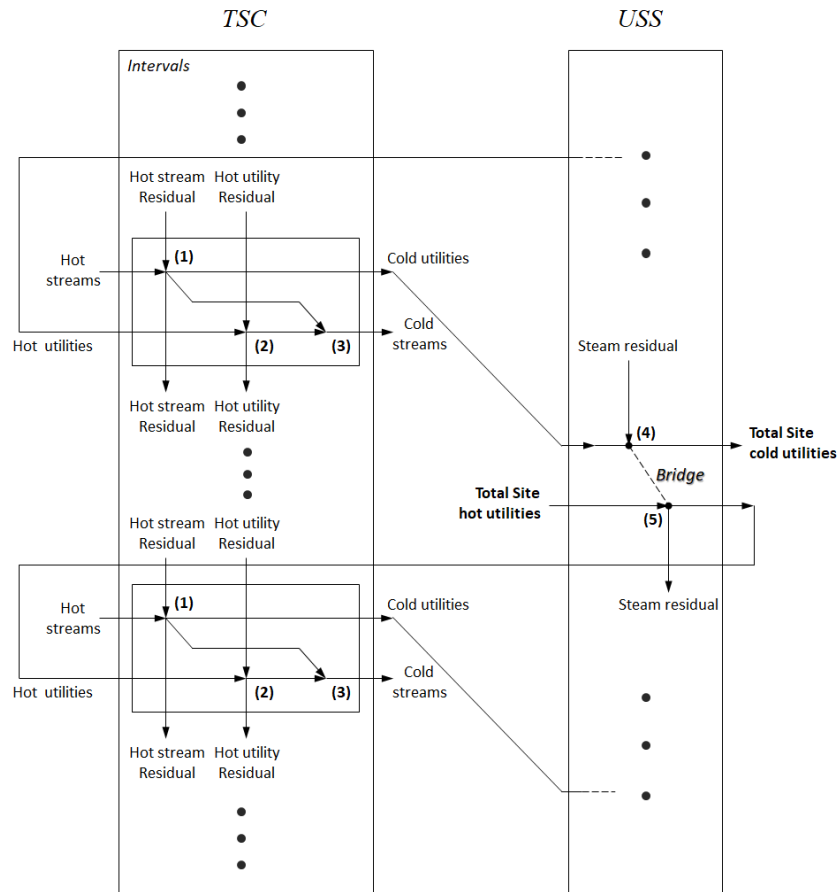
Σχήμα 5.3: Ενσωμάτωση πολλαπλών-καταρρακτών εντός ενός ενιαίου καταρράκτη ολοκλήρωσης Συνολικής Μονάδας (Total Site Cascade)

Οι κόμβοι 1, 2 και 3 του Σχήματος 5.4 περιγράφουν κάθε πρόβλημα ενεργειακής αποσυμφόρησης κάθε συνεισφερόμενης διεργασίας εφαρμόζοντας τις αρχές άμεσης ολοκλήρωσης σύμφωνα με τη συμβατική έννοια των μοντέλων μεταφόρτωσης (Paroulias and Grossman, 1983). Οι ροές που συνδέουν τους κόμβους 1-2 και περιγράφουν την άμεση ολοκλήρωση θερμών-ψυχρών ρευμάτων διαφορετικών διεργασιών απενεργοποιούνται. Έτσι, η μεθοδολογία CIT κεφαλαιοποιεί τις αναλυτικές ροές του μοντέλου μεταφόρτωσης των Paroulias and Grossmann (1983) και περιγράφει όλα τα μεμονωμένα προβλήματα αποσυμφόρησης των εμπλεκόμενων διεργασιών, χωρίς να επηρεάζονται μεταξύ τους, με τη χρήση ενός μόνο καταρράκτη.

Η έμμεση ολοκλήρωση εφαρμόζεται στους κόμβους 4 και 5 του Σχήματος 5.4, κατ' αντιστοιχία των κόμβων 2 και 3 του μοντέλου ICT (Σχήμα 5.2). Για λόγους θερμοδυναμικής εφικτότητας, κάθε (ψευδο-

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

ψυχρή παροχή θερμοκρασίας $T1$ (του USS) αντλεί θερμότητα από το ενδιάμεσο του TSC με κατώτερη θερμοκρασία $T1 + \Delta T_{min}^{site}/2$, και κάθε θερμή παροχή ($T2$) τροφοδοτεί θερμότητα στο ενδιάμεσο με ανώτερη θερμοκρασία $T2 - \Delta T_{min}^{site}/2$.



Σχήμα 5.4: Ανάπτυξη του μοντέλου μεταφόρτωσης CIT για την ολοκλήρωση ρευμάτων διαφορετικών διεργασιών της Συνολικής Μονάδας μέσω των κόμβων 4, 5

Διαθέσιμη θερμότητα των ενδιάμεσων μεταφέρεται από τον κόμβο 1 στον κόμβο 4, και μεταφράζεται σε ατμό στον κόμβο 5, από όπου επιστρέφει πίσω στα ενδιάμεσα του TSC μέσω του κόμβου 2. Κάθε ενεργειακή γέφυρα που ενώνει τους κόμβους 4-5 συνδέει ζεύγη ενδιάμεσων του TSC αναπτύσσοντας την αναβαθμισμένη έκδοση του μοντέλου μεταφόρτωσης διασταυρούμενων-ενδιάμεσων, ή Cross-Interval Transshipment (CIT). Τα υπόλοιπα ατμού που καταρρέουν μεταξύ διαδοχικών κόμβων 4 προσφέρουν τη δυνατότητα μελέτης των δυνατοτήτων συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

Βασιζόμενοι στις ροές του Σχήματος 5.5, αναπτύσσονται τα ισοζύγια ενέργειας γύρω από κάθε κόμβο (1-5) του μοντέλου CIT, ως εξής:

Κόμβος 1:

$$R_{i,k-1} + Q_{ik}^H \cdot \sum_{p \in P_i} \sum_{t \in T_p^{in}} A_t \cdot f_t = R_{ik} + \sum_{j \in CS_k} Q_{ijk} + \sum_{n \in W_k} Q_{ink}, \quad \forall k \in K, i \in HS'_k \quad Eq. 5.14$$

Κόμβος 2:

$$R_{m,k-1} + \sum_{m' \in S_k} Q_{m'} = R_{mk} + \sum_{j \in CS_k} Q_{mjk}, \quad \forall k \in K, m \in S'_k \quad Eq. 5.15$$

Κόμβος 3:

$$\sum_{i \in HS'_k} Q_{ijk} + \sum_{m \in S'_k} Q_{mjk} = Q_{jk}^C \cdot \sum_{p \in P_j} \sum_{t \in T_p^{in}} A_t \cdot f_t, \quad \forall k \in K, j \in CS_k \quad Eq. 5.16$$

Κόμβος 4:

$$R_{n-1}^W + \sum_{i \in HS'_k} Q_{ink} = R_n^W + Q_n^{TS} + \sum_{m \in S_n} Q_{mn}, \quad \forall k \in K, n \in W_k \quad Eq. 5.17$$

Κόμβος 5:

$$Q_m^{TS} + \sum_{n \in W_m} Q_{mn} = Q_m, \quad \forall m \in S \quad Eq. 5.18$$

Για την εφαρμογή των ισοζυγίων ενέργειας κατά μήκος του TSC και του USS απαιτούνται οι ακόλουθοι περιορισμοί των υπολοίπων:

$$R_{i,0} = R_{i,NK} = 0, \quad R_{m,0} = R_{m,NK} = 0, \quad R_0^W = R_{NW}^W = 0 \quad Eq. 5.19$$

Για την διασφάλιση της άμεσης ολοκλήρωσης μόνο μεταξύ ρευμάτων της ίδιας διεργασίας ρυθμίζονται οι αντίστοιχες ροές Q_{ijk} στο μηδέν: $Q_{ijk} = 0, \forall (i,j) \in HCS, k \in K$.

Ομοίως με την περίπτωση πολλαπλών-καταρρακτών, η αναπαράσταση TSC χρησιμοποιεί επίσης ένα σύνολο υποψήφιων επιπέδων βοηθητικών παροχών. Για την επιλογή και την βελτιστοποίηση των επιπέδων προστίθενται οι ακόλουθοι περιορισμοί:

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

$$Q_m \leq y_m \cdot UB_m^S, \quad \forall m \in S \quad Eq. 5.20$$

$$\sum_{i \in H'_k} Q_{ink} \leq y_n \cdot UB_n^W, \quad \forall k \in K, n \in W_k \quad Eq. 5.21$$

$$Q_m^{TS} \leq y_m \cdot UB_m^S, \quad \forall m \in S \quad Eq. 5.22$$

$$Q_n^{TS} \leq y_n \cdot UB_n^W, \quad \forall n \in W \quad Eq. 5.23$$

$$Q_{mn} \leq y_n \cdot UB_n^W, \quad \forall m \in S, n \in W_m \quad Eq. 5.24$$

Οι δυαδικές μεταβλητές y_m και y_n χρησιμοποιούνται για την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση κάθε επιπέδου θερμής/ψυχρής παροχής στο USS.

Ο ακόλουθος λογικός περιορισμός είναι όμοιος με αυτόν της εξίσωσης Eq.5.11 του μοντέλου ICT και αντιστοιχίζει θερμές με ψευδο-ψυχρές παροχές που αφορούν τα ίδια επίπεδα ατμού ενεργοποιώντας τις αντίστοιχες ενεργειακές γέφυρες που συνδέουν διαφορετικά ενδιάμεσα του TSC.

$$y_m = y_n, \quad \forall m \in S, n \in W_m \quad Eq. 5.25/Eq. 5.11$$

Ο μέγιστος αριθμός βοηθητικών παροχών που επιλέγονται από το μοντέλο καθορίζεται από τους ακόλουθους περιορισμούς (όμοιοι με αυτούς της περίπτωσης του μοντέλου ICT):

$$\sum_{m \in S} y_m \leq N^H \quad and/or \quad \sum_{n \in W} y_n \leq N^C \quad and/or \quad \sum_{m \in S} y_m + \sum_{n \in W} y_n \leq N^U \quad Eq. 5.26/Eq. 5.12$$

Το μοντέλο μεταφόρτωσης CIT διατυπώνεται από τις εξισώσεις Eq.5.14 έως Eq.5.26 και χρησιμοποιεί την ίδια αντικειμενική συνάρτηση (Eq.5.13) με αυτή του προβλήματος ICT, η οποία υπολογίζει το ενεργειακό κόστος της Συνολικής Μονάδας:

$$Min \quad E^{TS} = \sum_{m \in S} c_m \cdot Q_m^{TS} + \sum_{n \in W} c_n \cdot Q_n^{TS} \quad Eq. 5.27/Eq. 5.13$$

Όταν το πρόβλημα αντιμετωπίζει την σύνθεση και ολοκλήρωση υποψήφιων διεργασιών, τότε το μοντέλο CIT συνδυάζεται με τα ισοζύγια μάζας (Eq.4.1-Eq.4.4) του BBR για την επιλογή των δυναμικοτήτων των διεργασιών, η συνεισφορά των οποίων εμφανίζεται στους κόμβους 1 και 3 του μοντέλου CIT (Σχήμα 5.5). Η αντικειμενική συνάρτηση υπολογισμού του ενεργειακού κόστους Eq.5.27 (ή Eq.5.13) μπορεί να επεκταθεί με οικονομικά δεδομένα κόστους διεργασιών και κέρδους προϊόντων

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

για τον υπολογισμό της κερδοφορίας και την εκτίμηση τάσεων ελπιδοφόρων και βιώσιμων χαρτοφυλακίων προϊόντων.

Για τον υπολογισμό της κερδοφορίας της Συνολικής Μονάδας λαμβάνονται υπόψη τα κέρδη από πωλήσεις προϊόντων, το (βελτιστοποιημένο βάσει ICT ή CIT) κόστος ενέργειας, το κόστος επένδυσης και λοιπά λειτουργικά κόστη, το κόστος προμήθειας και μεταφοράς της πρώτης ύλης (βιομάζα) της αλυσίδων προϊόντων (εάν χρειαστεί). Τα κόστη επένδυσης ετησιοποιούνται για διάρκεια 10 ετών και επιτόκιο 5%, και το κόστος μεταφοράς υπολογίζεται για ακτίνα συλλογής πρώτης ύλης (βιομάζας) 200 km, με κόστος 0.625 €/km, για χρήση φορτηγών δυναμικότητας 50 τόνων και 8000 ώρες λειτουργίας το χρόνο. Επίσης, θεωρείται συντελεστής φορολόγησης κερδών 50%. Τα επιμέρους κόστη, και η εναλλακτική αντικειμενική συνάρτηση υπολογισμού της κερδοφορίας παρουσιάζονται παρακάτω:

$$\text{Max } Z = (\text{profits} - \text{capex} - \text{opex} - \text{energy} - \text{transport} - \text{feed}) \cdot 50\% \quad \text{Eq. 5.28}$$

- $\text{profits} \left[\frac{\text{M€}}{\text{yr}} \right] = \sum_{pr \in PR} F_{pr} \cdot \text{price}_{pr}$
- $\text{capex} \left[\frac{\text{M€}}{\text{yr}} \right] = \sum_{p \in P} \sum_{t \in T_p^{in}} F_t \cdot \text{CAPEX}_p$
- $\text{opex} \left[\frac{\text{M€}}{\text{yr}} \right] = \sum_{p \in P} \sum_{t \in T_p^{in}} F_t \cdot \text{OPEX}_p$
- $\text{energy} \left[\frac{\text{M€}}{\text{yr}} \right] = \sum_{m \in S} c_m \cdot Q_m^{TS} + \sum_{n \in W} c_n \cdot Q_n^{TS}$
- $\text{transport} \left[\frac{\text{M€}}{\text{yr}} \right] = 200 \cdot 2 \cdot 0.625 \cdot \frac{F_{1''}}{50,000} \cdot \frac{8,000}{1,000,000}$
- $\text{feed} \left[\frac{\text{M€}}{\text{yr}} \right] = F_{1''} \cdot \text{price}_{1''}$
- $\text{taxes} = Z \cdot 50\%$

Όλα τα επιμέρους κόστη της Eq.5.28 καθορίζονται από τις επιλογές διεργασιών και δυναμικότητων μέσω του BBR και η αντικειμενική συνάρτηση έχει νόημα εφαρμογής μόνο όταν το πρόβλημα αφορά υποψήφιες διεργασίες, ειδάλλως (για γνωστές και δεδομένες Συνολικές Μονάδες) έχει αξία να υπολογίζονται μόνο κόστη που αφορούν την ενεργειακή κατανάλωση και να χρησιμοποιείται η Eq.5.27.

Τα μοντέλα ICT/CIT μπορούν να συνδυαστούν είτε με την αντικειμενική συνάρτηση υπολογισμού του ενεργειακού κόστους (Eq.5.27), είτε υπολογισμού της κερδοφορίας (Eq.5.28), για την επιλογή των βέλτιστων διεργασιών και επιπέδων ατμού και ψύξης που ελαχιστοποιούν ή μεγιστοποιούν, αντίστοιχα, κάθε αντικειμενική συνάρτηση.

5.4. Αντικατάσταση της κλασσικής γραφικής ανάλυσης από τα αναβαθμισμένα μοντέλα ICT και CIT

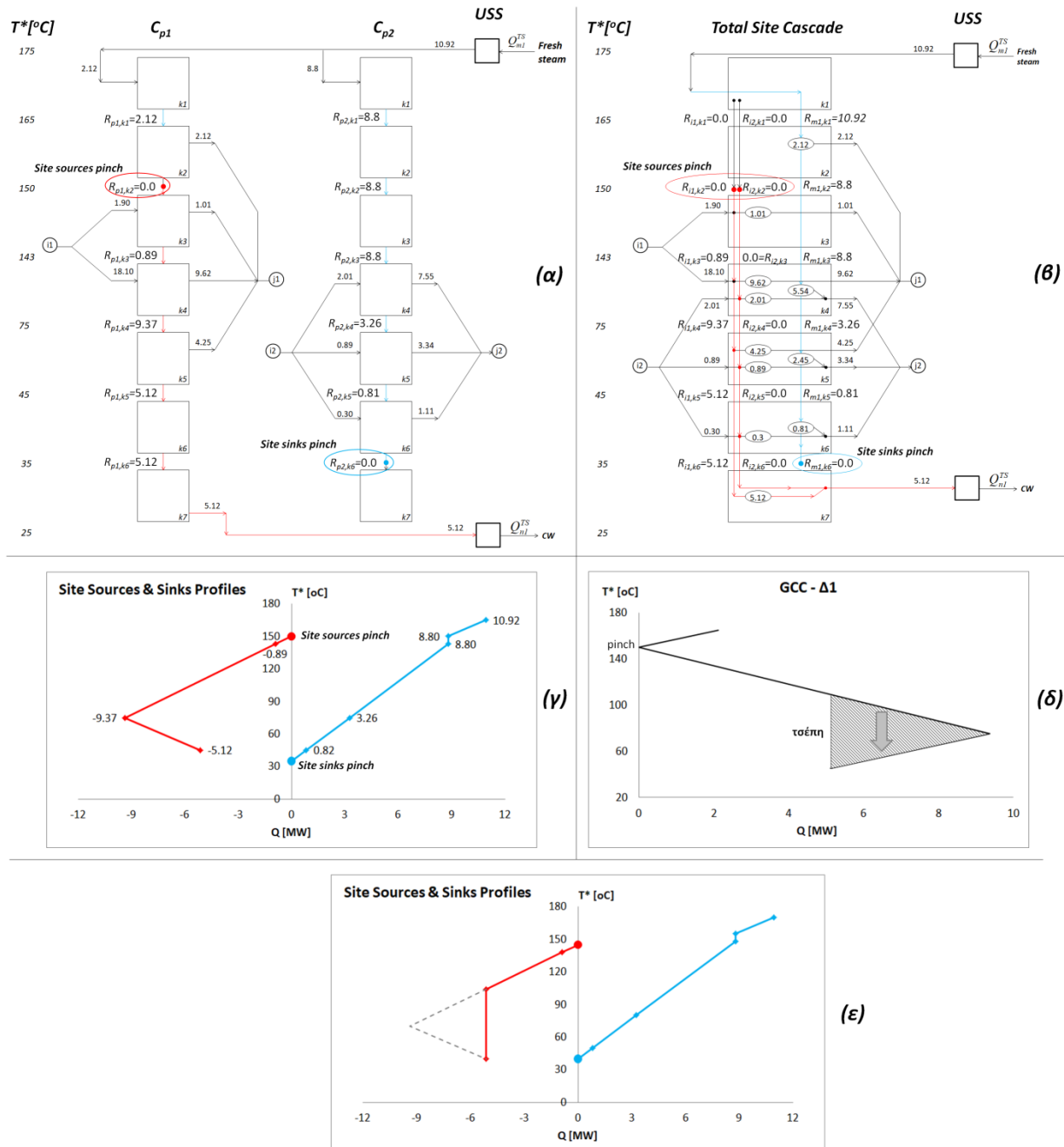
Η συμβατική μεθοδολογία έμμεσης ολοκλήρωσης υστερεί σε τρεις βασικούς άξονες:

- 1) Δεν μπορεί να αντιμετωπίσει περιπτώσεις υποψήφιων διεργασιών, οι οποίες αποτελούν μεταβλητές του προβλήματος. Ένα τέτοιο πρόβλημα καταλήγει στην ανάλυση άπειρων SSSPs, κάθε ένα από τα οποία πρέπει, επιπλέον, να βελτιστοποιηθεί συναρτήσει των υποψήφιων επιπέδων βοηθητικών παροχών.
- 2) Η γραφική ανάλυση απαρτίζεται από πολλαπλά στάδια ανάλυσης, είναι επίπονη, χρονοβόρα και δεν εγγυάται την εύρεση βέλτιστων λύσεων.
- 3) Αδυναμία κατάστρωσης του προβλήματος ολοκλήρωσης (μέθοδος πολλαπλών σταδίων) σε ένα ενιαίο και προσαρμόσιμο μοντέλο βελτιστοποίησης, το οποίο μπορεί να συνδυαστεί με αυτοματοποιημένο τρόπο με πλήθος άλλων προβλημάτων σχεδιασμού και ενεργειακής βελτιστοποίησης, όπως το σχεδιασμό συστημάτων αντιδραστήρων και διαχωρισμών, την ταυτόχρονη και αυτοματοποιημένη βελτιστοποίηση της συμπαραγωγής, κ.ά.

Τα μοντέλα μεταφόρτωσης ICT και CIT ξεπερνούν τις παραπάνω δυσκολίες και μπορούν να αντικαταστήσουν πλήρως την γραφική διαδικασία ολοκλήρωσης της βιβλιογραφίας. Επιπλέον, τα ICT και CIT μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για τον εντοπισμό των κόμβων ανάσχεσης, όσο και για την αναπαραγωγή των γραμμών SSSP, ακολουθώντας γνωστά βήματα ενεργειακής αποσυμφόρησης καταρρακτών (βλ. Κεφάλαιο 2). Οι δυνατότητες των αναβαθμισμένων μοντέλων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.6, όπου τα παραδείγματα ολοκλήρωσης βασίζονται στα ρεύματα των δύο πρώτων διεργασιών ($\Delta 1$ και $\Delta 2$) του Πίνακα 3.1.

Τα Σχήματα 5.6α και 5.6β παρουσιάζουν αντίστοιχα την αναπαράσταση πολλαπλών-καταρρακτών και τον καταρράκτη TSC ως δύο εναλλακτικές μέθοδοι για την ταυτόχρονη εφαρμογή άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης. Για σκοπούς ενεργειακής αποσυμφόρησης των δύο συστημάτων ολοκλήρωσης και αναπαραγωγής των αποτελεσμάτων της γραφικής ανάλυσης SSSP, και στα δύο παραδείγματα εφαρμόζεται μία θερμή παροχή ($180\text{ }^{\circ}\text{C}$) και μία ψυχρή ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$), οι οποίες τοποθετούνται στα δύο άκρα του θερμοκρασιακού εύρους της Συνολικής Μονάδας.

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης



Σχήμα 5.6: Ολοκλήρωση πολλαπλών-καταρρακτών (α), ολοκλήρωση με χρήση του TSC (β), κατασκευή SSSP με χρήση του TSC (γ), τσέπη διεργασίας (δ), αναπαράσταση συμβατικού SSSP (ε)

Η διαδικασία αποσυμφόρησης του συστήματος πολλαπλών καταρρακτών (Σχήμα 5.6α) για τον εντοπισμού των pinch πηγών και καταβοθρών της Συνολικής Μονάδας είναι όμοια με τη αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4 και ακολουθεί τους κανόνες αποσυμφόρησης για κάθε έναν καταρράκτη

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

ξεχωριστά, με τη μόνη διαφορά ότι οι θερμές παροχές των καταρρακτών δίνονται κεντρικά από το υψηλότερο επίπεδο ατμού και διαμοιράζονται στους πολλαπλούς (εδώ μόνο 2) καταρράκτες. Εφαρμόζοντας μηδενική παροχή ατμού 180 °C εντοπίζεται το μικρότερο (αρνητικό) ενεργειακό υπόλοιπο σε κάθε καταρράκτη. Το άθροισμα των υπολοίπων αυτών (κατά απόλυτη τιμή) αντιπροσωπεύει τις ελάχιστες θερμές παροχές της Συνολικής Μονάδας (10.92 MW στο παρόν παράδειγμα). Ύστερα από την εφαρμογή 10.92 MW στην παροχή ατμού εντοπίζονται το υψηλότερο και χαμηλότερο pinch των καταρρακτών, τα οποία αντιπροσωπεύουν τα pinch καταβοθρών και πηγών αντίστοιχα του συμβατικού SSSP. Στο παρόν παράδειγμα, τα pinch πηγών και καταβοθρών εντοπίζονται αντίστοιχα στους 150 °C και 35 °C. Επίσης, τα αθροίσματα των υπολοίπων όλων των καταρρακτών σε κάθε θερμοκρασία, πάνω και κάτω από τα pinch κάθε καταρράκτη, αποδίδουν αντίστοιχα τα σημεία των γραμμών των πηγών και καταβοθρών του SSSP. Συγκεκριμένα, έστω $K_p^{up} \subseteq K$ και $K_p^{do} \subseteq K$ τα ενδιάμεσα του καταρράκτη της διεργασίας p πάνω και κάτω από το pinch της διεργασίας. Τότε τα σημεία κάθε γραμμής πηγών (C_k^{source}) και καταβοθρών (C_k^{sink}) του SSSP υπολογίζονται σύμφωνα με τα υπόλοιπα του Σχήματος 5.6α ως εξής:

$$C_k^{sink} = \sum_{p \in P} \sum_{\substack{k' \in K_p^{up} \\ k' = k}} R_{p,k} \quad \forall k \in K$$

$$C_k^{source} = \sum_{p \in P} \sum_{\substack{k' \in K_p^{do} \\ k' = k}} R_{p,k} \quad \forall k \in K$$

Στην περίπτωση που το ενδιάμεσο k , όπου εφαρμόζεται κάθε εξίσωση, δεν εντοπίζεται στα υποσύνολα K_p^{up} και K_p^{do} , τότε ο όρος $R_{p,k}$ φαινομενικά δεν συνεισφέρει στις εξισώσεις υπολογισμού των γραμμών. Τέλος, το υψηλότερο σημείο της γραμμής καταβοθρών αντιπροσωπεύει τις ελάχιστες συνολικές θερμές παροχές της Συνολικής Μονάδας, δηλαδή $C_0^{sink} = Q_{m1}^{TS}$, όπου “m1” το υψηλότερο επίπεδο ατμού (εδώ 180 °C).

Το Σχήμα 5.6β παρουσιάζει την εναλλακτική αναπαράσταση ολοκλήρωσης TSC με τα συνεισφερόμενα ρεύματα της Συνολικής Μονάδας. Και εδώ χρησιμοποιείται μία θερμή και μία ψυχρή παροχή στα άκρα του καταρράκτη. Ακολουθώς, σχεδιάζονται οι ροές άμεσης ανταλλαγής θερμότητας ρευμάτων κάθε διεργασίας κατά μήκος του TSC. Έμμεση ολοκλήρωση φαινομενικά δεν μπορεί να επιτευχθεί, εφόσον το USS δεν χρησιμοποιεί επίπεδα ατμού σε θερμοκρασιακά ενδιάμεσα εντός του εύρους θερμοκρασιών της Συνολικής Μονάδας.

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

Το TSC χρησιμοποιεί δύο τύπους υπολοίπων, έναν για τη θερμή παροχή και έναν για τα θερμά ρεύματα, σε αντίθεση με το Σχήμα 5.6α όπου εφαρμόζεται μόνο ένας τύπος υπολοίπου ανά ενδιάμεσο. Σε έναν αποσυμφορημένο καταρράκτη, τα υπόλοιπα των θερμών παροχών αντικατοπτρίζουν τις ανάγκες θέρμανσης των καταβοθρών της Συνολικής Μονάδας σε κάθε θερμοκρασία και κατ' επέκταση τα σημεία της γραμμής καταβοθρών του SSSP. Παράλληλα, τα υπόλοιπα θερμών ρευμάτων αφορούν την περίσσεια θερμότητα κάθε ενδιάμεσου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή θερμότητας ή να απορριφθεί μέσω ψυχρών παροχών, δηλαδή αντικατοπτρίζουν τα σημεία της γραμμής πηγών του συμβατικού SSSP. Ομοίως με προηγουμένως, η αποσυμφόρηση των θερμών παροχών (Q_{m1}^{TS}) εφαρμόζεται με δοκιμή και σφάλμα δύο επαναλήψεων, δηλαδή μία για $Q_{m1}^{TS} = 0 \text{ MW}$ και μία για το μικρότερο-αρνητικό υπόλοιπο παροχών (και με θετικό πρόσημο) που βρέθηκε στην προηγούμενη επανάληψη. Από αυτήν την διαδικασία το υπόλοιπο θερμών παροχών του ενδιάμεσου k ισούται με μηδέν και αφορά το pinch καταβοθρών του SSSP. Αντίστοιχα, η χαμηλότερη θερμοκρασία όπου μηδενίζονται όλα τα υπόλοιπα θερμών ρευμάτων, δηλαδή $\sum_{i \in \text{HS}} R_{i,k} = 0$ (εδώ του ενδιάμεσου k), αποτελεί το pinch των πηγών. Τέλος, οι τιμές των υπολοίπων του TSC χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των γραμμών πηγών και καταβοθρών του SSSP, ως εξής:

$$C_0^{sink} = Q_{m1}^{TS}$$
$$C_k^{source} = \sum_{i \in \text{HS}} R_{ik}$$
$$C_k^{sink} = R_{m1,k}$$

Οι γραμμές C_k^{source} και C_k^{sink} που υπολογίζονται από τα υπόλοιπα των ICT (Σχήμα 5.6α) και CIT (Σχήμα 5.6β) είναι ίδιες, και αφορούν τις μετατοπισμένες θερμοκρασίες των ρευμάτων κατά $\pm \Delta T_{min}/2$. Εάν $\Delta T_{min}^{site} = 2 \cdot \Delta T_{min}$ (συνηθέστερη περίπτωση), τότε οι γραμμές C_k^{source} και C_k^{sink} μετατοπίζονται επιπλέον κατά $-\Delta T_{min}/2$ και $+\Delta T_{min}/2$ αντίστοιχα αντιπροσωπεύοντας τις θερμοκρασίες των βοηθητικών παροχών, όπως στα SSSP. Εάν $\Delta T_{min}^{site} \neq 2 \cdot \Delta T_{min}$, τότε οι γραμμές C_k^{source} και C_k^{sink} μετατοπίζονται αντίστοιχα κατά $+\Delta T_{min}/2 - \Delta T_{min}^{site}$ και $-\Delta T_{min}/2 + \Delta T_{min}^{site}$.

Σημειώνεται ότι οι γραμμές SSSP που κατασκευάζονται με τη χρήση των υπολοίπων των μοντέλων ICT και CIT θα περιλαμβάνουν και τις ενεργειακές τσέπες των μεμονωμένων διεργασιών, οι οποίες δεν εμφανίζονται στα συμβατικά SSSP. Οι τσέπες εντοπίζονται στην αναπαράσταση GCC (Σχήμα 5.6δ για το GCC της Δ1) και αποτελούν αυτόνομα συστήματα ολοκλήρωσης ρευμάτων μίας διεργασίας, τα οποία

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

ανταλλάσσουν θερμότητα σε διαφορετικά θερμοκρασιακά ενδιάμεσα πάνω ή κάτω από το pinch της διεργασίας, χωρίς να επηρεάζουν τις συνολικές ανάγκες φρέσκων παροχών.

Η αλλαγή της κλίσης πάνω/κάτω από το pinch μίας διεργασίας υποδεικνύει πλεόνασμα θερμών/ψυχρών ρευμάτων αντίστοιχα, το οποίο ωστόσο ολοκληρώνεται άμεσα με ψυχρά/θερμά ρεύματα σε διαφορετικά ενδιάμεσα πάνω/κάτω από το pinch. Το γεγονός αυτό δεν δίνει το δικαίωμα άντλησης της θερμότητας που καταρρέει εντός της τσέπης, ειδάλλως η διεργασία θα χρεωθεί με επιπλέον βοηθητικές παροχές και ως εκ τούτου δεν ενδείκνυται για χρήση της θερμότητας για σκοπούς έμμεσης ολοκλήρωσης. Για αυτό το λόγο, σύμφωνα με τη κλασική διαδικασία (Dhole and Linnhoff, 1993; Kemp, 2007) κατασκευής των SSSP (βλ. Σχήμα 2.7), οι τσέπες αποκόπτονται από τα GCC, ενώνοντας τα άνω-κάτω άκρα της με μία κατακόρυφη γραμμή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6δ. Ως αποτέλεσμα, οι γραμμές των συμβατικών SSSP παρουσιάζουν τέτοιες κατακόρυφες γραμμές ή/και σταθερή μονοτονία στα θερμοκρασιακά εύρη που εντοπίζονται τσέπες εμποδίζοντας την παραγωγή ατμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6ε όπου παρουσιάζεται το σκαρίφημα το συμβατικού SSSP των διεργασιών του παραδείγματος.

Η μοναδική διαφορά του συμβατικού SSSP (Σχήμα 5.6ε) με το SSSP που υπολογίζεται βάσει των μοντέλων ICT και CIT έγκεινται μόνο στις περιοχές των τσεπών. Γενικά δεν προτείνεται η ολοκλήρωση ρευμάτων και μονάδων εντός των τσεπών για την αποφυγή πολύπλοκων συστημάτων ολοκλήρωσης. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις μεγάλων τσεπών (δεν εμφανίζονται συχνά στη βιβλιογραφία), η ολοκλήρωση συστημάτων, τα οποία μπορούν να λαμβάνουν και να επιστρέφουν θερμότητα από υψηλότερες σε χαμηλότερες θερμοκρασίες αποτελούν ιδανικές περιπτώσεις ολοκλήρωσης εντός των τσεπών, χωρίς να σπαταλούν την ενέργεια τσέπης και να επιβαρύνουν τις ελάχιστες παροχές θέρμανσης και ψύξης. Τέτοιες περιπτώσεις μπορούν να είναι ο αναβραστήρας και ο συμπυκνωτήρας μίας απόσταξης ή μία τουρμπίνα εκτόνωσης ατμού. Η συμβατική μεθοδολογία, απαλείφοντας τις τσέπες από τη γραφική παράσταση SSSP δεν μπορεί να εντοπίσει τέτοιες ωφέλιμες περιπτώσεις ολοκλήρωσης. Εν αντιθέσει, τα μοντέλα ICT και CIT φέρουν την ενέργεια τσεπών μέσω των υπολοίπων θερμότητας και μπορούν να εντοπίσουν περιπτώσεις αξιοποίησής της με σκοπό τη μείωση του ενεργειακού κόστους (π.χ. την ολοκλήρωση μίας ενεργοβόρου απόσταξης μίας διεργασίας με την τσέπη μίας άλλης διεργασίας) ή την ενίσχυση της κερδοφορίας (π.χ. ενσωματώνοντας τουρμπίνες εντός τσεπών για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας). Τέτοιες αποφάσεις ολοκλήρωσης και αξιοποίησης ενέργειας τσεπών παρουσιάζονται στα παραδείγματα των Κεφαλαίων 5, 7 και 8, όπου χρησιμοποιούνται τα μοντέλα ICT/CIT, ενισχύοντας τις αποδόσεις και την κερδοφορία των

βιομηχανικών εγκαταστάσεων και αναδεικνύοντας τις πολλαπλές δυνατότητες που προσφέρουν τα αναβαθμισμένα μοντέλα ταυτόχρονης άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης, έναντι των κλασικών διαδικασιών και συμβατικών σχημάτων ολοκλήρωσης.

5.5. Παραδείγματα και εφαρμογές

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται παραδείγματα επεξήγησης (5.5.1. και 5.5.2.) της λειτουργίας και της εφαρμογής κάθε μοντέλου μεταφόρτωσης (ICT και CIT). Επίσης, παρουσιάζονται πραγματικά παραδείγματα εφαρμογής του συνολικού μοντέλου σύνθεσης και ολοκλήρωσης για την αξιολόγηση και την επέκταση υφιστάμενων βιομηχανιών (πετρελαίου, ζάχαρης και βιοαιθανόλης) με καινοτόμες βιοδιεργασίες (5.5.3.-5.5.5.), καθώς και μία περίπτωση ανάπτυξης ενός βιοδιυλιστηρίου από την αρχή (5.5.6.) χωρίς περιορισμούς ολοκλήρωσης με υπάρχουσες διεργασίες. Στα παραδείγματα συνοψίζονται τα αποτελέσματα των καλύτερων λύσεων και οι πίνακες προτίμησης μεταξύ ανταγωνιστικών διεργασιών και προϊόντων για κάθε βιομηχανική περίπτωση.

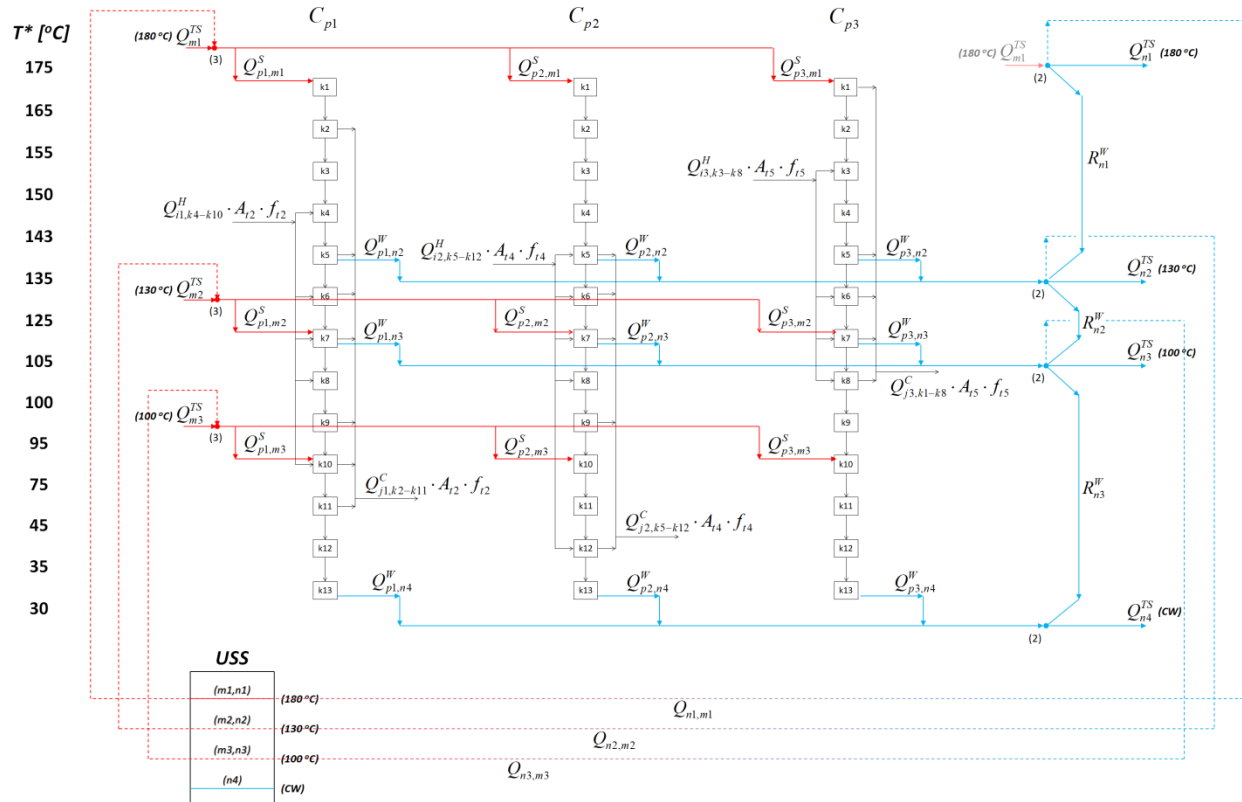
5.5.1. Εφαρμογή του συνδυαστικού μοντέλου ICT-BBR

Το παράδειγμα αντιμετωπίζει το πρόβλημα σύνθεσης και ολοκλήρωσης των 3 υποψήφιων διεργασιών του Σχήματος 3.1 με τη χρήση του αναβαθμισμένου μοντέλου άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης ICT. Το πρόβλημα μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 3 με τη χρήση συμβατικών γραφικών εργαλείων, τα οποία απαιτούσαν πλήθος υπολογισμών και γραφικών αναπαραστάσεων για τον εντοπισμό καλύτερων λύσεων. Αν και τα αποτελέσματα του Σχήματος 3.5 αποδεικνύουν ότι η καλύτερη λύση, 70-30% ($\Delta 2$ - $\Delta 3$), είναι αρκετά κοντά στη βέλτιστη, αυτό δεν θα ίσχυε για μεγαλύτερα και πολυπλοκότερα προβλήματα, όπου το πρόβλημα θα αντιμετώπιζε πολλαπλάσιους συνδυασμούς δυαδικών μεταβλητών και άπειρους συνδυασμούς δυναμικότητας διεργασιών. Το μοντέλο ICT, σε συνεργασία με το BBR, διαμορφώνει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο αντιλαμβάνεται τις δυναμικότητες υποψήφιων διεργασιών ως συνεχείς μεταβλητές και αντιμετωπίζει συστημικά όλους τους βαθμούς ελευθερίας σύνθεσης και ολοκλήρωσης. Έτσι, αποφεύγονται οι χρονοβόρες και αναποτελεσματικές προσεγγιστικές στρατηγικές διαμοιρασμού κοινών τροφοδοσιών, όπως χρησιμοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο 3, που απαιτούνται κατά την εξαντλητική εφαρμογή των συμβατικών γραφικών εργαλείων (SSSP).

Το μοντέλο ICT περιγράφει τα ισοζύγια ενέργειας που αναπτύσσονται στην αναπάρσταση πολλαπλών-καταρρακτών. Ακολούθως, αναπτύσσεται το σύστημα του Σχήματος 5.7, το οποίο

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

περιλαμβάνει 3 καταρράκτες όσες και οι διεργασίες της αλυσίδας προϊόντων του Σχήματος 3.1. Τα θερμικά δεδομένα των ρευμάτων και των βοηθητικών παροχών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.



Σχήμα 5.7: Αναπαράσταση πολλαπλών-καταρρακτών για το παράδειγμα του Σχήματος 3.1 χρησιμοποιώντας το μοντέλο ICT

Το πρόβλημα χρησιμοποιεί 3 δεδομένα επίπεδα ατμού και ένα επίπεδο για ψύξη (κρύο νερό). Ακολουθως, το σύνολο θερμών παροχών περιλαμβάνει 3 στοιχεία: m1 (180 °C), m2 (130 °C), m3 (100 °C), ενώ το σύνολο ψυχρών παροχών περιλαμβάνει 4 στοιχεία: n1 (180 °C), n2 (130 °C), n3 (100 °C), n4 (25 °C), δηλαδή τόσες ψευδο-ψυχρές παροχές (n1, n2 και n3) όσα τα επίπεδα ατμού και τόσα πραγματικά ψυχρά επίπεδα (n4) όσα τα επίπεδα εφαρμογής ψύξης. Το Σχήμα 5.7 περιλαμβάνει τους όρους συνεισφοράς κάθε θερμού/ψυχρού ρεύματος και τις περιφερειακές ροές βοηθητικών παροχών διασφαλίζοντας την επικοινωνία μεταξύ των καταρρακτών για σκοπούς έμμεσης ολοκλήρωσης. Όλοι οι καταρράκτες διαμορφώνονται σύμφωνα τα θερμοκρασιακά εύρη όλων των ρευμάτων και των θερμοκρασιών των βοηθητικών παροχών, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούν κοινά ενδιάμεσα, τα οποία επιτρέπουν την συνεισφορά των ρευμάτων κάθε διεργασίας και τον εντοπισμό ενδιάμεσων για την εφαρμογή των περιφερειακών ροών. Ενεργειακές γέφυρες (διακεκομμένες γραμμές) συνδέουν

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

τους καταρράκτες μεταξύ τους μεταφέροντας θερμότητα που συλλέγεται (από τα ενδιάμεσα) στους κόμβους 2 και τροφοδοτείται (προς τα ενδιάμεσα) μέσω των κόμβων 3.

Εξοικονόμηση ατμού 130 °C (m2) και 100 °C (m3) επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας περίσσεια θερμότητα που προέρχεται αντίστοιχα από τα διαστήματα k1-k5 και k6-k7 και των τριών καταρρακτών. Η θερμότητα εξάγεται μέσω των ροών $Q_{p1-p3, n1-n3}^W$ στα αντίστοιχα επίπεδα ψευδο-ψυχρών παροχών n2 και n3 στους κόμβους 2. Παράλληλα, οι κόμβοι 3 εποπτεύουν τις απαιτήσεις ατμού (m1, m2 και m3) των τριών καταρρακτών μέσω των ροών $Q_{p1-p3, m1-m3}^S$. Οι ενεργειακές γέφυρες ($Q_{n1, m1}$, $Q_{n2, m2}$, $Q_{n3, m3}$) συνδέουν τους κόμβους 2-3 που αφορούν το ίδιο επίπεδο ατμού και μεταφέρουν την περίσσεια θερμότητα εξοικονομώντας κόστος ατμού. Σε περίπτωση, όπου ο παραγόμενος ατμός υπερέχει των αναγκών σε κάποιο επίπεδο, τότε ο ατμός καταρρέει μέσω των υπολοίπων ατμού (R_{n1} , R_{n2} , R_{n3}) για την κάλυψη αναγκών σε χαμηλότερα επίπεδα. Επίσης, τα υπόλοιπα ατμού φέρουν το θερμικό φορτίο που μπορεί να αξιοποιηθεί και για την παραγωγή έργου με χρήση τουρμπίνων. Όταν ο παραγόμενος ατμός δεν επαρκεί να καλύψει τις απαιτήσεις των καταρρακτών, τότε χρεώνονται φρέσκες παροχές ατμού (Q_{m1-m3}^S) και κρύου νερού (Q_{n4}^{TS}).

Ο ατμός m1 βρίσκεται στο υψηλότερο θερμοκρασιακό επίπεδο, ώστε να τροφοδοτεί με θερμότητα όλα τα ρεύματα της Συνολικής Μονάδας. Όταν το πρόβλημα δεν αντιμετωπίζει την περίπτωση της συμπαραγωγής, ο κόμβος 2 του υψηλότερου επιπέδου ψευδο-ψυχρών παροχών n1 δεν έχει λόγω ύπαρξης καθώς δεν αναμένονται θερμά ρεύματα σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Όταν η συμπαραγωγή περιλαμβάνεται στο πρόβλημα, τότε προτείνεται ο ατμός m1 – σε πραγματικές συνθήκες αφορά ατμό πολύ υψηλής πίεσης που εξέρχεται από τον φούρνο (VHP στα 90 bar και 500 °C) – να μην τροφοδοτείται άμεσα μέσω του κόμβου 3, αλλά έμμεσα μέσω: του κόμβου 2 → της ενεργειακής γέφυρας $Q_{n1, m1}$ → στον κόμβο 3, όπως φαίνεται πάνω δεξιά (με αμυδρά γράμματα) στο Σχήμα 5.7. Έτσι, μπορούν να υπολογιστούν όλα τα υπόλοιπα ατμού (και το R_{n1}^W) από την υψηλότερη προς χαμηλότερες θερμοκρασίες για την εκτίμηση της συμπαραγωγής σε κάθε ζώνη εκτόνωσης, όπως θα συζητηθεί εκτενώς στο Κεφάλαιο 7.

Η παραπάνω ανάπτυξη και μελέτη των ενεργειακών ροών των καταρρακτών του Σχήματος 5.7 δεν απαιτείται από τον χρήστη. Η επιλογή του βέλτιστου χαρτοφυλακίου διεργασιών και η αποσυμφόρηση των ενεργειακών απαιτήσεων των καταρρακτών πραγματοποιείται με αυτοματοποιημένο τρόπο με τη χρήση του μοντέλου ICT και τις εξισώσεις του BBR. Για την προετοιμασία και την εφαρμογή του μοντέλου βελτιστοποίησης απαιτούνται μόνον τα ακόλουθα:

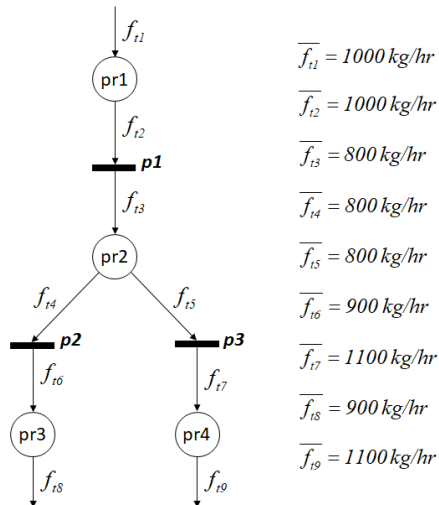
Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

1. ο υπολογισμός των μετατοπισμένων ενδιαμέσων των καταρρακτών
2. ο υπολογισμός της μέγιστης ενεργειακής συνεισφοράς των ρευμάτων (Q_{ik}^H και Q_{jk}^C) στα ενδιάμεσα των καταρρακτών υποθέτοντας λειτουργία στη μέγιστη δυναμικότητα για κάθε διεργασία.
3. ο εντοπισμός των ενδιαμέσων όπου συνεισφέρουν και συμμετέχουν τα ρεύματα των διεργασιών και τα υποψήφια επίπεδα (θερμές, ψευδο-ψυχρές και ψυχρές παροχές) του USS, καθώς επίσης και τα μοναδιαία κόστη των υποψήφιων επιπέδων.

Το πρόβλημα σύνθεσης περιγράφεται από το BBR του Σχήματος 5.8, το οποίο περιγράφει τις επιλογές σύνθεσης της αρχικής αλυσίδας προϊόντων του Σχήματος 3.1. Το Σχήμα 5.8 περιλαμβάνει τους κόμβους προϊόντων, τα σημεία μετάβασης (διεργασίες) και τις διασυνδέσεις μεταξύ κόμβων και διεργασιών και χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη των ισοζυγίων μάζας του BBR. Για την ανάπτυξη των ισοζυγίων μάζας του BBR, στο Σχήμα 5.8 παρατίθενται, επίσης, οι μέγιστοι ρυθμοί ροής σύμφωνα τους σταθερούς βαθμούς μετατροπής κάθε διεργασίας και την σταθερή παροχή της τροφοδοσίας του BBR, η οποία στο παρόν παράδειγμα ορίζεται στα 1000 kg/hr. Υπενθυμίζεται ότι, τα μέγιστα ενεργειακά περιεχόμενα των ρευμάτων των τριών διεργασιών του Πίνακα 3.1 αφορούν σε λειτουργία μέγιστης δυναμικότητας κάθε διεργασίας, όπως εκφράζονται από τους μέγιστους ρυθμούς ροής ($\overline{f_{t2}}$, $\overline{f_{t4}}$ και $\overline{f_{t5}}$ για τις Δ1, Δ2 και Δ3 αντίστοιχα) του Σχήματος 5.8.

Το συνολικό μοντέλο ICT-BBR απαρτίζεται από τις εξισώσεις Eq.4.1-Eq.4.4 (BBR) και Eq.5.1-Eq.5.12 (ICT), ενώ η αντικειμενική συνάρτηση Eq.13 υπολογίζει το συνολικό κόστος βοηθητικών παροχών θέρμανσης και ψύξης της Συνολικής Μονάδας. Το πρόβλημα επιλύεται με μεθόδους Μεικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (Mixed Integer Linear Programming-MILP) και παρουσιάζει ελάχιστες υπολογιστικές απαιτήσεις (χρόνοι επίλυσης μικρότεροι του 1 sec).

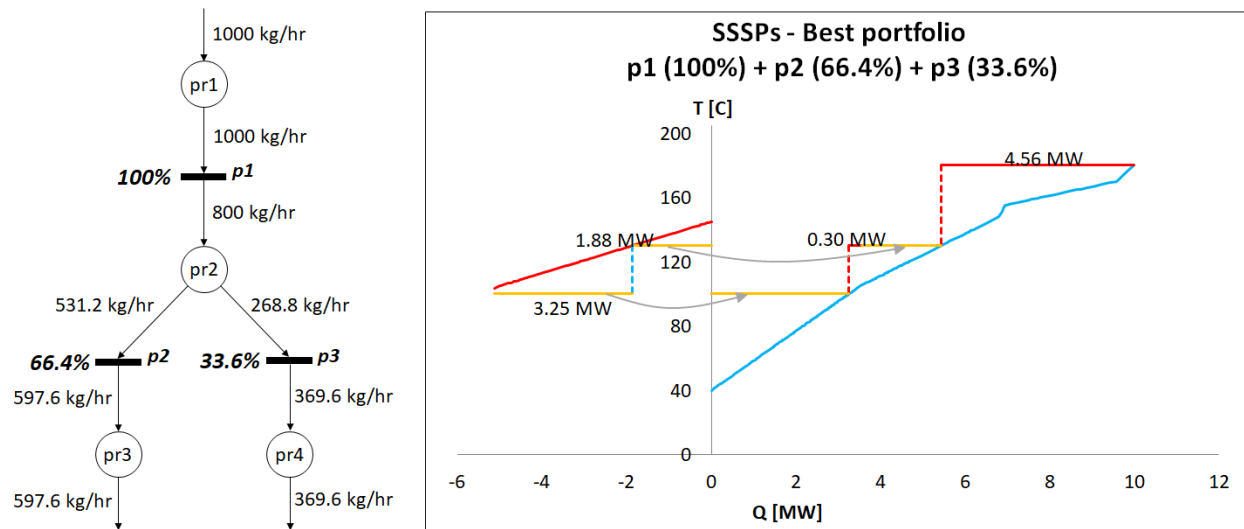
Το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο διεργασιών που εντοπίζεται περιλαμβάνει και τις τρεις διεργασίες Δ1-Δ2-Δ3 σε δυναμικότητες 100%-66.4%-33.6% των μέγιστων δυναμικότητων τους. Οι βελτιστοποιημένες ροές χημικών κατά μήκος της αλυσίδας προϊόντων και το SSSP της βέλτιστης λύσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.9 για γραφική επισκόπηση της εξοικονόμησης ατμού λόγω έμμεσης ολοκλήρωσης.



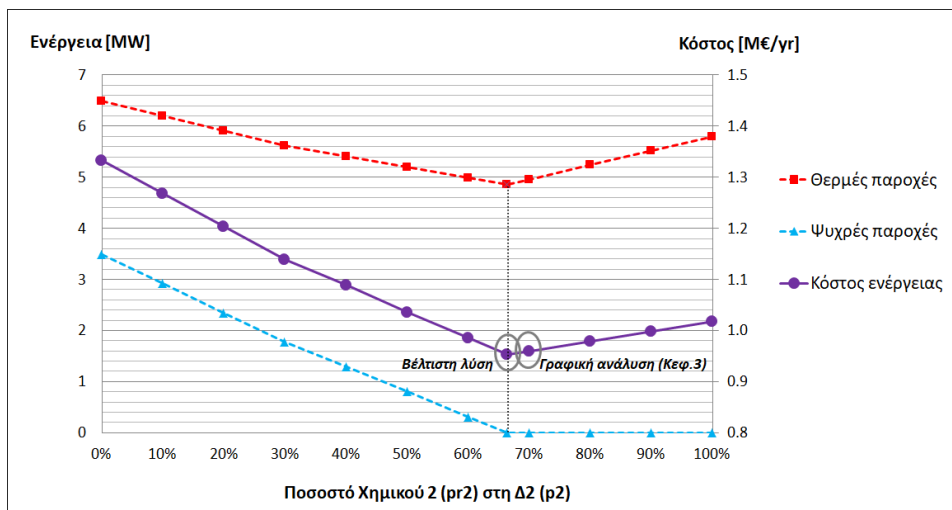
Σχήμα 5.8: BBR της αλυσίδας προϊόντων του Σχήματος 3.1 και μέγιστες δυναμικότητες υποψήφιων διεργασιών

Από το Σχήμα 3.2, υπενθυμίζεται ότι διαθέσιμη θερμότητα προσφέρεται μόνον από την Δ1, η οποία εισέρχεται σε κάθε περίπτωση στη Συνολική Μονάδα και στη μέγιστη δυναμικότητά της, ενώ οι ανταγωνιστικές Δ2 και Δ3 λειτουργούν μόνον ως καταβόθρες. Οι δυναμικότητες των ανταγωνιστικών διεργασιών επιλέγονται από το μοντέλο, έτσι ώστε αφενός να αξιοποιείται πλήρως η διαθέσιμη θερμότητα των πηγών της Συνολικής Μονάδας για την παραγωγή 5.13 MW ατμού και αφετέρου η Συνολική Μονάδα να μην παρουσιάζει ανάγκες ψύξης. Σε οποιοδήποτε άλλο σενάριο είτε η διαθέσιμη θερμότητα της Δ1 θα αξιοποιούταν πλήρως και θα αυξάνονταν περαιτέρω οι θερμές παροχές, είτε η αναξιοποίητη διαθέσιμη θερμότητα της Δ1 θα απορριπτόταν με κόστος ψυχρών παροχών. Αυτές οι δύο περιπτώσεις σεναρίων εκφράζονται από τα σημεία δεξιά και αριστερά της βέλτιστης λύσης που φαίνεται στο Σχήμα 5.10. Στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζεται το ενεργειακό κόστος όλων των στρατηγικών διαμορισμού της κοινής τροφοδοσίας στις ανταγωνιστικές διεργασίες Δ2 και Δ3 συμπεριλαμβανομένων της βέλτιστης λύσης από τη χρήση του μοντέλου ICT-BBR και της «καλύτερης» λύσης που βρέθηκε με τη χρήση της συμβατικής γραφικής ανάλυσης και τη χρήση σταθερών βημάτων διαμορισμού (10%) στο Κεφάλαιο 3 (βλ. Σχήμα 3.4).

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης



Σχήμα 5.9: Βελτιστοποιημένη αλυσίδα προϊόντων και SSSP της βέλτιστης Συνολικής Μονάδας

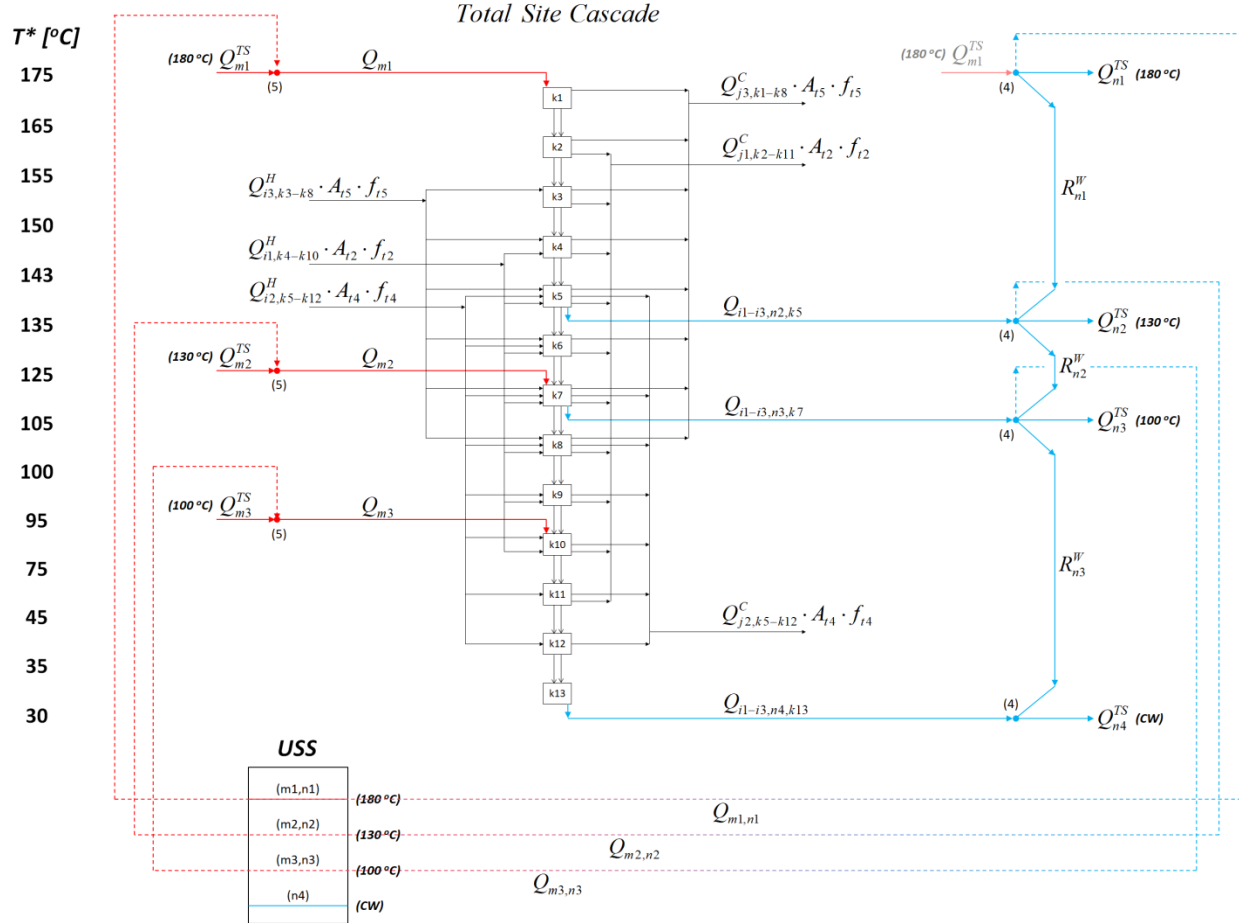


Σχήμα 5.10: Διάγραμμα κόστους ενέργειας και φρέσκων θερμών/ψυχρών παροχών συναρτήσει της κατανομής της κοινής τροφοδοσίας στις ανταγωνιστικές διεργασίες.

5.5.2. Εφαρμογή του συνδυαστικού μοντέλου CIT-BBR

Εναλλακτικά του συστήματος πολλαπλών-καταρρακτών του Σχήματος 5.7, το πρόβλημα της προηγούμενης ενότητας 5.5.1 μελετάται με τη χρήση του ενιαίου καταρράκτη TSC και του μοντέλου μεταφόρτωσης CIT. Η αναπαράσταση και τα ισοζύγια μάζας του BBR του Σχήματος 5.8 ισχύουν ως έχουν. Το Σχήμα 5.11 παρουσιάζει τις ενεργειακές ροές του TSC και τη συνεισφορά των ρευμάτων ρυθμισμένες σύμφωνα με τις δυναμικότητες των υποψήφιων διεργασιών.

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης



Σχήμα 5.11: Αναπαράσταση TSC για το παράδειγμα του Σχήματος 3.1 χρησιμοποιώντας το μοντέλο CIT

Εντός των ενδιάμεσων του TSC εφαρμόζονται οι κόμβοι 1, 2 και 3 (Σχήμα 5.5) για την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ ρευμάτων και παροχών. Η άμεση ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ ρευμάτων διαφορετικών διεργασιών αποκλείεται θέτοντας τις ακόλουθες ροές (μεταβλητές) ίσες με μηδέν: $Q_{i1,j2,k1-k13} = Q_{i1,j3,k1-k13} = Q_{i2,j1,k1-k13} = Q_{i2,j3,k1-k13} = 0$, όπου $i1, i2, i3$ και $j1, j2, j3$ τα θερμά και ψυχρά ρεύματα των $\Delta1, \Delta2, \Delta3$, αντίστοιχα. Περίσσεια θερμότητα των διαστημάτων "k1-k5" και "k6-k7" εξάγεται προς τον κόμβο 4 και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού 130 °C και 100 °C, αντίστοιχα, όπως εφαρμόστηκε στην περίπτωση τους Σχήματος 5.7. Ο παραγόμενος ατμός μεταφέρεται στους κόμβους 5 των αντίστοιχων επιπέδων ατμού μέσω των ενεργειακών γεφυρών $Q_{n2,m2}$ και $Q_{n3,m3}$ και αποδίδεται στα διαστήματα «k7» (ατμός 130 °C) και «k10» (ατμός 100 °C) εξοικονομώντας απαιτήσεις φρέσκου ατμού, Q_{m2}^S και Q_{m3}^S . Οι λειτουργίες των ενεργειακών ροών περιφερειακά των κόμβων 4 και 5 είναι όμοιες με αυτές των κόμβων 2 και 3 του Σχήματος 5.7.

Η ανάπτυξη της αναλυτικής αναπαράστασης του Σχήματος 5.11 δεν απαιτείται από τον χρήστη, παρά μόνον η προετοιμασία των δεδομένων του μοντέλου, όπως περιγράφονται στα σημεία (1)-(3) της προηγούμενης ενότητας 5.5.1. Το συνολικό μοντέλο βελτιστοποίησης αποτελείται από τα ισοζύγια μάζας του BBR (Eq.4.1-Eq.4.4) και τα ισοζύγια ενέργειας του CIT (Eq.5.14-Eq.5.26), ενώ η αντικειμενική συνάρτηση Eq.5.27 χρησιμοποιείται για το υπολογισμό του κόστους θέρμανσης και ψύξης της συνολικής μονάδας. Το μοντέλο καταλήγει στα ίδια αποτελέσματα (βέλτιστο χαρτοφυλάκιο διεργασιών και βοηθητικές παροχές) με αυτά της προηγούμενης ενότητας 5.5.1. που χρησιμοποιεί το εναλλακτικό μοντέλο ICT-BBR.

5.5.3. Ολοκλήρωση βιομηχανίας ζάχαρης με βιοδιεργασίες: αξιοποίηση υπολειμμάτων επεξεργασίας ζαχαροκάλαμων

Το παράδειγμα εξετάζει την επέκταση μίας υπάρχουσας βιομηχανίας παραγωγής ζάχαρης – Savannah Sugar Company στη Νιγηρία (Barambu et al., 2017) – αξιοποιώντας υπολείμματα από την επεξεργασία ζαχαροκάλαμων, τα οποία παρουσιάζουν υψηλό λιγνοκυτταρινούχο περιεχόμενο. Η τροφοδοσία της βιομηχανίας ανέρχεται ημερησίως στους 4,000 τόνους ζαχαροκάλαμων αποδίδοντας 50,000 τόνους επεξεργασμένης ζάχαρης ετησίως. Ύστερα και από το τελευταίο στάδιο εκχύλισης των ζαχαροκάλαμων παραμένει ένα μεγάλο ποσοστό ινώδους υπολείμματος, τη βαγάσση (bagasse), το οποίο ανέρχεται στους 50 τόνους ανά ώρα. Η βαγάσση χρησιμοποιείται ως βιοκαύσιμο και καίγεται στον θάλαμο καύσης του λέβητα της βιομηχανίας για παραγωγή θερμότητας και ατμού διεργασίας. Εναλλακτικά, το παρόν παράδειγμα εξετάζει την αξιοποίηση της βαγάσσης για την παραγωγή γλυκαντικών ουσιών, βιοκαυσίμων ανώτερης ποιότητας (από τη βαγάσση) ή/και καινοτόμων υλικών (πολυμερών) με στόχο την επέκταση του υπάρχοντος χαρτοφυλακίου προϊόντων και την ενίσχυση της ευελιξίας, της ανταγωνιστικότητας και των περιθωρίων κερδοφορίας εντάσσοντας τη βιομηχανία σε νέες αγορές και αυξάνοντας την ενεργειακή της απόδοση.

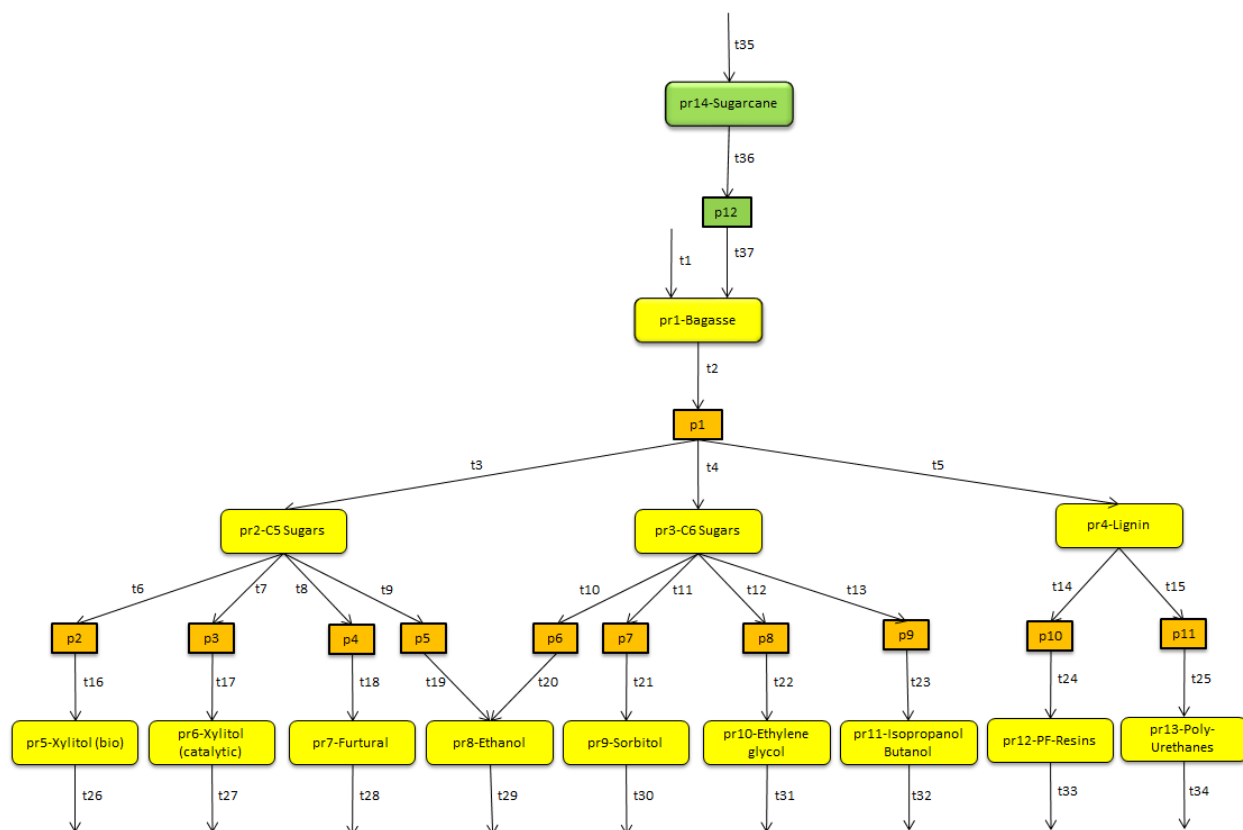
Οι συνθήκες της παρούσας ζαχαροβιομηχανίας είναι ιδανικές για την ανάπτυξη βιοδιυλιστηριακών δομών και νέων βιοπροϊόντων, καθώς η διαθεσιμότητα της βιοανανεώσιμης τροφοδοσίας βαγάσσης διασφαλίζεται από την ίδια την Savannah Sugar Company και ανανεώνεται ετησίως (ως υπόλειμμα της διεργασίας) από την γεωργική παραγωγή ζαχαροκάλαμων της εταιρίας, χωρίς να ανταγωνίζεται άλλες τροφοδοσίες (βρώσιμες, ή μη) και αποσυνδέοντας την παραγωγή βιοπροϊόντων από προμηθευτές βιομάζας.

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

Το πρόβλημα απαρτίζεται από τη (δεδομένη) διεργασία παραγωγής ζάχαρης και υποψήφιες χημικές και βιοχημικές διεργασίες, οι οποίες αναβαθμίζουν το λιγνοκυτταρινούχο υπόλειμμα βαγάσσης σε βιοπροϊόντα, όπως αυτά του BBR του Σχήματος 5.12. Η διεργασία ζάχαρης (p12) λαμβάνει ως τροφοδοσία ζαχαροκάλαμο (pr14) και αποδίδει τη βαγάσση ως προϊόν εισόδου της αλυσίδας βιοπροϊόντων (pr1). Το BBR επιτρέπει, σύμφωνα με τις ανάγκες του χρήστη, την εισαγωγή επιπλέον λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας, μέσω της διασύνδεσης t1, εφόσον είναι βιώσιμο και υπάρχει διαθεσιμότητα. Στο παρόν παράδειγμα οι βιοδιεργασίες εκμεταλλεύονται μόνο τη βιομάζα βαγάσσης που παράγεται από τη ζαχαροβιομηχανία.

Στο BBR του Σχήματος 5.12, η βιομάζα κλασμάτωναται στην διεργασία p1 σε τρία βασικά ενδιάμεσα C5 και C6 ζαχάρων και λιγνίνης, τα οποία αναβαθμίζονται περαιτέρω προς γλυκαντικές ουσίες (ξυλιτόλη, σορβιτόλη), διαλύτες και καύσιμα (αιθανόλη, ισοπροπανόλη, βουτανόλη), υλικά (ρητίνες, πολυουρεθάνες) και πρόδρομα χημικά για την παραγωγή καυσίμων, πολυμερών και άλλων εφαρμογών (φουρφουράλη, αιθυλενογλυκόλη).

Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται από δύο διαφορετικές οπτικές. Πρώτον, ερευνώνται τα βέλτιστα χαρτοφυλάκια διεργασιών και προϊόντων, τα οποία ελαχιστοποιούν το ενεργειακό κόστος, όταν ολοκληρωθούν με την δεδομένη-υπάρχουσα βιομηχανία ζάχαρης, και δεύτερον, διερευνώνται οι διεργασίες και τα προϊόντα, που μεγιστοποιούν την κερδοφορία της αναβαθμισμένης Συνολικής Μονάδας (ζαχαροβιομηχανία και βιοδιεργασίες). Για την εξαγωγή ενεργειακών και οικονομικών δεδομένων των υποψήφιων διεργασιών, όλες οι διεργασίες προσομοιώθηκαν με τη χρήση εμπορικών εργαλείων (Aspen plus v8.6 και του Aspen Process Economic Analyzer v8.6) σύμφωνα με τις κατευθύνσεις ειδικών στην παραγωγή κάθε υποψήφιου χημικού, όπου αποδόσεις και τα ενεργειακά αποτελέσματα επαληθεύθηκαν από πραγματικά δεδομένα εργαστηριακής κλίμακας και πιλότων (BIOCORE, 2014). Τα θερμικά δεδομένα και οι αποδόσεις της ζαχαροβιομηχανίας αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία (Barambu, 2017). Τα θερμικά και οικονομικά δεδομένα των διεργασιών του BBR του Σχήματος 5.12 παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.



Σχήμα 5.12: BBR της υπάρχουσας ζαχαροβιομηχανίας (πράσινο) και των υποψήφιων βιοδιεργασιών (πορτοκαλί)

Το USS διαθέτει 42 υποψήφια επίπεδα θερμών παροχών και 45 επίπεδα ψυχρών, με τα τελευταία να ενσωματώνουν και τις ψευδο-ψυχρές παροχές ατμού που εξυπηρετούν την άντληση θερμότητας για την παραγωγή των υποψήφιων επιπέδων ατμού. Οι θερμοκρασίες των υποψήφιων επιπέδων συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1. Ο μέγιστος αριθμός των επιλεχθέντων επιπέδων από το μοντέλο τίθενται στις 4 θερμές και 2 ψυχρές παροχές, ώστε οι λύσεις να είναι βιομηχανικά εφικτές. Τα μοναδιαία κόστη των υποψήφιων επιπέδων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β. Το πρόβλημα ολοκλήρωσης ενσωματώνει τα θερμά και ψυχρά ρεύματα των 12 υποψήφιων βιοδιεργασιών, και η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά διεργασιών και συνολικής μονάδας τίθενται στα: $\Delta T_{min} = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ και $\Delta T_{min}^{SITE} = 2 \cdot \Delta T_{min}$. Ύστερα από την ενσωμάτωση 120 θερμών και 112 ψυχρών ρευμάτων όλων των διεργασιών (βιομηχανία ζάχαρης και υποψήφιες) και των υποψήφιων επιπέδων του USS διαμορφώνονται 300 θερμοκρασιακά ενδιάμεσα για την ολοκλήρωση της Συνολικής Μονάδας.

Πίνακας 5.1: Υποψήφια επίπεδα βοηθητικών παροχών θέρμανσης και ψύξης

Επίπεδα θερμών παροχών								Επίπεδα ψυχρών παροχών							
m	T (°C)	m	T (°C)	m	T (°C)	m	T (°C)	n	T (°C)	n	T (°C)	n	T (°C)	n	T (°C)
1	500	12	250	23	195	34	140	1	295	13	235	25	175	37	115
2	300	13	245	24	190	35	135	2	290	14	230	26	170	38	110
3	295	14	240	25	185	36	130	3	285	15	225	27	165	39	105
4	290	15	235	26	180	37	125	4	280	16	220	28	160	40	100
5	285	16	230	27	175	38	120	5	275	17	215	29	155	41	25
6	280	17	225	28	170	39	115	6	270	18	210	30	150	42	0
7	275	18	220	29	165	40	110	7	265	19	205	31	145	43	-10
8	270	19	215	30	160	41	105	8	260	20	200	32	140	44	-30
9	265	20	210	31	155	42	100	9	255	21	195	33	135	45	-90
10	260	21	205	32	150			10	250	22	190	34	130		
11	255	22	200	33	145			11	245	23	185	35	125		
								12	240	24	180	36	120		

Και στις δύο περιπτώσεις βελτιστοποίησης της ενέργειας και της κερδοφορίας, το μοντέλο ενσωματώνει τα μοντέλα ενεργειακής ολοκλήρωσης ICT ή CIT. Εφόσον, δεν λαμβάνονται ειδικές περιπτώσεις ανταλλαγής θερμότητας, παρά μόνον (αυστηρά) άμεση ολοκλήρωση εντός κάθε διεργασίας και έμμεση ολοκλήρωση μεταξύ τους, και τα δύο μοντέλα μεταφόρτωσης (ICT/CIT) καταλήγουν στα ίδια ενεργειακά αποτελέσματα. Το μοντέλο απαρτίζεται από τις Eq.4.1-Eq.4.4 και Eq.5.1-Eq.5.12 για χρήση του απλοποιημένου μοντέλου ICT ή τις Eq.4.1-Eq.4.4 και Eq.5.14-Eq.5.26 για χρήση του αναλυτικότερου και πιο απαιτητικού μοντέλου CIT. Στην περίπτωση ενεργειακής βελτιστοποίησης το πρόβλημα λαμβάνει υπόψη το συνολικό κόστος παροχών θέρμανσης και ψύξης και χρησιμοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση Eq.5.13. Στην περίπτωση βελτιστοποίησης της κερδοφορίας το μοντέλο χρησιμοποιεί την εξίσωση Eq.5.28 και ακολουθείται μία συντηρητική στρατηγική υπολογισμού των κερδών και του κόστους υποθέτοντας αποκλίσεις στις τιμές των προϊόντων κατά -30% και αυξημένο κόστος επένδυσης και λειτουργίας κατά +30% από τις πραγματικές τιμές (βλ. Παράρτημα Β). Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο περιπτώσεων βελτιστοποίησης του BBR του Σχήματος 5.12 σύμφωνα με τη χρήση ενεργειακών και οικονομικών (κερδοφορία) κριτηρίων.

Περίπτωση 1: Βιοδιυλιστήριο ελάχιστου ενεργειακού κόστους

Το BBR του Σχήματος 5.12 βελτιστοποιήθηκε με κριτήριο το ενεργειακό κόστος της υπο-κατασκευής Συνολικής Μονάδας. Τα μοντέλα ICT και CIT κατέληξαν στο ίδιο βέλτιστο χαρτοφυλάκιο και ενεργειακό

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

κόστος. Στόχος, πέραν της εύρεσης βέλτιστης λύσεως, είναι η εξαγωγή τάσεων και προτιμήσεων σε προϊόντα και διεργασίες που ολοκληρώνονται αποδοτικότερα με την υπάρχουσα βιομηχανία. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύθηκε 100 φορές με τη χρήση τεχνικών “integer cuts” – αποκλείοντας λύσεις που βρέθηκαν σε προηγούμενες επιλύσεις – για την εύρεση των 100 καλύτερων λύσεων. Από την ανάλυση εξάγονται πληροφορίες για τις δυναμικότητες που επιλέχθηκαν για κάθε διεργασία και κατόπιν υπολογίζονται τα ποσοστά επιτυχίας και εμφάνισης κάθε προϊόντος/διεργασίας στην Συνολική Μονάδα συναρτήσει των δυναμικοτήτων που προτιμήθηκαν. Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι 5 καλύτερες λύσεις βιοδιυλιστηρίων που επιλέχθηκαν να ενταχθούν και να ολοκληρωθούν με την υπάρχουσα ζαχαροβιομηχανία σύμφωνα με ενεργειακά κριτήρια.

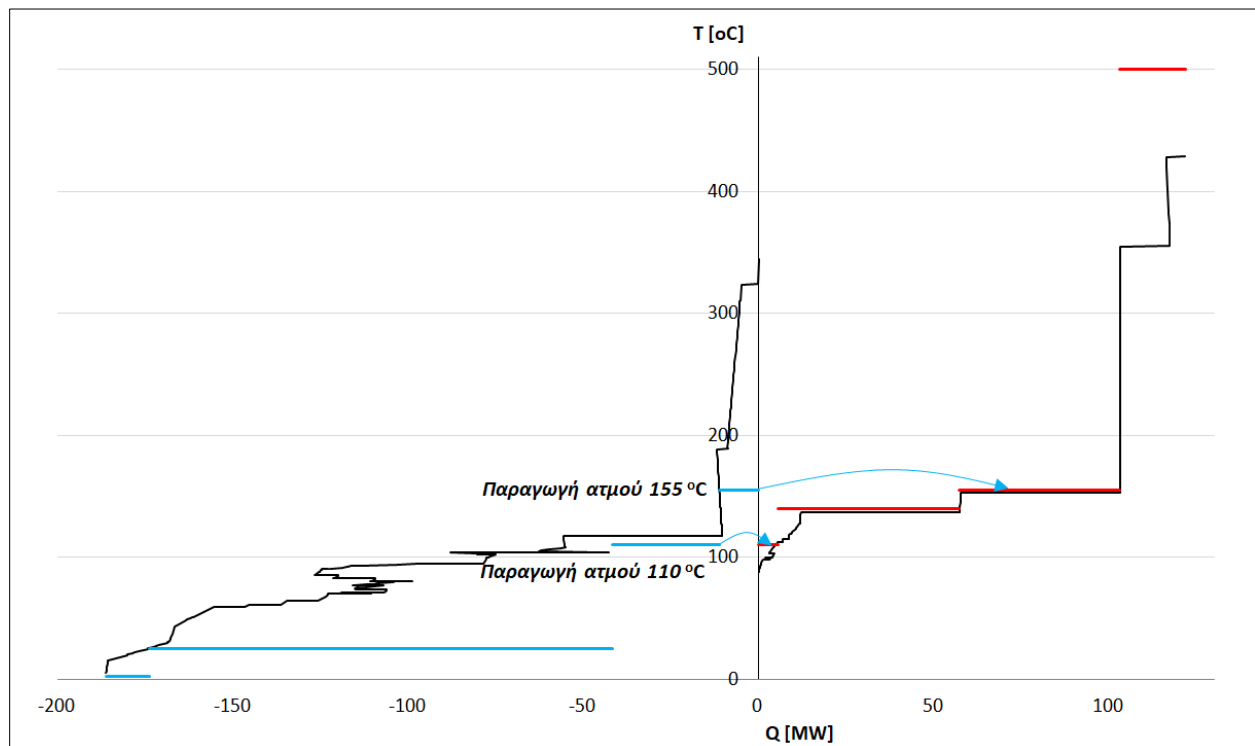
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα 5 καλύτερων λύσεων του προβλήματος ενεργειακής βελτιστοποίησης

Λύση	Βιοδιυλιστήριο	Θερμές Παροχές [MW]	Ψυχρές Παροχές [MW]	Εξοικονόμηση ατμού [MW]	Ενεργειακό κόστος εξοικονόμησης [Μ€/γρ]	Ενεργειακό κόστος [Μ€/γρ]
1		105.2	157.1	29.1	1.1	18.7
2		105.2	157.1	31.5	1.3	18.7
3		105.0	158.1	31.1	1.2	18.7
4		105.0	158.2	31.1	1.2	18.7
5		105.0	158.3	31.1	1.2	18.7

Η «καλύτερη» βέλτιστη λύση (1^η λύση του Πίνακα 5.2) περιλαμβάνει την παραγωγή αιθανόλης, σορβιτόλης και πολυουρεθανών, ενώ το βελτιστοποιημένο ενεργειακό κόστος της Συνολικής Μονάδας (υπάρχουσα και νέες διεργασίες) υπολογίστηκε στα 18.7 Μ€/γρ. Οι θερμές παροχές υπολογίστηκαν στα 105.2 MW και οι ψυχρές στα 157.1 MW, ενώ η εξοικονόμηση ατμού (λόγω έμμεσης ολοκλήρωσης) φτάνει τα 29.1 MW, τα οποία ισοδυναμούν με εξοικονόμηση ενέργειας 22% και κόστους 1.1 Μ€/γρ. Για

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

την επίτευξη των βέλτιστων ενεργειακών στόχων ολοκλήρωσης επιλέχθηκαν τα βέλτιστα επίπεδα ατμού στους 300 °C (VHP), 155 °C (MP), 140 °C (MP), 110 °C (LP), ενώ για ψύξη κρύο νερό (25 °C) και ψύξη στους 0 °C. Όπως παρουσιάζεται στο SSSP του Σχήματος 5.13 για την «καλύτερη» βέλτιστη λύση, εντοπίζεται παραγωγή 11 MW ατμού 155 °C, ο οποίος προέρχεται από διαθέσιμη ενέργεια της διεργασίας σορβιτόλης και καλύπτει το 13% των αναγκών της διεργασίας κλασμάτωσης. Η τελευταία παράγει επιπλέον 18.1 MW ατμού 110 °C, ο οποίος υπερκαλύπτει τις ανάγκες της βιοδιεργασίας παραγωγής αιθανόλης (είσοδος βιοαιθανόλης χωρίς ενεργειακό κόστος), ενώ μπορεί να διαθέσει περίσσεια θερμότητα για παραγωγή έργου με χρήση τουρμπίνων.



Σχήμα 5.13: SSSP της βέλτιστης Συνολικής Μονάδας (παραγωγή και εξοικονόμηση ατμού)

Όπως ήταν αναμενόμενο (βλ. Πίνακα 5.2), οι επόμενες καλύτερες λύσεις, που εντοπίζονται από το αποκλεισμό των προηγούμενων καλύτερων λύσεων με χρήση εξισώσεων integer cuts, παρουσιάζουν υψηλότερα ενεργειακά κόστη.

Οι δυναμικότητες των διεργασιών που επιλέγονται στο σύνολο των 100 καλύτερων λύσεων αποκαλύπτουν τις προτιμήσεις (σύμφωνα με ενεργειακά κριτήρια) μεταξύ ανταγωνιστικών διεργασιών για την αξιοποίηση κάθε χημικού ενδιάμεσου C5, C6 σακχάρων και λιγνίνης. Ο Πίνακας 5.3 συνοψίζει

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

(για κάθε λύση) τα ποσοστά της επιλεχθείσας δυναμικότητας (F_t) κάθε διεργασίας ως προς τη μέγιστη (\bar{F}_t), ως εξής: $G_p = \frac{F_t}{\bar{F}_t} \quad \forall t \in T_p^{in}$. Όπως ισχύει από τα ισοζύγια μάζας, το άθροισμα των ποσοστών δυναμικότητας G_p μεταξύ ανταγωνιστικών διεργασιών θα πρέπει να είναι ίσο με το ποσοστό δυναμικότητας της «μητρικής» διεργασίας (G_{core}), η οποία παράγει την κοινή τους τροφοδοσία. Ακολουθώντας, για ένα σύνολο N διαφορετικών λύσεων, το ποσοστό προτίμησης ($Preference_p$) κάθε διεργασίας έναντι των ανταγωνιστών της στο σύνολο των N λύσεων υπολογίζεται ως ο λόγος του αθροίσματος των ποσοστών δυναμικότητας της διεργασίας όλων των λύσεων ($\sum_{n=1}^N G_{p_n}$) προς το αντίστοιχο άθροισμα των ποσοστών δυναμικότητας της μητρικής διεργασίας ($\sum_{n=1}^N G_{core_n}$), ως εξής:

$$Preference_p = \frac{\sum_{n=1}^N G_{p_n}}{\sum_{n=1}^N G_{core_n}},$$

αντικατοπτρίζοντας το μέγεθος προτίμησης διαμοιρασμού της κοινής τροφοδοσίας προς την κάθε ανταγωνιστική διεργασία. Ακολουθώντας, το άθροισμα των προτιμήσεων ανταγωνιστικών διεργασιών θα πρέπει να ισούται με τη μονάδα, δηλαδή $\sum_{p(\text{ανταγωνιστικές})} Preference_p = 1$, όπως εξηγείται από το ακόλουθο παράδειγμα.

Παραδείγματος χάριν, μελετάται η προτίμηση μεταξύ των ανταγωνιστικών διεργασιών p_3 και p_4 του BBR του Σχήματος 5.12. Έστω, σε πλήθος μίας μόνο λύσης, ότι η μητρική διεργασία των p_3 και p_4 (δηλαδή η p_1) έχει επιλεγεί με ποσοστό δυναμικότητας $G_{p_1} = G_{core\ process} = 30\%$ της μέγιστης, ενώ οι p_3 και p_4 έχουν αντίστοιχα επιλεγεί με ποσοστά δυναμικότητας $G_{p_3} = 6\%$ και $G_{p_4} = 24\%$, και λόγω ισοζυγίων μάζας ισχύει: $G_{p_1} = G_{p_3} + G_{p_4}$. Τότε η απόδοση προτίμησης της p_4 είναι $Preference_{p_4} = \frac{G_{p_4}}{G_{p_1}} = 80\%$, έναντι της p_3 που είναι $Preference_{p_3} = \frac{G_{p_3}}{G_{p_1}} = 20\%$, όπου $Preference_{p_3} + Preference_{p_4} = 1$.

Οι αποδόσεις προτίμησης ανταγωνιστικών διεργασιών/προϊόντων του BBR για το σύνολο των 100 καλύτερων λύσεων συνοψίζονται στο γράφημα του Σχήματος 5.14, από όπου εξάγεται το συμπέρασμα ότι η παραγωγή αιθανόλης από C5 Σάκχαρα, σορβιτόλης από C6 Σάκχαρα και πολυουρεθανών από λιγνίνη στατιστικά προτιμώνται έναντι των υπολοίπων ανταγωνιστικών διεργασιών αποδίδοντας τις υψηλότερες ενεργειακές αποδόσεις κατά την ολοκλήρωσή τους τόσο με την υπάρχουσα βιομηχανία ζάχαρης όσο και μεταξύ τους. Η βιομηχανία ζάχαρης επιλέγεται σε κάθε λύση ως δεδομένη διεργασία του βιομηχανικού συγκροτήματος, ενώ η διεργασία κλασμάτωσης βαγάσσης τίθενται ως δεδομένη επιλογή του μοντέλου, ειδάλλως το μοντέλο θα απέκλειε κάθε κατάντη βιοδιεργασία για την ελαχιστοποίηση του ενεργειακού κόστους και δεν θα οριζόταν βιοδιυλιστήριο. Έτσι, σε κάθε λύση η ζαχαροβιομηχανία και η διεργασία κλασμάτωσης της βιομάζας παρουσιάζουν αποδόσεις προτίμησης 100%.

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

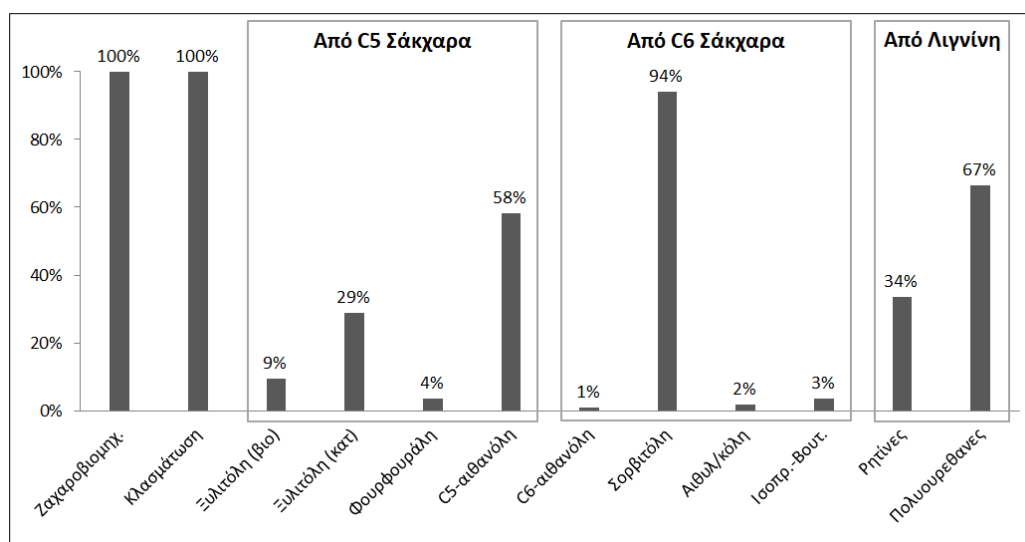
Πίνακας 5.3: Επιλογή διεργασιών και κατανομή ενδιάμεσων χημικών στις 100 καλύτερες λύσεις

Λύση	Αξιοποίηση Ζαχαροκάλαμων		Αξιοποίηση C5 Σακχάρων				Αξιοποίηση C6 Σακχάρων			Αξιοποίηση Λιγνίνης		
	Ζαχαροβιομηχανία	Κλασμάτωση	Συκτώδη (ζύμωση)	Συκτώδη (καταλυτική)	Φουρφουράλη	C5-Αιθανόλη	C6-Αιθανόλη	Σορβιτόλη	Αιθυλονογλυκόλη	Ισοπροπανόλη Βουτανόλη	Ρητίνες	Πολυουρεθάνες
1	1	1				1		1			0.1	1
2	1	1				1		1			0.1	0.9
3	1	1		0.1		0.9		1			0.1	1
4	1	1		0.1		0.9		1			0.1	0.9
5	1	1	0.1			0.9		1			0.1	1
6	1	1	0.1			0.9		1			0.1	0.9
7	1	1	0.1	0.1		0.8		1			0.1	1
8	1	1	0.1	0.1		0.8		1			0.1	0.9
9	1	1				1		1			1	
10	1	1		0.1		0.9		1			1	
11	1	1		1				1			1	1
12	1	1	0.1			0.9		1			1	
13	1	1		1				1			0.1	0.9
14	1	1	0.1	0.1		0.8		1			1	
15	1	1	0.1	0.9				1			1	
16	1	1	0.1	0.9				1			0.1	0.9
17	1	1		1				1			1	
18	1	1	0.1	0.9				1			1	
19	1	1			0.1	0.9		1			1	
20	1	1			0.1	0.9		1			0.1	0.9
21	1	1		0.1	0.1	0.8		1			1	
22	1	1		0.1	0.1	0.8		1			0.1	0.9
23	1	1	0.1		0.1	0.8		1			1	
24	1	1				1		0.9		0.1	1	
25	1	1	0.1		0.1	0.8		1			0.1	0.9
26	1	1				1		0.9		0.1	0.1	0.9
27	1	1	0.1	0.1	0.1	0.7		1			1	
28	1	1		0.1	0.1	0.9		0.9		0.1	1	
29	1	1	0.1	0.1	0.1	0.7		1			0.1	0.9
30	1	1		0.1	0.1	0.9		0.9		0.1	0.1	0.9
31	1	1			0.1	0.9		1			1	
32	1	1		0.1	0.1	0.8		1			1	
33	1	1	0.1	0.1		0.8		0.9		0.1	1	
34	1	1	0.1	0.1		0.8		0.9		0.1	0.1	0.9
35	1	1	0.1			0.9		0.9		0.1	1	
36	1	1		0.9	0.1			1			1	
37	1	1	0.1		0.1	0.8		1			1	
38	1	1		0.9	0.1			1			0.1	0.9
39	1	1	0.1			0.9		0.9		0.1	0.1	0.9
40	1	1	0.1	0.1	0.1	0.7		1			1	
41	1	1		0.1	0.1	0.9		0.9		0.1	1	
42	1	1	0.1	0.8	0.1			1			1	
43	1	1	0.1	0.8	0.1			1			0.1	0.9
44	1	1				1		0.9		0.1	1	
45	1	1		1				0.9		0.1	1	
46	1	1	0.1	0.1206		0.7794		0.9		0.1	1	
47	1	1		1				0.9		0.1	0.1	0.9
48	1	1		0.9	0.1			1			1	
49	1	1	0.1	0.9				0.9		0.1	1	
50	1	1	0.1	0.9				0.9		0.1	0.1	0.9
51	1	1	0.1	0.8	0.1			1			1	
52	1	1	0.1			0.9		0.9		0.1	1	
53	1	1		1				0.9		0.1	1	
54	1	1				1		0.9	0.1		1	
55	1	1				1		0.9	0.1		0.1	0.9
56	1	1		0.1		0.9		0.9	0.1		1	
57	1	1		0.1		0.9		0.9	0.1		0.1	0.9
58	1	1	0.1	0.9				0.9			1	
59	1	1			0.1	0.9		0.9		0.1	1	
60	1	1			0.1	0.9		0.9		0.1	0.1	0.9
61	1	1		0.1	0.1	0.8		0.9		0.1	1	
62	1	1		0.1	0.1	0.8		0.9		0.1	0.1	0.9
63	1	1	0.1			0.9		0.9	0.1		1	
64	1	1	0.1			0.9		0.9	0.1		0.1	0.9
65	1	1	0.1	0.1		0.8		0.9	0.1		1	
66	1	1	0.1	0.1		0.8		0.9	0.1		0.1	0.9
67	1	1	0.1		0.1	0.8		0.9		0.1	1	
68	1	1				1		0.9	0.1		1	
69	1	1	0.1		0.1	0.8		0.9		0.1	0.1	0.9
70	1	1				1	0.1	0.9			1	
71	1	1		1				1			1	
72	1	1	0.1	0.1	0.1	0.7		0.9		0.1	1	
73	1	1		0.1		0.9		0.9	0.1		1	
74	1	1				1	0.1	0.9			0.1	0.9
75	1	1	0.1	0.1	0.1	0.7		0.9		0.1	0.1	0.9
76	1	1		1				1			0.1	0.9
77	1	1			0.1	0.9		0.9		0.1	1	
78	1	1		0.1	0.1	0.8		0.9		0.1	1	
79	1	1	0.1			0.9		0.9	0.1		1	
80	1	1		0.1		0.9		0.9			1	
81	1	1		1			0.1	0.9	0.1		1	
82	1	1	0.1	0.1		0.8		0.9	0.1		1	
83	1	1		0.1		0.9	0.1	0.9			0.1	0.9
84	1	1		1				0.9	0.1		0.1	0.9
85	1	1		0.9	0.1			0.9		0.1	1	
86	1	1	0.1		0.1	0.8		0.9		0.1	1	
87	1	1	0.9		0.1			1			1	
88	1	1		0.9	0.1			0.9		0.1	0.1	0.9
89	1	1				1	0.1	0.9			1	
90	1	1	0.9		0.1			1			0.1	0.9
91	1	1	0.1	0.1	0.1	0.7		0.9		0.1	1	
92	1	1	0.1	0.9				0.9	0.1		1	
93	1	1	0.1	0.9				0.9	0.1		0.1	0.9
94	1	1	0.1	0.8	0.1			0.9		0.1	1	
95	1	1	0.1	0.4266		0.4734	0.1	0.9			1	
96	1	1	0.1	0.8	0.1			0.9		0.1	0.1	0.9
97	1	1	0.1	0.4348		0.4652	0.1	0.9			0.1	0.9
98	1	1		0.1		0.9	0.1	0.9			1	
99	1	1		1				1			1	
100	1	1		1				0.9	0.1		1	

Προτίμηση 100% 100% 9% 29% 4% 58% 1% 94% 2% 3% 34% 67%

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

Αν και η ξυλιτόλη εντοπίζεται στη δεύτερη θέση για την αξιοποίηση των C5 σακχάρων με ποσοστό προτίμησης 29% (έναντι τις αιθανόλης με 59%) προτείνεται η ένταξή και της γλυκαντικής ουσίας λόγω συνάφειας των αγορών που ήδη συμμετέχει η υπάρχουσα βιομηχανία. Οι συντελεστές προτίμησης μπορούν να αξιοποιηθούν για την στάθμιση της κοινής τροφοδοσίας (C5 σάκχαρα) προς τις δύο ανταγωνιστικές διεργασίες ξυλιτόλης-αιθανόλης διαμοιράζοντας 33.3% $\left(= \frac{29\%}{29\%+58\%} \right)$ των C5 Σακχάρων στην παραγωγή ξυλιτόλης και 66.7% $\left(= \frac{58\%}{29\%+58\%} \right)$ για την παραγωγή αιθανόλης. Τέλος, στο Σχήμα 5.15 συνοφίζεται το βελτιστοποιημένο ενεργειακό κόστος της Συνολικής Μονάδας, το κόστος των βοηθητικών παροχών θέρμανσης και ψύξης και το κόστος θέρμανσης (ατμού) που εξοικονομήθηκε λόγω έμμεσης ολοκλήρωσης στις 100 καλύτερες λύσεις.

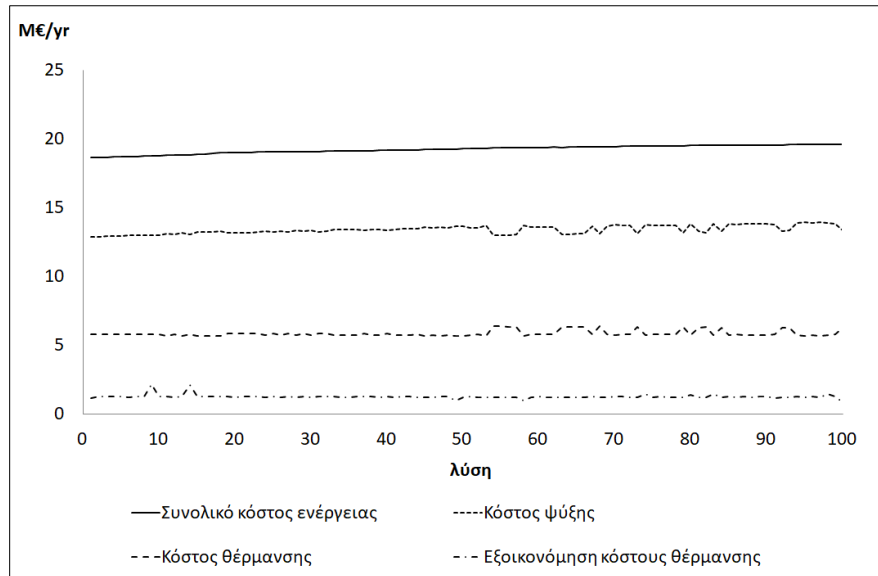


Σχήμα 5.14: Αποτελέσματα προτιμήσεων βιοδιεργασιών για την επέκταση υπάρχουσας ζαχαροβιομηχανίας βασισμένα σε ενεργειακά κριτήρια

Το πρόβλημα σύνθεσης και ολοκλήρωσης υποψήφιων διεργασιών μαζί με τη βιομηχανία παραγωγής ζάχαρης εξετάζεται ξανά σύμφωνα με οικονομικά κριτήρια. Το μαθηματικό μοντέλο είναι ίδιο με αυτό της προηγούμενης Περίπτωσης 1 – περιλαμβάνει τα ισοζύγια του BBR και του ICT ή του CIT – με τη μόνη διαφορά ότι χρησιμοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση υπολογισμού της κερδοφορίας (Eq.5.28). Σε αντίθεση με την παραπάνω προσέγγιση ελαχιστοποίησης του ενεργειακού κόστους, εδώ η επιλογή της διεργασίας κλασμάτωσης βαγάσσης δεν θεωρείται δεδομένη για το μοντέλο, δεδομένου ότι αναμένεται το μοντέλο να επιλέξει τουλάχιστον μία από τις κατάντη βιοδιεργασίες που

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

παρουσιάζουν τις υψηλότερες οικονομικές αποδόσεις. Σε αντίθετη περίπτωση, το μοντέλο δεν θα επιλέξει την επέκταση της ζαχαροβιομηχανίας, εάν δεν υπάρχουν οικονομικά κίνητρα.



Σχήμα 5.15: Ενεργειακά αποτελέσματα και αντικειμενική συνάρτηση (ενεργειακό κόστος) των 100 καλύτερων λύσεων

Περίπτωση 2: Βιοδιυλιστήριο μέγιστης κερδοφορίας

Επαναλαμβάνεται η ίδια στρατηγική για τον εντοπισμό των 100 οικονομικά αποδοτικότερων χαρτοφυλακίων βιοδιεργασιών (με χρήση τεχνικών integer cuts) για την επέκταση της υπάρχουσας βιομηχανίας. Όμοια με προηγουμένως, εξάγονται οι δυναμικότητες κάθε διεργασίας και τα αποτελέσματα κερδοφορίας τη Συνολικής Μονάδας για κάθε λύση. Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται οι 5 πιο κερδοφόρες συνθέσεις διεργασιών και προϊόντων, με την διεργασία ζάχαρης να συμπεριλαμβάνεται στη Συνολική Μονάδα σε κάθε λύση.

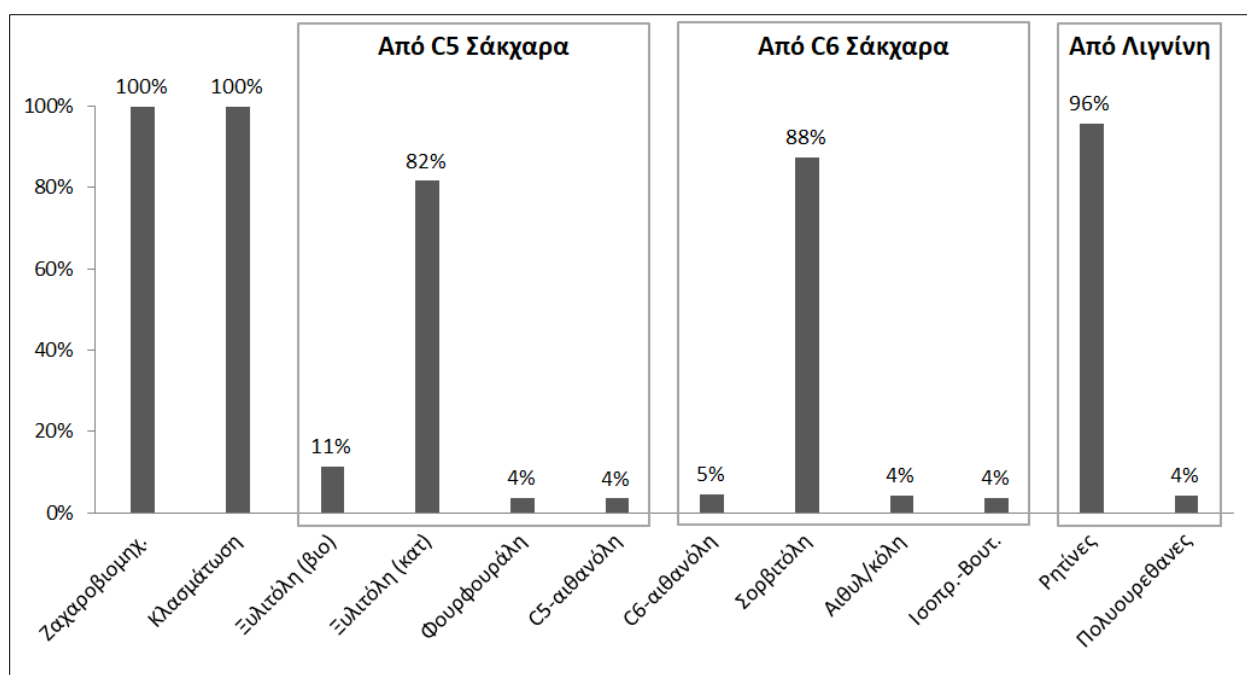
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα των 5 πιο κερδοφόρων λύσεων

Λύση	Βιοδιωλιστήριο	Κόστος θέρμανσης [Μ€/yr]	Κόστος ψύξης [Μ€/yr]	Εξοικονόμηση θέρμανσης [Μ€/yr]	Ενεργειακό κόστος [Μ€/yr]	Κερδοφορία [Μ€/yr]
1		5.7	13.3	1.2	18.9	16.9
2		5.7	13.3	1.2	19.0	16.6
3		5.6	14.1	1.1	19.7	16.5
4		6.3	13.4	1.2	19.6	16.3
5		5.6	14.2	1.2	19.8	16.2

Η «καλύτερη» βέλτιστη λύση (1^η λύση του Πίνακα 5.4) περιλαμβάνει το χαρτοφυλάκιο παραγωγής ξυλιτόλης (KAT) (καταλυτική διεργασία), σορβιτόλης και πολυφαινολικών ρητινών αποδίδοντας 16.9 Μ€ ετησίως από τις πωλήσεις των νεοεισαχθέντων βιοπροϊόντων. **Το ενεργειακό κόστος υπολογίστηκε στα 18.9 Μ€/yr παρουσιάζοντας ίδια τάξη μεγέθους με τα περιθώρια κερδοφορίας, γεγονός που καθιστά ζωτικής σημασίας την εφαρμογή τεχνικών άμεσης και έμμεσης ενεργειακής ολοκλήρωσης για τη διασφάλιση της βιωσιμότητας της βιομηχανίας.** Η εξοικονόμηση ατμού θέρμανσης (έμμεση ολοκλήρωση) ανέρχεται στα 1.2 Μ€/yr ενισχύοντας επιπλέον την κερδοφορία της βέλτιστης λύσης κατά 4%. Ατμός παραγόμενος από τη διεργασία σορβιτόλης (11 MW) καλύπτει το 14% των αναγκών της διεργασίας κλασμάτωσης, ενώ η τελευταία παράγει 8 MW καλύπτοντας πλήρως τις ανάγκες θέρμανσης των διεργασιών παραγωγής ξυλιτόλης και ρητινών. **Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει τη σημασία αντιμετώπισης του προβλήματος ολοκλήρωσης ως πρόβλημα σύνθεσης για τον εντοπισμό ενεργειακά συμπληρωματικών διεργασιών, οι οποίες μπορούν να καλυφθούν ενεργειακά από την διαθέσιμη ενέργεια άλλων εμπλεκόμενων διεργασιών.** Τα βελτιστοποιημένα επίπεδα βοηθητικών παροχών περιλαμβάνουν ατμό 300 °C (VHP), 155 °C (MP), 140 °C (MP) και 115 °C (LP) και ψύξη με κρύο νερό (25 °C) και ψύξη στους 0 °C και τους -25 °C.

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

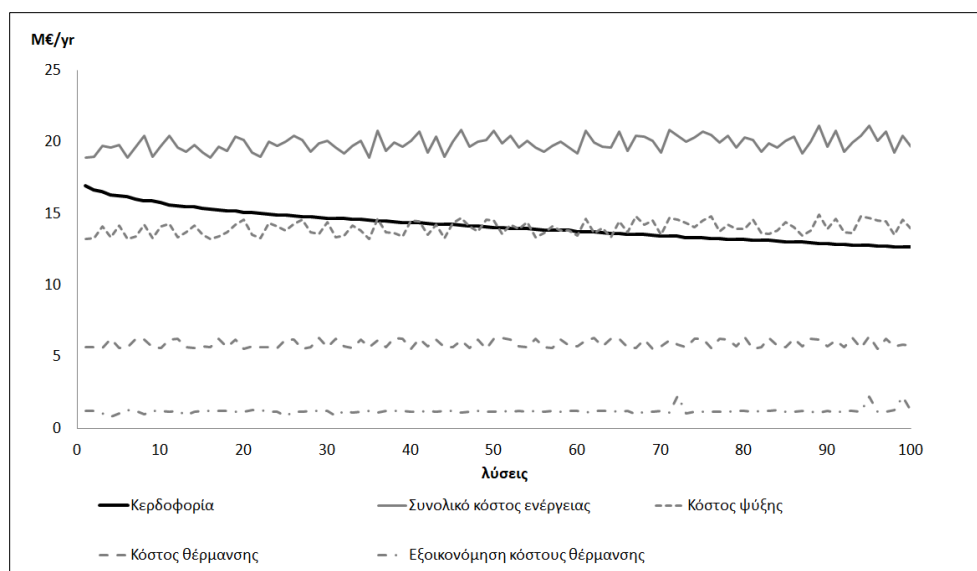
Οι αποδόσεις προτίμησης μεταξύ των ανταγωνιστικών διεργασιών και προϊόντων του μελετώμενου BBR υπολογίστηκαν βάσει των δυναμιכוτήτων που επιλέχθηκαν στις 100 καλύτερες θέσεις, όπως εξηγήθηκε στην παραπάνω Περίπτωση 1. Ομοίως με το Σχήμα 5.14, το Σχήμα 5.16 παρουσιάζει τις προτιμήσεις στην παραγωγή κάθε προϊόντος με κριτήριο την κερδοφορία που αποδίδει κατά την ενσωμάτωσή του στη βιομηχανία ζάχαρης. Από τα αποτελέσματα του Σχήματος 5.16 αναδεικνύονται με υψηλά ποσοστά προτίμησης η παραγωγή ξυλιτόλης (ΚΑΤ) από C5 Σάκχαρα, σορβιτόλης από C6 Σάκχαρα και ρητινών από λιγνίνη, με βαθμολογίες προτίμησης άνω του 80% έναντι των ανταγωνιστικών διεργασιών τους. Οι διεργασίες κλασμάτωσης και η υπάρχουσα βιομηχανία ζάχαρης εμπλέκονται σε κάθε λύση Συνολικής Μονάδας παρουσιάζοντας βαθμολογίες προτίμησης 100%.



Σχήμα 5.16: Αποτελέσματα προτιμήσεων βιοδιεργασιών για την επέκταση υπάρχουσας ζαχαροβιομηχανίας βασισμένα σε οικονομικά κριτήρια

Το Σχήμα 5.17 συνοψίζει τα αποτελέσματα κερδοφορίας σε συνδυασμό με τα επιμέρους ενεργειακά κόστη (θέρμανσης, ψύξης και εξοικονόμηση ατμού) στο σύνολο των 100 καλύτερων λύσεων που μελετήθηκαν, με το συνολικό κόστος ενέργειας να εμφανίζεται σταθερά σημαντικό και μεγαλύτερο από τα περιθώρια κερδοφορίας, ενώ η εξοικονόμηση κόστους ατμού λόγω έμμεσης ολοκλήρωσης κυμαίνεται στο 11-28% του κόστους θέρμανσης και στο 2-8% των περιθωρίων κερδοφορίας.

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης



Σχήμα 5.17: Ενεργειακά αποτελέσματα και αντικειμενική συνάρτηση (ενεργειακό κόστος) των 100 καλύτερων λύσεων

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι προτιμήσεις προϊόντων που εξήχθησαν με τη χρήση και των δύο εναλλακτικών κριτηρίων (ενέργειας και κερδοφορίας), που παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.14 και 5.16, παρουσιάζουν αρκετά υψηλά ποσοστά για τις περιπτώσεις της ξυλιτόλης, σορβιτόλης και των ρητινών. **Το γεγονός αυτό (ομοιότητα τάσεων από τη χρήση διαφορετικών κριτηρίων) αναδεικνύει τη επίδραση της ενεργειακής ολοκλήρωσης και του ενεργειακού κόστους για τη ανάπτυξη βιώσιμων λύσεων και καθιστά αναγκαία τη συνδυαστική χρήση μοντέλων ολοκλήρωσης, πέραν της αποκλειστικής χρήσης οικονομικών κριτηρίων που χρησιμοποιούνται στην βιβλιογραφία.**

Οι Πίνακες 5.2 και 5.4 και τα διαγράμματα προτιμήσεων (Σχήματα 5.14 και 5.16) αποτελούν σημαντικά εργαλεία στρατηγικής σημασίας για την διερεύνηση βιώσιμων λύσεων και νέων επενδύσεων. Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν σημαντικά κίνητρα για την ένταξη γλυκαντικών σορβιτόλης και ξυλιτόλης στο χαρτοφυλάκιο της βιομηχανίας ζάχαρης. Η επιπλέον ένταξη αιθανόλης ως βιοκαύσιμο (βάσει ενεργειακών κριτηρίων, βλ. Σχήμα 5.14) και των πολυουρεθανών (βάσει οικονομικών κριτηρίων, βλ. Σχήμα 5.16) αποτελούν επιπλέον ελπιδοφόρες επιλογές για την ένταξη της βιομηχανίας σε νέες αγορές ή/και για την κάλυψη μέρους των αναγκών θέρμανσης. Εναλλακτικά, η λιγνίνη θα μπορούσε να προωθηθεί (χωρίς αναβάθμιση) σε εξειδικευμένες αγορές του τομέα κατασκευών.

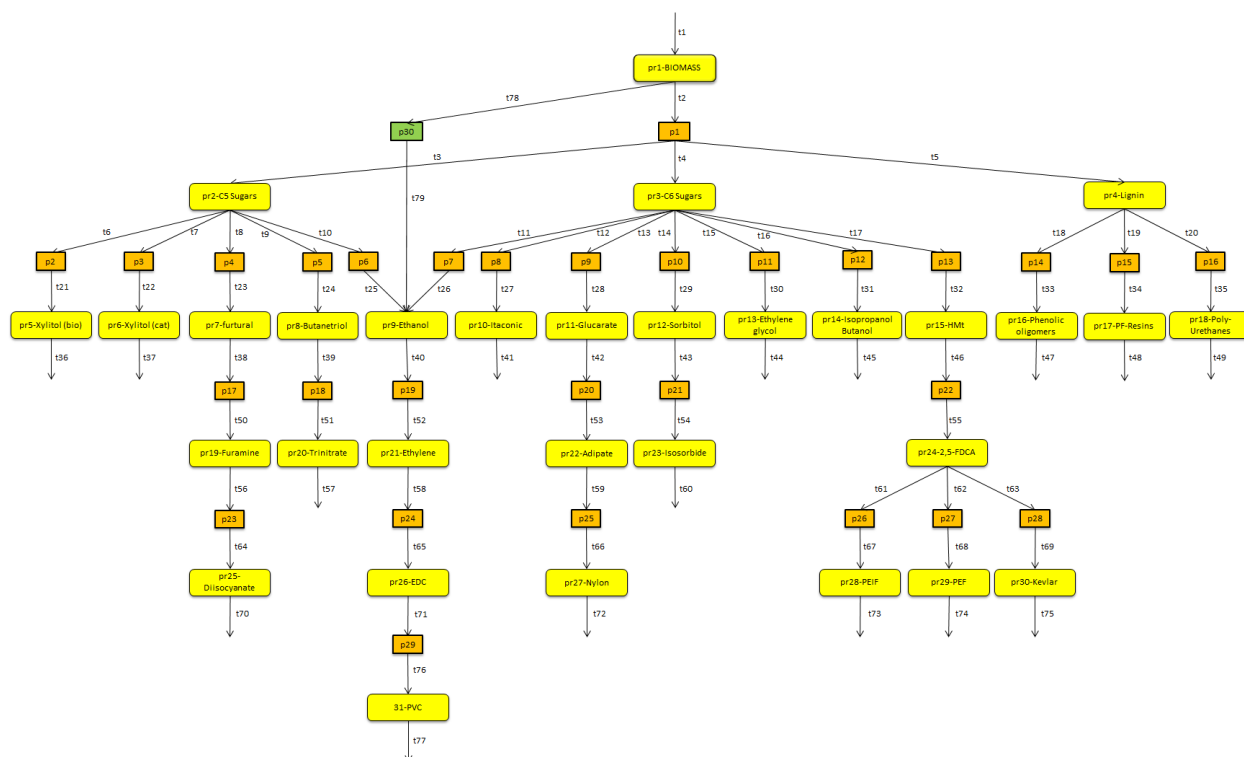
5.5.4. Επέκταση και ολοκλήρωση βιοδιυλιστηρίου παραγωγής 1-2G βιοαιθανόλης

Το παρόν παράδειγμα εξετάζει την ένταξη υψηλής αξίας καινοτόμων βιοπροϊόντων σε υπάρχουσα μονάδα παραγωγής βιοαιθανόλης 1^{ης} και 2^{ης} γενιάς. Η υπάρχουσα διεργασία αξιοποιεί βρώσιμες (1^{ης}) και μη-βρώσιμες (2^{ης}) τροφοδοσίες σιταριού (πυρήνα και άχυρα) για την παραγωγή αιθανόλης με τεχνολογίες ζύμωσης. Δεδομένων των ζητημάτων που αντιμετωπίζονται τόσο λόγω χρήσης βρώσιμων τροφοδοσιών – και σε συνδυασμό με τις Ευρωπαϊκές οδηγίες (EU parliament, 2015; 2018) – όσο και των χαμηλών οικονομικών αποδόσεων (μόλις 0.35 €/lt βιοαιθανόλης), καθίσταται απαραίτητη η αξιοποίηση μέρους της εισερχόμενης βιομάζας για την ενσωμάτωση πολλαπλών προϊόντων με σκοπό την ενίσχυση της βιωσιμότητας, της ευελιξίας και της ανταγωνιστικότητας τέτοιων εγχειρημάτων βιοοικονομίας. Τέτοια ζητήματα αντιμετωπίζουν πολλές περιπτώσεις βιοδιυλιστηρίων παραγωγής βιοαιθανόλης, τα οποία κυριάρχησαν ως πρώτες εφαρμογές αξιοποίησης της βιομάζας. Οι ΗΠΑ, την περίοδο 2010-2015, ενίσχυσαν με 1.2 δισ. € τέτοια εγχειρήματα προσπαθώντας να ενισχύσουν τους όρους ζήτησης και προσφοράς μέσω διαφόρων εργαλείων, όπως μειώσεις φόρων, επιχορηγήσεις, δανεισμό και αυστηρότερους κανονισμούς στη χρήση ανανεώσιμων καυσίμων (Kokossis et al., 2015).

Στο παρόν παράδειγμα εξετάζεται το BBR του Σχήματος 5.18 για την διερεύνηση 30 υποψήφιων βιοπροϊόντων με στόχο την ενσωμάτωσή τους και την ολοκλήρωση νέων παραγωγικών γραμμών με το υπάρχον/δεδομένο βιοδιυλιστήριο 1-2G βιοαιθανόλης. Οι αποδόσεις ενεργειακής ολοκλήρωσης αποδεικνύονται σημαντικές για την μείωση του κόστους παραγωγής τόσο της υπάρχουσας βιομηχανίας όσο και των νεοεισαχθέντων προϊόντων σε σχέση με την αυξημένη αξία που προστίθεται στη νέα Συνολική Μονάδα.

Το υπάρχον βιοδιυλιστήριο αιθανόλης (p30) αξιοποιεί πυρήνα και άχυρα σιταριού 55 tn/hr (μικτή τροφοδοσία). Το παράδειγμα εξετάζει τα περιθώρια διαμοιρασμού της διαθέσιμης τροφοδοσίας σιταριού για την επέκταση του βιοδιυλιστηρίου με τις υποψήφιες διεργασίες p1-p29 του BBR. Σε κάθε περίπτωση η υπάρχουσα βιομηχανία δεν επιτρέπεται να λειτουργεί κάτω από το 80% της υφιστάμενης δυναμικότητας της εγκατάστασης για πρακτικούς λόγους εφαρμογής και αξιοποίησης του εξοπλισμού. Όπως και στην περίπτωση του παραδείγματος της προηγούμενης Ενότητας 5.5.3, το πρόβλημα επιλύεται ξεχωριστά σύμφωνα με ενεργειακά και οικονομικά κριτήρια. Ακολούθως, εντοπίζονται οι 30 καλύτερες λύσεις, σε κάθε περίπτωση βελτιστοποίησης, για την εξαγωγή προτιμήσεων χαρτοφυλακίων προϊόντων που ολοκληρώνονται με τον πιο αποδοτικό τρόπο με την υπάρχουσα βιομηχανία παραγωγής βιοαιθανόλης.

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης



Σχήμα 5.18: BBR της υπάρχουσας παραγωγής 1-2G βιοαιθανόλης (πράσινο) και των υποψήφιών βιοδιεργασιών (πορτοκαλί).

Περίπτωση 1: Βιοδιυλιστήριο ελάχιστου ενεργειακού κόστους

Ο Πίνακας 5.5 παρουσιάζει τις 5 (από τις 30) καλύτερες λύσεις βιοδιυλιστηρίων με το ελάχιστο ενεργειακό κόστος. Το καλύτερο χαρτοφυλάκιο (1^η λύση Πίνακα 5.5) αφορά διαμοιρασμό 10% της τροφοδοσίας άχυρου στην διεργασία κλασμάτωσης για την παραγωγή σακχάρων και λιγνίνης και την αναβάθμισή τους σε ξυλιτόλη (KAT), σορβιτόλη και πολυουρεθάνες. Η υπόλοιπη τροφοδοσία (90%) καταναλώνεται από την υπάρχουσα βιομηχανία. Για την βέλτιστη λύση επιλέχθηκαν τα επίπεδα ατμού 545 °C (υπέρθερμος), 155 °C, 120 °C και 110 °C, ενώ για ψύξη τα επίπεδα 25 °C, 0 °C και -25 °C. Τα περιθώρια έμμεσης ολοκλήρωσης (3.18 MW) της Συνολικής Μονάδας ανέρχονται στο 5.4%, εξοικονομώντας μόλις 120 κ€/γρ λόγω του γεγονότος ότι αφενός η υπάρχουσα βιομηχανία δεν παρουσιάζει υψηλά ποσοστά διαθέσιμης ενέργειας για παραγωγή ατμού, και αφετέρου οι προστιθέμενες διεργασίες έχουν επιλεγεί σε ποσοστά μόλις 10% της μέγιστης δυναμικότητάς τους, με αποτέλεσμα να συνεισφέρουν ενεργειακά σε πολύ μικρό ποσοστό. Οι προτιμήσεις χαρτοφυλακίων

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

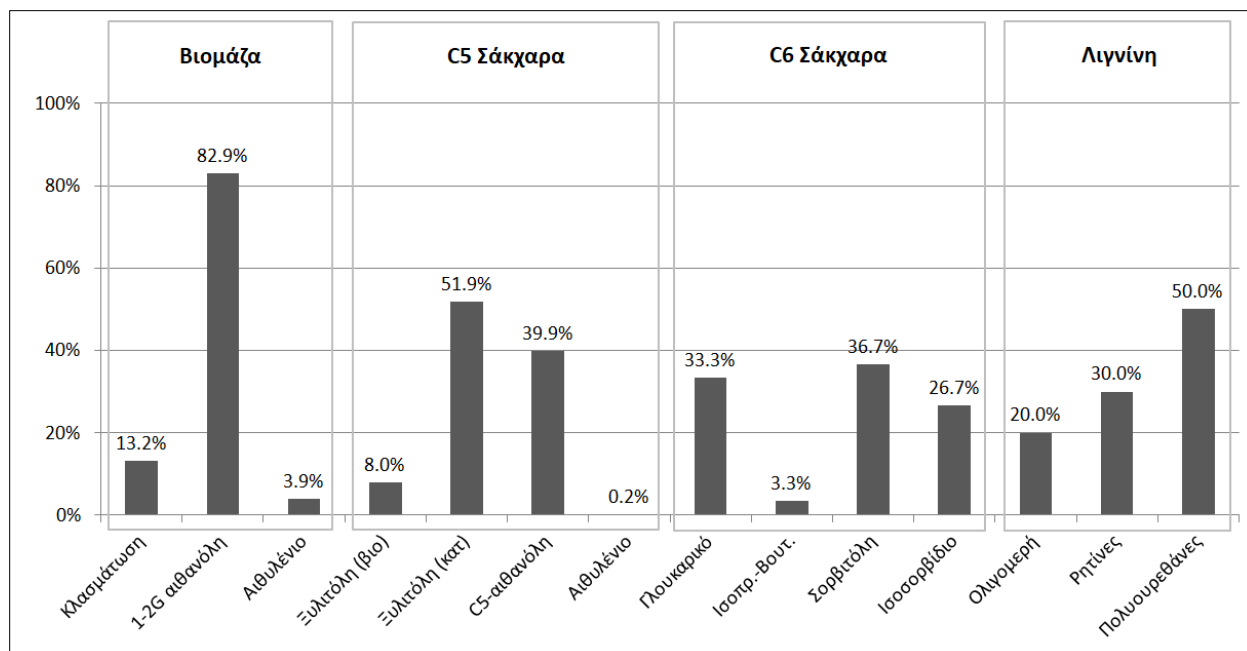
προϊόντων που απορρέουν από τη ανάλυση των 30 καλύτερων λύσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.19.

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα 5 καλύτερων λύσεων του προβλήματος ενεργειακής βελτιστοποίησης

Λύση	Βιοδιυλιστήριο	Θερμές Παροχές [MW]	Ψυχρές Παροχές [MW]	Εξοικονόμηση ατμού [MW]	Ενεργειακό κόστος εξοικονόμησης [M€/yr]	Ενεργειακό κόστος [M€/yr]
1		56.3	53.0	3.18	0.12	5.756
2		57.5	51.3	4.61	0.15	5.774
3		57.0	52.2	3.74	0.11	5.774
4		55.8	53.8	2.24	0.08	5.833
5		56.3	53.1	4.62	0.17	5.854

Τα πολύ χαμηλά ποσοστά δυναμικότητας 10% που επιλέχθηκαν για τις νεοεισαχθείσες διεργασίες στην βέλτιστη λύση του Πίνακα 5.5 αποτελούν τα ελάχιστα εφικτά που έχουν οριστεί στο μοντέλο ($F_t^{LB} = 10\%$ στην εξίσωση Eq.4.3) ως κάτω όρια για την είσοδο κάθε επιλεχθείσας διεργασίας. Επίσης, στο μοντέλο ορίστηκε η επιλογή της διεργασίας κλασμάτωσης ($y_{t2} = 1$ στην εξίσωση Eq.4.3 και Eq.4.4), ειδάλλως το μοντέλο επιλέγει μόνο την υπάρχουσα βιομηχανία για την αποφυγή αύξησης του αρχικού ενεργειακού κόστους. Το ενεργειακό κόστος της υπάρχουσας βιομηχανίας υπολογίζεται στα 4.3 M€/yr, ενώ το συνολικό ενεργειακό κόστος της καλύτερης λύσης (1^η λύση του Πίνακα 5.5) είναι 5.8 M€/yr. Σε αντίθεση με το παραπάνω παράδειγμα ζαχαροβιομηχανίας, όπου η τροφοδοσία βιομάζας κατευθύνεται ούτως ή άλλως προς κλασμάτωση, στο παρόν παράδειγμα όλες οι υποψήφιες διεργασίες λειτουργούν ανταγωνιστικά με την υπάρχουσα βιομηχανία και το μοντέλο αποφασίζει να διαμοιράσει το ελάχιστο εφικτό ποσοστό τροφοδοσίας (όσο ορίζεται από τον χρήστη, εδώ είναι 10% της μέγιστης) προς τις υποψήφιες διεργασίες του BBR.

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης



Σχήμα 5.19: Αποτελέσματα προτιμήσεων βιοδιεργασιών για την επέκταση βιοδιυλιστηρίου 1-2G αιθανόλης βασισμένα σε ενεργειακά κριτήρια

Οι προτιμήσεις του Σχήματος 5.19 αναδεικνύουν ένα μέρος της τροφοδοσίας βιομάζας (13%) ως κατάλληλο για κλασμάτωση. Το υπόλοιπο αξιοποιείται από την υπάρχουσα βιομηχανία για παραγωγή 1-2G βιοαιθανόλης, ενώ μέρος αυτής ($\approx 4\%$) θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για παραγωγή αιθυλενίου από αιθανόλη που παράγει η υπάρχουσα βιομηχανία. Βάσει ενεργειακών κριτηρίων, οι υψηλότερες τάσεις για την αξιοποίηση των C5, C6 σακχάρων και λιγνίνης εμφανίζονται για την παραγωγή ξυλιτόλης (ΚΑΤ), σορβιτόλης και πολυουρεθανών, όταν επιλέγεται η διεργασία κλασμάτωσης. Υψηλές ακόμα τάσεις εμφανίζονται και για τη παραγωγή αιθανόλης, γλουκαρικού οξέος (πρόδρομο συστατικό για την παραγωγή νάιλον) και των ρητινών. Ωστόσο, οι τελικές τάσεις θα χρειαστεί να αξιολογηθούν και βάσει οικονομικών κριτηρίων, ως ακολούθως.

Περίπτωση 2: Βιοδιυλιστήριο μέγιστης κερδοφορίας

Το πρόβλημα επιλύθηκε με χρήση της αντικειμενικής συνάρτησης κερδοφορίας για τον εντοπισμό των 30 καλύτερων λύσεων. Οι αποκλίσεις των τιμών των προϊόντων ρυθμίστηκαν στο -40% από τις

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

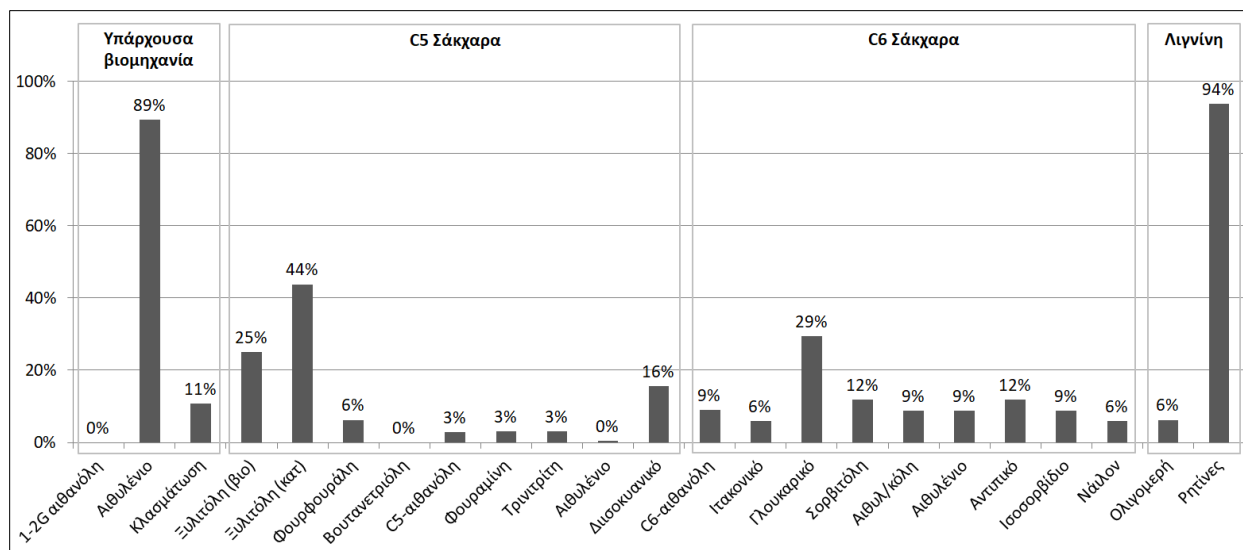
υπάρχουσες τιμές και τα κόστη επένδυσης και λειτουργίας κατά +50%. Ο Πίνακας 5.6 παρουσιάζει τις 5 καλύτερες διεργασίες, ενώ το Σχήμα 5.20 τις τάσεις ένταξης κάθε χημικού στην υπάρχουσα βιομηχανία.

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα των 5 πιο κερδοφόρων λύσεων

Λύση	Βιοδιυλιστήριο	Κόστος θέρμανσης [Μ€/γρ]	Κόστος ψύξης [Μ€/γρ]	Εξοικονόμηση θέρμανσης [Μ€/γρ]	Ενεργειακό κόστος [Μ€/γρ]	Κερδοφορία [Μ€/γρ]
1		3.7	4.4	0.12	8.1	95.4
2		3.9	5.2	0.19	9.1	94.8
3		3.8	4.3	0.17	8.1	94.7
4		3.8	4.6	0.13	8.5	94.6
5		3.6	4.6	0.23	8.2	94.4

Η κερδοφορία της βέλτιστης λύσης (1^η λύση Πίνακα 5.6) διαμοιράζει την τροφοδοσία άχυρου κατά 90% στην υπάρχουσα διεργασία, ενώ το υπόλοιπο οδηγείται προς κλασμάτωση. Αν και σε αυτήν την περίπτωση βελτιστοποίησης τέθηκε πάλι δεδομένη η επιλογή της διεργασίας κλασμάτωσης ($y_{t2} = 1$), οι λόγοι που επιλέγεται στην ελάχιστη εφικτή δυναμικότητα 10% ($F_t^{LB} = 10\%$) δεν είναι οι ίδιοι με παραπάνω. Η παραγωγή αιθυλενίου από αιθανόλη αποτελεί επιλογή υψηλής κερδοφορίας, επομένως το μοντέλο μεγιστοποίησε την παραγωγή αιθανόλης και αιθυλενίου διαμοιράζοντας στην υπάρχουσα βιομηχανία την υπόλοιπη τροφοδοσία βιομάζας (90%) και επιλέγοντας την ένταξη παραγωγής αιθυλενίου. Η παραγωγή αιθανόλης μέσω κλασμάτωσης και ζύμωσης των σακχάρων C5 και C6 αποφεύχθηκε από το μοντέλο λόγω των επιπρόσθετων απωλειών στις αποδόσεις παραγωγής αιθανόλης στα ενδιάμεσα στάδια κλασμάτωσης της βιομάζας και ζύμωσης των C5 και C6 σακχάρων. Ως εκ τούτου, το μοντέλο αξιοποιεί απευθείας τις διεργασίες ζύμωσης της υπάρχουσας βιομηχανίας.

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης



Σχήμα 5.20: Αποτελέσματα προτιμήσεων βιοδιεργασιών για την επέκταση βιοδιυλιστηρίου 1-2G αιθανόλης βασισμένα σε οικονομικά κριτήρια

Όσον αφορά το μέρος της βιομάζας που επιλέγεται για κλασμάτωση (λόγω ορίων $F_t^{LB} = 10\%$), τα σάκχαρα και η λιγνίνη αντίστοιχα μετατρέπονται σε ξυλιτόλη, γλουκαρικό οξύ και ρητίνες. Το ενεργειακό κόστος (8.1 Μ€/γρ) της Συνολικής Μονάδας της καλύτερης λύσης κυμαίνεται στο 8.5% των περιθωρίων κερδοφορίας (95.4 Μ€/γρ). Τα χαμηλά επίπεδα εξοικονόμησης ατμού οφείλονται, όπως και παραπάνω, στην έλλειψη διαθέσιμης ενέργειας από τη υπάρχουσα βιομηχανία και στις μικρές δυναμικότητες των διεργασιών που εντάχθηκαν στην υπάρχουσα βιομηχανία. Εάν δεν υπήρχε η υποχρέωση ένταξης της κλασμάτωσης, το μοντέλο θα επέλεγε μόνο την διεργασία παραγωγής αιθυλενίου από 1-2G αιθανόλη αποδίδοντας μόλις 0.1 Μ€/γρ περισσότερη κερδοφορία από αυτήν της 1^{ης} καλύτερης λύσης του Πίνακα 5.6. Ωστόσο, οι οικονομικές απώλειες (0.1 Μ€/γρ) της καλύτερης λύσης ενδεχομένως να αντισταθμίζονται από την ένταξη της βιομηχανίας στις νέες αγορές υψηλής αξίας προϊόντων, πέραν του αιθυλενίου.

5.5.5. Αναβάθμιση διυλιστηρίου Φυσικού Αέριου

Τα παράδειγμα εξετάζει την ενσωμάτωση ανανεώσιμων καυσίμων στο υπάρχον διυλιστήριο φυσικού αέριου του South Pars Gas Complex στον Περσικό Κόλπο. Οι υποψήφιες διεργασίες περιλαμβάνουν θερμο-χημικές, χημικές και βιο-χημικές διεργασίες για την παραγωγή μικτών υγρών καυσίμων και φυσικού αέριου με στόχο την διασφάλιση περιβαλλοντικών στόχων (EU parliament, 2015; 2018)

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

αναφορικά με τη χρήση ανανεώσιμων καυσίμων και μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η προσέγγιση του παρόντος παραδείγματος διαφέρει από τα παραδείγματα των προηγούμενων ενότητων 5.5.3. και 5.5.4., καθώς πέραν από τη επιλογή διεργασιών, προϊόντων και βελτιστοποίησης του ενεργειακού κόστους, αντιμετωπίζει την τροφοδοσία βιομάζας (μίγμα λιγνοκυτταρινούχων τροφοδοσιών) ως επιπλέον βαθμό ελευθερίας. Σύμφωνα με τη βασική οδηγία REDII (EU parliament, 2018) – το 14% των συνολικών ενεργειακών αναγκών πρέπει να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μέχρι το 2030 – εξετάζεται το βέλτιστο σενάριο επέκτασης της πετρελαϊκής βιομηχανίας με την ενσωμάτωση βιοανανεώσιμων πηγών για την επίτευξη του στόχου 14%.

Οι στόχοι υπολογίζονται ως ενεργειακά ισοδύναμα των παραγόμενων ανανεώσιμων καυσίμων σύμφωνα με την ελάχιστη θερμαντική αξία (Lower Heating Value) κάθε καυσίμου. Το South Pars παράγει 1,600,000 kg/hr φυσικού αερίου, το ενεργειακό ισοδύναμο του οποίου φτάνει τα 22.22 GW. Τα υποψήφια βιοκαύσιμα που μελετώνται στο παράδειγμα περιλαμβάνουν το μεθάνιο, μικτά υγρά καύσιμα στην περιοχή απόσταξης της βενζίνης, του diesel και της κηροζίνης, αιθανόλη και μίγμα ισοπροπανόλης-βουτανόλης. Το BBR του μελετώμενου διυλιστηρίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.21 και περιλαμβάνει κλασσικές επιλογές θερμο-χημικών διεργασιών (αεριοποίηση/Fischer-Tropsch, υδροθερμική υγροποίηση, πυρόλυση), αναερόβιας χώνευσης, ή κλασμάτωσης της βιομάζας για παραγωγή σακχάρων, τα οποία μετατρέπονται σε αιθανόλη, ισοπροπανόλη και βουτανόλη. Το υπόλειμμα λιγνίνης της βιομάζας μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά ως βιοκαύσιμο σε θάλαμο καύσης για παραγωγή ανανεώσιμης θερμότητας.

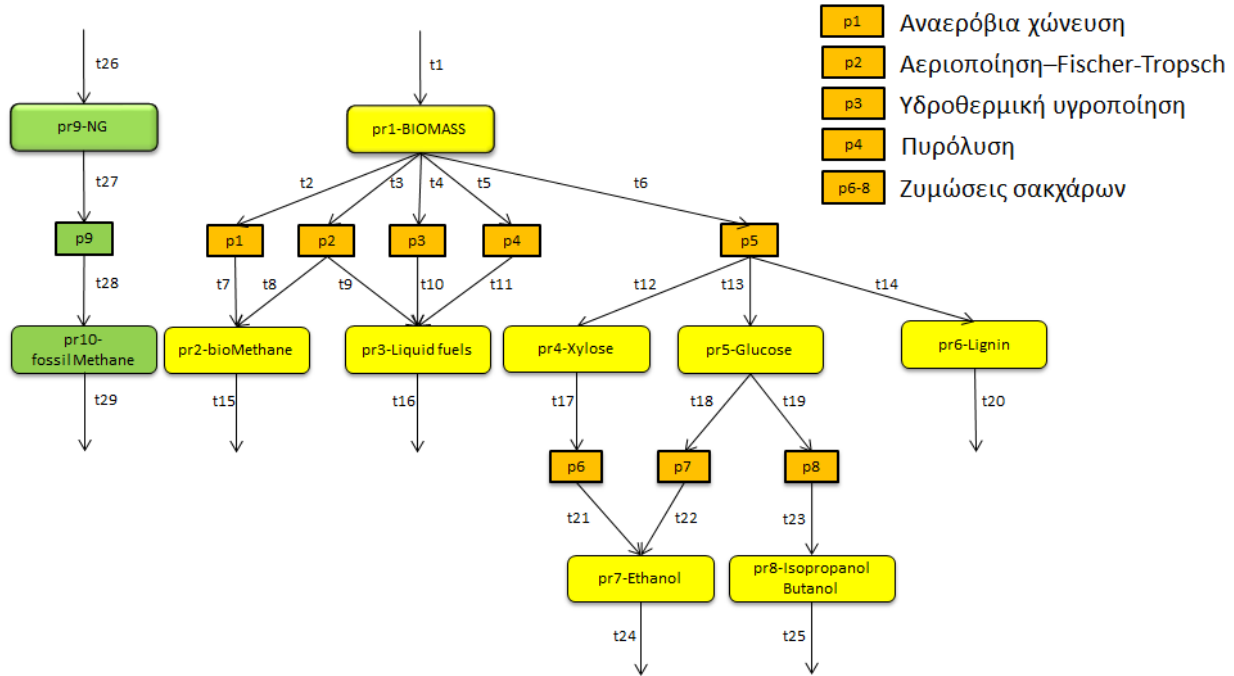
Το μοντέλο βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί, όπως και παραπάνω τις εξισώσεις BBR, τα μοντέλα μεταφόρτωσης ICT ή CIT, καθώς και επιπλέον περιορισμούς για την διασφάλιση του στόχου ανανεώσιμων καυσίμων στο 14%. Η βιοανανεώσιμη ενέργεια βιοκαυσίμων (BF) υπολογίζεται ως:

$$BF = \sum_{t \in T^{bioFUEL}} F_t \cdot LHV_t^{bioFUEL}$$

Όπου το $T^{bioFUEL}$ είναι υποσύνολο του συνόλου διασυνδέσεων T του BBR και περιλαμβάνει τις διασυνδέσεις που φέρουν τα ανανεώσιμα καύσιμα, δηλαδή τις διασυνδέσεις t15, t16, t20, t24 και t25. LHV (Lower Heating Value) είναι η ελάχιστη θερμαντική αξία κάθε καυσίμου. Ομοίως, η παραγωγή ανανεώσιμης θερμότητας από την καύση λιγνίνης (BL) υπολογίζεται ως:

$$BL = F_{t20} \cdot LHV^{lignin}$$

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης



Σχήμα 5.21: BBR επέκτασης διυλιστηρίου φυσικού αερίου με ανανεώσιμα καύσιμα

Σύμφωνα με τον στόχο, η ανανεώσιμη ενέργεια πρέπει αποτελεί το 14% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης, οι οποίες περιλαμβάνουν την ενέργεια του ορυκτού φυσικού αερίου ($FNG = F_{t29} \cdot LHV^{NG}$), των ανανεώσιμων καυσίμων (BF) και της ενέργειας βοηθητικών παροχών της Συνολικής Μονάδας ($UTILITIES$) μείων την ανανεώσιμη θερμότητα που παράγεται από την καύση λιγνίνης (η οποία επιστρέφει στο σύστημα αντικαθιστώντας μέρος των βοηθητικών παροχών $UTILITIES$), και ο επιπλέον περιορισμός του μοντέλου παίρνει την μορφή:

$$\frac{BF}{BF + FNG + UTILITIES - BL} \geq 14\%$$

όπου $FNG = 22.22$ [GW] αποτελεί το ενεργειακό ισοδύναμο του ορυκτού φυσικού αερίου της υφιστάμενης βιομηχανίας. Ύστερα από πράξεις, ο παραπάνω στόχος επαναδιατυπώνεται ως εξής:

$$BF \cdot 86\% + BL \cdot 14\% \geq 14\% \cdot \left(22.22 + \sum_{m \in S} Q_m^{TS} + \sum_{n \in W} Q_n^{TS} \right) \quad Eq. 5.29$$

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

όπου τα Q_m^{TS} και Q_n^{TS} αποτελούν τις βοηθητικές παροχές της Συνολικής Μονάδας και βελτιστοποιούνται σύμφωνα με την εφαρμογή των μοντέλων μεταφόρτωσης ICT/CIT. Η εξίσωση Eq.5.29 ενσωματώνεται στο μοντέλο βελτιστοποίησης ως επιπλέον γραμμικός περιορισμός.

Το πρόβλημα βελτιστοποιείται με τη χρήση κριτηρίων κερδοφορίας και της αντικειμενικής συνάρτησης Eq.5.28. Το πρόβλημα αναδεικνύει τη συνδυαστική φύση της βελτιστοποίησης της εισερχόμενης βιομάζας, των βοηθητικών παροχών (*UTILITIES*) της Συνολικής Μονάδας, του κόστους επένδυσης και της κερδοφορίας από τα ανανεώσιμα καύσιμα. Υπό αυτές τις συνθήκες, το καύσιμο που παρουσιάζει την μεγαλύτερη συνεισφορά ανανεώσιμης ενέργειας ($F_{t^{bioFUEL}} \cdot LHV_{t^{bioFUEL}}^{bioFUEL}$) – αυτό είναι το φυσικό αέριο αναερόβιας χώνευσης – δεν είναι απαραίτητα η καλύτερη επιλογή για την επίτευξη του στόχου (14%) λόγω της ταυτόχρονης συνεισφοράς της ενεργειακής κατανάλωσης (*UTILITIES*) στην εξίσωση Eq.5.29, η οποία υπόκειται σε άμεση και έμμεση ολοκλήρωση, και το πρόβλημα χρίζει διερεύνησης.

Για την εκτίμηση της κερδοφορίας δεν υποτέθηκαν απώλειες στις τιμές των καυσίμων του προβλήματος, καθώς αποτελούν κοινά εμπορικά προϊόντα με μικρές αποκλίσεις στο χρόνο, σε αντίθεση με τα βιοπροϊόντα που μελετήθηκαν στα προηγούμενα παραδείγματα, ωστόσο υποτέθηκαν αποκλίσεις στο κόστος επένδυσης και λειτουργίας κατά +40%.

Αρχικά το πρόβλημα επιλύεται για δεδομένες και αυξανόμενες τιμές παροχής βιομάζας μέχρις ότου εντοπιστεί η ελάχιστη εφικτή τροφοδοσία που ικανοποιεί τον περιορισμό της Eq.5.29 διασφαλίζοντας τον στόχο 14%. Αυτό συμβαίνει για παροχή λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας 1,190,000 kg/hr, η οποία αξιοποιείται πλήρως με αναερόβια χώνευση για την παραγωγή φυσικού αερίου. Αυτή η επιλογή αν και ήταν αναμενόμενη σε όρους απόδοσης στον συντελεστή *BF* του στόχου, ευνοείται περαιτέρω από τα υψηλά ποσοστά έμμεσης ολοκλήρωσης με τις δύο διεργασίες (διυλιστήριο και αναερόβια χώνευση) να ανταλλάσσουν μέχρι και 24 MW μεταξύ τους. Ωστόσο, δεν ισχύει το ίδιο όσον αφορά την κερδοφορία, καθώς η αντικειμενική συνάρτηση κυμαίνεται σε αρνητικές τιμές, λόγω του υψηλού κόστους προμήθειας και μεταφοράς της βιομάζας. Δηλαδή η υπάρχουσα βιομηχανία θα επενδύει συνεχώς για την επίτευξη του στόχου. Το επόμενο ερώτημα αφορά τις απαιτήσεις βιομάζας και τις επιλογές διεργασιών που αφενός διασφαλίζουν τον στόχο 14%, ενώ αφετέρου παραμένουν κερδοφόρες επιλογές για την υπάρχουσα βιομηχανία.

Το πρόβλημα επιλύεται ξανά αντιμετωπίζοντας την παροχή βιομάζας ως βαθμό ελευθερίας αναμένοντας το πρόβλημα μεγιστοποίησης της κερδοφορίας να είναι μη-φραγμένο (unbounded). Ωστόσο, τα άνω όρια (UB_m^S και UB_n^W) των βοηθητικών παροχών Q_m^{TS} και Q_n^{TS} – τίθενται μέσω των

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

εξισώσεων Eq.5.5-Eq.5.10 για το ICT και των Eq.5.20-Eq.5.24 για το CIT – οι οποίες χρησιμοποιούνται στο περιορισμό του στόχου (Eq.5.29), θέτουν με έμμεσο τρόπο άνω όρια στην παροχή βιομάζας μέσω των αποδόσεων των διεργασιών που επίσης χρησιμοποιούνται στον περιορισμό Eq.5.29. Συγκεκριμένα, όσο το μοντέλο αυξάνει την παροχή βιομάζας, ενισχύεται η παραγωγή βιοκαυσίμων και αυξάνεται η ενεργειακή κατανάλωση της Συνολικής Μονάδας. Όταν τουλάχιστον μία εκ των ενεργειακών καταναλώσεων, Q_m^{TS} ή/και Q_n^{TS} , της Συνολικής Μονάδας φτάσουν τα άνω όρια, UB_m^S ή/και UB_n^W , τότε φράσσεται και η παροχή βιομάζας μέσω της Eq.5.29. Βέβαια, στην πραγματικότητα το πρόβλημα είναι μη-φραγμένο και η κερδοφορία αυξάνεται με την παροχή βιομάζας, αν και η τελευταία φράσσεται με τεχνητό τρόπο μέσω των ορίων UB_m^S και UB_n^W .

Η χρήση τεράστιων παροχών βιομάζας δεν έχει πρακτική και λογική σημασία. Σημασία έχουν οι διεργασίες και τα προϊόντα που επιλέγει το μοντέλο, όσο η παροχή βιομάζας αυξάνεται πάνω από την ελάχιστη εφικτή τιμή των 1,190,000 kg/hr και το όριο βιομάζας στο οποίο σταθεροποιούνται οι επιλογές αυτές. Τα αποτελέσματα για διάφορες τιμές παροχής βιομάζας συνοψίζονται στους Πίνακες 5.7 και 5.8, καθώς και στο Σχήμα 5.22.

Πίνακας 5.7: Επιλογές διεργασιών, στόχου και κερδοφορίας για διάφορες τιμές παροχής βιομάζας

Τροφοδοσία [kg/hr]	Αναερόβια χώνευση	Υδροθερμική υγροποίηση	Στόχος	Κερδοφορία [Μ€/γρ]
1,190,000	100%	0%	14.0%	-33.6
1,290,000	76%	24%	14.0%	-17
1,390,000	55%	45%	14.0%	0.8
1,490,000	37%	63%	14.0%	18
1,590,000	21%	79%	14.0%	35
1,690,000	7%	93%	14.0%	53
1,790,000	0%	100%	14.0%	70
1,890,000	0%	100%	14.6%	75
2,000,000	0%	100%	15.4%	80

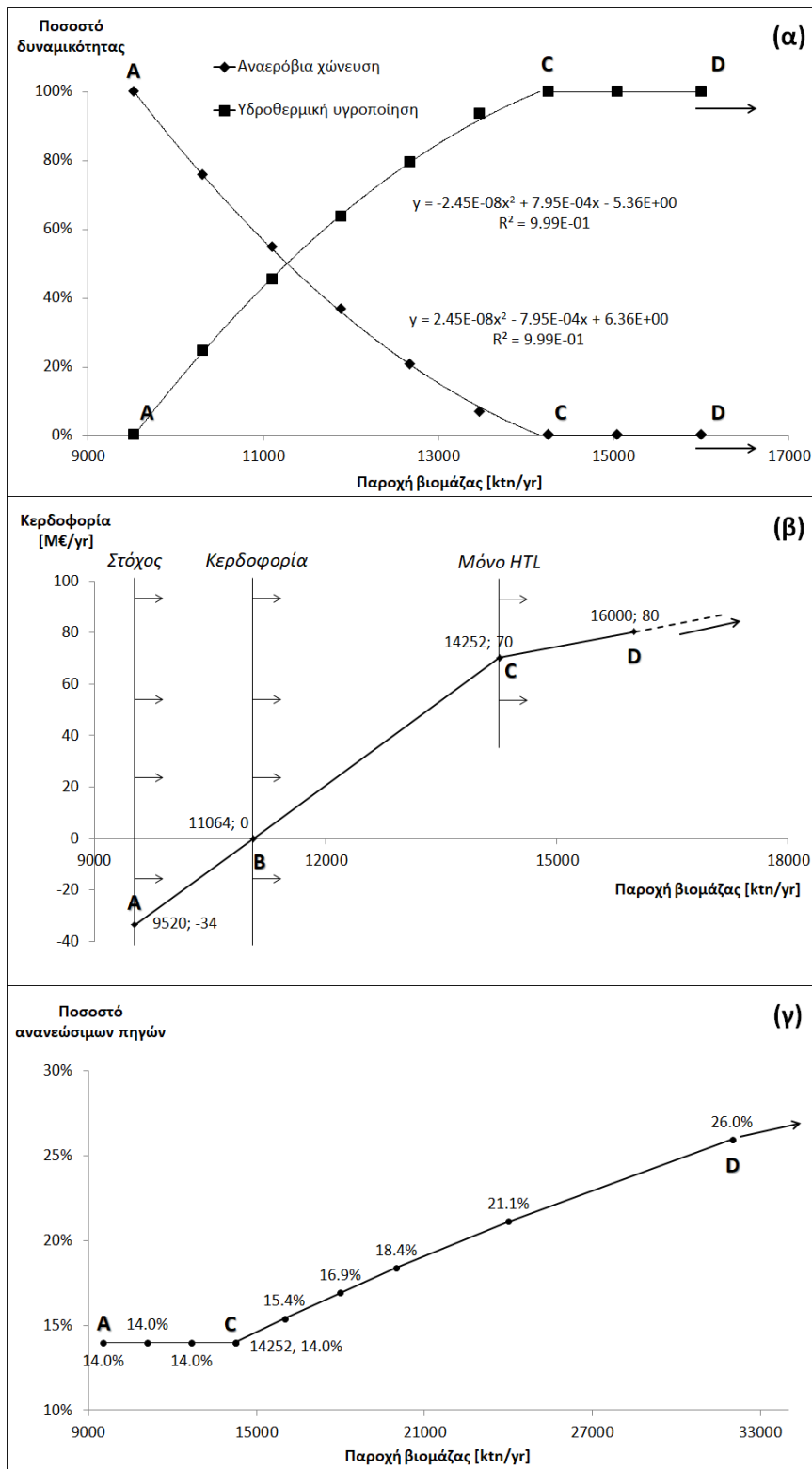
Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.7, η ελάχιστη παροχή βιομάζας υπολογίζεται στα 1,190,000 kg/hr, με την αναερόβια χώνευση (AD) να διασφαλίζει τον στόχο 14%. **Όσο η παροχή βιομάζας αυξάνεται**, τότε το μοντέλο αξιοποιεί μέρος της τροφοδοσίας για την ένταξη της πιο κερδοφόρου διεργασίας υδροθερμικής υγροποίησης (HTL) και την ενίσχυση της κερδοφορίας. Οι απώλειες που παρουσιάζονται στην επίτευξη του στόχου 14% λόγω της εισόδου της λιγότερο αποδοτικής HTL, αντισταθμίζονται

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

διαμοιράζοντας μέρος της **αυξανόμενης** τροφοδοσίας και στην AD. Ωστόσο, μέχρι ο στόχος να μπορεί να καλυφθεί πλήρως από τη χρήση της HTL, το μοντέλο διαμοιράζει κατάλληλα την τροφοδοσία βιομάζας στις HTL-AD, παρουσιάζοντας μία μορφή ισορροπίας μεταξύ της πιο κερδοφόρου και της πιο ενεργειακά αποδοτικής διεργασίας, διατηρώντας τον στόχο σταθερό στο 14%. Όσο αυξάνεται η παροχή βιομάζας, τόσο αυξάνεται η παραγωγή ανανεώσιμων βιοκαυσίμων από την κερδοφόρο HTL. Για παροχή 1,790,000 kg/hr, ο στόχος 14% διασφαλίζεται από την αποκλειστική χρήση της HTL και αποκλείεται η αναερόβια χώνευση. Σε μεγαλύτερες παροχές (από 1,790,000 kg/hr), η αποκλειστική επιλογή της HTL από το μοντέλο σταθεροποιείται και η κερδοφορία ενισχύεται με την παροχή βιομάζας, τυπικά μέχρι άπειρη παροχή (και χρήση της HTL), ενώ παράλληλα ενισχύεται ο στόχος από την αύξηση της παραγωγής ανανεώσιμων καυσίμων, έναντι της σταθερής παραγωγής ορυκτού φυσικού αερίου του διυλιστηρίου. Το Σχήμα 5.22α παρουσιάζει την ισορροπία μεταξύ HTL-AD (μεταξύ των σημείων A-C) μέχρι το όριο των 1,790,000 kg/hr (σημείο C), όπου σταθεροποιείται η επιλογή της HTL.

Η πορεία της αντικειμενικής συνάρτησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.22β, στο οποίο εντοπίζονται 4 σημεία. Το σημείο A αντιπροσωπεύει την ελάχιστη εφικτή παροχή βιομάζας που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς του μοντέλου, και αφορά την επιλογή μόνον της AD. Η παρούσα λύση παρουσιάζει αρνητικές τιμές κερδοφορίας και υποδηλώνει ότι το διυλιστήριο επενδύει συνεχώς για την διασφάλιση του στόχου 14%. Υπενθυμίζεται ότι εάν το κόστος αγοράς και μεταφοράς της λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας εξαλειφθεί, τότε η αναερόβια χώνευση θα αποτελεί κερδοφόρα επιλογή. Όσο αυξάνεται η παροχή βιομάζας ενισχύεται η κερδοφορία με την ενσωμάτωση της HTL, και το σημείο B αντιπροσωπεύει το βιοδιυλιστήριο μηδενικής κερδοφορίας (κέρδη=κόστη) για παροχή βιομάζας 1,390,000 kg/hr και διαμοιρασμό της τροφοδοσίας κατά 55%(AD)-45%(HTL). Σε υψηλότερες παροχές το βιοδιυλιστήριο είναι κερδοφόρο, με ενίσχυση της παρουσίας της HTL, μέχρι το σημείο C (1,790,000 kg/hr), όπου η AD δεν επιλέγεται πλέον. Μεταξύ των σημείων A-C, οι λύσεις αντιπροσωπεύουν συνδυασμούς των διεργασιών αναερόβιας χώνευσης και υδροθερμικής υγροποίησης (όπως στην ισορροπία του Σχήματος 5.22α), ενώ ο στόχος παραμένει σταθερός στο 14%. Δεξιά του σημείου C, το βιοδιυλιστήριο περιέχει μόνον την HTL και η κερδοφορία ενισχύεται περαιτέρω με αύξηση της παροχής βιομάζας, με πορεία προς το σημείο D και ως «άπειρη» τροφοδοσία. Τα σημεία A, B, C και D αφορούν λύσεις-ορόσημα του προβλήματος και εμφανίζονται και στα τρία σχήματα του Σχήματος 5.22, αντιπροσωπεύοντας τις ίδιες λύσεις για την ίδια παροχή βιομάζας.

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης



Σχήμα 5.22: Επιλογές διεργασιών (α), κερδοφορία (β) και περιβαλλοντικός στόχος (γ) συναρτήσει της παροχής βιομάζας

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

Στο Σχήμα 5.22γ παρουσιάζεται η πορεία της τιμή του περιβαλλοντικού στόχου συναρτήσει της παροχής βιομάζας. Σε μικρές παροχές (σημείο Α έως C), το μοντέλο διατηρεί την ισορροπία μεταξύ των AD-HTL και τον στόχο στο 14%, όπως συζητήθηκε παραπάνω. Από το σημείο C και μετά, η HTL διασφαλίζει μόνη της τον στόχο, και ο στόχος φαινομενικά ενισχύεται καθώς ενισχύεται η παραγωγή ανανεώσιμων καυσίμων συναρτήσει των ορυκτών. Ο στόχος ακολουθεί ασυμπτωτική πορεία προς το σημείο D και μέχρι την τιμή 82.7% σε άπειρη παροχή. Τέλος, ο Πίνακας 5.8 παρουσιάζει την αναλυτική συνεισφορά των διαφορετικών λύσεων (για διάφορες παροχές βιομάζας) στους επιμέρους συντελεστές του περιβαλλοντικού στόχου, καθώς επίσης και την αυξανόμενη πορεία του στόχου για λειτουργία της HTL σε πολύ υψηλές παροχές βιομάζας.

Πίνακας 5.8: Συνεισφορά διαφορετικών λύσεων στον περιβαλλοντικό στόχο

Τροφοδοσία [kg/hr]	Αναερόβια χώνευση	Υδροθερμική υγροποίηση	Ενέργεια Βιοκαυσίμων [GW]	Κατανάλωση ενέργειας [GW]	Ορυκτό καύσιμο [GW]	Στόχος
1,190,000	100%	0%	3.795	1.088	22.222	14%
1,400,000	52%	48%	3.749	0.808	22.222	14%
1,500,000	34%	66%	3.727	0.675	22.222	14%
1,781,500	0%	100%	3.778	0.983	22.222	14%
2,000,000	0%	100%	4.241	1.080	22.222	15%
2,250,000	0%	100%	4.771	1.190	22.222	17%
2,500,000	0%	100%	5.301	1.301	22.222	18%
3,000,000	0%	100%	6.362	1.522	22.222	21%
4,000,000	0%	100%	8.482	1.964	22.222	26%

5.5.6. Σχεδιασμός ενός νέου και πλήρως ολοκληρωμένου βιοδιυλιστηρίου

Στο παρόν παράδειγμα συγκεντρώνονται όλες οι υποψήφιες διεργασίες των προηγούμενων παραδειγμάτων που αφορούν την παραγωγή βιοκαυσίμων, βιοχημικών και βιοϋλικών και εξετάζεται η ανάπτυξη ενός νέου και αυτόνομου βιοδιυλιστηρίου, χωρίς την ύπαρξη περιορισμών ολοκλήρωσής του με υφιστάμενες διεργασίες. Το BBR των υποψήφιων διεργασιών παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.23 και βασίζεται στην αξιοποίηση λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας. Το παρόν παράδειγμα αφορά μία πραγματική περίπτωση αξιολόγησης δυνητικών διεργασιών (BIOCORE, 2014) για την αξιοποίηση βιομάζας άχυρων σιταριού διαθεσιμότητας 150 ktn ετησίως.

Το πρόβλημα εξετάζει 33 υποψήφιες και ανταγωνιστικές διεργασίες που σχετίζονται με την παραγωγή 32 υποψήφιων βιοπροϊόντων με σκοπό την ανάπτυξη βιώσιμων βιοδιυλιστηρίων πολλαπλών-προϊόντων. Στο BBR του Σχήματος 5.23 εντοπίζονται δύο βασικές περιοχές. Η μία αφορά την απευθείας

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

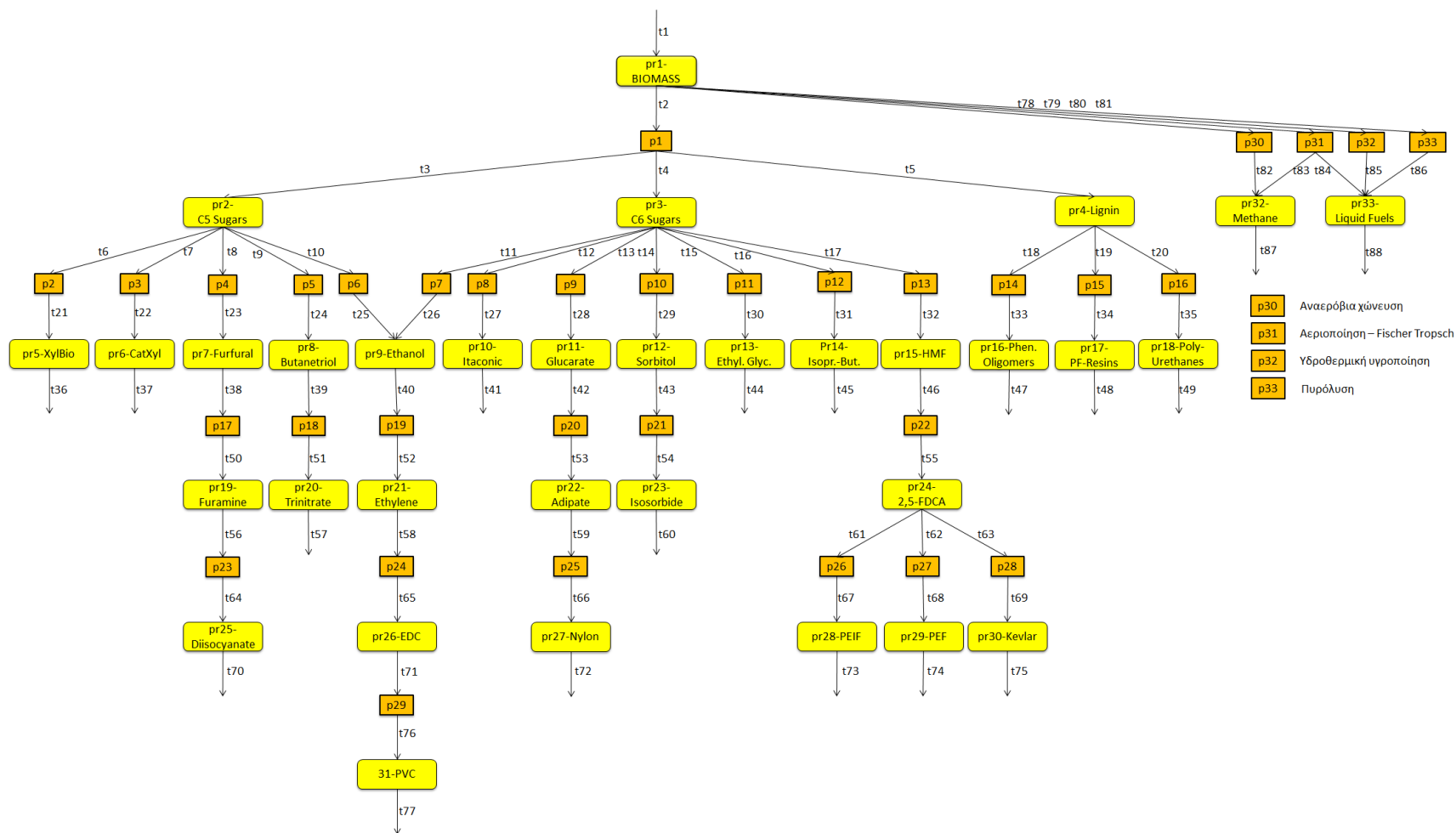
μετατροπή της βιομάζας σε βιοκαύσιμα (φυσικό αέριο και μίγματα υγρών καυσίμων) μέσω βιοχημικών και θερμοχημικών μονοπατιών, ενώ η δεύτερη αφορά την κλασμάτωση λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας στα τρία βασικά χημικά ενδιάμεσα σακχάρων και λιγνίνης από τα οποία διακλαδίζονται 28 υποψήφιες χημικές και βιοχημικές διεργασίες για την παραγωγή υψηλής αξίας προϊόντων.

Το μαθηματικό πρόβλημα βελτιστοποίησης αποτελείται από τα ισοζύγια μάζας του BBR, τα ισοζύγια ενέργειας του μοντέλου ολοκλήρωσης (ICT ή CIT) και την αντικειμενική συνάρτηση. Το πρόβλημα σύνθεσης και ολοκλήρωσης μελετάται στα πλαίσια ελαχιστοποίησης του ενεργειακού κόστους ή μεγιστοποίησης της κερδοφορίας χρησιμοποιώντας αντίστοιχα τις αντικειμενικές συναρτήσεις των εξισώσεων Eq.5.13 ή Eq.5.28.

Περίπτωση 1: Σχεδιασμός ολοκληρωμένων βιοδιυλιστηρίων ελάχιστου ενεργειακού κόστους

Το πρόβλημα μελετήθηκε με τη χρήση εξισώσεων integer cuts για τον εντοπισμό των 30 καλύτερων ενεργειακών λύσεων-βιοδιυλιστηρίων. Όπως ήταν αναμενόμενο στα πλαίσια ελαχιστοποίησης του ενεργειακού κόστους, το μοντέλο επιλέγει ως βέλτιστη λύση την ενσωμάτωση μίας μόνο διεργασίας, η οποία μάλιστα θα παρουσιάζει τις μικρότερες ενεργειακές ανάγκες. Αυτή είναι η διεργασία της πυρόλυσης, όπου ύστερα από εφαρμογή (μόνον) άμεσης ολοκλήρωσης μεταξύ των θερμών/ψυχρών ρευμάτων αποδίδει το μικρότερο ενεργειακό κόστος, 293 k€/yr. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.9 (5 καλύτερες λύσεις), η 1^η βέλτιστη λύση δεν παρουσιάζει εξοικονόμηση ατμού (λόγω έμμεσης ολοκλήρωσης), καθώς το βιοδιυλιστήριο περιλαμβάνει μόνο μία διεργασία. Στη 2^η λύση ενσωματώνεται η αναερόβια χώνευση, ενώ στις επόμενες θέσεις μέρος της τροφοδοσίας μοιράζεται και στη διεργασία κλασμάτωσης για την ενσωμάτωση βιοχημικών πέραν των βιοκαυσίμων, ενισχύοντας την εξοικονόμηση ατμού της Συνολικής Μονάδας. Ήδη στις 5 πρώτες θέσεις τα ποσοστά εξοικονόμησης ατμού θέρμανσης κυμαίνονται έως 28% (5^η λύση) των συνολικών αναγκών του βιοδιυλιστηρίου, με την ανταλλαγή ενέργειας να λαμβάνει χώρα στα βελτιστοποιημένα επίπεδα ατμού θερμοκρασίας 290-295 °C, 155 °C και 115 °C.

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης



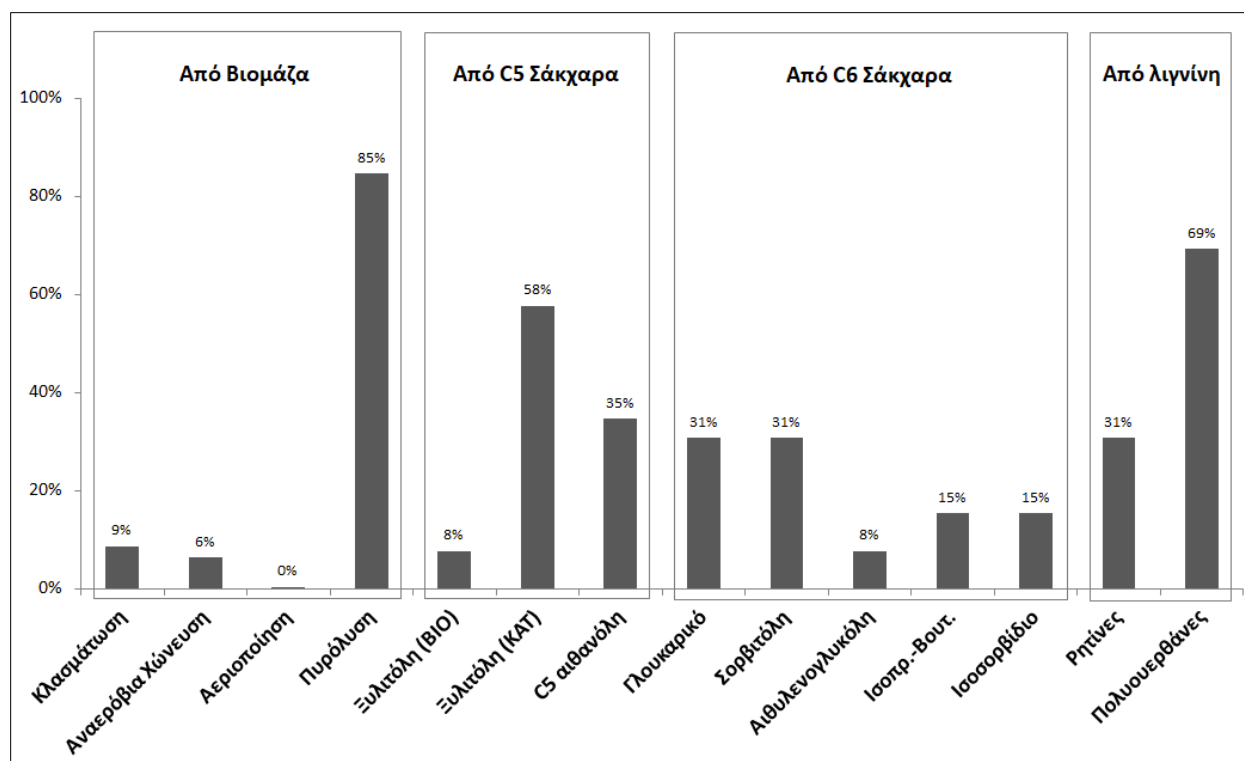
Σχήμα 5.23: BBR υποψήφια διεργασίες αξιοποίησης βιομάζας για την ανάπτυξη ενός νέου βιοδιωλιστηρίου

Πίνακας 5.9: Σύνολο 5 καλύτερων λύσεων βιοδιυλιστηρίων ελάχιστου ενεργειακού κόστους

Λύση	Βιοδιυλιστήριο	Θερμές Παροχές [kW]	Ψυχρές Παροχές [kW]	Εξοικονόμηση ατμού [kW]	Ενεργειακό κόστος εξοικονόμησης [κ€/γρ]	Ενεργειακό κόστος [κ€/γρ]
1		2,137	198	0	0	293
2		2,416	486	0	0	370
3		5,381	4,611	765	27	875
4		5,492	4,425	955	41	876
5		5,487	4,450	2,153	84	920

Από το σύνολο των 30 καλύτερων λύσεων εξαγονται συμπεράσματα για τις τάσεις επιλογής προϊόντων σύμφωνα με ενεργειακά κριτήρια. Οι προτιμήσεις ένταξης προϊόντων καταγράφονται στο διάγραμμα του Σχήματος 5.24, με την πυρόλυση (85%) να είναι η προτιμότερη διεργασία για την αξιοποίηση της βιομάζας, από ενεργειακής σκοπιάς. Η επόμενη εναλλακτική περιλαμβάνει την κλασμάτωση βιομάζας (9%), ενώ οι υψηλότερες τάσεις αξιοποίησης των ενδιαμέσων C5, C6 σακχάρων και λιγνίνης παρουσιάζονται για την παραγωγή ξυλιτόλης (KAT), γλουκαρικού οξέος, σορβιτόλης και πολυουρεθανών.

Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη χρήση και των δύο μοντέλων μεταφόρτωσης για την εξαγωγή επιπλέον πληροφοριών σχεδιασμού σχετικά με τους εναλλάκτες ολοκλήρωσης των ρευμάτων. Στην περίπτωση του ICT (πολλαπλών καταρρακτών), η διάρκεια επίλυσης δεν ξεπέρασε τα 3 δευτερόλεπτα, ενώ στην περίπτωση του CIT (ενιαίος καταρράκτης) η επίλυση διήρκησε περίπου 4.5 λεπτά. Καθότι δεν υφίστανται ειδικές ελευθερίες στην άμεση ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ ρευμάτων διαφορετικών διεργασιών, και τα δύο μοντέλα μεταφόρτωσης απέδωσαν τις ίδιες βέλτιστες λύσεις βιοδιυλιστηρίων.



Σχήμα 5.24: Προτιμήσεις ενσωμάτωσης βιοπροϊόντων σε βιοδιυλιστήρια σύμφωνα με ενεργειακά κριτήρια

Ελάχιστος αριθμός εναλλακτών Συνολικής Μονάδας

Η μεγάλη διαφορά στο χρόνο επίλυσης του μοντέλου CIT οφείλεται στη χρήση αναλυτικών επιλογών ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ όλων των υποψήφιων ρευμάτων και υποψήφιων βοηθητικών παροχών σε κάθε θερμοκρασιακό ενδιάμεσο. Ωστόσο, οι επιπλέον επιλογές και δυνατότητες ολοκλήρωσης που προσφέρει το μοντέλο CIT επιτρέπουν τον υπολογισμό του ελάχιστου αριθμού εναλλακτών (ή/και τη στόχευση της επιφάνειας εναλλαγής) για την ολοκλήρωση των ρευμάτων και την εξαγωγή σημαντικών πληροφοριών που απαιτούνται κατά την μετα-ανάλυση των αποτελεσμάτων για το σχεδιασμό του δικτύου εναλλακτών της Συνολικής Μονάδας. Το παρακάτω παράδειγμα παρουσιάζει την δυναμική και την ευκολία συνδυασμού του αναβαθμισμένου μοντέλου CIT με άλλα προβλήματα σχεδιασμού, όπως αυτό του δικτύου εναλλακτών (Biegler et al., 1997) και την προσέγγιση του κόστους επένδυσης του δικτύου εναλλακτών για την εύρεση της βέλτιστης τιμής ΔT_{\min} της Συνολικής Μονάδας (Kemp, 2007). Το πρόβλημα βελτιστοποίησης του αριθμού εναλλακτών επεξηγείται για την καλύτερη λύση βιοδιυλιστηρίου (1^η λύση του Πίνακα 5.9) που επιλέχθηκε από το μοντέλο.

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

Το πρόβλημα απαρτίζεται από το μοντέλο CIT και επιπλέον περιορισμούς που αναλαμβάνουν την ενεργοποίηση εναλλακτών για κάθε ζεύγος ολοκληρωμένων ρευμάτων και εναλλακτών-βοηθητικών παροχών. Η αντικειμενική συνάρτηση υπολογίζει τον αριθμό όλων των επιλεχθέντων εναλλακτών που χρησιμοποιεί η Συνολική Μονάδα. Το πρόβλημα εκμεταλλεύεται τις ειδικές επιλογές ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ ρευμάτων (Q_{ijk}) και βοηθητικών παροχών (Q_{ink} και Q_{mjk}), που προσφέρει το μοντέλο CIT, για τον εντοπισμό των αντίστοιχων εναλλακτών. Επίσης, δεδομένου ότι ο ενιαίος καταρράκτης έχει ήδη αποσυμφορηθεί, κατά το πρώτο στάδιο βελτιστοποίησης των διεργασιών, είναι γνωστοί όλοι οι κόμβοι ανάσχεσης των εμπλεκόμενων διεργασιών. Ακολούθως, το πρόβλημα υπολογισμού εναλλακτών εφαρμόζεται για κάθε επιμέρους δίκτυο εναλλακτών άνω/κάτω των κόμβων κάθε διεργασίας (Biegler et al., 1997), και εισάγονται οι περιορισμοί:

$$\sum_{k \in K_p^{UP}} Q_{ijk} \leq y_{ij}^{HC_{UP}} \cdot U_{ij}^{UP} \quad \forall i \in HS, j \in CS, p \in P \quad Eq. 5.30.1$$

$$\sum_{k \in K_p^{UP}} Q_{ink} \leq y_{in}^{HU_{UP}} \cdot U_{in}^{UP} \quad \forall i \in HS, n \in W \quad Eq. 5.30.2$$

$$\sum_{k \in K_p^{UP}} Q_{mjk} \leq y_{mj}^{CU_{UP}} \cdot U_{mj}^{UP} \quad \forall m \in S, j \in CS \quad Eq. 5.30.3$$

$$\sum_{k \in K_p^{DO}} Q_{ijk} \leq y_{ij}^{HC_{DO}} \cdot U_{ij}^{DO} \quad \forall i \in HS, j \in CS, p \in P \quad Eq. 5.30.4$$

$$\sum_{k \in K_p^{DO}} Q_{ink} \leq y_{in}^{HU_{DO}} \cdot U_{in}^{DO} \quad \forall i \in HS, n \in W \quad Eq. 5.30.5$$

$$\sum_{k \in K_p^{DO}} Q_{mjk} \leq y_{mj}^{CU_{DO}} \cdot U_{mj}^{DO} \quad \forall m \in S, j \in CS \quad Eq. 5.30.6$$

Οι δείκτες UP και DO αντιπροσωπεύουν εναλλάκτες που τοποθετούνται άνω (UP) ή κάτω (DO) από το pinch, ενώ τα υποσύνολα K_p^{UP} και K_p^{DO} υποδεικνύουν τα θερμοκρασιακά ενδιάμεσα, αντίστοιχα, άνω και κάτω του pinch της διεργασίας p . Οι δυαδικές μεταβλητές y_{ij}^{HC} , y_{in}^{HU} και y_{mj}^{CU} σχετίζονται με την ενεργοποίηση ενός εναλλάκτη για την ανταλλαγή θερμότητας, αντίστοιχα, μεταξύ θερμού (i)-ψυχρού (j) ρεύματος, θερμού ρεύματος (i)-ψυχρής παροχής (n) και θερμής παροχής (m)-ψυχρού ρεύματος (j). Τα U_{ij} , U_{in} και U_{mj} αποτελούν άνω όρια (παράμετροι) ανταλλαγής θερμότητας και συσχετίζονται με τα

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

ενεργειακά περιεχόμενα των ρευμάτων που συνεισφέρουν σε κάθε εξίσωση της Eq.5.30. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται αθροίζει του επιλεγμένους εναλλάκτες για κάθε επιλογή ανταλλαγής θερμότητας για τον υπολογισμό του συνολικού αριθμού εναλλακτών (HE) της Συνολικής Μονάδας, ως εξής:

$$MIN \ HE = \sum_{\substack{i \in HS \\ j \in CS}} y_{ij}^{HC} + \sum_{\substack{i \in HS \\ n \in W}} y_{in}^{HU} + \sum_{\substack{m \in S \\ j \in CS}} y_{mj}^{CU} \quad Eq. 5.31$$

Το μοντέλο CIT με τις εξισώσεις Eq.5.30 και αντικειμενική συνάρτηση την Eq.5.31 επιλύθηκε για την ελαχιστοποίηση του αριθμού εναλλακτών, HE , και τελικά, τον υπολογισμό των ανταλλασσόμενων ενεργειακών φορτίων μεταξύ ρευμάτων και βοηθητικών παροχών για κάθε θερμοκρασιακό εύρος άνω και κάτω του pinch, ως εξής: $\sum_{k \in K_p^{UP}} Q_{ijk}$, $\sum_{k \in K_p^{UP}} Q_{ink}$, $\sum_{k \in K_p^{UP}} Q_{mjk}$, $\sum_{k \in K_p^{DO}} Q_{ijk}$, $\sum_{k \in K_p^{DO}} Q_{ink}$ και $\sum_{k \in K_p^{DO}} Q_{mjk}$. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή (χειροκίνητα ή αυτοματοποιημένα με χρήση εργαλείων) για το σχεδιασμό του δικτύου εναλλακτών (Biegler et al., 1997). Ωστόσο, σημειώνεται ότι λύση του προβλήματος δεν είναι απαραίτητα μοναδική, δεδομένου ότι μπορεί να υπάρχουν αρκετά εναλλακτικά σενάρια εναλλαγής θερμότητας για τον ίδιο (ελάχιστο) αριθμό εναλλακτών που προέκυψαν από το μοντέλο.

Η παραπάνω στρατηγική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε βέλτιστη λύση Συνολικής Μονάδας που εντοπίστηκε στις 30 καλύτερες θέσεις. Ενδεικτικά, στον Πίνακα 5.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη βελτιστοποίηση των εναλλακτών της 1^{ης} βέλτιστης λύσης, η οποία περιλαμβάνει μόνο τη διεργασία της πυρόλυσης. Τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.10 παρουσιάζουν τις συνδέσεις μεταξύ των εμπλεκόμενων ρευμάτων και των επιλεγμένων (βελτιστοποιημένων) βοηθητικών παροχών και τα ενεργειακά φορτία ανταλλαγής θερμότητας κάθε ζεύγους ολοκλήρωσης. Τα δεδομένα του Πίνακα 5.10 αποτελούν σημαντική αφετηρία για την επιλογή εναλλακτών και των φορτίων τους κατά τον ιδιαίτερα απαιτητικό σχεδιασμό του δικτύου εναλλακτών. Ο χρήστης σε επόμενα στάδια απαιτείται να εντοπίσει τη σειρά των εν λόγω εναλλακτών, ή/και τη χρήση τεχνικών διαχωρισμού ρευμάτων, για τη διασφάλιση των εφικτών θερμοκρασιακών διαφορών σε κάθε εναλλάκτη.

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα εναλλακτών θερμότητας από τη χρήση του αναλυτικού μοντέλου CIT

p33 (Πυρόλυση)																	
Άνω του pinch									Κάτω του pinch								
Θερμά-Ψυχρά ρεύματα ($\sum_{k \in K_p^{up}} Q_{ijk}$)			Θερμά ρεύματα-Ψυχρές παροχές ($\sum_{k \in K_p^{up}} Q_{ink}$)			Ψυχρά ρεύματα-Θερμές παροχές ($\sum_{k \in K_p^{up}} Q_{mjk}$)			Θερμά-Ψυχρά ρεύματα ($\sum_{k \in K_p^{po}} Q_{ijk}$)			Θερμά ρεύματα-Ψυχρές παροχές ($\sum_{k \in K_p^{po}} Q_{ink}$)			Ψυχρά ρεύματα-Θερμές παροχές ($\sum_{k \in K_p^{po}} Q_{mjk}$)		
Θερμό	Ψυχρό	MW	Θερμό	Ψυχρή	MW	Ψυχρό	Θερμή	MW	Θερμό	Ψυχρό	MW	Θερμό	Ψυχρή	MW	Ψυχρό	Θερμή	MW
H1	C3	0.131	-	-	-	C6	1000	0.055	-	-	-	H3	Cold Water	0.036	-	-	-
H1	C9	0.211	-	-	-	C7	1000	0.044	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H2	C5	0.074	-	-	-	C8	1000	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H2	C6	0.193	-	-	-	C9	295	0.134	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H2	C7	0.116	-	-	-	C9	165	0.066	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H2	C8	0.152	-	-	-	C9	100	0.083	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H2	C9	0.613	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H3	C1	0.249	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H3	C2	0.139	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H3	C4	0.577	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H3	C9	1.397	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Περίπτωση 2: Ανάπτυξη βιοδιυλιστηρίων μέγιστης κερδοφορίας

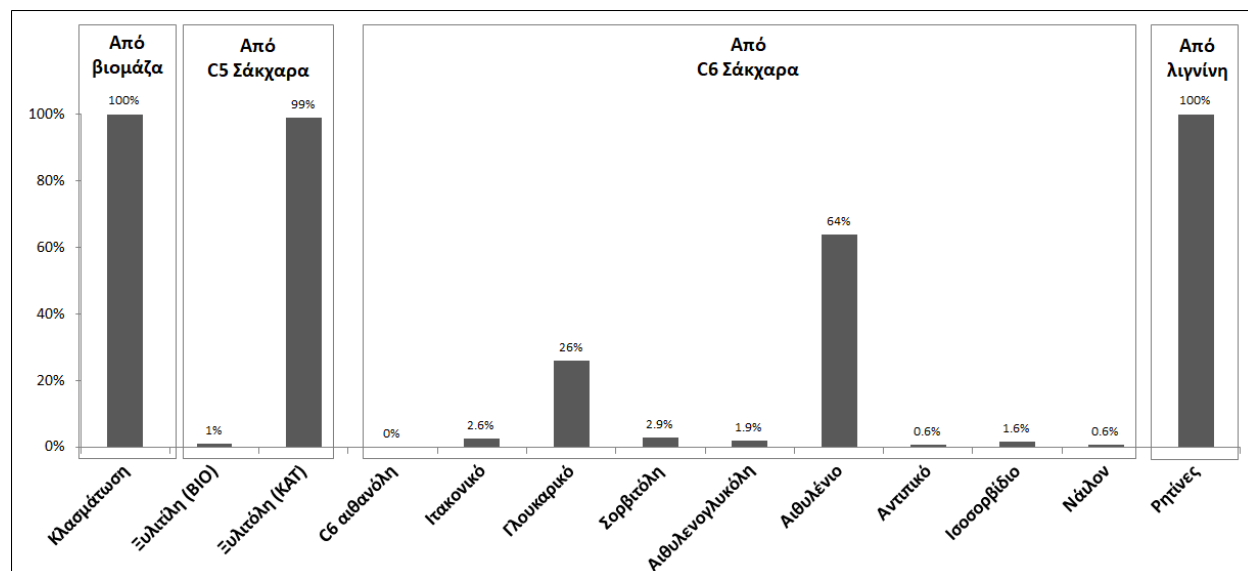
Το πρόβλημα επιλύθηκε ξανά με τη χρήση integer cuts για την εύρεση των 30 καλύτερων χαρτοφυλακίων διεργασιών με τη μεγαλύτερη κερδοφορία ακολουθώντας μία συντηρητική προσέγγιση και υποθέτοντας αποκλίσεις στις τιμές των προϊόντων κατά -30% και αυξημένα κόστη επένδυσης και λειτουργίας κατά +30%. Τα αποτελέσματα των 5 καλύτερων λύσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.11. Η βέλτιστη λύση περιλαμβάνει τη χρήση όλης της τροφοδοσίας για την παραγωγή προϊόντων υψηλής αξίας έναντι βιοκαυσίμων. Συγκεκριμένα, επιλέγεται η παραγωγή ξυλιτόλης (KAT) από C5 σάκχαρα, αιθυλενίου από αιθανόλη που παράχθηκε από ζύμωση C6 σακχάρων (γλυκόζης) και ρητινών από λιγνίνη. Το βιοδιυλιστήριο παρουσιάζει κερδοφορία έως 66.4 Μ€ ετησίως (μετά φόρων 50% επί των κερδών), ενώ η εξοικονόμηση κόστους ατμού (0.25 Μ€/γρ), λόγω έμμεσης ολοκλήρωσης, φτάνει το 10% του κόστους θέρμανσης του βιοδιυλιστηρίου. Πέραν του ατμού πολύ υψηλής πίεσης, τα βέλτιστα επίπεδα βοηθητικών παροχών που επιλέχθηκαν περιλαμβάνουν ατμό 155 °C, 140 °C και 105 °C, ενώ το σύστημα ψύξης χρησιμοποιεί κρύο νερό και ψύξη στους 0 °C και -35 °C.

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

Τα συμπεράσματα προτιμήσεων που προέκυψαν για το σύνολο των 30 καλύτερων λύσεων παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 5.25, επιβεβαιώνοντας τις επιλογές της 1^{ης} βέλτιστης λύσης του Πίνακα 5.11 για την παραγωγή ξυλιτόλης (ΚΑΤ), αιθυλενίου και ρητινών. Το γλουκαρικό οξύ (πρόδρομο συστατικό για την παραγωγή νάιλον) αποτελεί μία επιπλέον ελπιδοφόρα εναλλακτική για την αξιοποίηση των C6 σακχάρων, ωστόσο η κλιμάκωση της παραγωγής προς το αιθυλένιο ή το γλουκαρικό θα εξαρτηθεί από τις ειδικές συνθήκες των αγορών και επιπλέον οικονομικά κριτήρια και δεδομένα της επένδυσης.

Πίνακας 5.11: Σύνολο 5 καλύτερων λύσεων βιοδιυλιστηρίων μέγιστης κερδοφορίας

Λύση	Βιοδιυλιστήριο	Κόστος θέρμανσης [Μ€/γρ]	Κόστος ψύξης [Μ€/γρ]	Εξοικονόμηση θέρμανσης [Μ€/γρ]	Ενεργειακό κόστος [Μ€/γρ]	Κερδοφορία [Μ€/γρ]
1		2.37	6.99	0.25	9.36	66.373
2		2.31	6.79	0.25	9.11	66.367
3		1.78	5.04	0.27	6.82	66.334
4		2.36	6.76	0.26	9.11	66.196
5		2.30	6.56	0.26	8.86	66.190



Σχήμα 5.25: Προτιμήσεις ενσωμάτωσης βιοπροϊόντων σε βιοδιυλιστήρια σύμφωνα με κριτήρια κερδοφορίας

5.5.7. Ειδικές περιπτώσεις ολοκλήρωσης διεργασιών

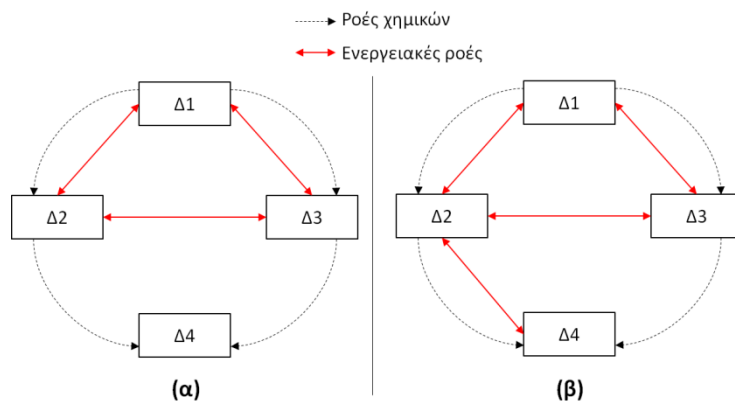
Η ανταλλαγή χημικών μεταξύ διεργασιών φαίνεται πιο εύκολη και προφανής διαδικασία από την ανταλλαγή θερμότητας, η οποία χρησιμοποιεί απαιτητικά συστήματα ρύθμισης και σωληνώσεων μεταφοράς ατμού για την ενεργειακή διασύνδεση των εμπλεκόμενων διεργασιών μέσω του κεντρικού συστήματος παροχών. Για αυτό, αν και η ανταλλαγή θερμότητας (άμεσα και έμμεσα) μεταξύ των διεργασιών ενός βιοδιυλιστηρίου μπορεί να θεωρηθεί δεδομένη, η έμμεση ολοκλήρωση μεταξύ βιομηχανιών σε ορισμένα παραδείγματα κυκλικής οικονομίας μπορεί να μην είναι εφικτή.

Ένα νέο βιοδιυλιστήριο μπορεί να ανταλλάσει (υπολειμματικές) ροές χημικών με όλες, ή κάποιες, υφιστάμενες βιομηχανίες, αλλά να μην μπορεί να ολοκληρωθεί ενεργειακά με απομακρυσμένες (παρά μόνον με παρακείμενες) βιομηχανίες για πρακτικούς λόγους ή/και λόγω κόστους εξοπλισμού. Τέτοιου είδους περιορισμοί ολοκλήρωσης μπορεί να παρατηρηθούν για οποιοδήποτε ζευγάρι επιλεγμένων διεργασιών (υποψήφιες ή/και υφιστάμενες). Η ανταλλαγή χημικών μεταξύ οποιονδήποτε διεργασιών με οποιονδήποτε τρόπο υποστηρίζεται με σαφή τρόπο από τις διασυνδέσεις του BBR (Κεφάλαιο 4.1 και Σχήμα 4.1), οι οποίες επιτρέπουν κάθε επιθυμητή σύνδεση διεργασιών σύμφωνα με τους βαθμούς ελευθερίας (ρυθμούς ροής χημικών F_t) που εισάγονται κατά την κατασκευή της αναπαράστασης. Ωστόσο, η ενεργειακή συνεισφορά κάθε διεργασίας στις εξισώσεις ολοκλήρωσης (Eq.5.1 του ICT ή Eq.5.14 του CIT) δεσμεύεται σύμφωνα με τις δυναμικότητες που επιλέγονται από το BBR, γεγονός που

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

μπορεί να μην είναι επιθυμητό σύμφωνα με τις ειδικές συνθήκες κάθε προβλήματος. Σύμφωνα με τα παραπάνω, εντοπίζονται δύο γενικές περιπτώσεις ολοκλήρωσης διεργασιών, για τις οποίες οι συνδέσεις που επιλέγονται μεταξύ διεργασιών στο BBR δεν συνεπάγονται τις ίδιες ενεργειακές συνδέσεις μεταξύ τους.

Και στις δύο περιπτώσεις, οι εμπλεκόμενες διεργασίες μπορούν να ανταλλάσσουν χημικά, αλλά να μην συμμετέχουν με τον ίδιο τρόπο στην ολοκλήρωση. Η πρώτη, αφορά τον πλήρη αποκλεισμό κάποιων διεργασιών της Συνολικής Μονάδας από τις διαδικασίες ολοκλήρωσης. Η δεύτερη αφορά τον κατά περίπτωση αποκλεισμό κάποιων διεργασιών από την ολοκλήρωσή τους με άλλες διεργασίες της Συνολικής Μονάδας. Οι δύο περιπτώσεις αποτυπώνονται στα Σχήματα 5.26α και 5.26β. Είναι προφανές ότι, η πρώτη περίπτωση (Σχήμα 5.26α) αποτελεί υποπερίπτωση της δεύτερης (Σχήμα 5.26β), ωστόσο παρουσιάζεται ξεχωριστά, καθότι αντιμετωπίζεται με πολύ ευκολότερο τρόπο από την γενική περίπτωση του Σχήματος 5.26β.



Σχήμα 5.26: Ειδικές περιπτώσεις ολοκλήρωσης: (α) αποκλεισμός διεργασίας, (β) ολοκλήρωση υπό περιορισμούς

Για την αντιμετώπιση της πρώτης περίπτωσης (Σχήμα 5.26α) απαιτείται ο αποκλεισμός της ενεργειακής συνεισφοράς των αντίστοιχων διεργασιών (εδώ της Δ4) στα μοντέλα ολοκλήρωσης. Αυτό επιτυγχάνεται εύκολα, αντιγράφοντας τις μεταβλητές ρυθμών ροής F_t σε F'_t . Ακολούθως, κάθε μεταβλητή χρησιμοποιείται ξεχωριστά: η μία (F_t) για τα ισοζύγια του BBR, και η άλλη (F'_t) για τα ισοζύγια ενέργειας των ICT και CIT στις αντίστοιχες εξισώσεις Eq.5.1 και Eq.5.14. Εφόσον είναι γνωστό, εκ των προτέρων, ποιες διεργασίες πρέπει να αποκλείονται από τις διαδικασίες ολοκλήρωσης, αποκλείονται οι αντίστοιχοι ρυθμοί εισόδου των διεργασιών στα ισοζύγια ενέργειας, άρα: $F'_t = 0$, ενώ όλοι οι

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

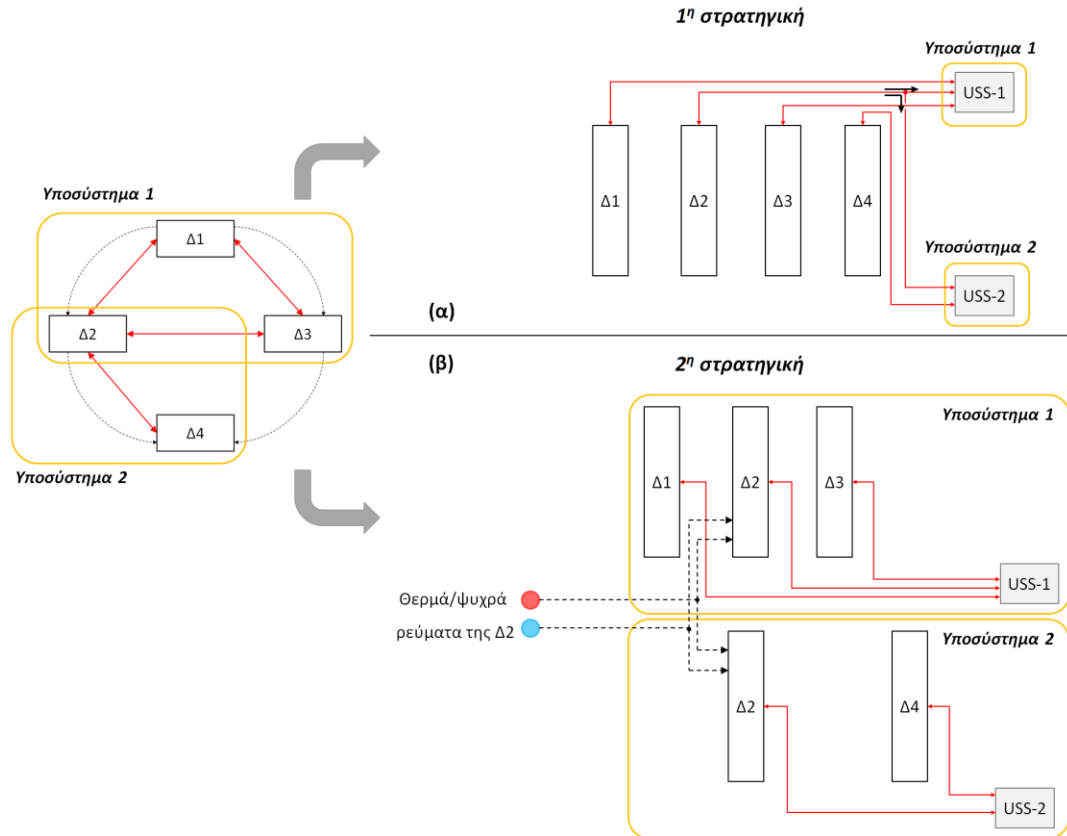
υπόλοιποι ρυθμοί ορίζονται σύμφωνα με τις επιλογές που προκύπτουν από τα ισοζύγια μάζας του BBR, δηλαδή $F'_t = F_t$. Η δεύτερη περίπτωση ολοκλήρωσης του Σχήματος 5.26β αντιμετωπίζεται διαφορετικά.

Στο Σχήμα 5.26β, χρειάζεται να εντοπιστούν όλα τα επιμέρους συστήματα ολοκλήρωσης που ορίζονται από τις ειδικές συνθήκες του προβλήματος. Οι περιορισμοί έμμεσης ολοκλήρωσης μεταξύ συγκεκριμένων συνδυασμών διεργασιών οδηγεί στην ανάπτυξη υποσυστημάτων ολοκλήρωσης, κάθε ένα από τα οποία αφορά την ολοκλήρωση ενός υποσυνόλου των διεργασιών. Στην περίπτωση του Σχήματος 5.26β, εντοπίζονται δύο υποσυστήματα: (1) Δ1-Δ2-Δ3 και (2) Δ2-Δ4. Η ολοκλήρωση κάθε υποσυστήματος είναι ίδιας φύσης με την κλασική ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας (όλες-με-όλες), μόνο που αφορά αυστηρά τις διεργασίες του υποσυνόλου διεργασιών από το οποίο απαρτίζεται. Οι διεργασίες κάθε υποσυστήματος ολοκληρώνονται με κάθε (και με τον δικό τους) τρόπο μεταξύ τους, για αυτό και πρέπει να υποστηρίζονται από διαφορετικά συστήματα βοηθητικών παροχών (USS). Το γεγονός αυτό υποδεικνύει τροποποιήσεις στην εφαρμογή των ενεργειακών κόμβων (2, 3 του Σχήματος 5.2 και 4, 5 του Σχήματος 5.5) του USS και κατ' επέκταση των μοντέλων ICT και CIT. Ακολούθως, παρουσιάζονται δύο εναλλακτικές στρατηγικές για την αντιμετώπιση τέτοιων ειδικών περιπτώσεων, με τη δεύτερη να μπορεί να αντιμετωπίσει τις παραπάνω προκλήσεις χωρίς να απαιτείται καμία τροποποίηση στα μοντέλα μεταφόρτωσης. Στα Σχήματα 5.27 και 5.28 παρουσιάζεται η εφαρμογή κάθε στρατηγικής για κάθε αναπαράσταση ολοκλήρωσης (πολλαπλών-καταρρακτών ή TSC) που επιλέγει να εφαρμόσει ο χρήστης.

Κατά την πρώτη στρατηγική (Σχήμα 5.27α), η αναπαράσταση πολλαπλών-καταρρακτών εφαρμόζεται μία φορά (για όλα τα υποσυστήματα) και οι καταρράκτες επικοινωνούν μέσω διαφορετικών USS, τα οποία εφαρμόζονται για την έμμεση ολοκλήρωση των διεργασιών κάθε υποσυστήματος. Αυτή η στρατηγική απαιτεί τεχνικές διαμοιρασμού της θερμότητας που εξάγεται από τις κοινές διεργασίες – δηλαδή διεργασίες που ανήκουν σε περισσότερα από ένα υποσυστήματα, όπως η διεργασία Δ2 – προς τα USS-1 και USS-2, καθώς επίσης και τον επαναπροσδιορισμό των ενεργειακών ροών γύρω από τους κόμβους 2 και 3 (Σχήμα 5.2) που χρησιμοποιεί κάθε USS. Το μοντέλο ICT χρειάζεται αναλόγως να τροποποιηθεί για την εφαρμογή της πρώτης στρατηγικής. Εναλλακτικά, στη δεύτερη στρατηγική (Σχήμα 5.27β), κάθε υποσύστημα περιγράφεται από ξεχωριστές αναπαραστάσεις πολλαπλών-καταρρακτών, οι οποίες αφορούν αυστηρά τις διεργασίες κάθε υποσυστήματος, και εφαρμόζονται σύμφωνα με τους υφιστάμενους κανόνες ολοκλήρωσης του ICT. Η μόνη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι τα θερμά/ψυχρά ρεύματα των κοινών διεργασιών θα πρέπει να μπορούν να μοιράζονται (διακεκομμένες

Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

γραμμές στο Σχήμα 5.27β) το ενεργειακό τους περιεχόμενο ελεύθερα σε κάθε επιμέρους αναπαράσταση-υποσύστημα. Αυτή η στρατηγική δεν απαιτεί τροποποιήσεις στις εξισώσεις του ICT, παρά μόνον στον τρόπο υπολογισμού της ενεργειακής συνεισφοράς των κοινών διεργασιών.



Σχήμα 5.27: Στρατηγικές αντιμετώπισης ολοκλήρωσης διεργασιών υπό περιορισμούς με τη χρήση πολλαπλών-καταρρακτών

Έτσι, έστω ότι το πρόβλημα αποτελείται από $Z = \{z = 1, NZ\}$ υποσυστήματα. Ακολούθως, οι ενεργειακές ροές και τα ισοζύγια του ICT διατυπώνονται για κάθε υποσύστημα z , και οι ρυθμοί ροής $F_{t,z}$ που ρυθμίζουν (στην Eq.5.1) τη συνεισφορά των διεργασιών στα ενδιάμεσα κάθε ICT_z , υπολογίζονται από τον πρόσθετο περιορισμό:

$$F_t = \sum_z F_{t,z} \quad \forall t \in T, z \in Z \quad Eq.5.32$$

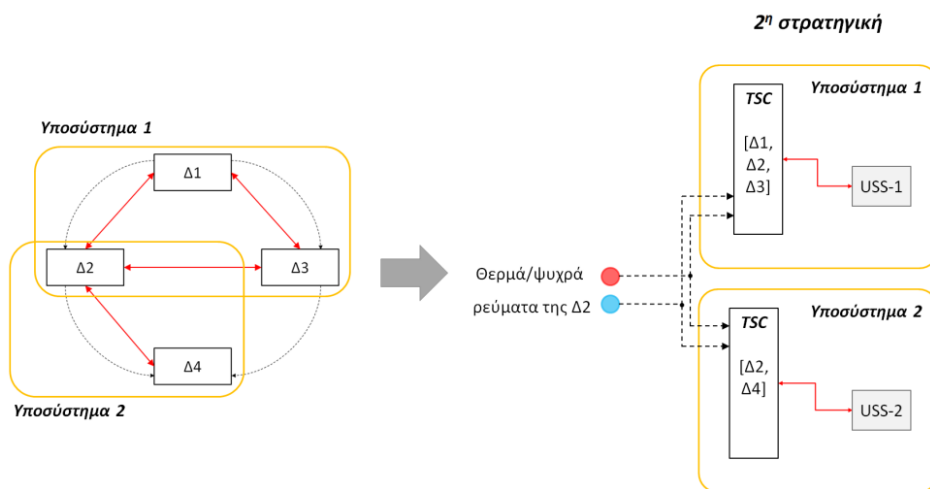
Κεφάλαιο 5. Μαθηματική προτυποποίηση ενεργειακής ολοκλήρωσης

όπου F_t η ρυθμοί ροής που επιλέγονται από το BBR. Όσον αφορά, τη συνεισφορά μη-κοινών διεργασιών – για τις οποίες είναι γνωστό εκ των προτέρων σε πιο υποσύστημα “z” συνεισφέρουν – οι αντίστοιχοι ρυθμοί ροής ορίζονται, ως: $F_{t,“z”} = F_t$.

Σημειώνεται ότι, αν και κάθε πρόβλημα ολοκλήρωσης ορίζεται αυτόνομα σε κάθε ICT_z , οι ενεργειακές αποδόσεις κάθε υποσυστήματος z επηρεάζονται από τις αποδόσεις των υπολοίπων, λόγω της ανταγωνιστικής ενεργειακής συνεισφοράς των κοινών διεργασιών στα παράλληλα υποσυστήματα. Η επέκταση του μοντέλου ICT μέσω της Eq.5.32 επιτρέπει, επίσης, τη βελτιστοποίηση της συνεισφοράς των κοινών τροφοδοσιών στα επιμέρους υποσυστήματα με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού ενεργειακού κόστους όλου του συστήματος.

Η δεύτερη στρατηγική εφαρμόζεται με τον ίδιο τρόπο και στην αναπαράσταση TSC, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.28. Κάθε υποσύστημα ολοκληρώνεται μέσω διαφορετικών TSC (σύμφωνα με τους υφιστάμενους κανόνες του Σχήματος 5.5), και τα ενεργειακά περιεχόμενα των ρευμάτων των κοινών διεργασιών διαμοιράζονται ελεύθερα στους επιμέρους καταρράκτες TSC. Αναλόγως, το CIT_z εφαρμόζεται για κάθε υποσύστημα μαζί με τον επιπλέον περιορισμό Eq.5.32.

Σημειώνεται ότι, το TSC δεν μπορεί να υποστηρίξει την πρώτη στρατηγική (χρήση παράλληλων USS του Σχήματος 5.27α), καθότι η θερμότητα που προέρχεται από διαφορετικά υποσυστήματα (και περνά μέσα από τα παράλληλα USS), θα συγκεντρώνεται ξανά στα ενδιάμεσα του TSC, με αποτέλεσμα να επιβάλλεται, πάλι, η έμμεση ολοκλήρωση μεταξύ όλων των εμπλεκόμενων διεργασιών.



Σχήμα 5.28: Στρατηγικές αντιμετώπισης ολοκλήρωσης διεργασιών υπό περιορισμούς με τη χρήση TSC

Οι υπολογιστικές απαιτήσεις των προβλημάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή της δεύτερης στρατηγικής είναι κατά τι μεγαλύτερες από της πρώτης, καθότι η άμεση ολοκλήρωση των κοινών διεργασιών επαναλαμβάνεται για κάθε υποσύστημα στο οποίο εμφανίζονται (βλ. Δ2 στο Υποσύστημα 1 και 2 του Σχήματος 5.27β). Βέβαια, οι υπολογιστικές απαιτήσεις της άμεσης ολοκλήρωσης, εκ φύσεως, καθορίζονται από τον αριθμό των ρευμάτων μίας διεργασίας και συνήθως δεν είναι υπολογίσιμες. Παρ' όλα αυτά, η δεύτερη στρατηγική προτιμάται, διότι μπορεί να εφαρμοστεί και με τα δύο μοντέλα μεταφόρτωσης, και κυρίως δεν απαιτεί τροποποιήσεις στα ICT και CIT εξασφαλίζοντας τη γενικευμένη εφαρμογή τους ανεξάρτητα από τις ειδικές συνθήκες ολοκλήρωσης που ορίζονται από το πρόβλημα.

Βιβλιογραφία

1. Kokossis, A.C., Tsakalova, M., Pyrgakis, K., 2015. Design of integrated biorefineries. *Computers & Chemical Engineering* 81, 40–56
2. Papoulias, A., Grossmann, I.E., 1983. A structural optimization approach in process synthesis—II: Heat recovery networks. *Computers & Chemical Engineering* 7, 6, 707-721
3. Pyrgakis, A.K., Kokossis, C.A., 2019. A Total Site Synthesis approach for the selection, integration and planning of multiple-feedstock biorefineries. *Computers and Chemical Engineering*, 122, 326–355
4. Barambu N.U., El-Nafaty U.A., Saeed I.A., 2017. Energy Integration of Sugar Production Plant Using Pinch Analysis: A Case Study of Savanah Sugar Company Yola, Nigeria. *Adv. Appl. Sc. Res.*, 8, 2, 20-29
5. Aspen Plus V8.6, Aspen Technology Inc., Aspen Plus V8.6, 2018
6. BIOCORE, a biorefinery concept, 2014. www.biocore-europe.org (accessed 17 January 2020)
7. European parliament, 2015. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L1513&from=EN> (accessed 17 January 2020)
8. European parliament, press room, 2018. Energy: new ambitious targets on renewables and energy efficiency, <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive> (accessed 17 January 2020)
9. Biegler, L.T., Grossmann, I.E., Westerberg, A.W., 1997. Systematic methods of chemical process design. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall PTR

Κεφάλαιο 6.

Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός:

Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

Στο παρόν κεφάλαιο, η σύνθεση και ολοκλήρωση διεργασιών επανεξετάζεται σε συνθήκες όπου το πρόβλημα υπόκειται στην εποχική διαθεσιμότητα των ποικιλιών βιομάζας. Το πρόβλημα σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών επαναδιατυπώνεται δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στο μέρος που αφορά τη επιλογή διεργασιών, καθότι το πρόβλημα επηρεάζεται σημαντικά από ποιοτικές και ποσοτικές μεταβολές των τροφοδοσιών βιομάζας του βιοδιυλιστηρίου. Οι βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος σύνθεσης επεκτείνονται, πρώτον, λαμβάνοντας υπόψη ανταγωνιστικές ποικιλίες βιομάζας, των οποίων η διαθεσιμότητα (σε πολλές περιπτώσεις) παρουσιάζει έντονες εποχικές μεταβολές και, δεύτερον, ενσωματώνοντας επιπλέον επιλογές σύνθεσης στα στάδια αποθήκευσης και (ενεργοβόρου) προεπεξεργασίας των τροφοδοσιών.

6.1. Εποχικότητα βιομάζας και αλυσίδων προϊόντων

Για την επεξήγηση του προβλήματος και των προκλήσεων που εμφανίζονται θα χρησιμοποιηθεί η περίπτωση των λιγνοκυτταρινούχων τροφοδοσιών, οι οποίες αφενός παρουσιάζουν σημαντικές εποχικές διακυμάνσεις διαθεσιμότητας και αφετέρου αποτελούν κύριο και ενδεικτικό παράδειγμα τροφοδοσιών της αναπτυσσόμενης βιο-οικονομίας και της αειφόρου ανάπτυξης. Η λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα έναντι άλλων τροφοδοσιών, όπως ότι συναντάται σε αφθονία στη φύση, ανανεώνεται από μόνη της χωρίς ιδιαίτερη φροντίδα και κόστος, η αξιοποίησή της

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

αποδίδει σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη και περιλαμβάνει πολύτιμες χημικές δομές που αντιπροσωπεύουν ποικιλία τροφοδοσιών βασισμένες στον άνθρακα με χαμηλό κόστος.

Μία συνήθης μορφολογία λιγνοκυτταρινούχων βιοδιυλιστηρίων περιλαμβάνει (1) στάδια προεπεξεργασίας ή/και κλασμάτωσης της βιομάζας και (2) στάδια αναβάθμισής της σε βιοπροϊόντα. Οι λιγνοκυτταρινούχες ποικιλίες προσφέρουν πλήθος επιλογών επεξεργασίας, όπως απευθείας αναβάθμιση μέσω ζυμώσεων και θερμο-χημικών διεργασιών για την παραγωγή καυσίμων ή άλλων πρόδρομων χημικών, ενώ άλλοτε το πρόβλημα εστιάζει στην κλασμάτωση της βιομάζας στα επιμέρους βασικά συστατικά της: (i) C5 σάκχαρα (ξυλάνη), (ii) C6 σάκχαρα (γλυκάνη) και (iii) λιγνίνη. Κατάντη της διεργασίας κλασμάτωσης της βιομάζας διακλαδώνονται υποψήφιας διεργασίες αξιοποίησης των τριών βασικών ενδιάμεσων της λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας προς μία πλειάδα υψηλής αξίας ενδιάμεσων και τελικών προϊόντων, όπως βασικά (καύσιμα και διαλύτες), εξειδικευμένα (φαρμακευτικά, καλλυντικά) και καινοτόμα (επιφανειοδραστικά, κόλλες, υλικά δόμησης) χημικά. Παρόμοιες διαδικασίες κλασμάτωσης (με φυσικό, χημικό ή βιοχημικό τρόπο) εντοπίζονται και σε άλλους τύπους βιομάζας, όπως π.χ. στις άλγες ή στα υφάσματα, για την ανάκτηση των βασικών πολύτιμων δομικών συστατικών τους. Συνήθως, η κλασμάτωση της τροφοδοσίας βιομάζας είτε παρακάμπτεται είτε λαμβάνει χώρα μαζί με την αναβάθμισή της, όπως στις ζυμώσεις ή τις θερμοχημικές διεργασίες, με αποτέλεσμα να περιορίζεται σημαντικά το εύρος των επιλογών αναβάθμισης. Όταν η κλασμάτωση λαμβάνει χώρα ως αυτοτελές στάδιο στην είσοδο του βιοδιυλιστηρίου, τότε ο μηχανικός μπορεί τόσο να εντοπίσει πολλαπλές εναλλακτικές γραμμές παραγωγής για την αναβάθμιση κάθε συστατικού ξεχωριστά, καθώς επίσης και να ελέγξει και να διαχειριστεί αποδοτικότερα τις επιμέρους γραμμές παραγωγής της Συνολικής Μονάδας σε πραγματικές συνθήκες, όπου η τροφοδοσία υπόκειται σε ποιοτικές και ποσοτικές διακυμάνσεις συναρτήσεως του χρόνου. Μάλιστα, εάν η επιλογή της τεχνολογίας κλασμάτωσης επιλεγεί κατάλληλα, ώστε να μην λειτουργεί καταστρεπτικά ή να παρουσιάζει απώλειες για κάποια από τα συστατικά της, μπορεί να επιτευχθεί, κατά το δυνατόν, πιο ολιστική αξιοποίηση της βιομάζας.

Το πρόβλημα σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών επηρεάζεται από ποσοτικές και ποιοτικές μεταβολές των τροφοδοσιών βιομάζας, η οποία αποτελεί την βασική πρώτη ύλη των αλυσίδων προϊόντων. Κάθε μεταβολή στην τροφοδοσία επιφέρει, άλλοτε περισσότερο και άλλοτε λιγότερο, σημαντικές αλλαγές στις ροές των χημικών και των δυναμικότητων των διεργασιών κατά μήκος των αλυσίδων. Συνήθεις τροφοδοσίες λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας που συναντώνται στην βιβλιογραφία

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

και σε πραγματικές εφαρμογές είναι τα άχυρα σιταριού, ρυζιού και κριθαριού, η σημύδα, η λεύκα, ο μίσχανθος κ.ά.

Βασικά χαρακτηριστικά που διαφοροποιούνται μεταξύ λιγνοκυτταρινούχων ποικιλιών είναι οι περίοδοι διαθεσιμότητας (θερισμός), οι διαθέσιμες ποσότητες ανά περίοδο και ανά ποικιλία και το περιεχόμενό τους σε σάκχαρα (C5 και C6) και λιγνίνη. Τα τελευταία αποτελούν ζωτικής σημασίας χημικά ενδιάμεσα για την ανάπτυξη νέων χημείων και προϊόντων. Τέτοιες διαφοροποιήσεις στην τροφοδοσία βιομάζας αναμένεται να επηρεάσουν τις αποδόσεις των χημικών μονοπατιών, τις δυναμικότητες και το ενεργειακό περιεχόμενο των εμπλεκόμενων διεργασιών της Συνολική Μονάδας και τη συνεισφορά τους στη ολοκλήρωση, με αποτέλεσμα να οδηγούν σε διαφορετικές επιλογές διεργασιών, όταν μεταβάλλεται η τροφοδοσία στο χρόνο. Το πρόβλημα σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών, που συζητήθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο 5, καλείται να αντιμετωπίσει επιπλέον βαθμούς ελευθερίας που σχετίζονται με τις εποχικές μεταβολές στην ποιότητα και τη διαθεσιμότητα της τροφοδοσίας βιομάζας. Στο υπάρχον πρόβλημα σύνθεσης διεργασιών, που αντιμετωπίζεται με τη χρήση των BBR, ενσωματώνεται επιπλέον το πρόβλημα χρονο-προγραμματισμού διεργασιών, καθώς και επιπλέον επιλογές αποθήκευσης πρώτων υλών (ποικιλίες βιομάζας) και ενδιάμεσων χημικών της αλυσίδας προϊόντων για τη διασφάλιση των μέγιστων αποδόσεων της Συνολικής Μονάδας.

Το πρόβλημα σύνθεσης υποψήφιων χημικών μονοπατιών αντιμετωπίζεται με τη χρήση της αναπαράστασης BBR, η οποία χαρτογραφεί όλες τις επιλογές σύνθεσης και επιτρέπει την ανάπτυξη ισοζυγίων μάζας για την επιλογή διεργασιών και δυναμικοτήτων. Ωστόσο, οι δυνατότητες του αρχικού γράφου BBR του Κεφαλαίου 4 δεν επαρκούν για την καταγραφή των επιπλέον βαθμών ελευθερίας που σχετίζονται με την εποχικότητα του προβλήματος. Στο παρόν κεφάλαιο, ο γράφος $BBR = (M, T, P, w)$ διατηρεί τις ιδιότητες των δομικών στοιχείων του, και επεκτείνεται με την ένταξη επιπλέον ιδιοτήτων, οι οποίες επιτρέπουν στα στοιχεία του γράφου την εποχική διαχείριση χημικών της αλυσίδας προϊόντος. Οι αρχικές συμβάσεις για την ανάπτυξη του γράφου BBR είναι:

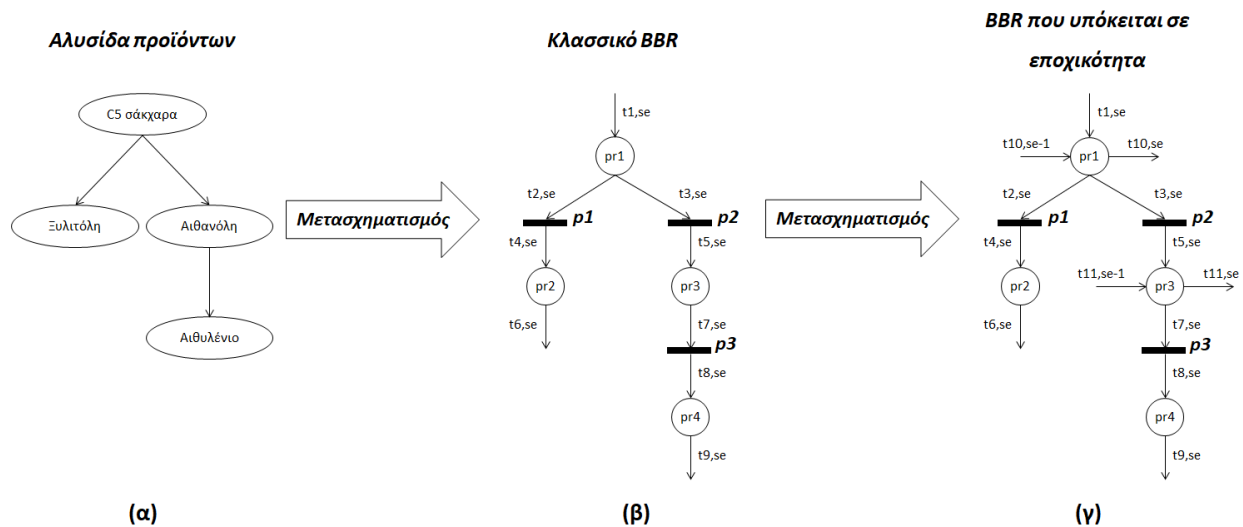
- M : κόμβοι που συλλέγουν αυστηρά ροές χημικών με ίδιες ιδιότητες
- T : σημεία μετάβασης (διεργασίες) που μεταβάλουν την ποιότητα μίας ροής της αλυσίδας
- P : διασυνδέσεις που ενώνουν τους κόμβους με σημεία μετάβασης
- w : βάρη που αποδίδονται σε μεταβλητές επιλογής

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

Στο παρόν κεφάλαιο ο γράφος επεκτείνεται εισάγοντας μία επιπλέον ιδιότητα για το δομικό στοιχείο των διασυνδέσεων:

- P^t : διασυνδέσεις που ενώνουν όμοιους κόμβους μεταξύ τους

Η νέα ιδιότητα χρησιμοποιείται για τη μεταφορά ροών χημικών στη μονάδα του χρόνου. Αυτό προϋποθέτει ότι οι κόμβοι ως συλλέκτες/διανομείς χημικών μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες αποθήκευσης, όπως φαίνεται στο σκαρίφημα του Σχήματος 6.1.



Σχήμα 6.1: Αναβαθμισμένο BBR για την αντιμετώπιση προβλημάτων εποχικότητας

Σύμφωνα με τις οδηγίες του Κεφαλαίου 4, τα προϊόντα της αλυσίδας του Σχήματος 6.1α αντιστοιχίζονται στους κόμβους $pr1$, $pr2$, $pr3$ και $pr4$, και τα χημικά μονοπάτια που εντοπίζονται στις διεργασίες $p1$, $p2$ και $p3$, καταλήγοντας στο κλασικό BBR του Σχήματος 6.1β. Το BBR συμπληρώνεται με τις διασυνδέσεις $t1-t9$, οι οποίες φέρουν τις ροές χημικών κατά μήκος της αλυσίδας. Οι δείκτες se υποδεικνύουν κάθε χρονική περίοδο λειτουργίας κατά την οποία οι ροές χημικών παραμένουν σταθερές. Στην περίπτωση της λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας, οι περίοδοι αντιστοιχούν στις εποχές συγκομιδής και συνήθως σχετίζονται με τις 4 εποχές του έτους. Ακολούθως ορίζεται το σύνολο: $se = \{se | se = 1, NSE\}$, όπου $NSE = 4$.

Όταν το πρόβλημα υφίσταται εποχικές διακυμάνσεις στην παροχή τροφοδοσίας, καθίσταται απαραίτητη η αποθήκευση πρώτων και ενδιάμεσων υλών με στόχο τη διατήρηση των αποδόσεων παραγωγής, την απόσβεση διακυμάνσεων των δυναμικοτήτων των διεργασιών και τη βέλτιστη χρήση

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

του κόστους επένδυσης, που σχετίζεται με τις διαστάσεις του εξοπλισμού και των διεργασιών που επιλέχθηκαν. Επιπλέον, η χρήση τεχνικών αποθήκευσης διαφορετικών ποικιλιών βιομάζας μπορεί να συνθέσει μίγματα τροφοδοσίας που θα ενισχύσουν την ετήσια απόδοση της Συνολικής Μονάδας σε όρους παραγωγής, κερδοφορίας και ενεργειακής ολοκλήρωσης. Για αυτούς τους σκοπούς, στην κλασική μορφή του BRR του Σχήματος 6.1β προστίθενται οι διασυνδέσεις t_2 και t_7 (με δείκτη $se-1$ και se) – γύρω από την πρώτη ύλη (pr_1) και τις ροές ενδιάμεσων χημικών (pr_3) – για την περιγραφή εισερχόμενων ροών χημικών από αποθηκευμένες ποσότητες προηγούμενων περιόδων, καταλήγοντας στην μορφή του BBR του Σχήματος 6.1γ. Η αποθήκευση τελικών προϊόντων του BBR (όπως τα pr_2 και pr_4) για τα οποία δεν υπάρχουν επιλογές αναβάθμισης, δεν λαμβάνεται υπόψη, καθώς δεν επηρεάζουν τη λειτουργία των διεργασιών. Κάτι τέτοιο θα είχε νόημα στην περίπτωση όπου οι τιμές πώλησης μεταβάλλονταν χρονικά, γεγονός που δεν αφορά την παρούσα ανάλυση.

Οι εποχικές μεταβολές της τροφοδοσίας επηρεάζουν τη δυναμικότητα όλων των διεργασιών αναβάθμισης και ως εκ τούτου το ενεργειακό περιεχόμενο των θερμών/ψυχρών ρευμάτων που συνεισφέρουν στη Συνολική Μονάδα. Η μεγαλύτερη δυναμικότητα που εντοπίζεται στο πέρασμα πολλών περιόδων (π.χ. ενός έτους, εάν η εποχική διαθεσιμότητα κάθε ποικιλίας επαναλαμβάνεται ετησίως χωρίς σημαντικές διαφοροποιήσεις) καθορίζει τη μέγιστη δυναμικότητα και τη διαστασιολόγηση των μονάδων της διεργασίας, και συσχετίζεται άμεσα με το κόστος επένδυσης. Ωστόσο, η λειτουργία των διεργασιών σε μεγάλες αποκλίσεις από τη μέγιστη δυναμικότητα δεν είναι επιθυμητή για πρακτικούς λόγους εφαρμογής και ασφάλειας (όρια λειτουργίας κατασκευαστή) και απόδοσης του κόστους επένδυσης.

Σε μία αλυσίδα υποψήφιων προϊόντων, οι επιλεγθείσες ροές κάθε χρονικής περιόδου συνθέτουν το χαρτοφυλάκιο (ποικιλίες βιομάζας, διεργασίες και προϊόντα, αποθήκευση προϊόντων) και το εποχικό πλάνο λειτουργίας της Συνολικής Μονάδας, η οποία αξιολογείται ενεργειακά με τη χρήση των μοντέλων μεταφόρτωσης ICT ή CIT. Κάθε εποχικό πλάνο λειτουργίας αντιμετωπίζεται ως στιγμιότυπο με σταθερές δυναμικότητες και ενεργειακές απαιτήσεις και τα μοντέλα μεταφόρτωσης αξιολογούν το αντίστοιχο ενεργειακό στιγμιότυπο ως μεμονωμένη περίπτωση ολοκλήρωσης ανεξάρτητα από τις λειτουργίες των άλλων εποχών. Η αποθήκευση ενέργειας δεν λαμβάνεται υπόψη. Τα ενεργειακά αποτελέσματα (κόστος θέρμανσης και ψύξης) όλων των εποχών που μελετώνται αθροίζονται και συμβάλουν στη συνολική ενεργειακή αποτίμηση της Συνολικής Μονάδας είτε αφορά το ίδιο είτε διαφορετικά (χρονικά μεταβαλλόμενα) χαρτοφυλάκια διεργασιών.

Όσον αφορά το πρόβλημα σύνθεσης, η αναπαράσταση BBR επεκτείνεται με επιπλέον επιλογές και κανόνες που ρυθμίζουν τις ροές των χημικών κατά μήκος των αλυσίδων προϊόντων και συναρτήσει του χρόνου. Όσον αφορά την ενεργειακή ολοκλήρωση, τα μοντέλα μεταφόρτωσης (ICT και CIT) εφαρμόζονται ως έχουν, με τη μόνη διαφορά ότι οι ενεργειακές ροές των μοντέλων ICT (Σχήμα 5.2) και CIT (Σχήμα 5.5) ισχύουν και για κάθε περίοδο λειτουργίας se.

6.2. Αναπαράσταση αναβαθμισμένου BBR σε προβλήματα εποχικότητας

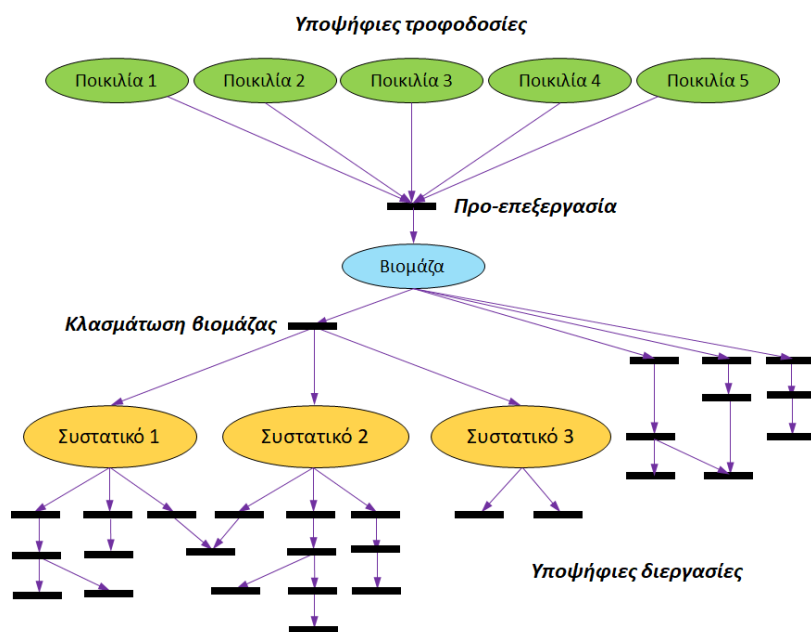
Το BBR χρησιμοποιείται για το μετασχηματισμό των αλυσίδων προϊόντων σε μορφή ανάλογη αυτής των υπερδομών για την καταγραφή ισοζυγίων μάζας και τη λήψη αποφάσεων. Η επίδραση της εποχικότητας στη λήψη αποφάσεων απαιτεί την ένταξη επιπλέον κανόνων κατά τη διαδικασία μετασχηματισμού των αλυσίδων μέσω μίας αναβαθμισμένης μορφής BBR. Το αναβαθμισμένο BBR (advanced-BBR, εφεξής aBBR) στοχεύει στην εποχική διαχείριση τόσο των τροφοδοσιών όσο και των κατάντη ρών χημικών των αλυσίδων.

Η γενική μορφή μίας αλυσίδας προϊόντων που χρησιμοποιεί διαφορετικές ποικιλίες βιομάζας παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2. Η αλυσίδα περιλαμβάνει τεχνολογίες προ-επεξεργασίας της βιομάζας, τεχνολογίες που αξιοποιούν απευθείας βιομάζα, και τεχνολογίες που στοχεύουν σε ειδικά συστατικά που προκύπτουν ύστερα από κλασμάτωση της βιομάζας. Τα χημικά μονοπάτια κατάντη της κλασμάτωσης βιομάζας επηρεάζονται από τη σύσταση κάθε ποικιλίας στα επιθυμητά κλάσματα. Αναλόγως επηρεάζονται και τα στάδια προ-επεξεργασίας της βιομάζας (π.χ. πολτοποίηση, θρυμματισμός, ξήρανση, συμπίεση, διαλυτοποίηση κ.ά.), όπου οι τεχνικές απαιτήσεις και η σύνθεση των σταδίων διαφοροποιούνται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά κάθε ποικιλίας και τις προδιαγραφές των τροφοδοσιών των κατάντη διεργασιών, όπως τα ποσοστά υγρασίας στην τροφοδοσία.

Πέραν των σταδίων κλασμάτωσης και αναβάθμισης της βιομάζας, το aBBR στοχεύει και σε ενεργοβόρα στάδια προ-επεξεργασίας της βιομάζας, καθότι αναμένεται να υποστηρίξει την ενεργειακή ολοκλήρωση της Συνολικής Μονάδας. Η μεθοδολογία εντοπίζει ιδιαίτερες προκλήσεις στην περίπτωση της ξήρανσης βιομάζας, η οποία μπορεί να φτάσει έως και το 25% των συνολικών αναγκών θέρμανσης, έναντι των υπολοίπων σταδίων προ-επεξεργασίας, το ενεργειακό κόστος των οποίων δεν αναμένεται να επηρεάσει την λήψη αποφάσεων. Επιπλέον, είναι συχνό φαινόμενο εναλλακτικές ποικιλίες της ίδια βιομάζας να παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις όσον αφορά τα επίπεδα υγρασίας μεταβάλλοντας χρονικά τις απαιτήσεις ξήρανσης. Για την παρουσίαση και την επεξήγηση των

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

προκλήσεων σύνθεσης των σταδίων προ-επεξεργασίας χρησιμοποιείται το παράδειγμα των λιγνοκυτταρινούχων βιοδιυλιστηρίων, καθότι αφορούν κατεξοχήν προβλήματα που υπόκεινται σε σημαντικές εποχικές διακυμάνσεις με έντονη παρουσία στη βιβλιογραφία και προσφέρουν μεγάλο εύρος επιλογών αναβάθμισης και βιοπροϊόντων. Ωστόσο, το aBBR παραμένει ένας γενικευμένος και προσαρμόσιμος γράφος κατάλληλος να αντιμετωπίσει προβλήματα σύνθεσης που υπόκεινται σε χρονικές μεταβολές, καθώς και να διαχειριστεί άλλους τύπους τροφοδοσιών/βιομάζας.



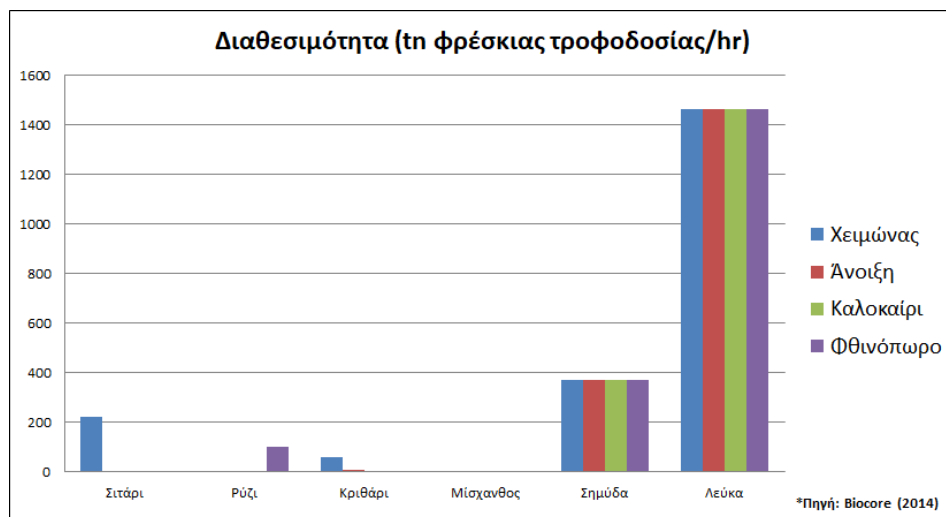
Σχήμα 6.2: BBR πολλαπλών-τροφοδοσιών: προ-επεξεργασία και αναβάθμιση ποικιλιών βιομάζας

Η λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα διαχωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες: (α) **την ξυλώδη**, όπως άχυρα σιταριού και κριθαριού, μίσχανθος, κ.ά. και (β) **τροφοδοσίες δασοκομίας**, όπως λεύκα, σημόδα, ιτιά κ.ά. Ένας από τους κυριότερους λόγους αυτού του διαχωρισμού αφορά τα ποσοστά υγρασίας που εμφανίζει κάθε κατηγορία. Η ξυλώδης βιομάζα γενικά παρουσιάζει ποσοστά υγρασίας 12-15% w/w, ενώ οι τροφοδοσίες δασοκομίας έως και 50% w/w (BIOCORE, 2014). Βασική απαίτηση πολλών τεχνολογιών αναβάθμισης, όπως η κλασμάτωση, η πυρόλυση ή η αεριοποίηση, είναι το ποσοστό υγρασίας στην τροφοδοσία τους να μην υπερβαίνει το 15-20%.

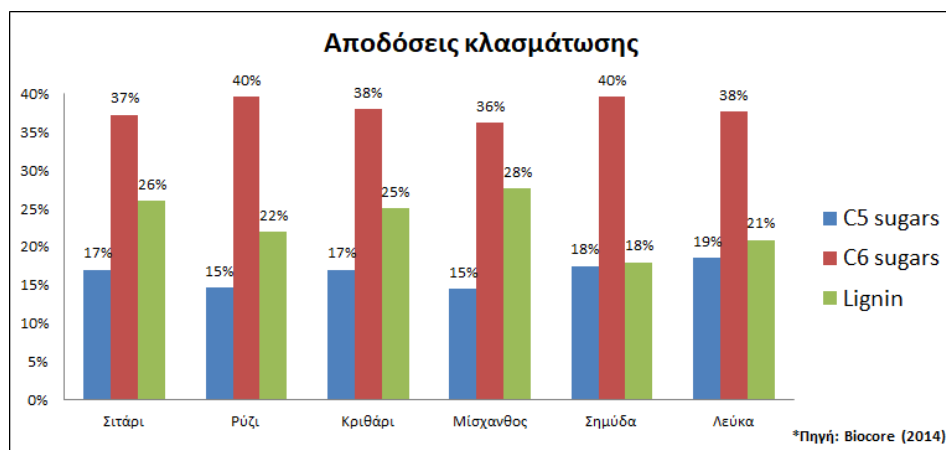
Για τους παραπάνω λόγους, καθίσταται απαραίτητη η ξήρανση τροφοδοσιών δασοκομίας, οι οποίες, μάλιστα, παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη διαθεσιμότητα κατά τη διάρκεια όλου του έτους χωρίς σημαντικές εποχικές μεταβολές, όπως φαίνεται στο γράφημα του Σχήματος 6.3 (BIOCORE, 2014).

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

Αντίθετα, οι ξυλώδεις τροφοδοσίες παρουσιάζουν σημαντικές εποχικές μεταβολές (λόγω των διαφορετικών εποχών θερισμού), γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη χρήση *αποθηκευτικών χώρων* για την κάλυψη αναγκών σε περιόδους έλλειψης. *Όσον αφορά την αποθήκευση δασοκομικών τροφοδοσιών επισημαίνεται ότι η αποθήκευση σε χώρους κατάλληλα προστατευμένους από τις καιρικές συνθήκες μπορεί να συνδράμει, επιπλέον, στην μείωση της υγρασίας (χωρίς ενεργειακό κόστος ξήρανσης) κατά 5% ανά εποχή και μέχρι το ελάχιστο όριο του 30% w/w.*



Σχήμα 6.3: Ετήσια (2017) συνολική διαθεσιμότητα λιγνοκυτταρινούχων ποικιλιών τεσσάρων βασικών χωρών-παραγωγών βιομάζας: Γαλλία, Γερμανία, Ουγγαρία, Ινδία (BIOCORE, 2014)



Σχήμα 6.4: Αποδόσεις κλασμάτων ποικιλιών λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας (BIOCORE, 2014)

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

Παράλληλα, κάθε λιγνοκυτταρινούχα ποικιλία παρουσιάζει διαφοροποιήσεις στα περιεχόμενα συστατικά (Σχήμα 6.4), γεγονός που επηρεάζει σημαντικά τις ροές κατά μήκος των αλυσίδων και την παραγωγικότητα των τελικών προϊόντων. Οι διαφοροποιήσεις στην εποχική διαθεσιμότητα κάθε ποικιλίας σε συνδυασμό με τις διαφοροποιήσεις των αποδόσεων κλασμάτων (σάκχαρα και λιγνίνη), καθιστούν απαραίτητη τη χρήση σταθμών **αποθήκευσης για κάθε χημικό ενδιάμεσο του aBBR**, ώστε (α) να ελαχιστοποιηθούν οι διακυμάνσεις στις τροφοδοσίες των διεργασιών και (β) να σταθεροποιηθούν οι ροές χημικών σε επίπεδα που μεγιστοποιούν τις αποδόσεις της Συνολικής Μονάδας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι σκόπιμο το αναβαθμισμένο aBBR να διαχωριστεί σε δύο επίπεδα: (1) το άνω-επίπεδο που αφορά στάδια προ-επεξεργασίας, τα οποία περιλαμβάνουν κοινές πρακτικές και συνήθεις επιλογές σύνθεσης στην πλειοψηφία των τροφοδοσιών βιομάζας και (2) το κάτω-επίπεδο, το οποίο αφορά υπο-διερεύνηση διεργασίες και προϊόντα βιοδιυλιστηρίου και καθορίζεται από τις επιλογές σύνθεσης κάθε προβλήματος. Ακολούθως, η γενική αναπαράσταση του Σχήματος 6.2 αναλύεται περαιτέρω στην μορφή του Σχήματος 6.5.

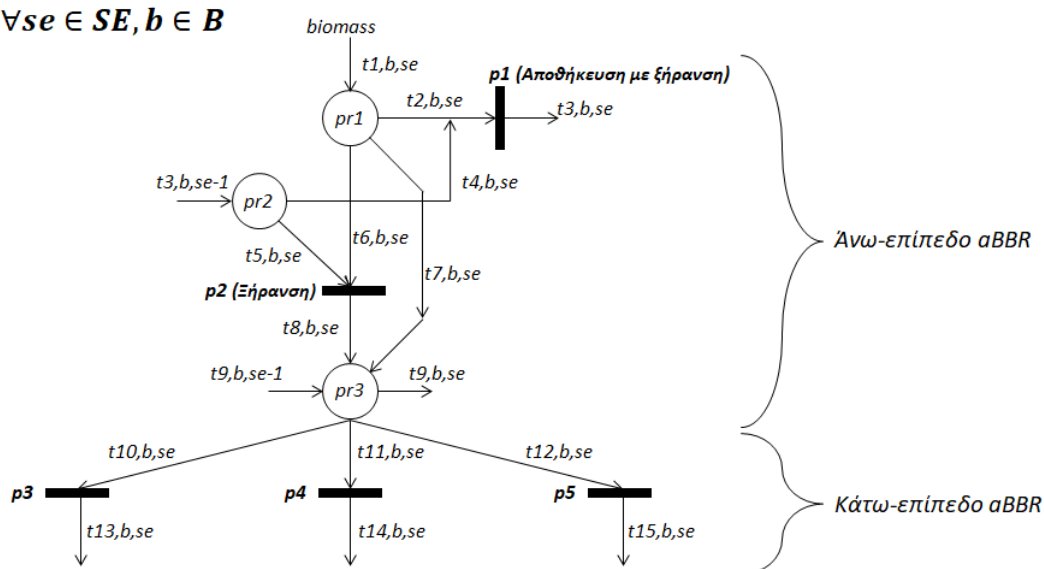
Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζονται οι ειδικές συνθήκες προ-επεξεργασίας κάθε ποικιλίας βιομάζας, b , σε κάθε χρονική στιγμή se . Κάθε κόμβος αναλαμβάνει, αυστηρά, την αποθήκευση ενός χημικού με σταθερές ιδιότητες (όπως η περιεχόμενη υγρασία), ενώ κάθε σημείο μετάβασης (διεργασία) μετατρέπει ένα χημικό σε ένα άλλο ή τουλάχιστον κάποια ιδιότητα του χημικού (όπως η υγρασία). Όλοι οι κόμβοι του aBBR λειτουργούν ως πιθανοί χώροι αποθήκευσης, εκτός από αυτούς των τελικών προϊόντων, εφόσον δεν υπολογίζονται χρονικές μεταβολές στις τιμές τους. Στην περίπτωση όπου η αποθήκευση αξιοποιείται και ως μέσο ξήρανσης (χωρίς ενεργειακό κόστος), τότε εντάσσονται και αποθήκες-διεργασίες, εφόσον το προϊόν εξόδου τους διαφέρει ποιοτικά από αυτό της εισόδου όσον αφορά τα επίπεδα υγρασίας.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.5, κάθε ποικιλία εισέρχεται στο βιοδιυλιστήριο μέσω του κόμβου $pr1$ από όπου διοχετεύεται προς (1) αποθήκευση-ξήρανση χωρίς κόστος στην $p1$, (2) ξήρανση στην $p2$, ή (3) αποθήκευση στον κόμβο $pr3$. Έτσι, το σκαρίφημα προσφέρει επιλογές τόσο για άμεση ενσωμάτωση τροφοδοσιών στις κατάντη διεργασίες μέσω του $pr3$, εφόσον δεν απαιτείται ξήρανση βιομάζας όπως στις ξυλώδεις, όσο και εναλλακτικές επιλογές ξήρανσης για περιπτώσεις που παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά υγρασίας, όπως οι τροφοδοσίες δασοκομίας (50% w/w). Αποθηκευμένες τροφοδοσίες (π.χ. δασοκομίας) στην διεργασία $p1$ μεταφέρονται μέσω της διασύνδεσης $t3$ (και του κόμβου $pr2$) σε επόμενες χρονικές περιόδους, και διοχετεύονται ξανά προς αποθήκευση-ξήρανση στην $p1$ ή απευθείας

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

για ξήρανση στην $p2$. Όταν οι απαιτήσεις υγρασίας δεν καλύπτονται από την αποθήκευση-ξήρανση στην $p1$ (μέχρι το όριο του 30% w/w), τότε η τροφοδοσία κατευθύνεται σε μονάδες ξήρανσης ($p2$) για την κάλυψη των στόχων υγρασίας (έως 15% w/w) στην τροφοδοσία του βιοδιυλιστηρίου. Η παραπάνω διαδικασία εξοικονομεί σημαντικές ενεργειακές απαιτήσεις, εφαρμόζοντας τα πρώτα στάδια ξήρανσης (50% \rightarrow 30%) χωρίς κόστος, ενώ μόνο τα τελευταία (30% \rightarrow 15%) χρεώνονται στη Συνολική Μονάδα. Όλες οι τροφοδοσίες (αποξηραμένες και μη) κατευθύνονται στον κεντρικό κόμβο $pr3$, όπου αποθηκεύεται η συνολική βιομάζα του βιοδιυλιστηρίου. Ακολούθως, ξεκινάει το κάτω μέρος του aBBR, το οποίο περιλαμβάνει τις υποψήφιες διεργασίες αναβάθμισης της βιομάζας. Το σκαρίφημα του Σχήματος 6.5 παρουσιάζει τις βασικές επιλογές και τους κανόνες σύνθεσης του άνω-επιπέδου του aBBR, ενώ το κάτω-επίπεδο διαμορφώνεται βάσει των κανόνων μετασχηματισμού αλυσίδων προϊόντων του Σχήματος 6.1 και σύμφωνα με τις υπο-διερεύνηση διεργασίες κάθε προβλήματος.

$\forall se \in SE, b \in B$



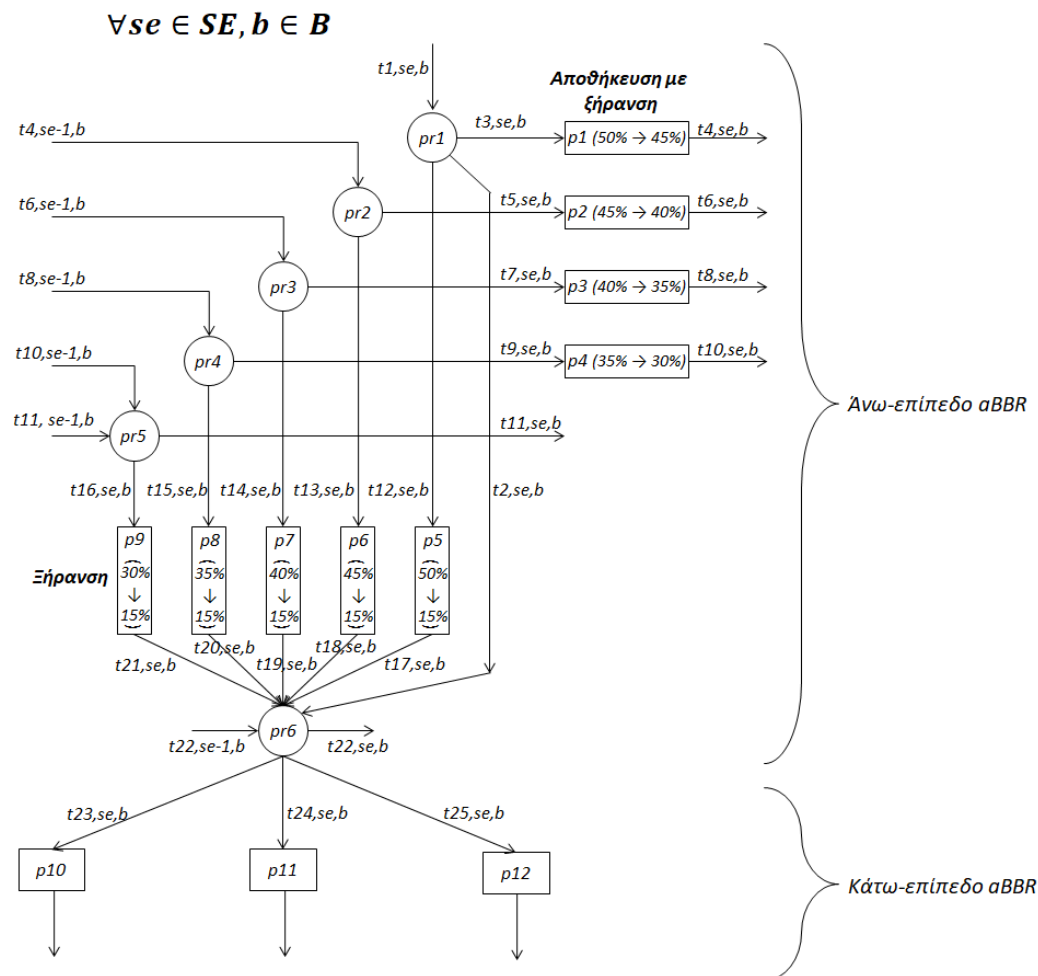
Σχήμα 6.5: Στάδια ξήρανσης-αποθήκευσης (άνω-BBR) και αναβάθμισης βιομάζας (κάτω-BBR)

Δεδομένου ότι η αποθήκευση-ξήρανση επιτυγχάνει μείωση της υγρασίας κατά 5% ανά εποχή (se), το σύστημα $p1$ - $pr1$ - $p2$ του Σχήματος 6.5 αναλύεται σε πολλαπλά στάδια αποθήκευσης-ξήρανσης καταλήγοντας στη τελική μορφή του Σχήματος 6.6 για το άνω-επίπεδο του aBBR.

Το Σχήμα 6.6 αφορά τις ροές βιομάζας για κάθε εποχή, se , και κάθε ποικιλία, b . Οι ξυλώδεις τροφοδοσίες που εισέρχονται στο aBBR μέσω της $t1$ μεταφέρονται απευθείας στον κόμβο ($pr6$) αποθήκευσης της συνολικής τροφοδοσίας μέσω της διασύνδεσης $t2$. Αντίθετα, οι τροφοδοσίες

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

δασοκομίας που εισέρχονται μέσω της $t1$ θα μεταφέρονται είτε στο πρώτο στάδιο αποθήκευσης-ξήρανσης ($p1$) μειώνοντας το επίπεδο υγρασίας από 50% σε 45% (χωρίς ενεργειακό κόστος) είτε στην διεργασία ξήρανσης $p5$, η οποία αντιπροσωπεύει ξήρανση από το 50% στο 15% σε ένα στάδιο (με κόστος ενέργειας) καθιστώντας την κατάλληλη για το βιοδιυλιστήριο. Το προϊόν εξόδου της $p1$, μεταφέρεται στην επόμενη εποχή μέσω της διασύνδεσης $t4$, από όπου διατίθεται είτε για αποθήκευση-ξήρανση (45→40%) στην $p2$, είτε για απομάκρυνση της υπόλοιπης υγρασίας (45→15%) στον ξηραντήρα $p6$. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται στην πάροδο των εποχών μέχρις ότου οι τροφοδοσίες δασοκομίας ξηραθούν πλήρως στον τελευταίο ξηραντήρα $p9$ (30%→15%) και αποθηκευθούν μαζί με κάθε άλλη ποικιλία βιομάζας στον κόμβο $pr6$. Κατάντη του κόμβου $pr6$ διακλαδίζονται οι ανταγωνιστικές διεργασίες αναβάθμισης της βιομάζας.



Σχήμα 6.6: Γενικευμένη αναπαράσταση aBBR: συνδυαστικά στάδια ξήρανσης-αποθήκευσης και αναβάθμισης βιομάζας

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

Το άνω-aBBR του Σχήματος 6.6 χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση των ισοζυγίων μάζας και εφαρμόζεται, ως έχει, ανεξαρτήτως του προβλήματος αλυσίδας προϊόντων που εξετάζεται. Αντιθέτως, η μορφή και τα ισοζύγια μάζας του κάτω-BBR καθορίζονται από τη μορφή της αλυσίδας που μελετάται σε κάθε περίπτωση και ακολουθούνται οι κανόνες διακλάδωσης και αποθήκευσης προϊόντων του Σχήματος 6.1. Τα ισοζύγια μάζας γύρω από κάθε κόμβο διαμορφώνονται με γενικό τρόπο, ως εξής:

$$\sum_{t \in T_{pr}^s} F_{t,se-1} + \sum_{t \in T_{pr}^{in}} F_{t,se} = \sum_{t \in T_{pr}^{out}} F_{t,se} \quad \forall pr \in PR, se \in SE \quad Eq. 6.1$$

με κάθε όρο να περιγράφει εισροές/εκροές της προηγούμενης και της παρούσας περιόδου λειτουργίας. Τα ισοζύγια γύρω από κάθε διεργασία έχουν, επίσης, τη γενική μορφή:

$$F_{t,se} \cdot Y_p = F_{t',se} \quad \forall p \in P, t \in T_p^{in}, t' \in T_p^{out}, se \in SE \quad Eq. 6.2$$

περιγράφοντας την απόδοση παραγωγής κάθε προϊόντος συναρτήσει της δυναμικότητας κάθε διεργασίας, όπου $Y_p \left[\frac{kg_{εξόδου}}{kg_{εισόδου}} \right]$ αποτελεί το βαθμό μετατροπής του χημικού εισόδου στο χημικό εξόδου.

Επίσης, ισχύει ότι αποθηκευμένες ροές της τελευταίας περιόδου (π.χ. εποχή) ενός κύκλου λειτουργίας (π.χ. έτος) μεταφέρονται στην πρώτη περίοδο του επόμενου κύκλου, ως εξής:

$$\sum_{t \in T_{pr}^s} F_{t,se2-1} = \sum_{t \in T_{pr}^s} F_{t,se5} \quad \forall pr \in PR \quad Eq. 6.3$$

όπου $se2$ η πρώτη περίοδος του κύκλου (π.χ. χειμώνας) και $se5$ η τελευταία (π.χ. φθινόπωρο), με την $se1$ να ταυτίζεται με την $se5$ επιτρέποντας, σε όρους μαθηματικού προγραμματισμού, τη μεταφορά βιομάζας μεταξύ διαφορετικών κύκλων στην Eq.6.3.

Οι εξισώσεις Eq.6.1-6.3 συμβάλουν στην επιλογή διεργασιών και των δυναμικότητων τους, καθώς και στον σχεδιασμό του εποχικού πλάνου λειτουργίας της Συνολικής Μονάδας και διαχείρισης των τροφοδοσιών της.

Τα ενεργειακά περιεχόμενα των ρευμάτων ανά μονάδα παραγωγικότητας $\left(Q_p^{H/C} \right)$ κάθε διεργασίας του aBBR είναι γνωστά από προσομοιώσεις ή/και πραγματικά δεδομένα (πειραμάτων, πιλότων ή/και τη βιομηχανία). Ακολούθως, υπολογίζεται το πραγματικό ενεργειακό περιεχόμενο των ρευμάτων που

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

συνεισφέρουν στη Συνολική Μονάδα σε κάθε περίοδο ($Q_{p,se}^{H/C}$) υποθέτοντας γραμμική συσχέτιση με τη επιλεχθείσα δυναμικότητα της διεργασίας, ως εξής:

$$Q_{p,se}^{H/C} = \overline{Q_p^{H/C}} \cdot \sum_{t \in T_p^{out}} A_t \cdot F_{t,se} \quad \forall p \in P, se \in SE \quad Eq. 6.4$$

Στην περίπτωση όπου κάποια διεργασία παρουσιάζει περισσότερα από ένα προϊόντα (π.χ. η διεργασία κλασμάτωσης της βιομάζας), των οποίων η παραγωγή μεταβάλλεται χρονικά, τότε το ενεργειακό περιεχόμενο των ρευμάτων είναι πιθανό να επηρεάζεται και σε σχέση με τις αποδόσεις κάθε προϊόντος. Τα ενεργειακά περιεχόμενα των ρευμάτων ανά μονάδα παραγωγικότητας κάθε προϊόντος ορίζονται (βάσει προσομοιώσεων ή/και πραγματικών δεδομένων) ως εξής: $\overline{Q_{pr,p}^{H/C}}$, και η πραγματική ενεργειακή συνεισφορά των ρευμάτων υπολογίζεται συναρτήσει της ροής κάθε προϊόντος στην έξοδο της διεργασίας, ως εξής:

$$Q_p^{H/C} = \sum_{pr \in PR_p} \left(\overline{Q_{pr,p}^{H/C}} \cdot \sum_{t \in T_{pr}^{out}} A_t \cdot F_{t,se} \right) \quad \forall p \in P, se \in SE \quad Eq. 6.5$$

όπου $PR_p \subset PR$ περιλαμβάνει τα προϊόντα της διεργασίας p .

Οι εξισώσεις Eq.6.4 και Eq.6.5 συμβάλουν στην επικοινωνία του aBBR με τα μοντέλα μεταφόρτωσης (ICT και CIT) υπολογίζοντας τα ενεργειακά περιεχόμενα των θερμών/ψυχρών ρευμάτων που συνεισφέρουν στα θερμοκρασιακά ενδιάμεσα των μοντέλων σύμφωνα με τις επιλογές του aBBR. Η ολοκλήρωση εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας τα ίδια μοντέλα ενεργειακής βελτιστοποίησης – Eq.5.1-5.13 για το ICT και Eq.5.14-5.27 για το CIT – με τη μόνη διαφορά ότι όλες οι ενεργειακές ροές που εφαρμόζονται γύρω από τους ενεργειακούς κόμβους των ενδιαμέσων (βλ. Σχήμα 5.2 και Σχήμα 5.5) ορίζονται και για κάθε χρονική περίοδο se .

6.3. Μαθηματική μοντελοποίηση

6.3.1. Ισοζύγια μάζας: Σύνθεση χαρτοφυλακίων βιοδιυλιστηρίων

Τα ισοζύγια μάζας αναπτύσσονται γύρω από κάθε κόμβο και διεργασία του aBBR. Το άνω-aBBR αντιπροσωπεύει τις επιλογές προ-επεξεργασίας της βιομάζας και οι βαθμοί ελευθερίας που περιλαμβάνει αφορούν επιλογές ποικιλιών βιομάζας και τις ροές αποθήκευσης και ξήρανσής τους. Το

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

κάτω-aBBR περιλαμβάνει όλες τις υποψήφιες διεργασίες, οι οποίες ολοκληρώνονται ενεργειακά μεταξύ τους και με τις διεργασίες του άνω-aBBR. Στην περίπτωση που το κάτω-aBBR περιλαμβάνει και επιλογές κλασμάτωσης της βιομάζας, τα ισοζύγια μάζας γύρω από την διεργασία διατυπώνονται με διαφορετικό τρόπο από τις υπόλοιπες υποψήφιες διεργασίες του κάτω-aBBR. Για την ανάπτυξη των ισοζυγίων εισάγονται τα παρακάτω υποσύνολα διασυνδέσεων και προϊόντων, σύμφωνα με το επίπεδο (άνω/κάτω) του aBBR όπου ανήκουν:

- $T_{upper}, T_{lower} \subset T$: μη-επικαλυπτόμενα υποσύνολα του συνόλου διασυνδέσεων, τα οποία χρησιμοποιούνται στο άνω- και κάτω-aBBR, αντίστοιχα, έτσι ώστε: $T_{upper} = \{tu \text{ ή } tu', tu \in T\}$, $T_{lower} = \{tl \text{ ή } tl', tl \in T\}$.
- $T_{pr}^S \subset T$: διασυνδέσεις που αποθηκεύουν και διαθέτουν το χημικό pr στην επόμενη περίοδο.
- $T_{pr}^S \cup T_{upper} \cup T_{lower} = T$.
- $PR_{upper}, PR_{lower} \subset PR$: μη-επικαλυπτόμενα υποσύνολα του συνόλου προϊόντων – εξαιρουμένων των προϊόντων κλασμάτωσης – τα οποία χρησιμοποιούνται στο άνω- και κάτω-aBBR, αντίστοιχα.
- $I \subset PR$: υποσύνολο του συνόλου προϊόντων που περιλαμβάνει τα προϊόντα κλασμάτωσης της βιομάζας.
- $PR_{upper} \cup PR_{lower} \cup I = PR$.

Ακολούθως, εισάγονται οι ρυθμοί ροής: $f_{tu,b,se}$, $f_{tl,se}$, $f_{b,se}^w$ and $f_{pr,se}^{PR}$, και οι βαθμοί μετατροπής μάζας κάθε υποψήφιας διεργασίας, p , και της διεργασίας κλασμάτωσης ως R_p και $R_{pr,b}^{fra}$, αντίστοιχα. Τα $f_{tu,b,se}$ και $f_{tl,se}$ περιγράφουν τις ροές χημικών κατά μήκος του άνω- και κάτω-aBBR, αντίστοιχα, ενώ τα $f_{b,se}^w$ and $f_{pr,se}^{PR}$ χρησιμοποιούνται για τη χαλάρωση των ισοζυγίων επιτρέποντας την απόρριψη περίσσειας παροχής βιομάζας και την εξαγωγή προϊόντων από το aBBR, τα οποία προορίζονται για πώληση. Το Σχήμα 6.7 παρουσιάζει τη γενικευμένη μορφή ενός aBBR και περιλαμβάνει όλες τις πιθανές επιλογές σύνθεσης σταδίων προ-επεξεργασίας και τεχνολογιών αναβάθμισης της βιομάζας και θα χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη των αναλυτικών ισοζυγίων μάζας στο άνω- και κάτω-μέρος του aBBR:

1. Άνω-BBR

1.1 Κόμβοι (pr1-pr6): $PR_{upper} = [pr1, \dots, pr6]$

$$\sum_{tu \in T_{pr}^s} f_{tu,b,se-1} + \sum_{tu \in T_{pr}^{in}} f_{tu,b,se} = \sum_{tu \in T_{pr}^{out}} f_{tu,b,se} + [f_{b,se}^w]_{pr=pr1} \quad \forall pr \in PR_{upper}, b \in B, se \in SE \quad Eq. 6.6$$

1.2 Διεργασίες (p1-p9): $P_{upper} = [p1, \dots, p9]$

$$f_{tu,b,se} \cdot R_p = f_{tu',b,se} \quad \forall p \in P_{upper}, b \in B, tu \in T_p^{in}, tu' \in T_p^{out}, se \in SE \quad Eq. 6.7$$

2. Κάτω-BBR

2.A. Υποψήφια διεργασία κλασμάτωσης

2.A.1 Κόμβοι (pr7-pr9): $I = [pr7, \dots, pr9]$

$$\sum_{tl \in T_{pr}^s} f_{tl,se-1} + \sum_{\substack{tu \in T_{pr}^{in} \\ b \in B}} f_{tu,b,se} = \sum_{tl \in T_{pr}^{out}} f_{tl,se} \quad \forall pr \in I, se \in SE \quad Eq. 6.8$$

2.A.2 Κλασμάτωση (p10):

$$f_{tu,b,se} \cdot R_{pr,b}^{fra} = f_{tl,se} \quad \forall p = p10, b \in B, pr \in I, tu \in T_p^{in}, tl \in T_{pr}^{in}, se \in SE \quad Eq. 6.9$$

2.B. Λοιπές υποψήφιες τεχνολογίες αναβάθμισης της βιομάζας

2.B.1 Κόμβοι (pr≥pr10): $PR_{lower} = [pr10, \dots, PRN]$

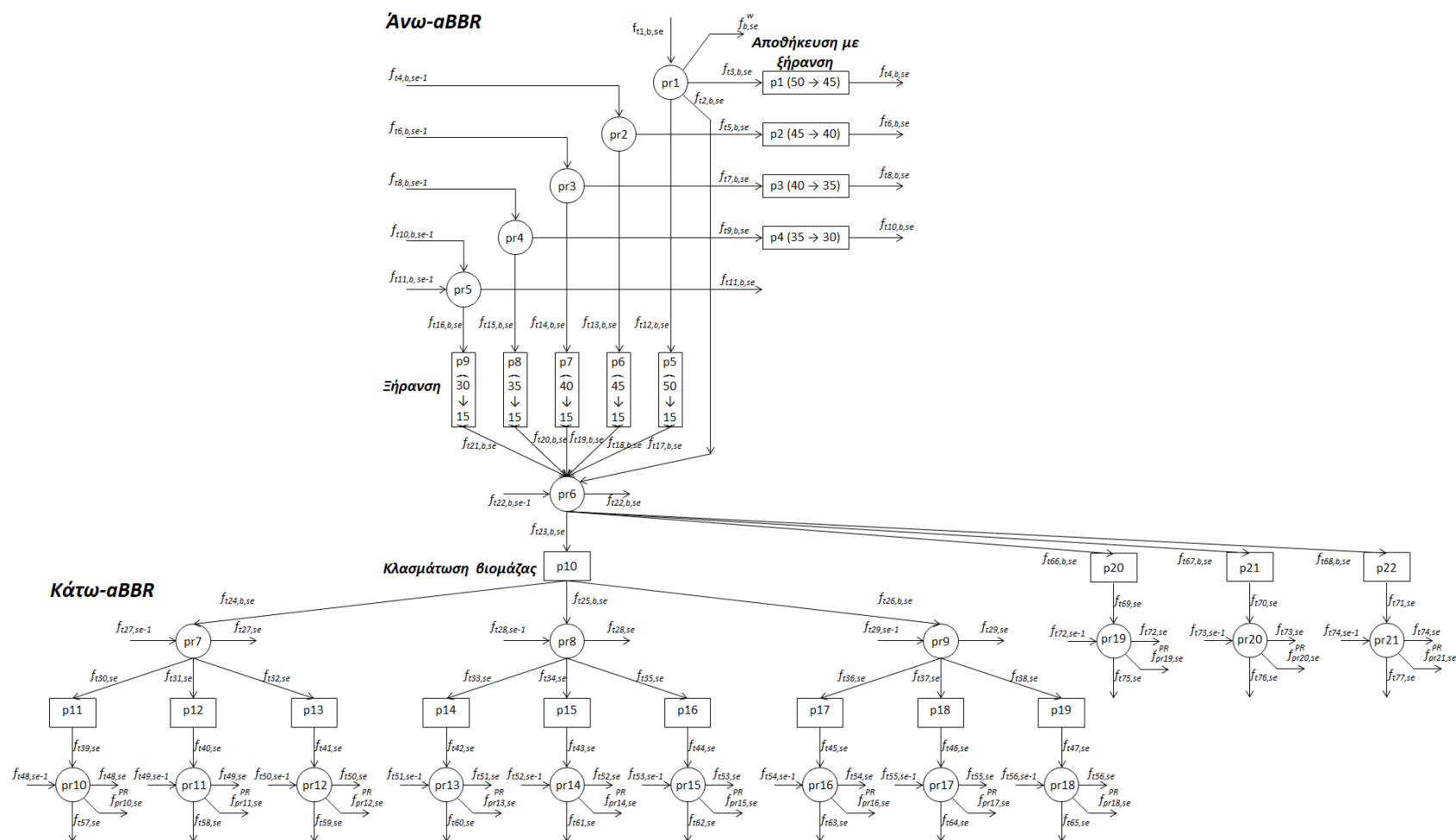
$$\sum_{tl \in T_{pr}^s} f_{tl,se-1} + \sum_{tl \in T_{pr}^{in}} f_{tl,se} = \sum_{tl \in T_{pr}^{out}} f_{tl,se} + f_{pr,se}^{PR} \quad \forall pr \in PR_{lower}, se \in SE \quad Eq. 6.10$$

2.B.2 Διεργασίες (p≥p11): $P_{lower} = [p11, \dots, PN]$

$$f_{tl,se} \cdot R_p = f_{tl',se} \quad \forall p \in P_{lower}, tl \in T_p^{in}, tl' \in T_p^{out}, se \in SE \quad Eq. 6.11$$

Η εξίσωση Eq.6.6 χαλαρώνεται με τη χρήση του όρου $f_{b,se}^w$ για την απόρριψη περίσσειας τροφοδοσίας βιομάζας (στο άνω-aBBR), που δεν χρειάζεται το βιοδιυλιστήριο. Ομοίως, η εξίσωση Eq.6.10 χαλαρώνεται με τον όρο $f_{pr,se}^{PR}$ επιτρέποντας την εξαγωγή χημικών-προϊόντων (του κάτω-aBBR) που προορίζονται για πώληση σε κάθε περίοδο. Η χρήση του όρου $f_{pr,se}^{PR}$ ενδείκνυται μόνο σε περιπτώσεις, όπου το πρόβλημα βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί όρους κέρδους στην αντικειμενική συνάρτηση.

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές



Σχήμα 6.7: Γενικευμένη αναπαράσταση αBBR: άνω-αBBR προ-επεξεργασίας βιομάζας και κάτω-αBBR χημικών μονοπατιών αναβάθμισης βιομάζας

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

Σε αντίθεση με το BBR του Κεφαλαίου 4, όπου οι επιλεχθείσες δυναμικότητες των διεργασιών παραμένουν σταθερές, στο πρόβλημα εποχικότητας οι δυναμικότητες κάθε διεργασίας μεταβάλλονται σύμφωνα με τη διαθέσιμη βιομάζα κάθε χρονικής περιόδου/εποχής. Η μεγαλύτερη δυναμικότητα που επιλέγεται στις διάφορες περιόδους που μελετώνται (π.χ. 4 εποχές του έτους) καθορίζει τη μέγιστη δυναμικότητα και το μέγεθος των εγκαταστάσεων (Installation Capacity) κάθε διεργασίας, IC_p . Λογικοί περιορισμοί θέτουν όρια στις μέγιστες δυναμικότητες των διεργασιών με τη χρήση δυαδικών μεταβλητών, y_p , που σχετίζονται με την επιλογή κάθε διεργασίας p , ως εξής:

$$IC_p \leq y_p \cdot UB_p^f \quad \forall p \in P \quad Eq. 6.12$$

$$IC_p \geq y_p \cdot LB_p^f \quad \forall p \geq p10 \quad Eq. 6.13$$

Οι παράμετροι UB_p^f and LB_p^f αποτελούν τα άνω και κάτω όρια της μέγιστης δυναμικότητας κάθε διεργασίας, τα οποία υπολογίζονται ή/και επιλέγονται εκ των προτέρων. Το UB_p^f μπορεί να αντιπροσωπεύει τις μέγιστες εφικτές δυναμικότητες για χρήση των μέγιστων ποσοτήτων βιομάζας και ενδιάμεσων χημικών, δεδομένης της διαθεσιμότητας κάθε ποικιλίας σε κάθε περίοδο και των αποδόσεων R_p και $R_{pr,b}^{fra}$ των διεργασιών. Το LB_p^f μπορεί να οριστεί ως ποσοστό των μέγιστων δυναμικοτήτων UB_p^f για την αποφυγή επιλογής πολύ μικρών και μη-πρακτικών δυναμικοτήτων από το μοντέλο. Εναλλακτικά, οι τιμές των UB_p^f and LB_p^f τίθενται στη ευχέρεια του χρήστη.

Ακολούθως, ορίζονται όρια στις διακυμάνσεις της δυναμικότητας κάθε διεργασίας από τη μέγιστη επιλεχθείσα (IC_p) στις διάφορες περιόδους λειτουργίας, ως εξής:

$$(1 - D_p) \cdot IC_p \leq \sum_{b \in B} f_{tu,b,se} \quad \forall p = p10, tu \in T_p^{in}, se \in SE \quad Eq. 6.14$$

$$IC_p \geq \sum_{b \in B} f_{tu,b,se} \quad \forall p \in P, tu \in T_p^{in}, se \in SE \quad Eq. 6.15$$

$$(1 - D_p) \cdot IC_p \leq f_{tl,se} \quad \forall p \in P, tl \in T_p^{in}, se \in SE \quad Eq. 6.16$$

$$IC_p \geq f_{tl,se} \quad \forall p \in P, tl \in T_p^{in}, se \in SE \quad Eq. 6.17$$

όπου η παράμετρος D_p κυμαίνεται μεταξύ [0-1] και εκφράζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη απόκλιση.

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

Τέλος, η εξίσωση Eq.6.3, η οποία εκφράζει τη μεταφορά αποθηκευμένων τροφοδοσιών μεταξύ διαδοχικών κύκλων (ετών) λειτουργίας, παίρνει την ακόλουθη τελική μορφή:

Άνω-BBR

$$\sum_{tu \in T_{pr}^s} f_{tu,b,se1-1} = \sum_{tu \in T_{pr}^s} f_{tu,b,se4} \quad \forall pr \in (PR_{upper} \cup I), \quad b \in B \quad Eq. 6.18$$

Κάτω-BBR

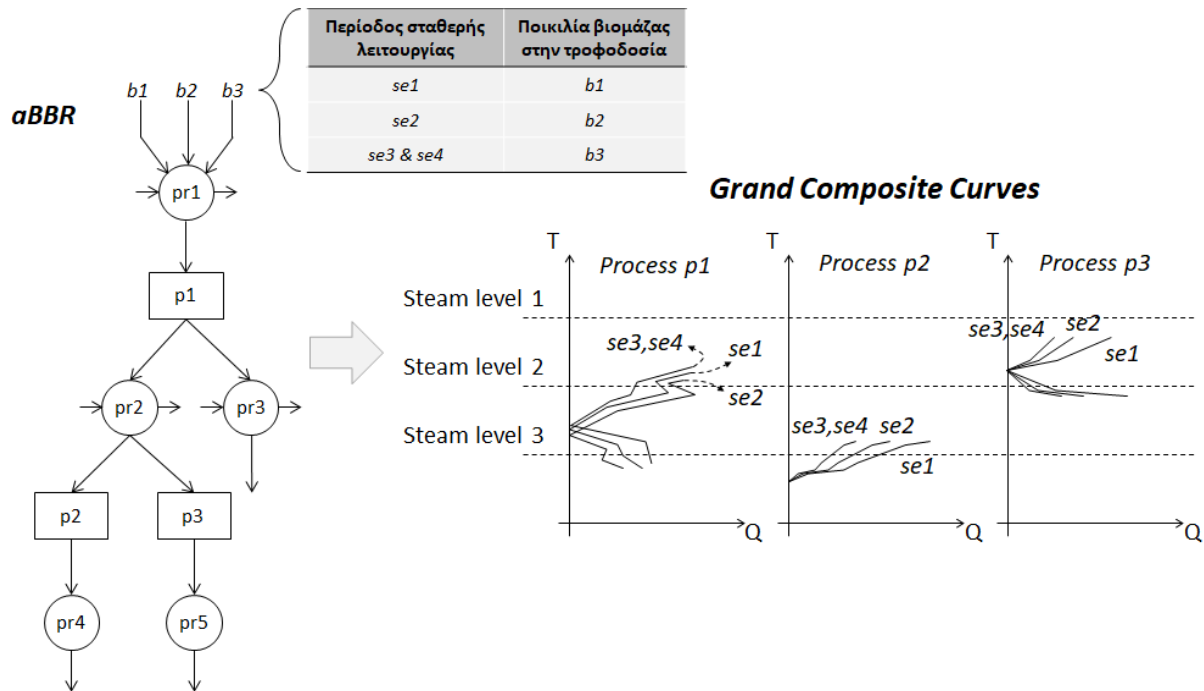
$$\sum_{tl \in T_{pr}^s} f_{tl,se1-1} = \sum_{tl \in T_{pr}^s} f_{tl,se4} \quad \forall pr \in PR_{lower} \quad Eq. 6.19$$

Το συνολικό μαθηματικό μοντέλο του αναβαθμισμένου aBBR απαρτίζεται από τις εξισώσεις Eq.6.6-Eq.6.19 και χρησιμοποιείται για την επιλογή χαρτοφυλακίων τροφοδοσιών, διεργασιών και προϊόντων και το χρονοπρογραμματισμό λειτουργίας του βιοδιυλιστηρίου (δυναμικότητες διεργασιών και μίγματα τροφοδοσίας) και των σταδίων αποθήκευσης βιομάζας και ενδιάμεσων χημικών σε κάθε περίοδο. Το μοντέλο aBBR παράγει όλα τα εφικτά σενάρια Συνολικών Μονάδων που αναδύονται από τις αλυσίδες προϊόντων και συνδυάζεται με τα μοντέλα μεταφόρτωσης ICT ή CIT για την ενεργειακή βελτιστοποίησή τους.

6.3.2. Ισοζύγια ενέργειας: Ενεργειακή ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας υποκείμενη σε εποχικότητα

Τα μοντέλα μεταφόρτωσης του Κεφαλαίου 5, καθώς και οι αναπαραστάσεις των θερμοκρασιακών ενδιάμεσων κάθε προσέγγισης ολοκλήρωσης (ICT ή CIT) εφαρμόζονται χωρίς εννοιολογικές διαφοροποιήσεις κατά την βελτιστοποίηση του προβλήματος ολοκλήρωσης που υπόκειται σε εποχικότητα. Κάθε χαρτοφυλάκιο διεργασιών που διαμορφώνεται (σύμφωνα με τις ροές που επιλέγονται από το aBBR) κάθε χρονική περίοδο, *se*, αντιμετωπίζεται ως στιγμιότυπο λειτουργίας της Συνολικής Μονάδας υπό σταθερές ροές και ολοκληρώνεται σύμφωνα με τους κανόνες του Κεφαλαίου 5. Οι δυναμικότητες των διεργασιών που επιλέγονται κάθε χρονική περίοδο καθορίζουν τα ενεργειακά προφίλ (GCC) και τη συνεισφορά κάθε διεργασίας στη Συνολική Μονάδα. Το Σχήμα 6.7 παρουσιάζει τα ενεργειακά προφίλ τριών διεργασιών που αναπτύσσονται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους σύμφωνα με τις μέγιστες δυναμικότητες που παρουσιάζουν στο aBBR.

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές



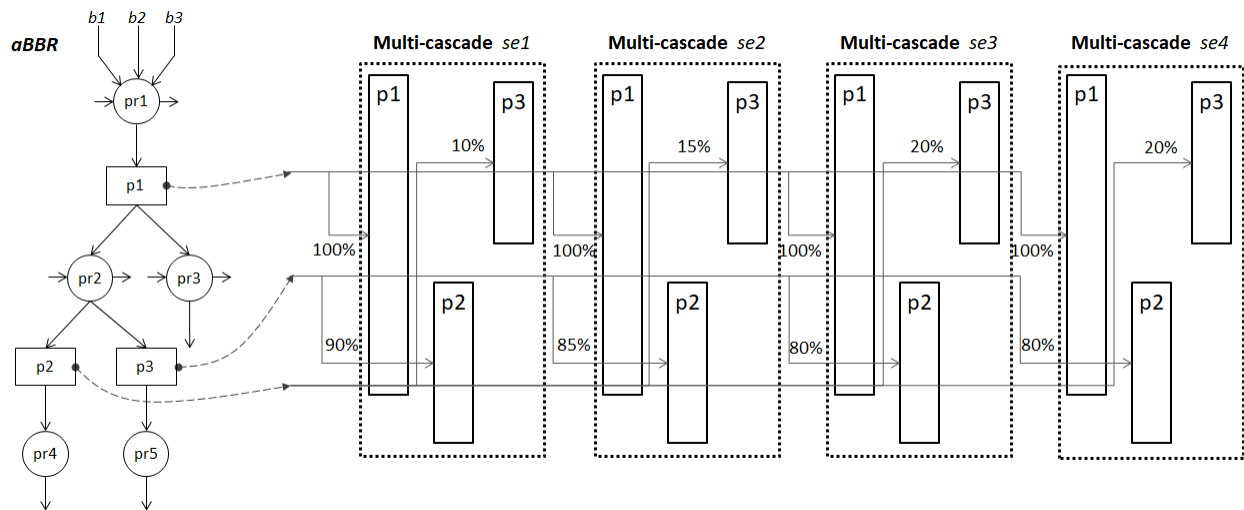
Σχήμα 6.8: aBBR που υπόκειται σε εποχική διαθεσιμότητα πολλαπλών-τροφοδοσιών βιομάζας (b1, b2, b3) και GCC διεργασιών του aBBR για κάθε περίοδο λειτουργίας (se1, se2, se3, se4)

Στο Σχήμα 6.8, η p1 λαμβάνει και κλασματοώνει την κύρια τροφοδοσία του βιοδιυλιστηρίου, η οποία μεταβάλλεται σε κάθε εποχή του έτους, και παράγει τα προϊόντα pr2 και pr3. Σύμφωνα με τον πίνακα του Σχήματος 6.8, η b1 είναι διαθέσιμη την πρώτη περίοδο λειτουργίας se1, η b2 στην se2 και η b3 στις περιόδους se3 και se4 (θεωρείται ίδια διαθεσιμότητα b3 και για τις δύο περιόδους). Δεδομένου ότι κάθε ποικιλία βιομάζας παρουσιάζει διαφορετικό περιεχόμενο στα χημικά ενδιάμεσα pr2 και pr3, η χρήση διαφορετικών ποικιλιών θα επιφέρει μεταβολές στη λειτουργία και τις ενεργειακές ανάγκες διαφορετικών τμημάτων της p1. Παραδείγματος χάριν, η χρήση απόσταξης για την ανάκτηση διαλύτη που χρησιμοποιείται για την κλασμάτωση του pr2 θα παρουσιάζει υψηλότερες απαιτήσεις, όταν χρησιμοποιούνται τροφοδοσίες πλούσιες στο κλάσμα pr2. Ως εκ τούτου, το GCC της p1 μπορεί να διαφοροποιείται σε κάθε εποχή, σύμφωνα με τις τροφοδοσίες που επιλέγονται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.8. Οι κατάντη διεργασίες, p2 και p3, παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά.

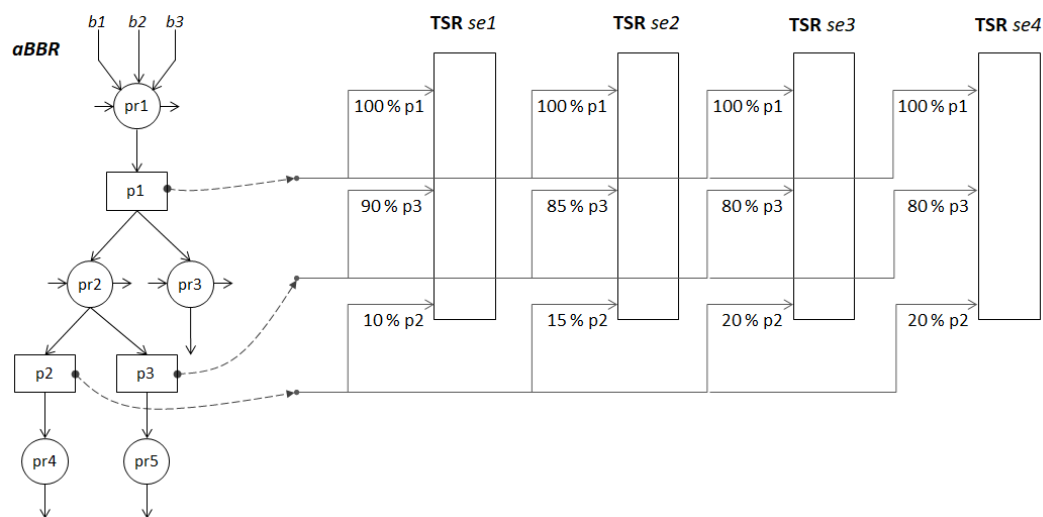
Μεταβολές στην τροφοδοσία βιομάζας θα επιφέρουν αλλαγές στη ροή του ενδιάμεσου χημικού pr2, προκαλώντας αντίστοιχες διακυμάνσεις στις δυναμικότητες και την ενεργειακή κατανάλωση των διεργασιών p2 και p3 σε κάθε εποχή. Η επίδραση των ποικιλιών βιομάζας στις p2 και p3 είναι μόνον ποσοτική, και όχι ποιοτική, δηλαδή δεν μεταβάλλονται τα θερμοκρασιακά εύρη λειτουργίας των

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

ρευμάτων τους. Ως εκ τούτου, τα GCC των p2 και p3 παρουσιάζουν μεταβολές μόνον παράλληλα του άξονα των τετμημένων. Από τη μορφολογία των GCC (για μέγιστη δυναμικότητα) των p2 και p3 του Σχήματος 6.8 μπορεί, επίσης, να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το περιεχόμενο της τροφοδοσίας στο ενδιάμεσο pr2 μικραίνει στην πάροδο των εποχών, εφόσον το ενεργειακό περιεχόμενο των αντίστοιχων GCC μικραίνει.



Σχήμα 6.9: Διαδικασία ολοκλήρωσης με χρήση πολλαπλών-καταρρακτών σε διαφορετικές περιόδους λειτουργίας της επιλεχθείσας Συνολικής Μονάδας



Σχήμα 6.10: Διαδικασία ολοκλήρωσης με χρήση του ενιαίου καταρράκτη TSC σε διαφορετικές περιόδους λειτουργίας της επιλεχθείσας Συνολικής Μονάδας

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

Οι ροές που επιλέγονται από το aBBR κάθε χρονική περίοδο ρυθμίζουν αντίστοιχα τη συνεισφορά των θερμών/ψυχρών ρευμάτων στη Συνολική Μονάδα, τα οποία ολοκληρώνονται άμεσα και έμμεσα με τη χρήση των αναπαραστάσεων πολλαπλών-καταρρακτών ή του TSC. Τα σκαριφήματα των Σχημάτων 6.9 και 6.10 παρουσιάζουν τη διαδικασία ενεργειακής συνεισφοράς και ολοκλήρωσης των διεργασιών του aBBR του Σχήματος 6.8.

Στο Σχήμα 6.9 γίνεται χρήση του συστήματος ολοκλήρωσης πολλαπλών-καταρρακτών. Το σύστημα διατυπώνεται για κάθε χρονική περίοδο λειτουργίας της Συνολικής Μονάδας, με τα ρεύματα των διεργασιών να συνεισφέρουν σύμφωνα με τις δυναμικότητες που επιλέγονται κάθε εποχή. Η p_1 , ως μοναδική λύση αξιοποίησης της βιομάζας, επιλέγεται στο 100% της μέγιστης δυναμικότητάς της και συνεισφέρει πλήρως στον καταρράκτη p_1 όλο το χρόνο. Οι p_2 και p_3 μοιράζονται με διαφορετικό τρόπο το ενδιάμεσο χημικό p_2 και αναλόγως συνεισφέρουν στους καταρράκτες κάθε διεργασίας κάθε περιόδου. Ως εκ τούτου, διαμορφώνονται οι ενεργειακές απαιτήσεις των ρευμάτων σε κάθε θερμοκρασιακό ενδιάμεσο κάθε καταρράκτη και κάθε περίοδο λειτουργίας. Το μοντέλο ICT εφαρμόζεται για την ολοκλήρωση κάθε συστήματος καταρρακτών p_1 - p_2 - p_3 ξεχωριστά για κάθε χρονική περίοδο αποδίδοντας τις βέλτιστες ανάγκες βοηθητικών παροχών κάθε εποχής.

Στο Σχήμα 6.10 εφαρμόζεται η αναπαράσταση του καταρράκτη TSC για κάθε περίοδο λειτουργίας. Τα ρεύματα των διεργασιών διαμορφώνουν τα ενεργειακά φορτία των θερμοκρασιακών ενδιάμεσων του TSC (κάθε εποχής του χρόνου) σύμφωνα με τις δυναμικότητες που επιλέγονται από το BBR. Το μοντέλο CIT εφαρμόζεται ξεχωριστά για κάθε στιγμιότυπο λειτουργίας του TSC και ολοκληρώνει τα ρεύματα των συνεισφερόμενων διεργασιών βελτιστοποιώντας τις ανάγκες βοηθητικών παροχών κάθε εποχής. Σημειώνεται, ότι τα θερμοκρασιακά ενδιάμεσα και των δύο αναπαραστάσεων ολοκλήρωσης διαμορφώνονται σύμφωνα με τις θερμοκρασίες εισόδου-εξόδου όλων των ρευμάτων που εντοπίζονται σε όλες τις περιόδους λειτουργίας επιτρέποντας την συνεισφορά κάθε υποψήφιου ρεύματος και την εφαρμογή των καταρρακτών με όμοιο τρόπο σε κάθε περίοδο. Παραδείγματος χάριν, στην περίπτωση όπου κάποια ρεύματα (π.χ. της διεργασίας p_1) λειτουργούν σε διαφορετικά θερμοκρασιακά εύρη σε διαφορετικές περιόδους, τότε κάθε τέτοια λειτουργία αντιμετωπίζεται ως διαφορετικό ρεύμα και ενσωματώνεται στα ενδιάμεσα των καταρρακτών όλων των περιόδων. Αν και τα μοντέλα μεταφόρτωσης δεν επηρεάζονται εννοιολογικά από την εποχικότητα του προβλήματος σύνθεσης, απαιτούνται κάποιες ρυθμίσεις για τον συντονισμό κάποιων μεταβλητών και όρων των εξισώσεων των ICT/CIT με σκοπό τη σύνδεση των μοντέλων μεταφόρτωσης με την αναπαράσταση aBBR.

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

Οι εξισώσεις και οι μεταβλητές των πεδίων ορισμού κάθε μοντέλου ολοκλήρωσης (ICT και CIT) παραμένουν ίδιες και ορίζονται (επιπλέον) για κάθε περίοδο λειτουργίας se , ως εξής:

1. ICT με τις εξισώσεις Eq.5.1-Eq.5.12

- Όλες οι εξισώσεις εφαρμόζονται και για κάθε χρονική περίοδο ($\forall se \in SE$)
- Οι ενεργειακές ροές και οι δυαδικές μεταβλητές επαναπροσδιορίζονται για κάθε χρονική περίοδο, ως εξής: $R_{p,k-1,se}$, $Q_{p,m,se}^S$, $Q_{p,n,se}^W$, $R_{n-1,se}^W$, $Q_{m,n,se}$, $Q_{n,se}^{TS}$, $Q_{m,se}^{TS}$, $Q_{p,m,se}^S$, $\gamma_{m,se}$, $\gamma_{n,se}$

- Οι όροι συνεισφοράς των θερμών/ψυχρών ρευμάτων, της μορφής: $\sum_{i \in HS_{pk}} Q_{ik}^H \cdot A_t \cdot f_t$ και $\sum_{t \in T_p^{in}}$

$\sum_{j \in CS_{pk}} Q_{jk}^C \cdot A_t \cdot f_t$, αντικαθίστανται αντίστοιχα από τους όρους:

a)

$$\sum_{i \in HS_{pk}} Q_{i,k}^H \cdot \left(\sum_{tu \in T_p^{out}} \sum_{b \in B} f_{tu,b,se} + \sum_{tu \in T_p^{out}} f_{tl,se} \right) + \sum_{pr \in I} \left(\sum_{i \in HS_{pk}} Q_{pr,i,k}^H \cdot \sum_{tu \in T_{pr}^{in}} \sum_{b \in B} f_{tu,b,se} \right)$$

b)

$$\sum_{j \in CS_{pk}} Q_{j,k}^C \cdot \left(\sum_{tu \in T_p^{out}} \sum_{b \in B} f_{tu,b,se} + \sum_{tu \in T_p^{out}} f_{tl,se} \right) + \sum_{pr \in I} \left(\sum_{j \in CS_{pk}} Q_{pr,j,k}^C \cdot \sum_{tu \in T_{pr}^{in}} \sum_{b \in B} f_{tu,b,se} \right)$$

Οι πρώτοι όροι συνεισφοράς των θερμών (a) και ψυχρών (b) ρευμάτων, αφορούν ρεύματα διεργασιών που αποδίδουν ένα προϊόν εξόδου. Οι δεύτεροι όροι αφορούν διεργασίες πολλαπλών-προϊόντων, όπως η διεργασία κλασμάτωσης, για αυτό και ορίζονται για κάθε προϊόν εξόδου ($\forall pr \in I$). Εδώ, το υποσύνολο I , περιλαμβάνει μόνο τα κλάσματα της βιομάζας.

2. CIT με τις εξισώσεις Eq.5.14-Eq.5.26

- Οι εξισώσεις ισχύουν και για κάθε χρονική περίοδο ($\forall se \in SE$)

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

- Οι ενεργειακές ροές και οι δυαδικές μεταβλητές επαναπροσδιορίζονται ως εξής: $R_{i,k,se}$, $Q_{i,j,k,se}$, $Q_{i,n,k,se}$, $R_{m',k,se}$, $Q_{m',j,k,se}$, $Q_{m,se}$, $R_{n-1,se}^W$, $Q_{i,n,k,se}$, $Q_{n,se}^{TS}$, $Q_{n,m,se}$, $Q_{m,se}^{TS}$, $y_{m,se}$, $y_{n,se}$
- Οι όροι συνεισφοράς των θερμών/ψυχρών ρευμάτων, της μορφής: $Q_{ik}^H \cdot \sum_{p \in P_i} \sum_{t \in T_p^{in}} A_t \cdot f_t$ και $Q_{jk}^C \cdot \sum_{p \in P_j} \sum_{t \in T_p^{in}} A_t \cdot f_t$, αντικαθίστανται αντίστοιχα από τους όρους:

a)

$$Q_{i,k}^H \cdot \sum_{p \in P_i} \left(\sum_{tu \in T_p^{out}} \sum_{b \in B} f_{tu,b,se} + \sum_{tu \in T_p^{out}} f_{tl,se} \right) + \sum_{pr \in I} \left(Q_{pr,i,k}^H \cdot \sum_{tu \in T_{pr}^{in}} \sum_{b \in B} f_{tu,b,se} \right)$$

b)

$$Q_{j,k}^C \cdot \sum_{p \in P_j} \left(\sum_{tu \in T_p^{out}} \sum_{b \in B} f_{tu,b,se} + \sum_{tu \in T_p^{out}} f_{tl,se} \right) + \sum_{pr \in I} \left(Q_{pr,j,k}^C \cdot \sum_{tu \in T_{pr}^{in}} \sum_{b \in B} f_{tu,b,se} \right)$$

Ομοίως με παραπάνω, η συνεισφορά των υποψήφιων διεργασιών εκφράζεται μέσω των πρώτων όρων στα σημεία (a) και (b), ενώ η συνεισφορά της διεργασίας κλασμάτωσης μέσω των δεύτερων όρων.

Το συνολικό μοντέλο σύνθεσης και ολοκλήρωσης περιλαμβάνει τα ισοζύγια μάζας του aBBR Eq.6.6-Eq.6.19 σε συνδυασμό με τα ισοζύγια ενέργειας, Eq.5.1-Eq.5.12 για χρήση του ICT ή Eq.5.14-Eq.5.23 για χρήση του CIT. Το πεδίο ορισμού περιλαμβάνει τις ροές των χημικών (συμπεριλαμβανομένης της βιομάζας) κατά μήκος των αλυσίδων αξίας, τις ροές αποθήκευσης χημικών, τις ενεργειακές ροές των θερμοκρασιακών ενδιαμέσων για ανταλλαγή θερμότητας (άμεση και έμμεση) και μεταβλητές απόφασης για την επιλογή διεργασιών και επιπέδων των βοηθητικών παροχών της Συνολικής μονάδας.

Το συνολικό πρόβλημα διατυπώνεται ως ένα γραμμικό μοντέλο βελτιστοποίησης, για τη σύνθεση και το χρονοπρογραμματισμού του χαρτοφυλακίου του βιοδιυλιστηρίου (διεργασίες, προϊόντα, τροφοδοσίες βιομάζας, δίκτυο αποθήκευσης προϊόντων), που ελαχιστοποιεί το ετήσιο κόστος ενέργειας της Συνολικής Μονάδας. Μια εναλλακτική προσέγγιση της αντικειμενικής συνάρτησης περιλαμβάνει επιπλέον οικονομικούς όρους με σκοπό την αποτίμηση των περιθωρίων βιωσιμότητας

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

του βιοδιυλιστηρίου. Και στις δύο περιπτώσεις το πρόβλημα επιλύεται με τη χρήση μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού (MILP).

Στην πρώτη περίπτωση, η αντικειμενική συνάρτηση αθροίζει το ενεργειακό κόστος βοηθητικών παροχών της Συνολικής Μονάδας για όλες τις περιόδους λειτουργίας (4 εποχές του χρόνου), ως εξής:

$$E^{TS} = \frac{\sum_{se} E_{se}^{TS}}{4} = \frac{\sum_{m \in S} c_m \cdot Q_{m,se}^{TS} + \sum_{n \in W} c_n \cdot Q_{n,se}^{TS}}{4} \quad Eq. 6.20$$

Στην δεύτερη περίπτωση η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει επιπλέον όρους κόστους και κερδοφορίας της Συνολικής Μονάδας, όπως χρησιμοποιήθηκαν στην εξίσωση Eq.5.28. Ωστόσο, στην παρούσα περίπτωση, οι επιμέρους όροι κόστους επαναδιατυπώνονται για την ενσωμάτωση των νέων κανόνων που επιβάλλει το aBBR, και η αντικειμενική συνάρτηση υπολογισμού της κερδοφορίας έχει την ακόλουθη μορφή:

$$Max \ Z = \left(\frac{profits}{4} - capex - \frac{opex}{4} - \frac{energy}{4} - \frac{transport}{4} - \frac{feed}{4} \right) \cdot 50\% \quad Eq. 6.21$$

- $profits \left[\frac{M\epsilon}{yr} \right] = \sum_{pr \in PR} f_{pr,se}^{PR} \cdot price_{pr} \quad \forall se \in SE$
- $capex = \sum_{p \in P} (IC_p \cdot CAPEX_p)$
- $opex \left[\frac{M\epsilon}{yr} \right] = \sum_{p \in P} \left[\left(\sum_{b \in B} \sum_{tu \in T_p^{out}} f_{tu,b,se} + \sum_{tl \in T_p^{out}} f_{tl,se} \right) \cdot OPEX_p \right] \quad \forall se \in SE$
- $energy \left[\frac{M\epsilon}{yr} \right] = \sum_{m \in S} c_m \cdot Q_{m,se}^{TS} + \sum_{n \in W} c_n \cdot Q_{n,se}^{TS} \quad \forall se \in SE$
- $transport \left[\frac{M\epsilon}{yr} \right] = \frac{40}{10^6} \left[\frac{M\epsilon \cdot hr}{kg \cdot yr} \right] \cdot \sum_{b \in B} f_{t1,b,se}$
- $feed \left[\frac{M\epsilon}{yr} \right] = \sum_{b \in B} f_{t1,b,se} \cdot bioprice_b$
- $taxes = Z \cdot 50\%$

6.4. Παράδειγμα σύνθεσης και ολοκλήρωσης βιοδιυλιστηρίων που υπόκεινται στην εποχική διαθεσιμότητα τροφοδοσιών βιομάζας

Το πρόβλημα ανέγερσης ενός νέου βιοδιυλιστηρίου που μελετήθηκε στην Ενότητα 5.5.6 επανεξετάζεται υπό συνθήκες εποχικής διαθεσιμότητας και μεταβολών στην παροχή τροφοδοσίας βιομάζας. Το παράδειγμα αντιμετωπίζει τις ίδιες διεργασίες παραγωγής ανανεώσιμων καυσίμων και προϊόντων υψηλής αξίας από κλάσματα της βιομάζας με στόχο τη μελέτη:

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

- της συνδυαστικής φύσης του προβλήματος επιλογής ποικιλιών βιομάζας, διεργασιών και προϊόντων και τις επιπτώσεις τους στην ενέργεια και την κερδοφορία,
- της επίδρασης της εποχικότητας ποικιλιών βιομάζας στην βέλτιστη λύση,
- του χρονοπρογραμματισμού λειτουργίας του συνολικού βέλτιστου βιοδιυλιστηρίου πολλαπλών-προϊόντων και πολλαπλών-τροφοδοσιών,
- των τάσεων ένταξης ανταγωνιστικών ποικιλιών βιομάζας σε βιοδιυλιστήρια, σύμφωνα με κριτήρια ενεργειακής κατανάλωσης και κερδοφορίας.

Για τη αναπαράσταση του χρονικά μεταβαλλόμενου προβλήματος χρησιμοποιείται ο γράφος aBBR του Σχήματος 6.11. Το χαρτοφυλάκιο τροφοδοσίας που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη Ενότητα 5.5.6 (μόνο άχυρα σιταριού) εμπλουτίζεται με πέντε επιπλέον υποψήφιες λιγνοκυτταρινούχες τροφοδοσίες: άχυρα ρυζιού και κριθαριού και μίσχανθο ως ξυλώδεις ποικιλίες, και σημύδα και λεύκα ως τροφοδοσίες ξυλείας. Κάθε ποικιλία χαρακτηρίζεται από διαφορετικές αποδόσεις στα ενδιάμεσα C5, C6 σακχάρων και λιγνίνης, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.4.

Στις περιπτώσεις παραγωγής βιοκαυσίμων, p39, p40, p41 και p42 (στα δεξιά του aBBR), οι αποδόσεις των διεργασιών εκφράζονται συναρτήσει της συνολικής τροφοδοσίας βιομάζας, ενώ η επίδραση της σύστασης σε σάκχαρα και λιγνίνη δεν λαμβάνεται υπόψη. Αυτό δεν συμβαίνει στην περίπτωση των διεργασιών που διακλαδίζονται κατάντη της διεργασίας κλασμάτωσης (p10), όπου οι δυναμικότητες των διεργασιών εξαρτώνται άμεσα από τη σύσταση κάθε ποικιλίας βιομάζας που εισέρχεται στο βιοδιυλιστήριο. Οι επιλογές που εντοπίζονται στην είσοδο του βιοδιυλιστηρίου (πάνω μέρος του aBBR) αφορούν τις επιλογές σύνθεσης συστημάτων αποθήκευσης και ξήρανσης σύμφωνα με τις οδηγίες του Σχήματος 6.6 και τους σχεδιαστικούς περιορισμούς που συζητήθηκαν στο Κεφάλαιο 6.2. Δηλαδή, *το ποσοστό υγρασίας στην είσοδο της διεργασίας κλασμάτωσης ορίζεται στο 15% w/w, ενώ η ίδια προδιαγραφή (15% w/w) ισχύει και για τις διεργασίες αεριοποίησης και πυρόλυσης, σε αντίθεση με την αναερόβια χώνευση και την υδροθερμική υγροποίηση, οι οποίες δεν επηρεάζονται από την περιεχόμενη υγρασία.* Συνοψίζονται οι υποθέσεις και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του προβλήματος σύμφωνα με τα οποία αναπτύσσεται το aBBR του Σχήματος 6.11, ως εξής:

- 1) η ξυλώδης βιομάζα (12-15% w/w υγρασία) μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας από όλες τις διεργασίες
- 2) οι τροφοδοσίες δασοκομίας (50% w/w) ξηραίνονται στο 15% w/w για όλες τις περιπτώσεις εκτός από τις διεργασίες αναερόβιας χώνευσης και υδροθερμικής υγροποίησης.

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

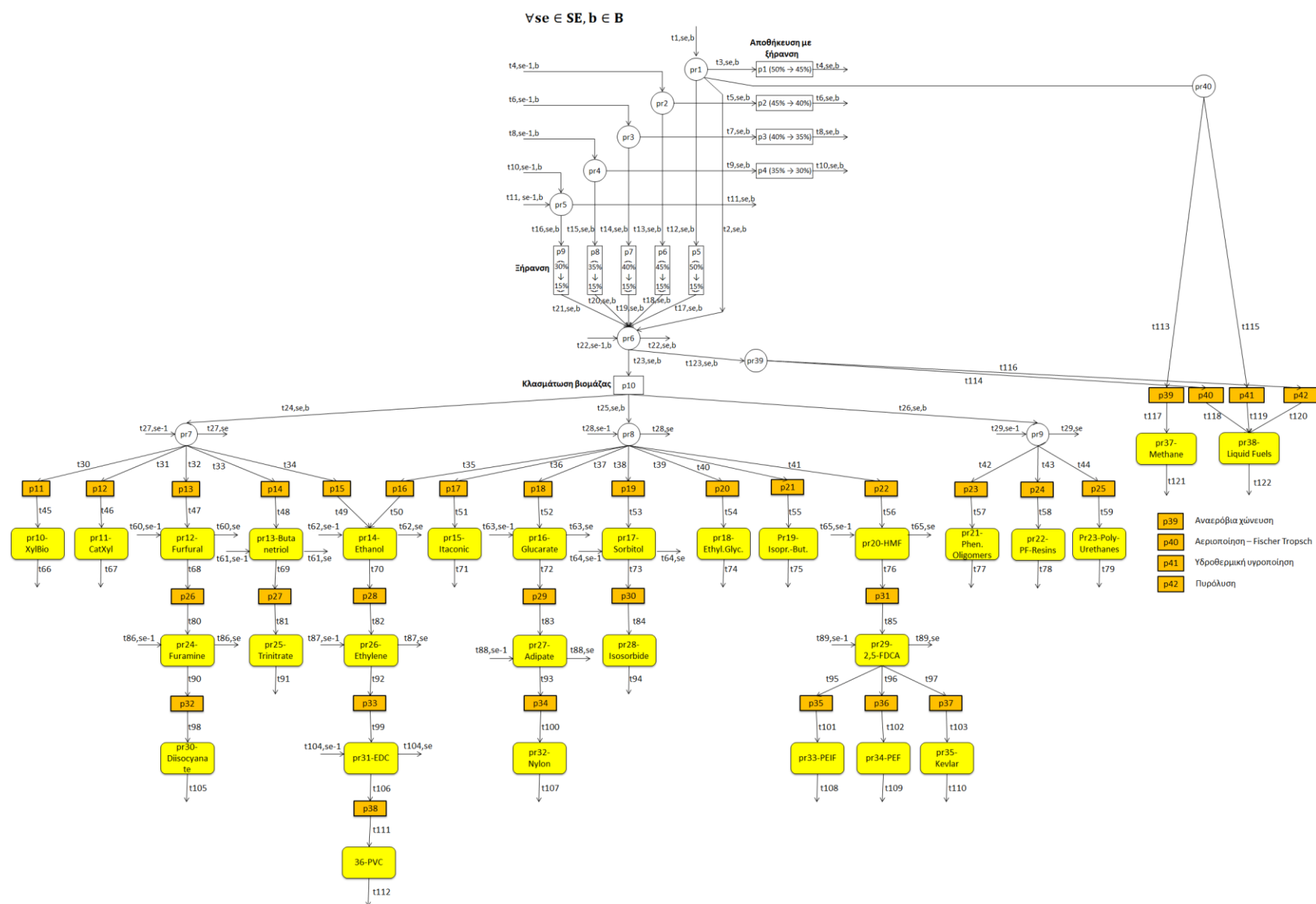
- 3) οι διεργασίες παραγωγής βιοκαυσίμων (αναερόβια χώνευση, αεριοποίηση, υδροθερμική υγροποίηση και πυρόλυση) δεν επηρεάζονται από τη σύσταση της βιομάζας σε σάκχαρα και λιγνίνη, ενώ όλες οι υπόλοιπες επηρεάζονται.

Δεδομένου του μεγέθους και της πολυπλοκότητας του προβλήματος δεν είναι εφικτή η πρόβλεψη βέλτιστων χαρτοφυλακίων τροφοδοσιών και διεργασιών, τα οποία συνδράμουν με διάφορους τρόπους στο ενεργειακό περιεχόμενο των διεργασιών, της ξήρανσης και της παραγωγικότητας κερδοφόρων προϊόντων. Σκοπός του παραδείγματος είναι η ανάδειξη χαρτοφυλακίων ποικιλιών βιομάζας, διεργασιών και προϊόντων, και ο χρονοπρογραμματισμός λειτουργίας του βιοδιυλιστηρίου, το οποίο παρουσιάζει μέγιστες αποδόσεις όσον αφορά την ενεργειακή κατανάλωση και μεγιστοποιεί τα περιθώρια κερδοφορίας. Δεν αποκλείεται μάλιστα το γεγονός επιλογής «κοκτέιλ» ποικιλιών βιομάζας με σκοπό τη προετοιμασία κατάλληλων μιγμάτων σακχάρων-λιγνίνης, τα οποία ενισχύουν τις αποδόσεις ενεργειακά συμπληρωματικών διεργασιών και την κερδοφορία.

Σε πρώτο στάδιο (παράδειγμα ενότητας 6.4.1 και 6.4.2), εξετάζονται οι τάσεις ένταξης κάθε ποικιλίας βιομάζας στο βιοδιυλιστήριο σε συνδυασμό με την καταλληλότητα επιλογής διεργασιών, σύμφωνα με τις επιπτώσεις στο ενεργειακό κόστος και την κερδοφορία. Σε αυτή την προσέγγιση δεν τίθενται περιορισμοί όσον αφορά την εποχική διαθεσιμότητα των ποικιλιών, και το πρόβλημα υποθέτει απεριόριστη διαθεσιμότητα για κάθε ποικιλία, με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων προτίμησης ποικιλιών και διεργασιών. Σε επόμενο στάδιο (παράδειγμα ενότητας 6.4.3), το πρόβλημα αντιμετωπίζεται υπό πραγματικές συνθήκες εποχικής διαθεσιμότητας ποικιλιών βιομάζας για την εύρεση του βέλτιστου χαρτοφυλακίου ποικιλιών, διεργασιών και προϊόντων ενός νέου βιοδιυλιστηρίου στην Ελλάδα. Και στις δύο προσεγγίσεις γίνεται χρήση των επιλογών που προσφέρει το aBBR του Σχήματος 6.11, ενώ η δυναμικότητα του βιοδιυλιστηρίου έχει οριστεί στους 150 ktn ξηρής βιομάζας ετησίως.

Το μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης περιλαμβάνει τα ισοζύγια μάζας (Eq.6.6-Eq.6-19) του aBBR για την περίπτωση του Σχήματος 6.11, τα ισοζύγια ενέργειας των μοντέλων μεταφόρτωσης ICT (Eq.5.1-Eq.5.12) ή CIT (Eq.5.14-Eq.5.26) σύμφωνα με τις παρατηρήσεις του Κεφαλαίου 6.3 και τις αντικειμενικές συναρτήσεις υπολογισμού του κόστους ενέργειας (Eq.6.20) ή της κερδοφορίας (Eq.6.21).

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές



Σχήμα 6.11: aBBR υποψήφιων διεργασιών αξιοποίησης υποψήφιων ποικιλιών βιομάζας για την ανάπτυξη ενός νέου βιοδιυλιστηρίου

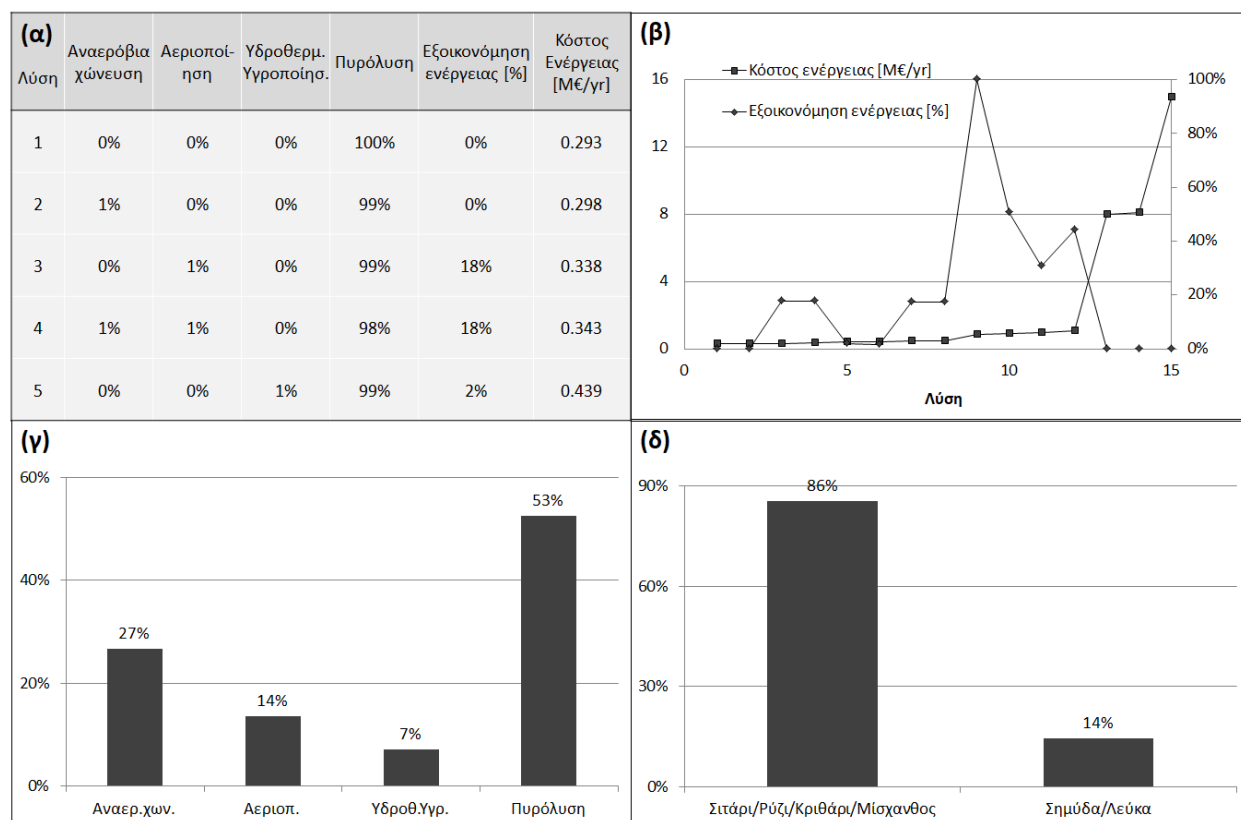
6.4.1. Μελέτη καταλληλότητας ποικιλιών βιομάζας σύμφωνα με ενεργειακά κριτήρια

Στο aBBR του Σχήματος 6.11 εντοπίζονται δύο περιοχές ανταγωνιστικών διεργασιών με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η πρώτη περιλαμβάνει την κλασμάτωση βιομάζας και τις κατάντη διεργασίες, οι οποίες επηρεάζονται από τη σύσταση της τροφοδοσίας βιομάζας, ενώ η δεύτερη αφορά την παραγωγή βιοκαυσίμων που παραμένει ανεπηρέαστη από αυτήν. Λόγω των ιδιοτήτων κάθε περιοχής, αρχικά, το πρόβλημα επιλύεται θέτοντας δεδομένες επιλογές για την πορεία κάθε υποψήφιας ποικιλίας βιομάζας είτε προς την μία (κλασμάτωση και κατάντη διεργασίες) είτε την άλλη (βιοκαύσιμα) περιοχή. Έπειτα, το μοντέλο επιλύεται αντιμετωπίζοντας όλες τις διεργασίες και τις ποικιλίες ως βαθμούς ελευθερίας του συνολικού προβλήματος. Σε κάθε περίπτωση, χρησιμοποιούνται περιορισμοί integer cuts (αποκλείουν επιλογές διεργασιών προηγούμενων επιλύσεων) για την επιλογή των 30 καλύτερων λύσεων και την εξαγωγή συμπερασμάτων προτίμησης τροφοδοσιών και διεργασιών.

Αρχικά το πρόβλημα επιλύεται δεσμεύοντας την πορεία κάθε ποικιλίας βιομάζας προς την παραγωγή βιοκαυσίμων, δηλαδή της αναερόβιας χώνευσης, της αεριοποίησης, της υδροθερμικής υγροποίησης και της πυρόλυσης. Η παρούσα ανάλυση πραγματοποιήθηκε μόνο για 15 επιλύσεις του μοντέλου (όχι 30), καθότι τόσοι είναι οι εφικτοί συνδυασμοί διεργασιών που προκύπτουν από τις τέσσερις υποψήφιες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.12, και αφορούν (α) τις 5 καλύτερες λύσεις, (β) τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης ενεργειακού κόστους και της εξοικονόμησης ενέργειας λόγω έμμεσης ολοκλήρωσης και (γ, δ) τις προτιμήσεις ποικιλιών βιομάζας και διεργασιών.

Το χαρτοφυλάκιο με το μικρότερο κόστος ενέργειας αποτελείται από την διεργασία της πυρόλυσης (1^η λύση Σχήματος 6.12α), η οποία εμφανίζει την μικρότερη κατανάλωση από όλες τις διεργασίες του aBBR. Τα υψηλά ποσοστά ανταλλαγής θερμότητας (18%) μεταξύ των διεργασιών που επιλέγονται στη 3^η και 4^η λύση (Σχήμα 6.12) – παρά το γεγονός ότι η μία εκ των εμπλεκόμενων διεργασιών μοιράζεται το 99% και 98% της τροφοδοσίας, αντίστοιχα – οφείλεται στην ιδιαίτερα ενεργοβόρα διεργασία αεριοποίησης, η οποία διαθέτει αρκετή θερμότητα σε πολύ υψηλή θερμοκρασία. Μάλιστα, όσον αφορά το ρεύμα-δότη θερμότητας της διεργασίας αεριοποίησης, εντοπίζεται ότι το μοντέλο δίνει προτεραιότητα στην εφαρμογή έμμεσης, και όχι άμεσης, ολοκλήρωσης, όπως συζητήθηκε και στην ακραία περίπτωση του Σχήματος 4.9. Αυτή η ιδιαίτερη διαδικασία ολοκλήρωσης λαμβάνει χώρα, ως ακολούθως.

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές



Σχήμα 6.12: Αποτελέσματα προτιμήσεων ποικιλιών και διεργασιών για την παραγωγή βιοκαυσίμων σύμφωνα με ενεργειακά κριτήρια

Υπο συνθήκες συμβατικής ολοκλήρωσης, τα ρεύματα της αεριοποίησης της 3^{ης} και 4^{ης} λύσης θα ολοκληρώνονταν πλήρως μεταξύ τους χωρίς να παρουσιάζουν περίσσεια θερμότητα (πρόβλημα ουδού) για σκοπούς έμμεσης ολοκλήρωσης με τη διεργασία πυρόλυσης. Ωστόσο, η συστηματική ανίχνευση όλων των επιλογών ολοκλήρωσης που προσφέρουν τα μοντέλα ICT και CIT, εντοπίζει ειδικές-ακραίες περιπτώσεις θέτοντας σε προτεραιότητα την έμμεση ολοκλήρωση, έναντι της άμεσης, όταν αυτό μπορεί να αποδώσει οικονομικότερη θέρμανση. Συγκεκριμένα, στη διεργασία αεριοποίησης εντοπίζεται θερμό ρεύμα (Θ1) πολύ υψηλής θερμοκρασίας, το οποίο προτιμάται να ολοκληρωθεί έμμεσα με ψυχρό ρεύμα (Ψ2) υψηλής θερμοκρασίας της διεργασίας πυρόλυσης για την εξοικονόμηση πολύ υψηλής θερμοκρασίας και κόστους ατμού. Το μη-ολοκληρωμένο ψυχρό ρεύμα (Ψ1) της αεριοποίησης – που σε συνθήκες κλασσικής ολοκλήρωσης θα ολοκληρωνόταν με το θερμό ρεύμα (Θ1) της αεριοποίησης μέσω άμεσης ολοκλήρωσης – τελικά χρεώνει ατμό πολύ χαμηλότερου κόστους από αυτόν που θα χρεωνόταν για τη θέρμανση του ψυχρού ρεύματος (Ψ2) της διεργασίας πυρόλυσης. **Αυτό το πλάνο ολοκλήρωσης αναδεικνύει πλεονεκτήματα που δεν μπορούν να υπολογισθούν με την**

συμβατική διαδικασία ολοκλήρωσης της βιβλιογραφίας, παρά μόνον με τη χρήση των συστημικών και συνδυαστικών εργαλείων ICT και CIT ταυτόχρονης αντιμετώπισης της άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης.

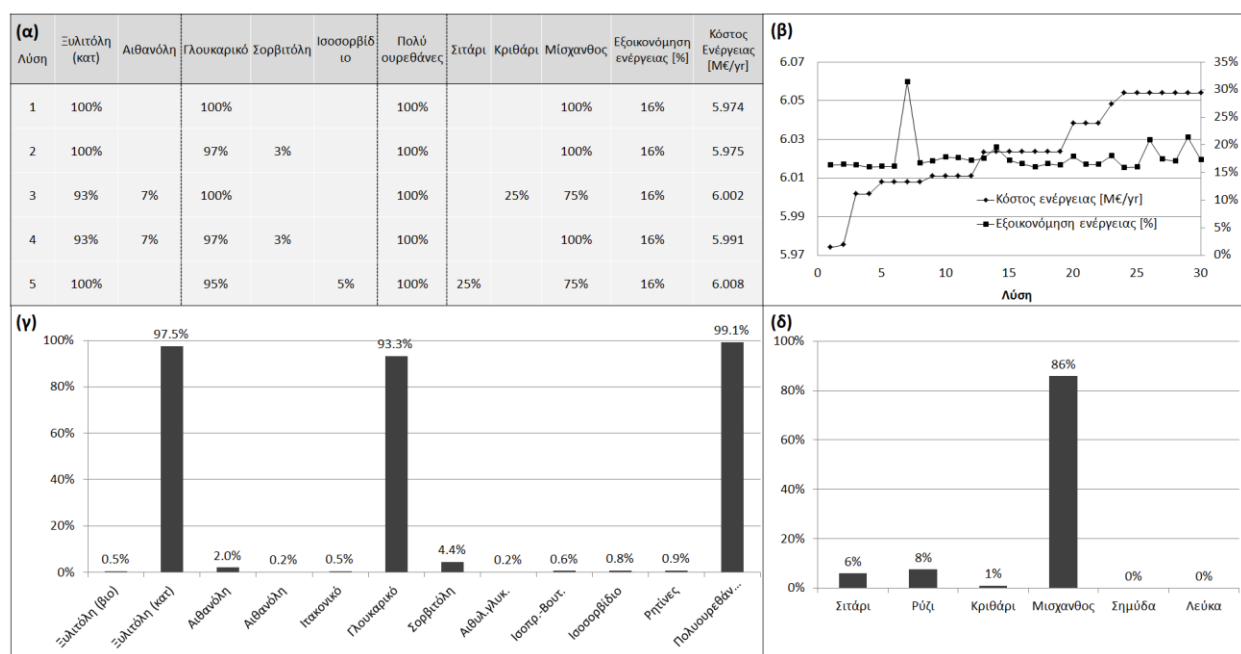
Στο διάγραμμα του Σχήματος 6.12β παρατηρείται απότομη αύξηση του ενεργειακού κόστους μετά τη 12^η λύση, επειδή η ενεργειακά φθηνή διεργασία της πυρόλυσης αποκλείεται από το χαρτοφυλάκιο διεργασιών, καθώς έχει εξαντλήσει την παρουσία της σε όλους τους προηγούμενους συνδυασμούς διεργασιών. Στο κάτω μέρος του Σχήματος 6.12 (γ και δ) παρουσιάζονται οι προτιμήσεις σε διεργασίες και ποικιλίες βιομάζας. Η αναερόβια χώνευση αποτελεί τη δεύτερη καλύτερη προτίμηση από ενεργειακής σκοπιάς, ενώ ακολουθούν η αεριοποίηση και η υδροθερμική υγροποίηση.

Εφόσον, η πυρόλυση παρουσιάζει την μεγαλύτερη προτίμηση, η χρήση ξυλώδους βιομάζας (σιτάρι, ρύζι, κριθάρι, μίσχανθος) που δεν απαιτεί κόστος ξήρανσης, επίσης κυριαρχεί στη σειρά προτίμησης, επί ίσους όρους για κάθε ξυλώδη ποικιλία. Με μικρότερα ποσοστά παρουσιάζονται οι τροφοδοσίες ξυλείας (σημύδα, λεύκα), οι οποίες επιλέγονται από το μοντέλο μόνο στις λύσεις όπου παρίστανται η αναερόβια χώνευση ή/και η υδροθερμική υγροποίηση, εφόσον αυτές οι διεργασίες δεν παρουσιάζουν απαιτήσεις ξήρανσης της τροφοδοσίας, χωρίς ωστόσο να αποκλείονται και οι ξυλώδεις τροφοδοσίες για αυτές τις διεργασίες. Στην παρούσα προσέγγιση διερεύνησης διεργασιών παραγωγής βιοκαυσίμων, η επιλογή τροφοδοσίας εξαρτάται μόνον από το ενεργειακό κόστος ξήρανσης και όχι από το λιγνοκυτταρινούχο περιεχόμενό της. Οι ξυλώδεις ποικιλίες για την παραγωγή βιοκαυσίμων μέσω πυρόλυσης και αναερόβιας χώνευσης αποτελούν τις καλύτερες επιλογές από ενεργειακής σκοπιάς. Στη συνέχεια, το πρόβλημα επιλύεται δεσμεύοντας την πορεία της τροφοδοσίας μόνο προς τη διεργασία κλασμάτωσης και τις κατάντη διεργασίες, αποκλείοντας την παραγωγή βιοκαυσίμων.

Το πρόβλημα επιλύθηκε για την εύρεση των 30 καλύτερων λύσεων και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.13, όπου αναδεικνύονται εμφανώς η παραγωγή ξυλιτόλης (KAT) (καταλυτική διεργασία), γλουκαρικού οξέως και πολυουρεθανών ως καταλληλότερες επιλογές από ενεργειακής σκοπιάς. Η αιθανόλη και η σορβιτόλη αποτελούν εναλλακτικές λύσεις. Το ενεργειακό κόστος (Σχήματος 6.13β) κυμαίνεται στα 6 Μ€/γρ, ενώ η εξοικονόμηση ενέργειας λόγω έμμεσης ολοκλήρωσης κυμαίνεται στο 15-20%. Οι πολύ μικρές διακυμάνσεις στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης οφείλονται στη συμμετοχή συμπληρωματικών διεργασιών – πέραν του βέλτιστου χαρτοφυλακίου ξυλιτόλης, γλουκαρικού και πολυουρεθανών – σε πολύ μικρά ποσοστά (της τάξης 1-10%). Επίσης, η προτίμηση της τροφοδοσίας του μίσχανθου σε ποσοστό 86% μπορεί να αποδοθεί: (α) στο γεγονός ότι παρουσιάζει τις μικρότερες αποδόσεις σε σάκχαρα (έναντι των υπόλοιπων ποικιλιών),

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

τα οποία επηρεάζουν τις δυναμικότητες των πιο ενεργοβόρων διεργασιών του χαρτοφυλακίου, ενώ οι διεργασίες που βασίζονται στη λιγνίνη οφείλονται μόλις για το 1% των συνολικών αναγκών και (β) στο γεγονός ότι αποτελεί ξυλώδη τροφοδοσία και δεν απαιτείται κόστος ξήρανσης. Μετά τον μίσχανθο, το ρύζι και το σιτάρι παρουσιάζουν τις επόμενες μικρότερες αποδόσεις σε σάκχαρα και ακολουθούν στη σειρά προτίμησης με ποσοστά 8% και 6%. Τέλος, **εντοπίζονται ελπιδοφόρα κοκτέιλ μίσχανθου με κριθάρι ή σιτάρι (3^η και 5^η λύση του Πίνακα 6.13α), τα οποία ρυθμίζουν κατάλληλα την παραγωγή C5 και C6 σακχάρων, και τις δυναμικότητες των επιλεχθέντων διεργασιών, για σκοπούς βέλτιστης κατανομής της διαθέσιμης θερμότητας στις διεργασίες της Συνολικής Μονάδας.**



Σχήμα 6.13: Αποτελέσματα προτιμήσεων ποικιλιών και διεργασιών για την παραγωγή προϊόντων υψηλής αξίας σύμφωνα με ενεργειακά κριτήρια

Τα αποτελέσματα των Σχημάτων 6.12 και 6.13 μπορούν να αξιοποιηθούν για τη λήψη αποφάσεων σε κάθε υποπερίπτωση που ανιχνεύεται στο aBBR το πρόβληματος. Από ενεργειακής σκοπιάς, η επιλογή της **πυρόλυσης και της αναερόβιας χώνευσης** με χρήση **ξυλωδών ποικιλιών** αποτελεί τις καταλληλότερες επιλογές για παραγωγή βιοκαυσίμων. Εναλλακτικά, εάν ο χρήστης ενδιαφέρεται για την παραγωγή υψηλής αξίας προϊόντων, η παραγωγή **ξυλιτόλης, γλουκαρικού οξέως και πολυουρεθανών**, σε συνδυασμό με τη χρήση **μίσχανθου**, αποτελούν τις καταλληλότερες επιλογές.

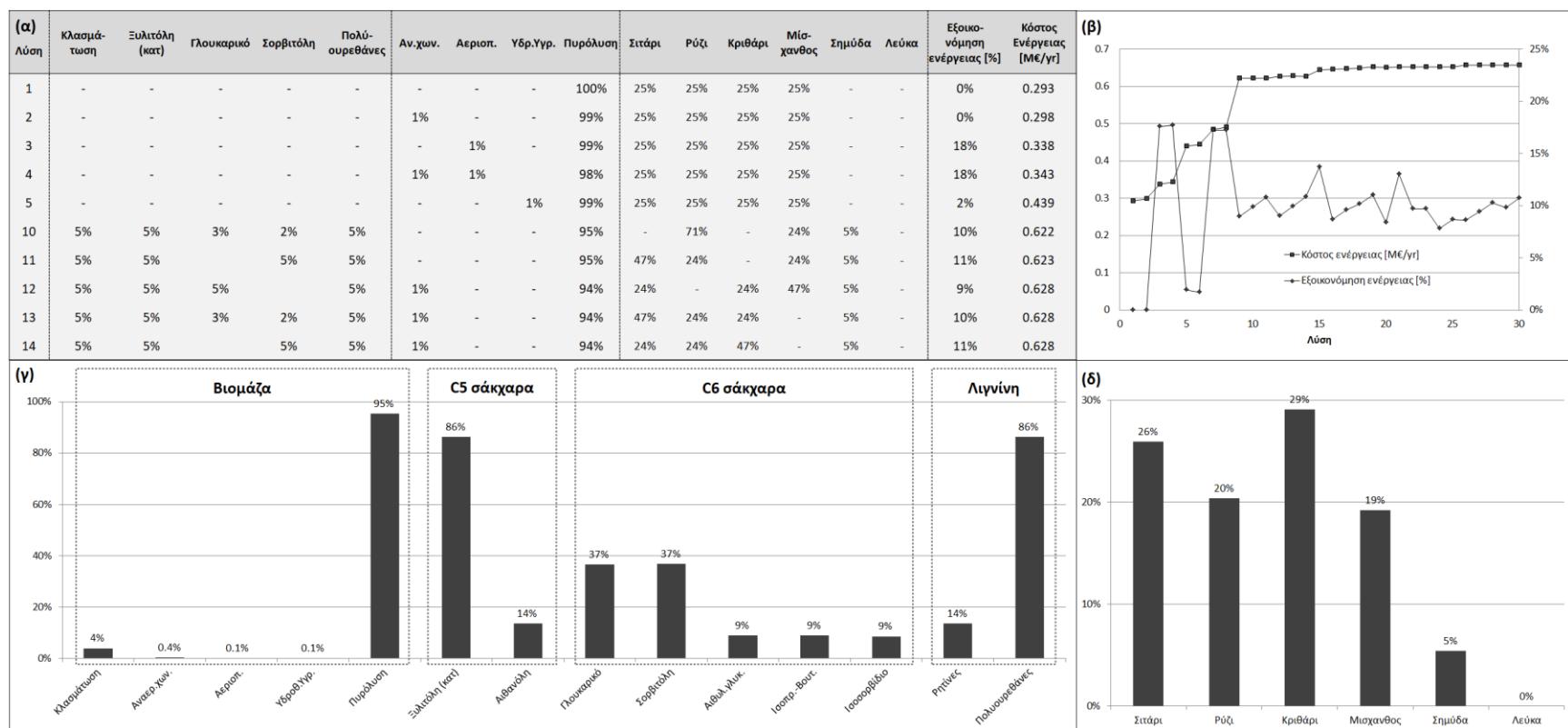
Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Σχημάτων 6.12 και 6.13, οι πιο ενεργειακά ελπιδοφόρες λύσεις αφορούν την παραγωγή βιοκαυσίμων, αντί προϊόντων υψηλής αξίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παραγωγή βιοκαυσίμων αναλαμβάνεται από μεμονωμένες διεργασίες (μέχρι και μία κάθε φορά), σε αντίθεση με τα άλλα προϊόντα του aBBR, για τα οποία απαιτούνται τουλάχιστον 4 διεργασίες κάθε φορά: μία για την κλασμάτωση βιομάζας και τρεις για την αξιοποίηση κάθε ενδιάμεσου (C5, C6 σάκχαρα και λιγνίνη) οδηγώντας στατιστικά σε μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις. Ακολούθως, το πρόβλημα επιλύεται για τον εντοπισμό των 30 καλύτερων λύσεων θεωρώντας όλες τις υποψήφιες διεργασίες και τροφοδοσίες του aBBR ως βαθμούς ελευθερίας, χωρίς τη χρήση περιορισμών για την πορεία της τροφοδοσίας.

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στο Σχήμα 6.14 και παρουσιάζουν (α) ένα δείγμα των καλύτερων λύσεων, (β) την τιμή της αντικειμενικής και της εξοικονόμησης ενέργειας και (γ, δ) τις προτιμήσεις διεργασιών και ποικιλιών. Στον πίνακα του Σχήματος 6.14α παρουσιάζονται οι 5 καλύτερες λύσεις, στις οποίες επικρατούν μόνον οι διεργασίες βιοκαυσίμων, και οι 5 πρώτες λύσεις από τη στιγμή που εμφανίζεται η διεργασία κλασμάτωσης στη λύση του μοντέλου (από τη 10^η λύση και μετά). Αυτή η συμπεριφορά του μοντέλου επιβεβαιώνεται από τη συζήτηση της προηγούμενης παραγράφου.

Οι υψηλότερες τάσεις διεργασιών (γλουκαρικό, ξυλιτόλη, πολυουρεθάνες και πυρόλυση) που αναδεικνύονται στις προτιμήσεις του Σχήματος 6.14γ συνάδουν με αυτές των 6.12 και 6.13, όπως ήταν αναμενόμενο. Ωστόσο, εμφανίζονται νέα κοκτέιλ βιομάζας (Σχήμα 6.14α και 6.14δ), τα οποία ενισχύουν τις αποδόσεις έμμεσης ολοκλήρωσης μεταξύ διεργασιών βιοκαυσίμων και υψηλής αξίας προϊόντων, οι οποίες από 10^η βέλτιστη λύση και μετά (Σχήμα 6.14α) συνυπάρχουν στο βιοδιυλιστήριο. Συγκεκριμένα, 10% των συνολικών αναγκών της Συνολικής Μονάδας καλύπτονται από παραγωγή ατμού 115 °C από την διεργασία κλασμάτωσης, ο οποίος κατανέμεται τόσο στη διεργασία πυρόλυσης, όσο και στις διεργασίες παραγωγής ξυλιτόλης, γλουκαρικού και πολυουρεθανών. Η επιπλέον ενσωμάτωση της σορβιτόλης στο βέλτιστο χαρτοφυλάκιο (σε σχέση με τις επιλογές του Σχήματος 6.13) οφείλεται στο γεγονός ότι η διεργασία παίζει διττό ρόλο τόσο ως καταβόθρα παραγόμενου ατμού από την διεργασία κλασμάτωσης, όσο και ως πηγή παραγωγής ατμού για την διεργασία της πυρόλυσης. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει μία ελπιδοφόρα ενεργειακή συνέργεια μεταξύ των διεργασιών σορβιτόλης-κλασμάτωσης-πυρόλυσης.

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές



Σχήμα 6.14: Αποτελέσματα καλύτερων λύσεων βιοδιυλιστηρίων για το aBBR του Σχήματος 6.11 σύμφωνα με ενεργειακά κριτήρια: (α) χαρτοφυλάκια διεργασιών και τροφοδοσιών, (β) ενεργειακό κόστος και εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) προτιμήσεις διεργασιών, (δ) προτιμήσεις ποικιλιών βιομάζας

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

Σύμφωνα με τις προτιμήσεις του Σχήματος 6.14, οι διεργασίες πυρόλυσης (95%), κλασμάτωσης (4%), ξυλιτόλης (86%), γλουκαρικού (37%), σορβιτόλης (37%) και πολυουρεθανών (86%) συνδυάζονται κατάλληλα με τη χρήση τροφοδοσιών κριθαριού (29%) και σιταριού (26%). Το παρόν χαρτοφυλάκιο διεργασιών-βιομάζας συνθέτει τις πλέον ενεργειακά συμπληρωματικές διεργασίες, οι οποίες παίζουν διττό ρόλο παράγοντας και καταναλώνοντας ατμό που προέρχεται από τις ίδιες, αποδίδοντας ποσοστά εξοικονόμησης φρέσκου ατμού έως και 10% (10^η λύση, Σχήμα 6.14α).

Στη επόμενη ενότητα, το παραπάνω παράδειγμα επανεξετάζεται ακολουθώντας την ίδια προσέγγιση, με τη μόνη διαφορά ότι το μοντέλο χρησιμοποιεί τη κερδοφορία ως κριτήριο για την επιλογή διεργασιών και ποικιλιών βιομάζας.

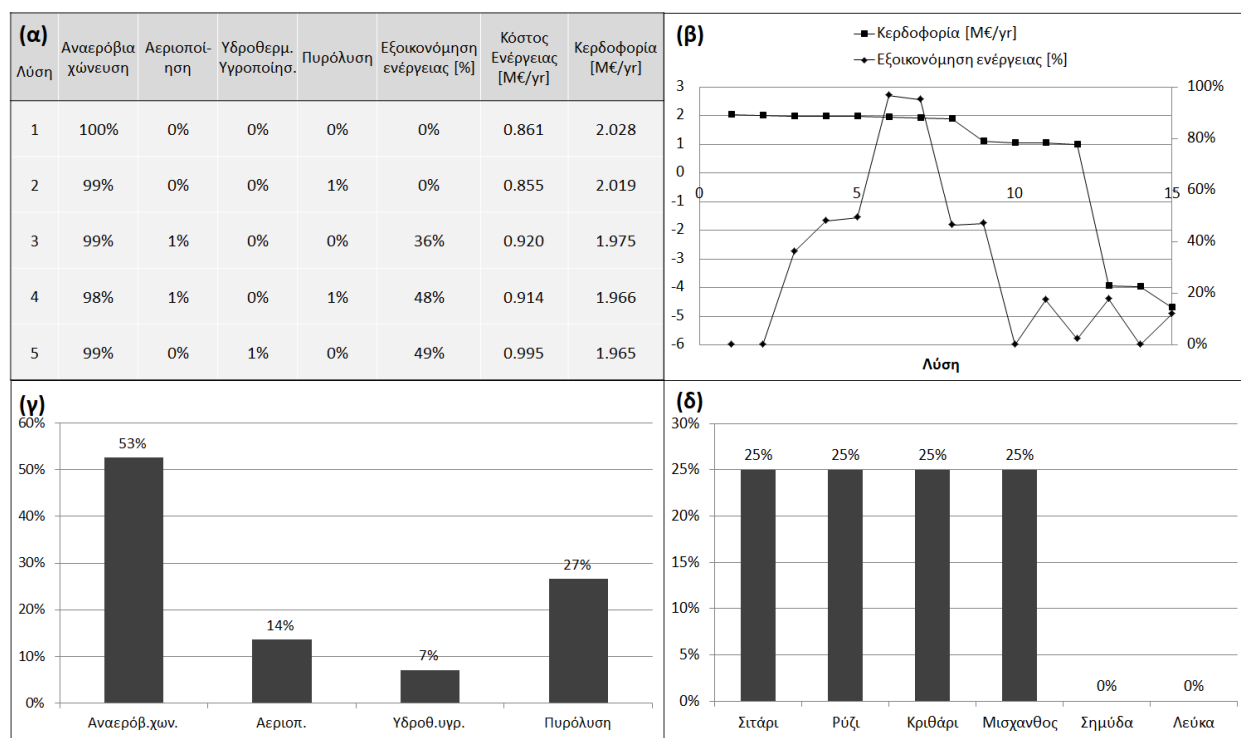
6.4.2. Μελέτη καταλληλότητας ποικιλιών βιομάζας σύμφωνα με κριτήρια κερδοφορίας

Σε όλες τις μελέτες κερδοφορίας υποτέθηκαν αποκλίσεις στις τιμές των προϊόντων κατά -30%, και επιπλέον κόστος επένδυσης και λειτουργίας κατά +30%. Αρχικά το πρόβλημα μελετήθηκε δεσμεύοντας την τροφοδοσία βιομάζας προς τις επιλογές διεργασιών παραγωγής βιοκαυσίμων (αναερόβια χώνευση, αεριοποίηση, υδροθερμική υγροποίηση, πυρόλυση). Τα αποτελέσματα των 5 καλύτερων λύσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.15. Για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας **και** των τεσσάρων διεργασιών υποτέθηκε προμήθεια βιομάζας με μηδενικό κόστος. Το παράδειγμα επαναλήφθηκε για τους 15 συνδυασμούς διεργασιών που προκύπτουν από τις 4 υποψήφιες διεργασίες παραγωγής βιοκαυσίμων.

Τα περιθώρια κερδοφορίας (Σχήμα 6.15α και 6.15β) κυμαίνονται σε πολύ χαμηλές τιμές και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το κόστος ενέργειας. Εν τη απουσία ενεργειακού κόστους, οι διεργασίες κατατάσσονται κατά φθίνουσα σειρά κερδοφορίας, ως εξής: αναερόβια χώνευση, υδροθερμική υγροποίηση, πυρόλυση και αεριοποίηση. Όταν το κόστος ενέργειας λογαριάζεται στον υπολογισμό της κερδοφορίας, η σειρά μεταβάλλεται, ως εξής: αναερόβια χώνευση, πυρόλυση, αεριοποίηση και τέλος η υδροθερμική υγροποίηση. Η κερδοφορία παραμένει σε θετικές τιμές στις 12 πρώτες λύσεις, όπου στο χαρτοφυλάκιο ενσωματώνονται η αναερόβια χώνευση ή/και πυρόλυση, ενώ οι τελευταίες 3 λύσεις, όπου επιλέγονται η υδροθερμική υγροποίηση ή/και η αεριοποίηση, δεν κρίνονται βιώσιμες. Στα γραφήματα προτίμησης (Σχήμα 6.15γ και 6.15δ) εντοπίζονται η αναερόβια χώνευση και η πυρόλυση ως καταλληλότερες επιλογές με συντελεστή προτίμησης 53% και 27%, αντίστοιχα, ενώ μόνον οι ξυλώδεις λιγνοκυτταρινούχες ποικιλίες επιλέγονται (επί ίσοις όροις), καθότι παρουσιάζουν μηδενικό κόστος

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

ξηρανσης, το οποίο επηρεάζει σημαντικά την κερδοφορία. Ακολούθως μελετάται το συνολικό πρόβλημα αντιμετωπίζοντας όλες τις διεργασίες και ποικιλίες ως βαθμούς ελευθερίας του προβλήματος. Η περίπτωση δέσμευσης της τροφοδοσίας μόνον προς την διεργασία κλασμάτωσης και την παραγωγή προϊόντων υψηλής αξίας (όπως εφαρμόστηκε παραπάνω Σχήμα 6.13) δεν έχει νόημα και παραλείπεται, καθότι παράγει τα ίδια αποτελέσματα (σε επαρκή αριθμό 30 καλύτερων θέσεων) με το συνολικό πρόβλημα (όλες οι διεργασίες βαθμοί ελευθερίας), λόγω των πολύ χαμηλών αποδόσεων κερδοφορίας που παρουσιάζουν οι διεργασίες βιοκαυσίμων.

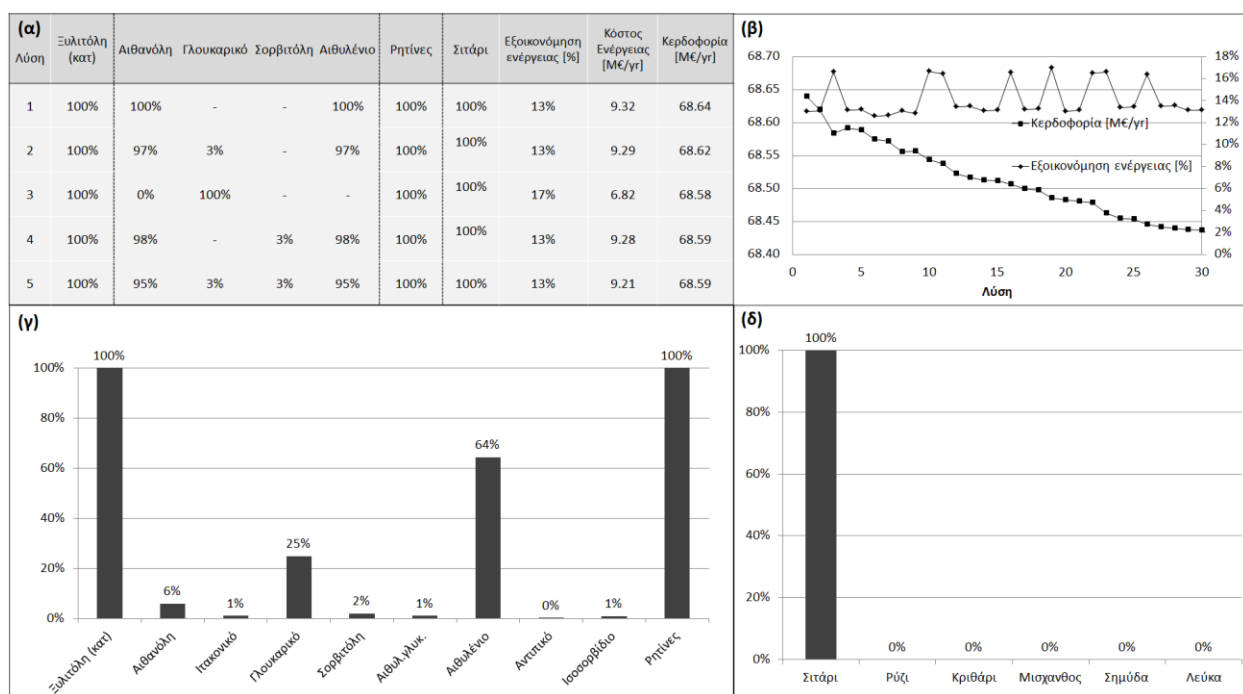


Σχήμα 6.15: Αποτελέσματα προτιμήσεων ποικιλιών και διεργασιών για την παραγωγή βιοκαυσίμων σύμφωνα με κριτήρια κερδοφορίας: (α) χαρτοφυλάκια διεργασιών, (β) κερδοφορία και εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) προτιμήσεις διεργασιών βιοκαυσίμων, (δ) προτιμήσεις ποικιλιών βιομάζας

Τα αποτελέσματα της προσέγγισης δίνουν ξεκάθαρο προβάδισμα στην επιλογή της διεργασίας κλασμάτωσης βιομάζας και την παραγωγή υψηλής αξίας προϊόντων, αποκλείοντας όλα τα βιοκαύσιμα. Στην παρούσα προσέγγιση, το κόστος προμήθειας της βιομάζας συνυπολογίστηκε στην εκτίμηση της κερδοφορίας. Το Σχήμα 6.16 συνοψίζει τα αποτελέσματα του συνολικού προβλήματος.

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

Η επιλογή της κλασμάτωσης βιομάζας αποτελεί αποκλειστική επιλογή σε όλες τις (30 καλύτερες) λύσεις. Από τα αποτελέσματα αναδεικνύεται η παραγωγή ξυλιτόλης (ΚΑΤ), γλουκαρικού οξέος, σορβιτόλης, αιθυλενίου και ρητινών. Στις πρώτες 5 θέσεις (Σχήμα 6.16α), η εξοικονόμηση ενέργειας ανέρχεται στο 13-17%, ενώ το κόστος ενέργειας καθίσταται υπολογίσιμο με ποσοστό 10-14% της κερδοφορίας του βιοδιυλιστηρίου. Στη συντριπτική πλειοψηφία των λύσεων επιλέγονται επίπεδα ατμού πολύ υψηλής πίεσης, 155 °C, 140 °C και 105 °C, ενώ για ψύξη επιλέγεται κρύο νερό και κατάψυξη στους 25 °C, 0 °C και -35 °C. Η ετήσια κερδοφορία κυμαίνεται στα 68 Μ€ για το πλήθος των 30 καλύτερων λύσεων.



Σχήμα 6.16: Αποτελέσματα ποικλιών και διεργασιών για το aBBR του Σχήματος 6.11 σύμφωνα με κριτήρια κερδοφορίας: (α) χαρτοφυλάκια διεργασιών και τροφοδοσιών, (β) κερδοφορία και εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) προτιμήσεις διεργασιών, (δ) προτιμήσεις ποικλιών βιομάζας

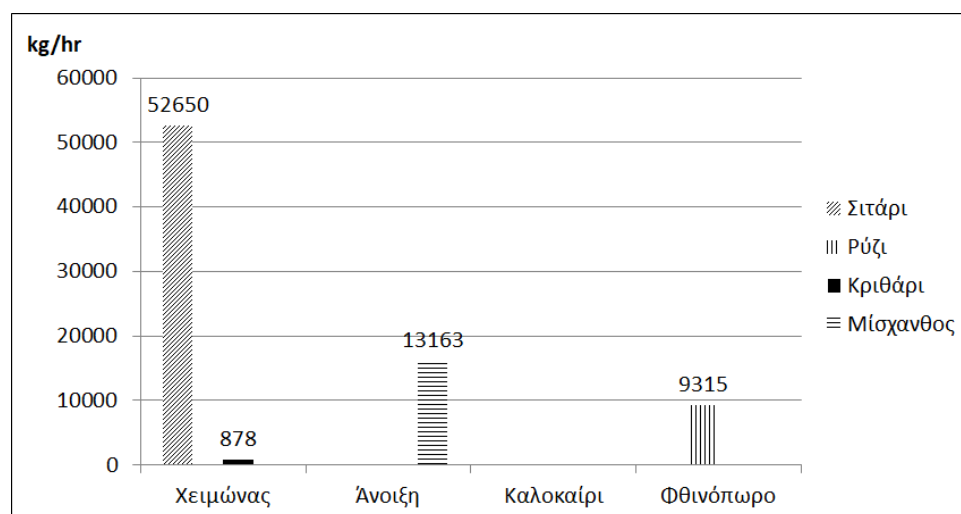
Τα άχυρα σιταριού αποτελούν κυρίαρχη επιλογή για όλες τις 30 καλύτερες λύσεις, καθώς παρουσιάζουν δυο σημαντικά πλεονεκτήματα: (1) παρουσιάζουν την μεγαλύτερη σύσταση (αθροιστικά) σε C5 σάκχαρα και λιγνίνη, από τα οποία παράγονται τα πιο κερδοφόρα προϊόντα ξυλιτόλης και ρητινών, και (2) αποτελεί την πιο φθηνή τροφοδοσία από όλες τις υποψήφιες ποικιλίες. Για την ανάδειξη προτίμησης στις υπόλοιπες ποικιλίες το πρόβλημα επαναλήφθηκε αποκλείοντας κάθε φορά ποικιλίες που επιλέχθηκαν σε προηγούμενες επιλύσεις. Έτσι, μετά το σιτάρι, οι υπόλοιπες

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

τροφοδοσίες κατατάσσονται κατά σειρά φθίνουσας προτίμησης, ως εξής: κριθάρι > μίσχανθος > ρύζι > σημύδα > λεύκα, με την ετήσια κερδοφορία να κυμαίνεται ανά περίπτωση στα 66 Μ€, 65 Μ€, 57 Μ€, 53 Μ€ και 47 Μ€. Επίσης, παρατηρείται ότι στο σύνολο των 30 καλύτερων λύσεων που μελετήθηκαν δεν εντοπίστηκαν κοκτέιλ τροφοδοσιών βιομάζας. Κάθε ποικιλία προτιμάται κατά αποκλειστικότητα, έναντι των υπολοίπων μικρότερης προτίμησης.

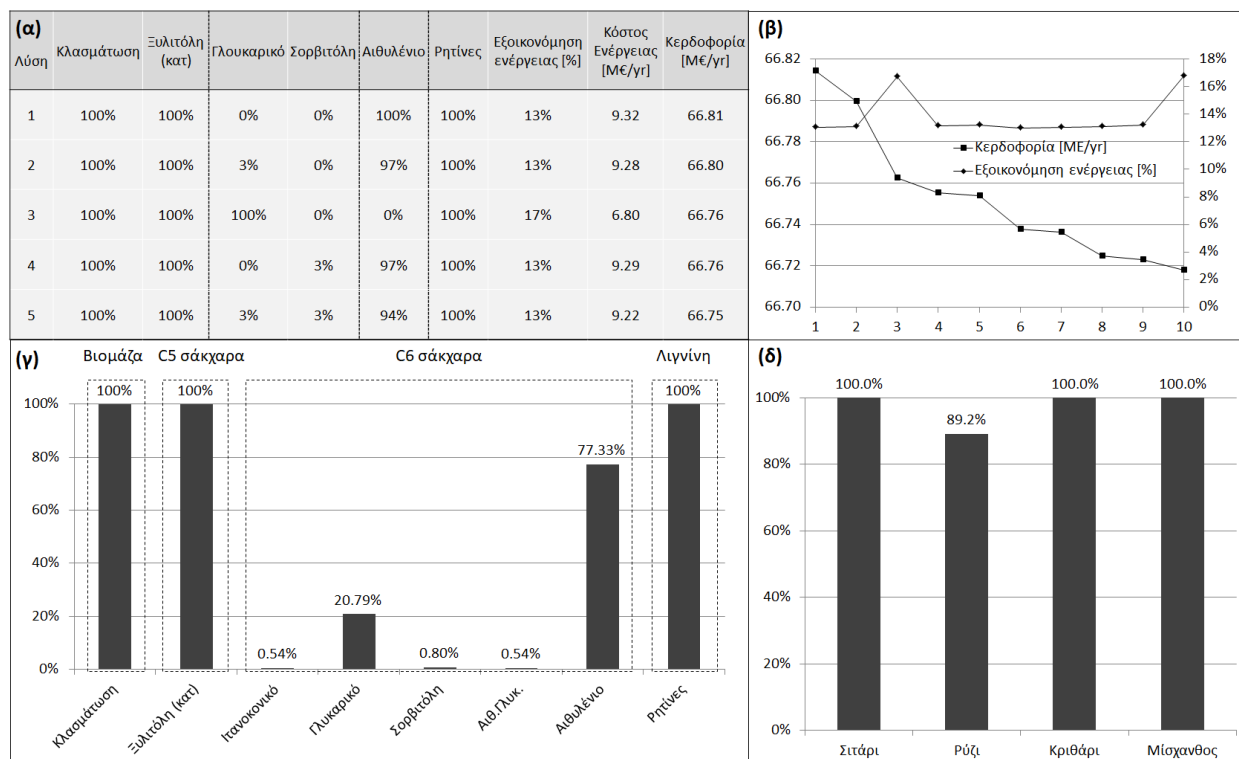
6.4.3. Σχεδιασμός και χρονοπρογραμματισμός ενός βιοδιυλιστηρίου στην Ελλάδα με πραγματικά δεδομένα εποχικότητας ποικιλιών βιομάζας

Το παρόν παράδειγμα αντιμετωπίζει τη ανάπτυξη ενός νέου βιοδιυλιστηρίου στην Ελλάδα, σύμφωνα με τις υποψήφιες επιλογές διεργασιών του aBBR του Σχήματος 6.11. Οι υποψήφιες τροφοδοσίες που μελετώνται αφορούν τα άχυρα σιταριού, ρυζιού και κριθαριού και τον μίσχανθο, οι οποίες υπόκεινται σε εποχική διαθεσιμότητα σύμφωνα με τα στοιχεία του Σχήματος 6.17. Τα δεδομένα εποχικότητας βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα παραγωγής και θερισμού κάθε ποικιλίας (IGB&ΦΠ, ΚΑΠΕ, NL Agency). Για τον υπολογισμό των πραγματικών διαθέσιμων τροφοδοσιών βιομάζας του Σχήματος 6.17, γίνονται οι συντηρητικές υποθέσεις ότι το 55% των παραγόμενων υπολειμμάτων βιομάζας (IGB&ΦΠ, ΚΑΠΕ, NL Agency) παραμένουν στις αγροκαλλιέργειες για την ενίσχυση του εδάφους, ενώ μόνον το υπόλοιπο 50% επιτυγχάνεται να συλλεχθεί, ώστε να διατεθεί στο βιοδιυλιστήριο. Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη χρήση κριτηρίων κερδοφορίας και integer cuts για τον εντοπισμό των 10 καλύτερων λύσεων. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στο Σχήμα 6.18.



Σχήμα 6.17: Εποχική διαθεσιμότητα τροφοδοσιών βιομάζας για την περίπτωση της Ελλάδας

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές



Σχήμα 6.18: Αποτελέσματα ποικιλιών και διεργασιών για την περίπτωση της Ελλάδας σύμφωνα με κριτήρια κερδοφορίας: (α) χαρτοφυλάκια διεργασιών, (β) κερδοφορία και εξοικονόμηση ενέργειας, (γ) προτιμήσεις διεργασιών, (δ) προτιμήσεις ποικιλιών βιομάζας

Τα άχυρα σιταριού και κριθαριού είναι διαθέσιμα την περίοδο του χειμώνα, ενώ ο μίσχανθος την περίοδο της άνοιξης. Επίσης, τα άχυρα ρυζιού διατίθενται την περίοδο του φθινοπώρου. Στο μοντέλο τίθενται περιορισμοί για την μέγιστη δυναμικότητα της τροφοδοσίας στην είσοδο του βιοδιυλιστηρίου στα 18750 kg/hr, που ισοδυναμούν με 150ktn βιομάζας ετησίως. Τα περιθώρια διακύμανσης των εποχικών δυναμικοτήτων των διεργασιών έχουν τεθεί στο 80% της μέγιστης δυναμικότητάς τους. Τα δεδομένα αυτά αντιστοιχούν στις τιμές των παραμέτρων $UB_{t23}^f = 18750$ και $D_p = 20\%$ ($= 100\% - 80\%$) $\forall p \in P$, οι οποίες χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις Eq.6.12, Eq.6.14 και Eq.6.16.

Το πρόβλημα για την περίπτωση της Ελλάδος παρουσιάζει τις ίδιες τάσεις (Σχήματα 6.18γ και 6.18δ) με αυτές που εντοπίστηκαν παραπάνω στο Σχήμα 6.16. Το πιο βιώσιμο χαρτοφυλάκιο διεργασιών αποτελεί την ξυλιτόλη, το γλουκαρικό, το αιθυλένιο και τις ρητίνες, ενώ αποκλείεται η παραγωγή βιοκαυσίμων. Στις 5 πρώτες καλύτερες λύσεις του Σχήματος 6.18α, τα χαρτοφυλάκια αποδίδουν κερδοφορία της τάξης των 66 Μ€ ετησίως, ενώ το ενεργειακό κόστος κυμαίνεται στα 9 Μ€/γρ και η εξοικονόμηση ατμού θέρμανσης λόγω έμμεσης ολοκλήρωσης των εμπλεκόμενων διεργασιών στο 13%.

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

Σε κάθε λύση, το μοντέλο αξιοποίησε κατά το μέγιστο δυνατό το όριο των 18750 kg/hr τροφοδοσίας με σκοπό τη μεγιστοποίηση της παραγωγής και της κερδοφορίας.

Σε όλες τις (10 καλύτερες) λύσεις, οι διαθέσιμες τροφοδοσίες κατάφεραν να καλύψουν οριακά τις ετήσιες ανάγκες του βιοδιυλιστηρίου με το σιτάρι, το κριθάρι και τον μίσχανθο να καταναλώνονται στο 100% (Σχήμα 6.18δ), ενώ οι υπόλοιπες ανάγκες καλύπτονται από το 89% των διαθέσιμων άχυρων ρυζιού. Η επιλογή του ρυζιού ως έσχατη λύση για την κάλυψη των αναγκών βιομάζας οφείλεται στο γεγονός ότι παρουσιάζει τη μικρότερη σύσταση σε σάκχαρα και λιγνίνη και, ως εκ τούτου, τις μικρότερες αποδόσεις παραγωγής, έναντι των άλλων τροφοδοσιών. Οι ροές του βιοδιυλιστηρίου που αφορούν το καλύτερο χαρτοφυλάκιο διεργασιών και τροφοδοσιών (1^η θέση του Σχήματος 6.18α) αναπτύσσεται αναλυτικότερα στο Σχήμα 6.19.

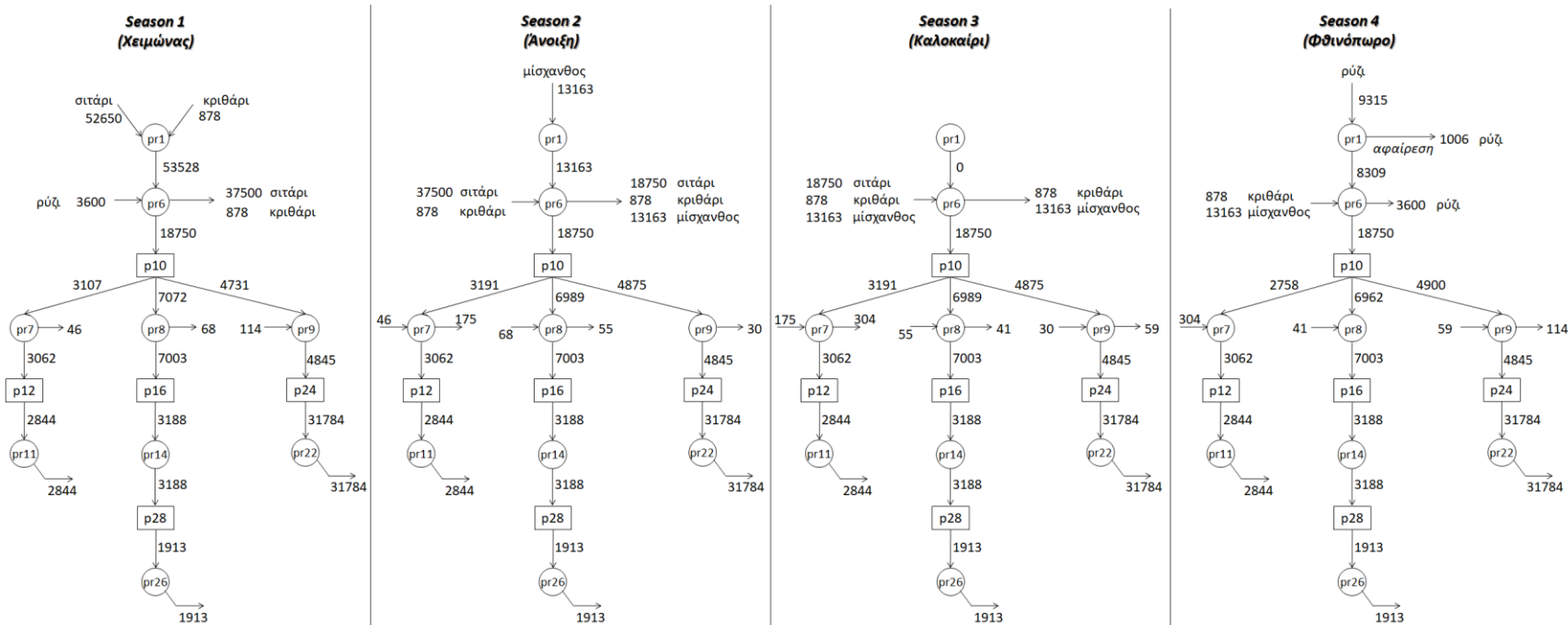
Δεδομένων:

- a. της συνολικής ετήσιας διαθέσιμης τροφοδοσίας
- b. των περιορισμών μέγιστης δυναμικότητας (18750 kg/hr)
- c. της εποχικής διαθεσιμότητας κάθε ποικιλίας και
- d. των διαφορετικών αποδόσεων κάθε ποικιλίας σε C5, C6 σάκχαρα και λιγνίνη

το μοντέλο εντόπισε τις μέγιστες εφικτές ροές που μπορούν να αναπτυχθούν για τα πιο κερδοφόρα προϊόντα και αξιοποίησε αναλόγως τις επιλογές αποθήκευσης τροφοδοσιών και ενδιάμεσων χημικών, ώστε να μεγιστοποιήσει και να σταθεροποιήσει τις ροές των προϊόντων αυτών σε όλες τις εποχές. Για αυτόν τον σκοπό, η χρήση κοκτέιλ ποικιλιών βιομάζας είναι απαραίτητη σε κάθε εποχή.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.19, το πλεονάζον σιτάρι και η μικρή ποσότητα κριθαριού χειμώνα καλύπτουν μεγάλο μέρος των ετήσιων αναγκών. Το σιτάρι καλύπτει τις τροφοδοσίες χειμώνα, άνοιξης και καλοκαιριού, ενώ το κριθάρι χρησιμοποιείται το καλοκαίρι. Οι υπόλοιπες καλύπτονται από τον ανοιξιάτικο μίσχανθο και το φθινοπωρινό ρύζι. Ο μίσχανθος καλύπτει τις ανάγκες καλοκαιριού και το ρύζι χρησιμοποιείται το φθινόπωρο και τον χειμώνα. Επιλογές αποθήκευσης αξιοποιούνται για τα ενδιάμεσα σακχάρων και λιγνίνης, ώστε να σταθεροποιηθούν οι μέγιστες εφικτές ροές εισόδου των κατόντη διεργασιών για την παραγωγή ξυλιτόλης (3062 kg/yr), αιθανόλης (7003 kg/hr), πολυουρεθανών (4845 kg/hr) και αιθυλενίου (3188 kg/hr). Στο Σχήμα 6.20 συνοψίζονται όλες οι πληροφορίες διαχείρισης των τροφοδοσιών και των ενδιάμεσων χημικών του βιοδιυλιστηρίου για κάθε εποχή του έτους.

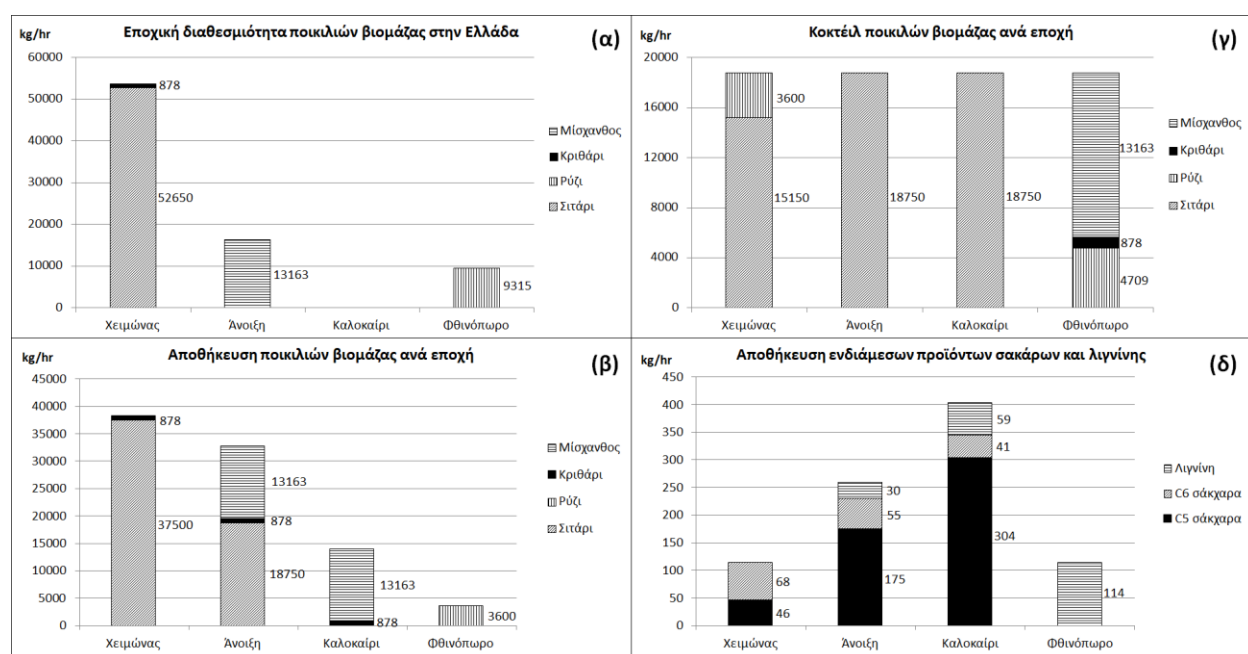
Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές



Σχήμα 6.19: Χρονοπρογραμματισμός λειτουργίας επιλεγμένων διεργασιών και τροφοδοσιών βιομάζας για την περίπτωση της Ελλάδας σύμφωνα με κριτήρια κερδοφορίας

Κεφάλαιο 6. Σύνθεση και χρονο-σχεδιασμός: Σύνθεση και ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας μέσα από εποχικές μεταβολές

Στο Σχήμα 6.20α συνοψίζεται η εποχική διαθεσιμότητα των ποικιλιών βιομάζας, ενώ στο Σχήμα 6.20β παρουσιάζεται η στρατηγική αποθήκευσης κάθε ποικιλίας για τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του βιοδιυλιστηρίου (18750 kg/hr βιομάζας, υγρασίας 15% w/w). Ως αποτέλεσμα της στρατηγικής αποθήκευσης των τροφοδοσιών προκύπτουν τα εποχικά κοκτέιλ βιομάζας του βιοδιυλιστηρίου (Σχήμα 6.20γ), τα οποία σε συνδυασμό με τον προγραμματισμό αποθήκευσης των ενδιάμεσων χημικών (Σχήμα 6.20δ) σακχάρων και λιγνίνης μεγιστοποιούν τις τροφοδοσίες των κατάντη διεργασιών αναβάθμισης. Οι στρατηγικές του Σχήματος 6.20 οδηγούν στις μέγιστες αποδόσεις παραγωγής 2844 kg/hr ξυλιτόλης, 1913 kg/hr αιθυλενίου και 31784 kg/hr πολυουρεθανών, για τις οποίες το ελληνικό βιοδιυλιστήριο αναμένεται να παρουσιάζει κερδοφορία της τάξης των 60-70 Μ€/γρ.



Σχήμα 6.20: Εποχική διαχείριση τροφοδοσιών βιομάζας και χημικών βιοδιυλιστηρίου στην Ελλάδα

Βιβλιογραφία

1. Kokossis, A.C., Tsakalova, M., Pyrgakis, K., 2015. Design of integrated biorefineries. Computers & Chemical Engineering 81, 40–56
2. Pyrgakis, A.K., Kokossis, C.A., 2019. A Total Site Synthesis approach for the selection, integration and planning of multiple-feedstock biorefineries. Computers and Chemical Engineering, 122, 326–355
3. ΙΓΒ&ΦΠ, <http://www.ipgrb.gr/>, (accessed 2 February 2020)
4. ΚΑΠΕ, http://www.cres.gr/cres/files/xrisima/ekdoseis/ekdoseis_GR8.pdf, (accessed 2 February 2020)
5. NL Agency, 2013, Rice straw and Wheat straw Potential feedstocks for the Biobased Economy, Wageningen UR, Food & Biobased Research

Κεφάλαιο 7.

Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

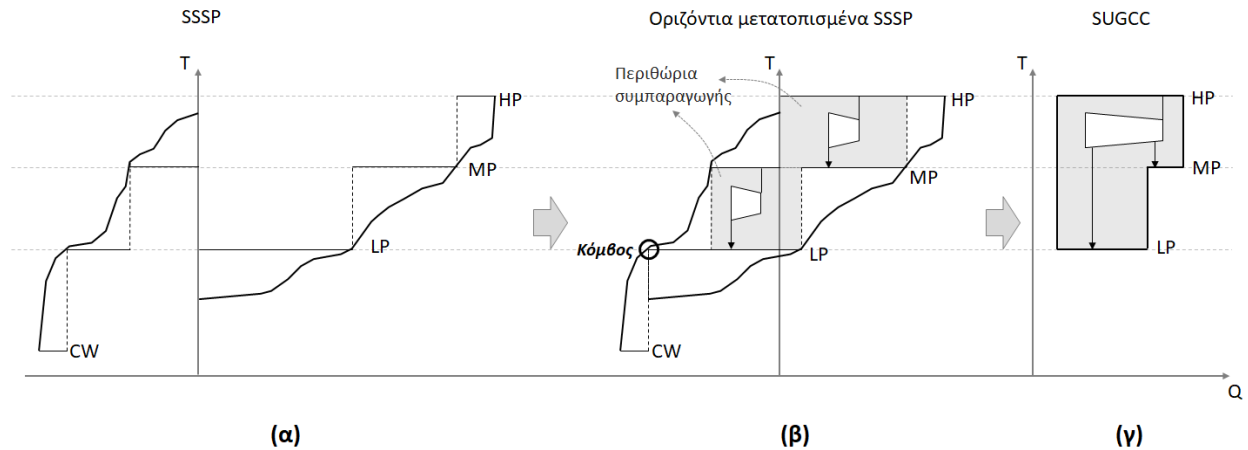
Στη συνήθη μορφή, το κεντρικό σύστημα βοηθητικών παροχών μίας Συνολικής Μονάδας παράγει ατμό υψηλής ή πολύ υψηλής πίεσης (αναλόγως τα θερμοκρασιακά εύρη των ρευμάτων της βιομηχανίας), ο οποίος εκτονώνεται σε χαμηλότερα επίπεδα ατμού (υψηλής, μεσαίας, χαμηλής) σύμφωνα με τις ενεργειακές απαιτήσεις της Συνολικής Μονάδας. Η βιομηχανία εκμεταλλεύεται το γεγονός εκτόνωσης ατμού για την παραγωγή ενδιάμεσων επιπέδων, με σκοπό τη συμπαραγωγή μηχανικού έργου και ηλεκτρικής ενέργειας. Η επιλογή των θερμοκρασιακών επιπέδων ατμού, σε συνδυασμό με τις ποσότητες ατμού που καταρρέουν από υψηλότερα σε χαμηλότερα επίπεδα, καθορίζουν τις αποδόσεις της συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, και ταυτόχρονα τα περιθώρια εξοικονόμησης ατμού λόγω έμμεσης ολοκλήρωσης στα εφαρμοζόμενα επίπεδα ατμού. Ένα από τα στάδια εφαρμογής της ενεργειακής ανάλυσης Συνολικής Μονάδας είναι η εύρεση των βέλτιστων στόχων συμπαραγωγής, ο σχεδιασμός του συστήματος τουρμπίνων και η βελτιστοποίηση των επιπέδων ατμού.

7.1. Εισαγωγή

Τα επίπεδα ατμού παίζουν διττό ρόλο, αφενός καθορίζοντας τις θερμοδυναμικές αποδόσεις των τουρμπίνων παραγωγής έργου, ενώ αφετέρου αποτελούν τις ενεργειακές πύλες έμμεσης ολοκλήρωσης. Είναι λογικό ότι τα επίπεδα που μεγιστοποιούν τις αποδόσεις της μίας περίπτωσης δεν είναι ίδια με αυτά που μεγιστοποιούν τις αποδόσεις της άλλης. Ως εκ τούτου, η ολοκλήρωση Συνολικής Μονάδας ως εργαλείο ενεργειακής στόχευσης των εμπλεκόμενων διεργασιών συνδέεται άρρηκτα με το

πρόβλημα βελτιστοποίησης και σχεδιασμού του συστήματος τουρμπίνων. Το μέγεθος και η πολυπλοκότητα του προβλήματος ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής μεγαλώνει σημαντικά, όταν το πρόβλημα αντιμετωπίζει τις διεργασίες της Συνολικής Μονάδας ως βαθμούς ελευθερίας (αλυσίδες προϊόντων). Η ανάλυση οφείλει να εξετάζει ταυτόχρονα την άμεση και έμμεση ολοκλήρωση μαζί με το πρόβλημα συμπαραγωγής, για την επιλογή διεργασιών που ελαχιστοποιούν το κόστος ενέργειας (ολοκλήρωση) και μεγιστοποιούν τα περιθώρια της κερδοφορίας από τη συμπαραγωγή. Μάλιστα, η εισαγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας ως επιπλέον βασικό εμπορικό προϊόν ενδεχομένως να αντισταθμίσει μέρος των απωλειών που οφείλονται στην οικονομική μεταβλητότητα των ανερχόμενων βιοπροϊόντων και θα τονώσει τα περιθώρια βιωσιμότητας του βιοδιυλιστηρίου.

Η συμβατική γραφική ανάλυση SSSP χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για το υπολογισμό των περιθωρίων εξοικονόμησης ατμού και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Dhole and Linnhoff, 1993; I.Kemp, 2007). Το παράδειγμα του Σχήματος 7.1 παρουσιάζει τη γραφική διαδικασία εκτίμησης της συμπαραγωγής έργου μίας Συνολικής Μονάδας. Το SSSP (Σχήμα 7.1α) αποτυπώνει τις ανάγκες βοηθητικών παροχών των θερμών-ψυχρών ρευμάτων ενός δεδομένου χαρτοφυλακίου διεργασιών και επιπέδων ατμού (υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσης). Μετά από οριζόντια μετατόπιση των δύο γραμμών πηγών και καταβοθρών (Σχήμα 7.1β), έως ότου συναντηθούν στον Κόμβο Ανάσχεσης της Συνολικής Μονάδας, εντοπίζονται τα μέγιστα περιθώρια κατάρρευσης ατμού για παραγωγή έργου (γκρι περιοχές) με χρήση τουρμπίνων. Το πρόβλημα μελέτης της συμπαραγωγής και σχεδιασμού του συστήματος τουρμπίνων αντιμετωπίζεται μέσω της ξεχωριστής αναπαράστασης των Site Utility Grand Composite Curves (εφεξής SUGCC) του Σχήματος 7.1γ, το οποίο αποτελεί υποσύνολο του συνολικού ενεργειακού προφίλ του SSSP. Η παρούσα γραφική ανάλυση χρησιμοποιείται εκτενώς για την εύρεση των στόχων της συμπαραγωγής και το σχεδιασμό των κυλίνδρων των τουρμπίνων της Συνολικής Μονάδας.



Σχήμα 7.1: Διάγραμμα SSSP (α), Περιθώρια συμπαραγωγής (β), Διάγραμμα SUGCC (γ).

Ωστόσο, οι συνθήκες και οι προϋποθέσεις της γραφικής ανάλυσης SUGCC δεν αντικατοπτρίζουν και δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν τις πραγματικές προκλήσεις που παρουσιάζονται σε προβλήματα αλυσίδων προϊόντων. Το πρόβλημα σύνθεσης διεργασιών παράγει άπειρα υποψήφια SSSP, καθένα από τα οποία αφορά μία διαφορετική Συνολική Μονάδα με διαφορετικές αποδόσεις περιθωρίων συμπαραγωγής και εξοικονόμησης ενέργειας, όπως συζητήθηκε εκτενώς στα προηγούμενα Κεφάλαια 3 και 4. Η λύση του προβλήματος ενεργειακής στόχευσης και αξιολόγησης όλων των υποψήφιων Συνολικών Μονάδων δόθηκε στο Κεφάλαιο 5 με τη συνδυαστική χρήση των μοντέλων BBR-ICT ή BBR-CIT. Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η επέκταση των δυνατοτήτων των αναβαθμισμένων μοντέλων μεταφόρτωσης για την συστηματική εκτίμηση της συμπαραγωγής με σκοπό την ολιστική μελέτη του προβλήματος σύνθεσης, ολοκλήρωσης και σχεδιασμού τουρμπίνων. Εφόσον η ανάλυση εφαρμόζεται αντιμετωπίζοντας τις επιλογές κάθε επιμέρους προβλήματος (σύνθεσης, ολοκλήρωσης, συμπαραγωγής) ως βαθμούς ελευθερίας, μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε περίπτωση προβλημάτων στα οποία ισχύουν δεδομένες επιλογές, όπως π.χ. δεδομένες διεργασίες ή δεδομένα επίπεδα ατμού.

7.2. Συμβατικές τεχνικές αναπαράστασης του προβλήματος

Δεδομένης μίας αλυσίδας υποψήφιων προϊόντων, και της απουσίας αυτοματοποίησης της γραφικής ανάλυσης (SSSP) έως τώρα στη βιβλιογραφία, καθίσταται αναγκαία η εξαντλητική και χειροκίνητη κατασκευή σεναρίων SSSP (βλ. Σχήμα 3.4) με σκοπό τη προσέγγιση, αλλά όχι τον ακριβή εντοπισμό, βέλτιστων αποδόσεων ενεργειακής κατανάλωσης και συμπαραγωγής. Στην συντριπτική πλειοψηφία

των περιπτώσεων γίνεται χρήση της γραφικής διαδικασίας (Dhole and Linnhoff, 1993; Linnhoff and Dhole, 1993; Dhole and Linnhoff, 1994; Liew et al., 2013) και ο σχεδιασμός επικεντρώνεται στη μελέτη συγκεκριμένων χειροκίνητων μεταβολών (ρευμάτων, διεργασιών, επιπέδων ατμού) παραβλέποντας τους άπειρους συνδυασμούς που προκύπτουν κατά την ολιστική αντιμετώπιση του προβλήματος και τη συνδυαστική μελέτη όλων των βαθμών ελευθερίας. Πολλές προσπάθειες συστηματοποίησης της διαδικασίας οδηγούν σε αλγορίθμους πολλαπλών-σταδίων (Petroulas and Reklaitis, 1984; Chou and Shih, 1987; Ghannadzadeh et al., 2012; Manesh et al., 2013; Tarighaleslami et al., 2017; Douglas and Alabo, 2018), οι οποίοι στα πλαίσια μαθηματικής μοντελοποίησης και αυτοματοποίησης της διαδικασίας οδηγούν σε μεγάλα και πολύπλοκα MINLPs που παρουσιάζουν δυσκολίες στην παραμετροποίηση των συνθηκών. Άλλα γραμμικά μοντέλα σχεδιασμού (Colmenares and Seider, 1989; Papoulias and Grossmann, 1993a,b,c; Mavromatis and Kokossis, 1998; Varbanov et al., 2004; Shang and Kokossis, 2004; Medina and Nunez, 2010) χρησιμοποιούνται ευρέως για την εκτίμηση της συμπαραγωγής, τα οποία ωστόσο εφαρμόζονται μόνο για δεδομένες επιλογές διεργασιών, ενώ σε ειδικές συνθήκες λειτουργίας τουρμπίνων παρουσιάζουν μειωμένη ακρίβεια στην εκτίμηση της ισεντροπικής απόδοσης.

Η συμπαραγωγή έχει αντιμετωπιστεί στη βιβλιογραφία αποκλειστικά από την οπτική γνωστών και δεδομένων διεργασιών και ρευμάτων, και μάλιστα, πολύ συχνά ακόμα και για γνωστά/δεδομένα φορτία και επίπεδα ατμού (βλ. SUGCC του Σχήματος 7.1γ). Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν εντοπίζεται κανένα γενικευμένο, γραμμικό και συντομευμένο μοντέλο για την ολιστική αντιμετώπιση του πραγματικού συνδυαστικού προβλήματος σύνθεσης, ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής, το οποίο να αντιμετωπίζει ταυτόχρονα (και μάλιστα με γενικευμένο τρόπο) όλους τους βαθμούς ελευθερίας: διεργασίες/ρεύματα, αποδόσεις άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης, επίπεδα ατμού και συμπαραγωγή.

Κύρια πρόκληση υπολογισμού της συμπαραγωγής είναι η εμφάνιση μη-γραμμικοτήτων της απόδοσης με τη φόρτωση ατμού της τουρμπίνας. Για τον υπολογισμό της συμπαραγωγής πρέπει να ληφθούν υπόψη βασικοί σχεδιαστικοί παράγοντες, όπως το μέγεθος (διαστασιολόγηση), η φόρτωση και οι συνθήκες λειτουργίας (θερμοκρασία και πίεση εισόδου-εξόδου) της τουρμπίνας. Αυτοί οι όροι αναπτύσσουν μη-γραμμικές συσχετίσεις μεταξύ τους καταλήγοντας σε πολύπλοκα μοντέλα και μαθηματικές διατυπώσεις. Το μέγεθος και η πολυπλοκότητα τέτοιων προβλημάτων μεγαλώνει εκθετικά, όταν το πρόβλημα αφορά μεταβολές στις διεργασίες με αποτέλεσμα να προστίθενται επιπλέον μη-γραμμικοί όροι στο συνολικό πρόβλημα σύνθεσης, ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής. Παρά το πλήθος προγραμματιστικών προσεγγίσεων, η γραφική ανάλυση επί των SUGCC (Σχήμα 7.1.γ)

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

πρωτοστατεί λόγω της ευκολίας στην απεικόνιση των βοηθητικών παροχών της Συνολικής Μονάδας και την ανάπτυξη μοντέλων για την σύνθεση τουρμπίνων και τη βελτιστοποίηση της συμπαραγωγής. Ωστόσο αδυνατεί να αντιμετωπίσει με συστηματικό τρόπο την επιλογή επιπέδων ατμού, και διαφοροποιήσεις στα φορτία ατμού της Συνολικής Μονάδας, οι οποίες μπορεί να οφείλονται είτε σε αλλαγές των εμπλεκόμενων διεργασιών είτε στην επιλογή εναλλακτικών στρατηγικών έμμεσης ολοκλήρωσης και επιλογής επιπέδων.

Η μη-γραμμικότητα της ισεντροπικής απόδοσης με τη ροή ατμού φαίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις Eq.7.2 και Eq.7.3. Εξορισμού η ισεντροπική απόδοση υπολογίζεται ως:

$$n_{is,max} = \frac{\overline{\Delta H}_{real}}{\overline{\Delta H}_{is}} \quad Eq. 7.1$$

ή αλλιώς

$$n_{is,max} = \frac{E^{max}}{\overline{\Delta H}_{is} \cdot M^{max}} \quad Eq. 7.2$$

ή αλλιώς

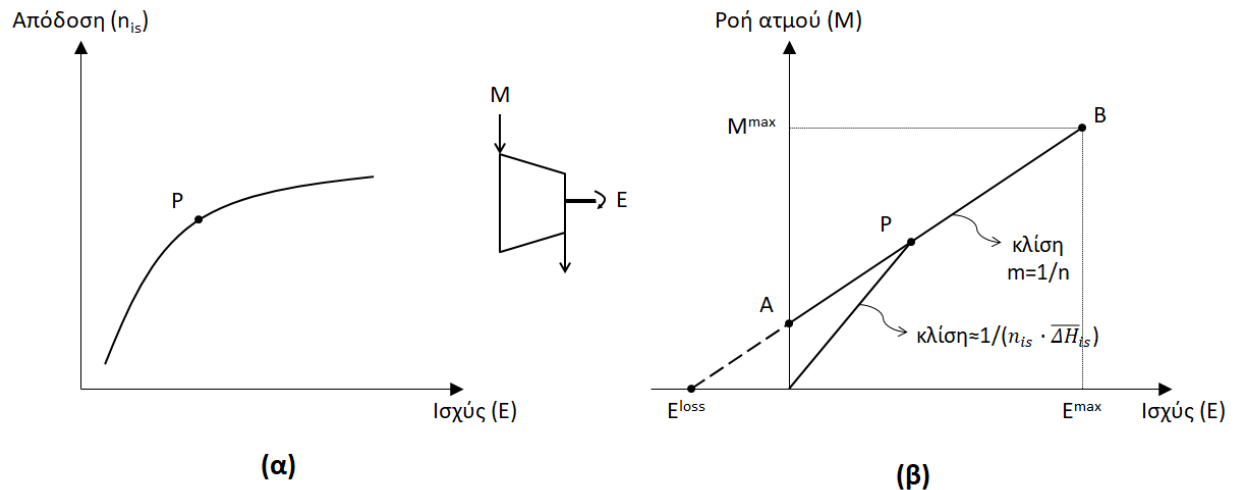
$$E^{max} = n_{is,max} \cdot \overline{\Delta H}_{is} \cdot M^{max} \quad Eq. 7.3$$

όπου $n_{is,max}$ η ισεντροπική απόδοση, $\overline{\Delta H}_{real}$ και $\overline{\Delta H}_{is}$ [MWh/tn] η πραγματική και ισεντροπική μεταβολή ενθαλπίας, E^{max} [MW] η μέγιστη παραγόμενη ισχύς και M^{max} [tn/hr] η μέγιστη ροή ατμού στην είσοδο του κυλίνδρου της τουρμπίνας. Η μη-γραμμικότητα απόδοσης-ροής ατμού είναι ισοδύναμη με αυτή της απόδοσης-ισχύος, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.2α. Η γραμμή Willan (Willan's line) αποτελεί μία προσεγγιστική γραμμική συσχέτιση μεταξύ της παραγόμενης ισχύος με τη ροή ατμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.2.β, η οποία παίρνει τη μορφή:

$$M = m \cdot E + C \quad Eq. 7.4$$

ή αλλιώς

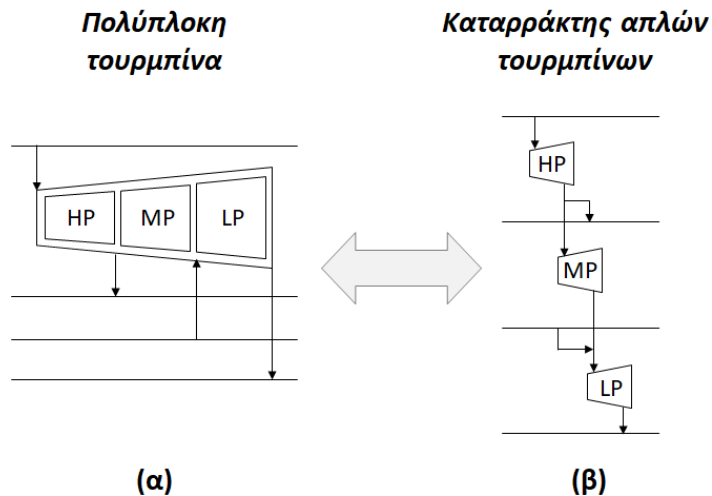
$$E = n \cdot M - E^{loss} \quad Eq. 7.5$$



Σχήμα 7.2: Διάγραμμα ισηντροπικής απόδοσης-ισχύος (α), Willan's line (β)

Το σημείο A του Σχήματος 7.2β αναπαριστά την ελάχιστη ροή ατμού που απαιτείται για να υπερνικήσει τις εσωτερικές απώλειες τριβής (E^{loss}) εντός της τουρμπίνας, μέχρι η τουρμπίνα να αρχίσει να παράγει έργο. Αυτή η ποσότητα ατμού αντικατοπτρίζεται μέσω της σταθεράς C της Eq.7.4. Το σημείο B αφορά τη μέγιστη ροή ατμού και χωρητικότητα της τουρμπίνας κατά την οποία αποδίδεται η μέγιστη ισχύς. Σε κάθε ενδιαμέσο σημείο λειτουργίας P της γραμμής Willan (Σχήμα 7.2β), η αναλογία ροής ατμού προς την ισχύ προσεγγίζει την ισηντροπική απόδοση της τουρμπίνας (Σχήμα 7.2.α) αποτυπώνοντας εμμέσως τη μη-γραμμικότητα του προβλήματος.

Η γραμμική προσέγγιση της Eq.7.5 αφορά απλές τουρμπίνες μίας εισόδου και μίας εξόδου ατμού. Με σκοπό την επέκταση της μεθόδου για το σχεδιασμό σύνθετων τουρμπίνων (Σχήμα 7.3α), οι σύνθετες διατάξεις αντιμετωπίζονται ως μία σειρά κυλίνδρων εκτόνωσης που λειτουργούν σε διαδοχικά επίπεδα ατμού μεταξύ των οποίων εισάγεται-εξάγεται ατμός (Manromatis and Kokossis, 1998). Σε αυτή τη βάση, κάθε σχήμα σύνθετων τουρμπίνων μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένας καταρράκτης απλών τουρμπίνων, οι κύλινδροι των οποίων λειτουργούν μεταξύ των επιπέδων της σύνθετης τουρμπίνας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.3β.



Σχήμα 7.3: (α) Κύλινδροι σύνθετης τουρμπίνας, (β) ισοδύναμος καταρράκτης απλών τουρμπίνων

Η λειτουργία κάθε κυλίνδρου της σύνθετης τουρμπίνας θεωρείται ισοδύναμη με τη λειτουργία μίας απλής τουρμπίνας ενός κυλίνδρου και μίας εισόδου-εξόδου μεταξύ των αντίστοιχων επιπέδων ατμού που διαχειρίζεται (Chou and Shih, 1987). Το γραμμικό μοντέλο της Eq.7.5 μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε στοιχείο του καταρράκτη απλών τουρμπίνων σύμφωνα με το μέγεθος, το φορτίο ατμού και τις συνθήκες λειτουργίας που χαρακτηρίσουν τη λειτουργία του στοιχείου. Η συνολική αποδιδόμενη ισχύς της σύνθετης τουρμπίνας θεωρείται ίση με το άθροισμα των αποτελεσμάτων ισχύος όλων των επιμέρους κυλίνδρων (απλών τουρμπίνων) του (ισοδύναμου) καταρράκτη.

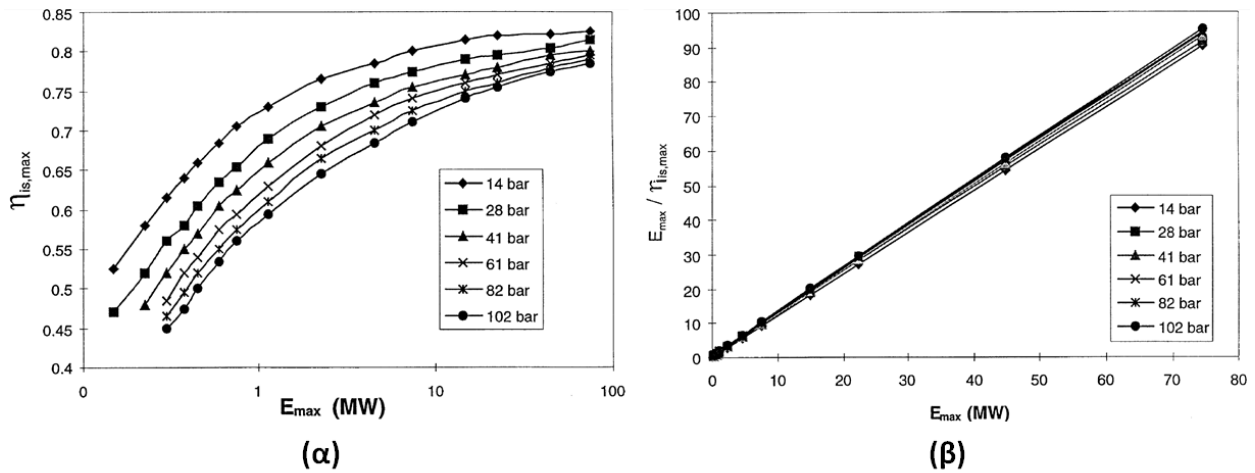
Η εφαρμογή του μοντέλου Eq.7.5 απαιτεί πληροφορίες για τον υπολογισμό της κλίσης, n , και των απωλειών, E^{loss} . Βασισμένοι στις υποθέσεις της γραμμής Willan του Σχήματος 7.2 και του σχήματος κατανομής της λειτουργίας σύνθετων τουρμπίνων του Σχήματος 7.3, οι Manromatis and Kokossis (1998) πρότειναν ένα γραμμικό και συντομευμένο μοντέλο (Turbine Hardware Model, εφεξής THM) υπολογισμού της συμπαραγωγής σε κάθε ζώνη εκτόνωσης του καταρράκτη.

Η ιδέα βασίζεται στην αξιοποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων των Peterson and Mann (1985) για την εξαγωγή γραμμικών συσχετίσεων μεταξύ την ισεντροπικής απόδοσης και της ισχύος. Τα πειραματικά αποτελέσματα του Σχήματος 7.4α αποτυπώνουν τη μη-γραμμικότητα του προβλήματος. Ύστερα από μετασχηματισμό των πειραματικών αποτελεσμάτων στη μορφή του Σχήματος 7.4β μπορούν να εξαχθούν οι ακόλουθες γραμμικές προσεγγίσεις:

$$\frac{E^{max}}{n_{is,max}} = A + B \cdot E^{max} \quad (\text{βάσει Σχήματος 7.4β}) \quad Eq. 7.6$$

και βάσει της Eq.7.2:

$$\frac{E^{max}}{n_{is,max}} = \overline{\Delta H}_{is} \cdot M^{max} = A + B \cdot E^{max} \quad Eq. 7.7$$



Σχήμα 7.4: Πειραματικά αποτελέσματα τουρμπίνων των Peterson and Mann (1985) (α) και μετασχηματισμός αποτελεσμάτων (β) από Μανροματίς and Κοκοσσίς (1998)

Ύστερα από το συνδυασμό των Eq.7.5 και Eq.7.7 και υποθέτοντας ότι οι απώλειες της τουρμπίνας αποτελούν το 20% της μέγιστης ισχύος, δηλαδή: $E^{loss} = 0.2 \cdot E^{max}$, τότε οι παράμετροι της γραμμής Willan υπολογίζονται, ως εξής:

$$n = \frac{6}{5} \cdot \frac{1}{B} \cdot \left(\overline{\Delta H}_{is} - \frac{A}{M^{max}} \right) \quad Eq. 7.8$$

$$E^{loss} = \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{B} \cdot (\overline{\Delta H}_{is} \cdot M^{max} - A) \quad Eq. 7.9$$

και η γραμμή Willan (Eq.7.5) παίρνει τη τελική μορφή:

$$E = \frac{6}{5} \cdot \frac{1}{B} \cdot \left(\overline{\Delta H}_{is} - \frac{A}{M^{max}} \right) \cdot \left(M - \frac{1}{6} \cdot M^{max} \right) \quad Eq. 7.10$$

όπου E η ισχύς της τουρμπίνας σε μερική φόρτωση, M , όπου $\frac{1}{6} \cdot M^{max} \leq M \leq M^{max}$.

Θέτοντας $M = M^{max}$, τότε η Eq.7.10 καταλήγει στη μορφή:

$$E^{max} = \frac{1}{B} (\overline{\Delta H}_{is} \cdot M^{max} - A) \quad Eq. 7.11$$

η οποία περιγράφει τη λειτουργία της τουρμπίνας στη μέγιστη δυναμικότητα (μέγιστη φόρτωση M^{max}) και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της μέγιστης απόδοσης ισχύος (E^{max}) σε κάθε ζώνη εκτόνωσης. Τα A και B προκύπτουν από παλινδρόμηση των πειραματικών δεδομένων του Σχήματος 7.4β και υπολογίζονται (Mavromatis and Kokossis, 1998), ως εξής:

$$A = a_0 + a_1 \cdot T_{in}^{sat} \quad Eq. 7.12$$

$$B = a_2 + a_3 \cdot T_{in}^{sat} \quad Eq. 7.13$$

όπου a_0 - a_3 οι συντελεστές παλινδρόμησης και T_{in}^{sat} η θερμοκρασία κορεσμού του ατμού στην πίεση εισόδου της τουρμπίνας, τα δεδομένα της οποίας παλινδρομούνται, σύμφωνα με τους Mavromatis and Kokossis (1998). Στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται εναλλακτικές προσεγγίσεις υπολογισμού των A και B , οι οποίες αντικαθιστούν την T_{in}^{sat} (Mavromatis and Kokossis, 1998) με τη διαφορά θερμοκρασίας κορεσμού, ΔT^{sat} , στην είσοδο-έξοδο της τουρμπίνας (Varbanov et al., 2004) ή με την πίεση του ατμού στην είσοδο, P^{in} , (Medina et al., 2010). Αναλόγως σε κάθε προσέγγιση, μεταβάλλονται οι τιμές των παραμέτρων a_0 , a_1 , a_2 και a_3 και η ακρίβεια της Eq.7.11.

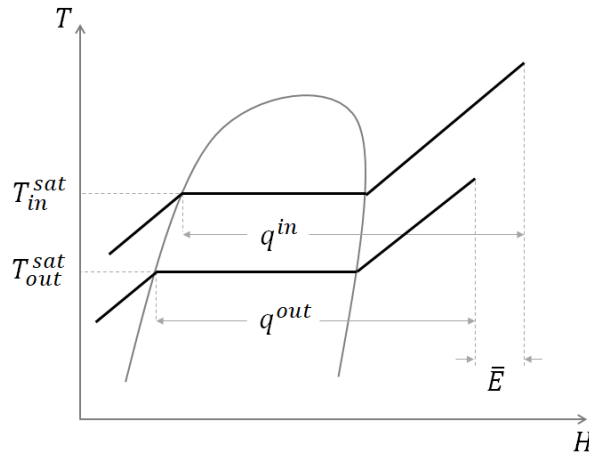
Η ισεντροπική μεταβολή ενθαλπίας, $\overline{\Delta H}_{is}$, υπολογίζεται από την εξίσωση του Singh (1997), ως εξής:

$$\overline{\Delta H}_{is} = \frac{\Delta T^{sat}}{1854 - 1931 \cdot q^{in}} \quad Eq. 7.14$$

όπου q^{in} το ειδικό φορτίο θερμότητας του ατμού και σύμφωνα με το Σχήμα 7.5 υπολογίζεται από την:

$$q^{out} = q^{in} + c_p \cdot \Delta T^{sat} - \frac{E^{max}}{M^{max}} \quad Eq. 7.15$$

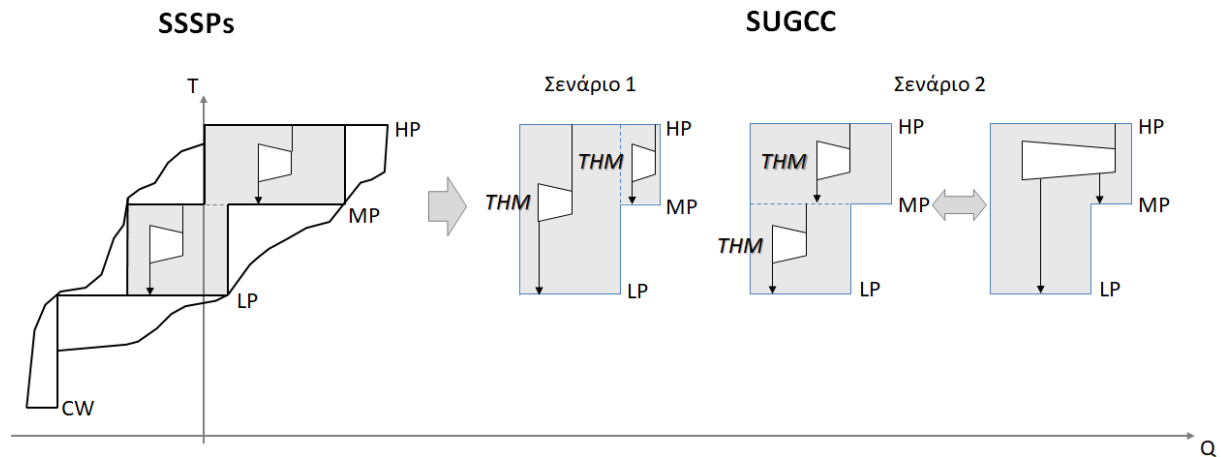
όπου c_p η θερμοχωρητικότητα του νερού, q^{out} και q^{in} η ειδική ενθαλπία στην είσοδο και έξοδο της τουρμπίνας και $\bar{E} = \frac{E^{max}}{M^{max}}$ η ειδική παραγόμενη ισχύς της τουρμπίνας. Για έναν καταρράκτη απλών τουρμπίνων, η ειδική ενθαλπία εξόδου μίας τουρμπίνας, μαζί με την ενθαλπία του παραγόμενου ατμού που εισέρχεται στο αντίστοιχο επίπεδο, αποτελούν την ειδική ενθαλπία στην είσοδο της επόμενης τουρμπίνας του καταρράκτη τουρμπίνων. Η ειδική ενθαλπία στην είσοδο της πρώτης τουρμπίνας είναι συνήθως γνωστή και αφορά ατμό πολύ υψηλής πίεσης (π.χ. 90 bar και 500 °C), για τον οποίο ισχύει: $q_{VHP}^{in} = 0.557$ MWh/tn ατμού.



Σχήμα 7.5: Ειδικό φορτίο θερμότητας (q^{in}) ατμού στην είσοδο-έξοδο της τουρμπίνας

Οι εξισώσεις Eq.7.11-Eq.7.15 απαρτίζουν το THM για την εκτίμηση της συμπαραγωγής ενός καταρράκτη απλών τουρμπίνων. Η εξίσωση Eq.7.11 αφορά το σχεδιασμό κάθε κυλίνδρου της σύνθετης τουρμπίνας, οι οποίοι αποτυπώνονται στον καταρράκτη απλών τουρμπίνων και λειτουργούν στη μέγιστη δυναμικότητα. Αυτή η συνθήκη είναι αρκετή για προβλήματα, τα οποία δεν υπόκεινται σε χρονικές μεταβολές, και η δυναμικότητα των τουρμπίνων δεν μεταβάλλεται. Εφόσον η ροή ατμού στην είσοδο κάθε κυλίνδρου δεν μεταβάλλεται, τότε κάθε κύλινδρος θα λειτουργεί με σταθερή ροή, η οποία αντικατοπτρίζει τη μέγιστη χωρητικότητα της τουρμπίνας, και ως εκ τούτου μπορεί να χρησιμοποιηθεί η απλοποιημένη και γραμμική εξίσωση Eq.7.11, αντί της Eq.7.10.

Το ενεργειακό φορτίο του ατμού που εκτονώνεται σε κάθε επίπεδο εισάγεται έμμεσα μέσω του όρου $M^{max} = \frac{Q^{max}}{q^{in}}$, όπου Q^{max} το φορτίο θερμότητας του ατμού. Για μία δεδομένη/γνωστή Συνολική Μονάδα και ένα δοσμένο σύστημα επιπέδων ατμού, τα διαθέσιμα ενεργειακά φορτία ατμού σε κάθε επίπεδο είναι γνωστά και τα Q^{max} σε κάθε επίπεδο ατμού αποτυπώνονται στο γράφημα SUGCC, όπως στο Σχήμα 7.6. Το μοντέλο Eq.7.11-Eq.7.15 εφαρμόζεται για τις ενεργειακές ροές που αποτυπώνονται επί των SUGCC και την εκτίμηση της συμπαραγωγής σε κάθε ζώνη εκτόνωσης, καθώς και για την ανάπτυξη σεναρίων λειτουργίας της σύνθετης τουρμπίνας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.6.



Σχήμα 7.6: Εφαρμογή THM για την αξιολόγηση σεναρίων για δεδομένες διεργασίες Συνολικής Μονάδας και επίπεδα ατμού

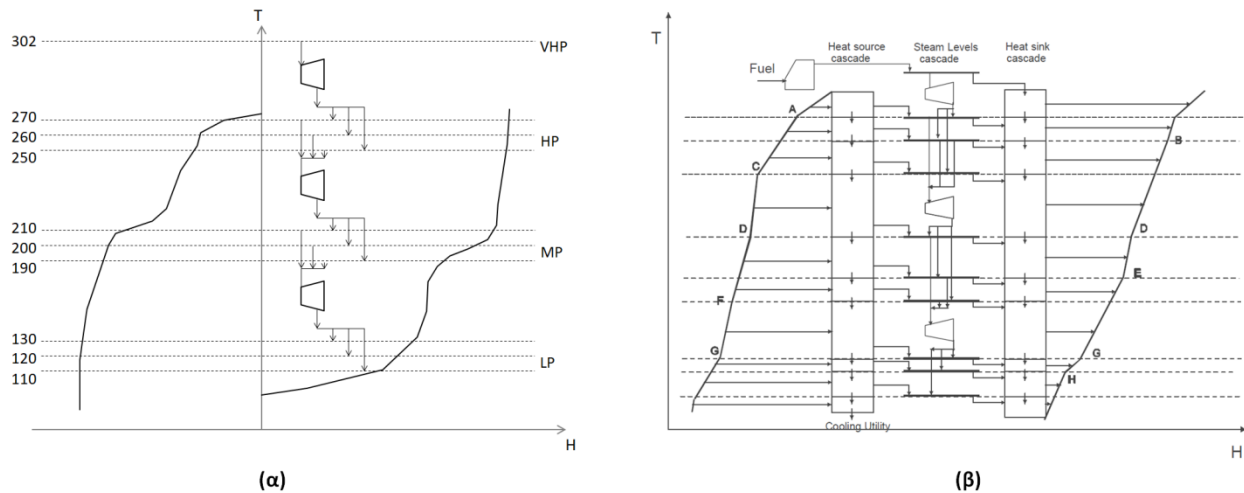
Στο Σχήμα 7.6, το THM εφαρμόζεται ξεχωριστά για τα εναλλακτικά σενάρια ροής ατμού μεταξύ των εμπλεκόμενων επιπέδων με σκοπό την εκτίμηση της συνολικής συμπαραγωγής ισχύος και το κόστος επένδυσης της/ων τουρμπίνας/ων για κάθε σενάριο λειτουργίας. Το Σενάριο 1 περιγράφει τη χρήση δύο διαφορετικών τουρμπίνων μίας εισόδου-εξόδου, κάθε μία από τις οποίες λειτουργεί με ατμό υψηλής πίεσης. Το Σενάριο 2 περιγράφει μία εναλλακτική λύση ολοκλήρωσης των δύο τουρμπίνων σε μία σύνθετη τουρμπίνα μίας εισόδου και δύο εξόδων, όπου μέρος της εξόδου του πρώτου κυλίνδρου εισέρχεται στον δεύτερο κύλινδρο.

Στα πλαίσια μαθηματικής διατύπωσης και αυτοματοποίησης της διαδικασίας υπολογισμού της συμπαραγωγής, το THM παραμένει μη-γραμμικό λόγω της εξίσωσης (Eq.7.15) υπολογισμού της ειδικής ενθαλπίας εισόδου. Για σκοπούς διατήρησης της γραμμικότητας του THM, συχνά γίνεται η υπόθεση σταθερής $q^{in}=0.557$ MWh/tn (90 bar, 500 °C) σε κάθε επίπεδο λειτουργίας, ίση δηλαδή με αυτή του ατμού πολύ υψηλής πίεσης (Manromatis and Kokossis, 1998; Shang and Kokossis, 2004), αναμένοντας να μην επηρεάζονται σημαντικά τα αποτελέσματα ισχύος σε κάθε επίπεδο. Έτσι, η Eq.7.15 εκφυλίζεται και το γραμμικό μοντέλο συμπαραγωγής απαρτίζεται από τις Eq.7.11-Eq.7.14.

Όσον αφορά την επιλογή επιπέδων, το μοντέλο θα μπορούσε να ανασκευασθεί θεωρώντας την πίεση ως συνεχή μεταβλητή καταλήγοντας σε μεγάλα και πολύπλοκα μη-γραμμικά προβλήματα, τα οποία δεν ενδείκνυνται για τη εύρεση ενεργειακών στόχων σε πρώιμα στάδια σχεδιασμού. Εναλλακτικά, η συνήθης πρακτική (Shang and Kokossis, 2004; Koufolioulis et al., 2014) χρησιμοποιεί ένα σύνολο υποψήφίων επιπέδων γύρω από κάθε επίπεδο υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσης, για το οποίο

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

εξετάζονται οι αποδόσεις συμπαραγωγής για κάθε συνδυασμό επιπέδων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.7α. Σε αυτό το πλαίσιο ολοκλήρωσης, οι Shang and Kokossis (2004) παρουσιάζουν ένα μοντέλο μαθηματικής διατύπωσης των ισοζυγίων ενέργειας κατά μήκος των γραμμών του SSSP για σκοπούς μελέτης της συμπαραγωγής σε γνωστές Συνολικές Μονάδες.



Σχήμα 7.7: Σκαρήφιμα υποψήφιων επιπέδων σε κάθε περιοχή υψηλής (HP), μέσης (MP) και χαμηλής (LP) πίεσης ατμού (α) και αναπαράσταση τριπλού-καταρράκτη (β) (από Shank and Kokossis, 2004)

Οι Shang και Kokossis (2004) πρότειναν μία αναπαράσταση τριών καταρρακτών (Σχήμα 7.7β) για την διαχείριση των ενεργειακών υπολοίπων που αποτυπώνονται στις γραμμές του SSSP. Οι δύο καταρράκτες του Σχήματος 7.7β αντλούν δεδομένα από τις γραμμές πηγών-καταβοθρών του SSSP, ενώ ο τρίτος (στη μέση του SSSP) αφορά τον καταρράκτη βοηθητικών παροχών και απλών τουρμπίνων, μέσω του οποίου επικοινωνούν οι δύο πρώτοι. Διαθέσιμη ενέργεια του καταρράκτη πηγών καταρρέει ή/και διατίθεται στο καταρράκτη βοηθητικών παροχών για παραγωγή ατμού, ο οποίος (μαζί με φρέσκο ατμό) τροφοδοτεί ενεργειακά των καταρράκτη καταβοθρών. Παράλληλα, ατμός που καταρρέει μεταξύ των επιπέδων του κεντρικού καταρράκτη χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της συμπαραγωγής κάθε κυλίνδρου.

Η αναπαράσταση του Σχήματος 7.7β χρησιμοποιεί τρία υποψήφια επίπεδα ατμού γύρω από κάθε επίπεδο ατμού HP, MP και LP, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.7α, με σκοπό την ανάπτυξη συνδυασμών επιπέδων ατμού ($3 \cdot 3 \cdot 3 = 27$ συνδυασμοί), την διαχείριση των βοηθητικών παροχών της Συνολικής Μονάδας (έμμεση ολοκλήρωση) και τον υπολογισμό της συμπαραγωγής με τη χρήση του μοντέλου THM σε κάθε ζώνη εκτόνωσης κάθε συνδυασμού. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι αν και η

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

διαθέσιμη θερμότητα συμπαραγωγής αποτελεί βαθμό ελευθερίας στα πλαίσια εφαρμογής του τριπλού-καταρράκτη, τα θερμά ρεύματα από όπου προέρχεται η ενέργεια αποτελούν γνωστές παραμέτρους του προβλήματος, και αντλούνται ως δεδομένα εισόδου από τις γραμμές του SSSP. Εάν το πρόβλημα αφορούσε υποψήφιες διεργασίες προς ολοκλήρωση, τότε η ενεργειακή κατάσταση των θερμοκρασιακών ενδιάμεσων των τριών-καταρρακτών δεν είναι γνωστή, καθώς αναπτύσσονται άπειρα SSSPs (βαθμοί ελευθερίας), σύμφωνα με τη συζήτηση του Κεφαλαίου 4.

Το μαθηματικό μοντέλο των Shang and Kokossis (2004) περιγράφει τα ισοζύγια ενέργειας κατά μήκος της Συνολικής Μονάδας, αλλά δεν υπολογίζει τις γραμμές του SSSP. Αυτό το πλεονέκτημα προσφέρεται από τα αναβαθμισμένα μοντέλα ICT και CIT, όπως συζητήθηκε αναλυτικά στην ενότητα 5.4. Ο τριπλός καταρράκτης αντλεί δεδομένα από τις γραμμές SSSP και υπό αυτές τις συνθήκες, εφαρμόζεται μόνο για γνωστές και δεδομένες διεργασίες. Επιπλέον, η χρήση μόνο μερικών υποψήφιων θέσεων για την επιλογή επιπέδων ατμού αφήνει ανεκμετάλλευτο ένα μεγάλο εύρος συνδυασμών πιέσεων ατμού, τα οποία αναμένεται να ενισχύσουν τις αποδόσεις έμμεσης ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής. Είναι ζωτικής σημασίας, τα υποψήφια επίπεδα ατμού να υφίστανται κατά μήκος όλου του εύρους θερμοκρασιών της Συνολικής Μονάδας, έτσι ώστε (παράλληλα με την συμπαραγωγή) να αντιμετωπίζουν ζητήματα έμμεσης ολοκλήρωσης σε κάθε θερμοκρασιακό ενδιάμεσο της Συνολικής Μονάδα και να εντοπίζουν ενδιάμεσα με σημαντική συνεισφορά θερμότητας. Το συνδυαστικό πρόβλημα ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής συμπεριφέρεται ως ένα πρόβλημα ανταγωνιστικών ωφελειών μεταξύ εξοικονόμησης κόστους ενέργειας (λόγω έμμεση ολοκλήρωσης) και συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (με χρήση τουρμπίνων).

Από τη μία, η απευθείας αξιοποίηση του παραγόμενου ατμού για σκοπούς έμμεσης ολοκλήρωσης θα ενισχύσει, κατά το δυνατόν, την εξοικονόμηση κόστους θερμών παροχών. Από την άλλη, μέσω της συμπαραγωγής, ο παραγόμενος ατμός υποβαθμίζεται και αξιοποιείται από την Συνολική Μονάδα (για σκοπούς έμμεσης ολοκλήρωσης) σε χαμηλότερα επίπεδα από το αρχικό, με κίνδυνο να μείνουν ανολοκλήρωτα ψυχρά ρεύματα της Συνολικής Μονάδας κατά μήκος της ζώνης εκτόνωσης. Τέτοιες απώλειες ολοκλήρωσης μπορεί να αντισταθμίζονται από το κέρδος της συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ωστόσο δεν εξασφαλίζεται αν η συνολική αποτίμηση θα έχει θετικό πρόσημο, πόσο μάλλον όταν το πρόβλημα χρησιμοποιεί λίγες μόνον επιλογές επιπέδων ατμού, όπως στο Σχήμα 7.7α. Για την μεγιστοποίηση των ωφελειών έμμεσης ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής απαιτούνται σχήματα επιπέδων πίεσης πολλών επιλογών, όπως θα συζητηθούν στην επόμενη ενότητα. Το πρόβλημα και οι

προκλήσεις που εντοπίζονται κατά την ταυτόχρονη αντιμετώπιση του προβλήματος ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής περιγράφονται αναλυτικά μέσω του παραδείγματος του Κεφαλαίου 7.5.1.

Σε συνθήκες διερεύνησης υποψήφιων διεργασιών, το συνδυαστικό πρόβλημα περιπλέκεται περαιτέρω υπό το πρίσμα σύνθεσης διεργασιών με στόχο τη μεγιστοποίηση των ανταγωνιστικών ωφελειών ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής. Η αντιμετώπιση όλων των βαθμών ελευθερίας του συνδυαστικού προβλήματος σύνθεσης, ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής καθίσταται εφικτή με τη συνδυαστική εφαρμογή:

- (1) των μοντέλων σύνθεσης (BBR) του Κεφαλαίου 4
- (2) των μοντέλων μεταφόρτωσης (ICT ή CIT) του Κεφαλαίου 5
- (3) ενός βελτιωμένου μοντέλου THM, το οποίο χρησιμοποιεί νέες στρατηγικές υπολογισμού των παραμέτρων λειτουργίας της τουρμπίνας βελτιώνοντας σημαντικά την ακρίβεια του μοντέλου και
- (4) μιας νέας στρατηγικής βελτιστοποίησης επιπέδων ατμού, η οποία χρησιμοποιεί ένα αναλυτικό σύστημα υποψήφιων επιπέδων, το οποίο δεν ήταν εφικτό να χρησιμοποιηθεί σύμφωνα με τις υφιστάμενες προδιαγραφές του κλασσικού μοντέλου THM της βιβλιογραφίας.

7.3. Σύνθεση και ολοκλήρωση διεργασιών: η περίπτωση της συμπαραγωγής

Ύστερα από την εφαρμογή άμεσης ολοκλήρωσης των εμπλεκόμενων διεργασιών μίας Συνολικής Μονάδας, η έμμεση ολοκλήρωση καλείται να αξιοποιήσει περίσσεια θερμότητα των εμπλεκόμενων διεργασιών, ενώ παράλληλα το πρόβλημα συμπαραγωγής ανταγωνίζεται μερίδια της διαθέσιμης ενέργειας για παραγωγή έργου. Η διερεύνηση διεργασιών που ενισχύουν τα περιθώρια εξοικονόμησης ατμού και συμπαραγωγής καθιστά απαραίτητη την ταυτόχρονη μελέτη της άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης κάθε συνδυασμού διεργασιών για τον υπολογισμό των ενεργειακών διαθεσίμων. Για αυτό το σκοπό, η χρήση των δυνατοτήτων των μοντέλων ICT/CIT είναι απαραίτητη. Στόχος είναι η εξέταση του προβλήματος εξοικονόμησης ατμού και συμπαραγωγής υπό το φως άγνωστων διεργασιών και η ανάδειξη ελπιδοφόρων Συνολικών Μονάδων με βελτιωμένα περιθώρια βιωσιμότητας λαμβάνοντας υπόψη το κόστος ενέργειας και το κέρδος από τη συμπαραγωγή.

Το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με την συνδυαστική χρήση του Turbine Hardware Model και των καταρρακτών ενεργειακής ανάλυσης που περιγράφονται από τα μοντέλα μεταφόρτωσης ICT και

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

CIT. Τα μοντέλα προσφέρουν κόμβους διαχείρισης της διαθέσιμης ενέργειας διατυπώνοντας ένα παράλληλο σύστημα μεταφόρτωσης ατμού μεταξύ των διεργασιών. Οι κόμβοι 2 (του ICT) και 4 (του CIT), όπως φαίνονται στο Σχήμα 7.8α και 7.8β, αντίστοιχα, εφαρμόζονται με όμοιο τρόπο και αναλαμβάνουν:

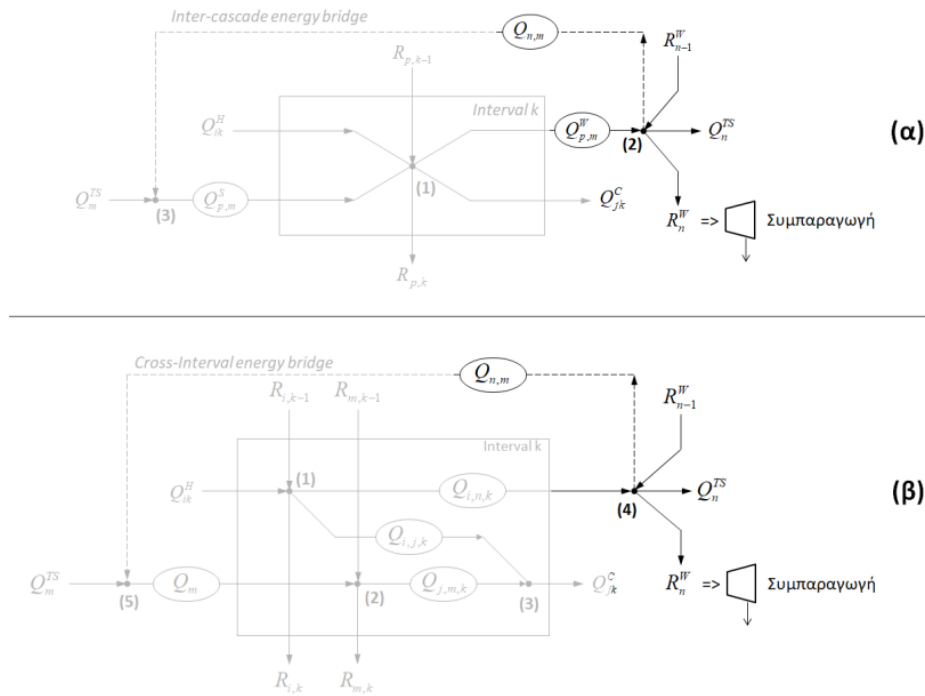
- (α) την εξαγωγή θερμότητας από τα ενδιάμεσα της Συνολικής Μονάδας μέσω των ροών $Q_{p,m}^W$ (ICT) ή $Q_{i,n,k}$ (CIT)
- (β) την διάθεση της περίσσειας θερμότητας (υπο μορφή ατμού) σε άλλους καταρράκτες του ICT ή ενδιάμεσα του CIT μέσω της ροής $Q_{m,n}$ υπολογίζοντας τα περιθώρια εξοικονόμησης φρέσκου ατμού
- (γ) την απαγωγή θερμότητας μέσω ψυχρών παροχών (Q_n^{TS}) και
- (δ) την κατάρρευση θερμότητας ατμού σε χαμηλότερα επίπεδα μέσω των υπολοίπων ατμού R_n^W .

Οι ροές της περίπτωσης (δ) αντικατοπτρίζουν τα φορτία ατμού Q^{max} που καταρρέουν μεταξύ διαδοχικών ζωνών εκτόνωσης, όπου καθίσταται εφικτή η εφαρμογή του THM για την εκτίμηση της συμπαραγωγής. Σε ένα προβλήματα σύνθεσης διεργασιών, η αναπαράσταση BBR συνθέτει Συνολικές Μονάδες και υπολογίζει τη συνεισφορά των ρευμάτων στις αναπαραστάσεις πολλαπλών-καταρρακτών ή του TSC κάθε Συνολικής Μονάδας. Για κάθε Συνολική Μονάδα:

- (α) διεξάγεται η άμεση ολοκλήρωση εντός των ενδιάμεσων (Σχήμα 7.8)
- (β) οι κόμβοι 2 (ICT) ή 4 (CIT) εξάγουν θερμότητα
- (γ) οι ροές $Q_{m,n}$ εφαρμόζουν έμμεση ολοκλήρωση και
- (δ) οι ροές R_n^W φέρουν τα ενεργειακά φορτία (φρέσκου και παραγόμενου) ατμού για την εκτίμηση της συμπαραγωγής.

Τα μοντέλα ICT και CIT εμπλουτίζονται με το THM των Manromatis and Kokossis (1998), το οποίο προσαρμόζεται κατάλληλα στις ανάγκες και τα πεδία ορισμού των μοντέλων μεταφόρτωσης.

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας



Σχήμα 7.8: Αναπαραστάσεις ICT (α) και CIT (β) για ταυτόχρονη εκτίμηση της συμπαραγωγής

Τα φορτία ατμού εξάγονται και καταρρέουν μεταξύ των επιπέδων “ n ” των ψευδο-ψυχρών παροχών του USS (βλ. Κεφάλαιο 5) διαμορφώνοντας διαδοχικές ζώνες εκτόνωσης, οι οποίες είναι ισοδύναμες με τις ζώνες ενός καταρράκτη απλών τουρμπίνων. Το THM εφαρμόζεται **για κάθε ζώνη μεταξύ διαδοχικών επιπέδων n και $n + 1$** και για φορτίο ατμού R_n^W (Σχήμα 7.8). Εφόσον κάθε κύλινδρος λειτουργεί στη μέγιστη δυναμικότητα – δεν λαμβάνονται υπόψη διακυμάνσεις στη φόρτωση του κυλίνδρου – τότε η παροχή ατμού που καταρρέει σε κάθε επίπεδο n υπολογίζεται ως:

$$M_n^{max} \left[\frac{tn}{hr} \right] = \frac{Q_n^{max}}{q_n^{in}} = \frac{R_n^W}{q_{VHP}^{in}} = \frac{R_n^W}{0.557} \left[\frac{MW}{\frac{MWh}{tn}} \right] \quad \forall n \in W_m, m \in S \quad Eq.7.16$$

Ακολούθως, το THM (Eq.7.11) συνδυάζεται με την Eq.7.16 και εφαρμόζεται για κάθε επίπεδο “ n ” του USS, ως εξής:

$$E_n^{max} = \frac{1}{B_n} \cdot (\overline{\Delta H}_{is} \cdot M_n^{max} - A_n) \quad \forall n \in W_m, m \in S \quad \xrightarrow{Eq.7.14}$$

$$E_n^{max} = \frac{1}{B_n} \cdot \left(\frac{\Delta T_n^{sat}}{1854 - 1931 \cdot 0.557} \cdot \frac{R_n^W}{0.557} - A_n \right) \quad \forall n \in W_m, m \in S \quad \Rightarrow$$

$$E_n^{max} = \frac{1}{B_n} \cdot \left(\frac{\Delta T_n^{sat} \cdot R_n^W}{433.59} - A_n \right) \quad \forall n \in W_m, m \in S \quad Eq. 7.17$$

όπου τα ΔT_n^{sat} είναι γνωστά και υπολογίζονται σύμφωνα με τις θερμοκρασίες των υποψήφιων επιπέδων του USS. Για τον υπολογισμό των παραμέτρων παλινδρόμησης A_n και B_n προτείνονται διάφορες στρατηγικές στη βιβλιογραφία (π.χ. Eq.7.12 και Eq.7.13 των Manromatis and Kokossis, 1998), οι οποίες παρουσιάζουν την γενική μορφή:

για $E^{max} < E^b$

- $A_n = a_0 + a_1 \cdot \Phi_n \quad \forall n \in W_m, m \in S$
- $B_n = a_2 + a_3 \cdot \Phi_n \quad \forall n \in W_m, m \in S$ Eq. 7.18

για $E^{max} > E^b$

- $A_n = a_4 + a_5 \cdot \Phi_n \quad \forall n \in W_m, m \in S$
- $B_n = a_3 + a_7 \cdot \Phi_n \quad \forall n \in W_m, m \in S$ Eq. 7.19

όπου οι τιμές των παραμέτρων E^b , a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 , a_6 και a_7 , και η παράμετρος σχεδιασμού της τουρμπίνας Φ δίνονται στον Πίνακα 7.1 για διαφορετικές περιπτώσεις της βιβλιογραφίας.

Πίνακας 7.1: Παράμετροι υπολογισμού των παραμέτρων παλινδρόμησης A και B

	Manromatis and Kokossis, 1998	Varbanov et al., 2004	Medina and Picon, 2010
Φ_n	$T_{in\ n}^{sat}$	ΔT_n^{sat}	$P_{in\ n}$
E^b	1.2 MW	2 MW	-
a_0	-0.131 [MW]	0 [MW]	0.1854 [MW]
a_1	0.00117 [MW/°C]	0.00108 [MW/°C]	0.0433 [MW/MPa]
a_2	0.989	1.097	1.2057
a_3	0.00152 [°C ⁻¹]	0.00172 [°C ⁻¹]	0.0075 [MPa ⁻¹]
a_4	-0.928 [MW]	0 [MW]	-
a_5	0.00623 [MW/°C]	0.00423 [MW/°C]	-
a_6	1.12	1.155	-
a_7	0.00047 [°C ⁻¹]	0.000538 [°C ⁻¹]	-

Οι εξισώσεις Eq.7.17-Eq.7.19 ενσωματώνονται μαζί με τις εξισώσεις των μοντέλων μεταφόρτωσης. Οι μεταβλητές R_n^W υπολογίζονται κατά την εφαρμογή των ICT/CIT, ενώ το THM εκτιμά τα περιθώρια συμπαραγωγής, όταν καταρρέει θερμότητα R_n^W . Το συνολικό μοντέλο κατασκευάζεται ως πρόβλημα

βελτιστοποίησης με την αντικειμενική συνάρτηση να υπολογίζει το κόστος ενέργειας και το κέρδος από τη συμπαραγωγή ως εξής:

$$\text{Min } Z = \sum_{m \in S} Q_m^{TS} \cdot c_m + \sum_{n \in W'} Q_n^{TS} \cdot c_n - \sum_{\substack{m \in S \\ n \in W_m}} E_n^{max} \cdot c_{cogen} \quad \text{Eq. 7.20}$$

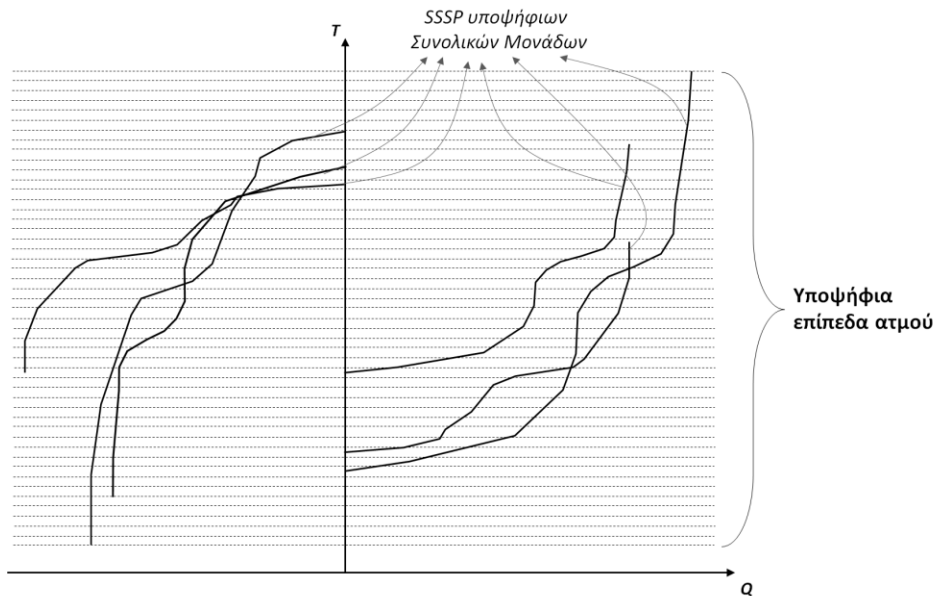
Για ένα δοσμένο σύνολο διεργασιών, το συνολικό μοντέλο (Eq.5.1-Eq.5.12 και Eq.7.17-Eq.7.20 ή Eq.5.14-Eq.5.26 και Eq.7.17-Eq.7.20) βελτιστοποιεί στις ροές ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ των γνωστών διεργασιών και τη συμπαραγωγή έργου, αντικαθιστώντας πλήρως τις συμβατικές γραφικές μεθόδους ανάλυσης της βιβλιογραφίας. Όταν το πρόβλημα συνδυάζει και υποψήφιες διεργασίες, τότε στο παραπάνω μοντέλο προστίθενται και οι εξισώσεις του BBR, και το πρόβλημα βελτιστοποιεί τις επιλογές διεργασιών, τις ενεργειακές ροές της Συνολικής Μονάδας και την συμπαραγωγή κατασκευάζοντας το βιοδιυλιστήριο μέγιστης ενεργειακής απόδοσης, σύμφωνα με την αντικειμενική συνάρτηση Eq.7.20.

Το μοντέλο συμπαραγωγής Eq.7.17-Eq.7.19 μπορεί να εφαρμοστεί, ως έχει, μόνον σε συνδυασμό με απλές στρατηγικές βελτιστοποίησης υποψήφιων επιπέδων, όπως αυτή του Σχήματος 7.7α, και σύμφωνα με τις παραμέτρους της βιβλιογραφίας του Πίνακα 7.1. Ωστόσο, κατά την εφαρμογή του μοντέλου σε πιο λεπτομερή συστήματα υποψήφιων επιπέδων ατμού, με σκοπό την προσέγγιση των βέλτιστων επιπέδων ατμού και των μέγιστων στόχων ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής, το μοντέλο παρουσιάζει εμφανώς μειωμένη ακρίβεια, ειδικά σε ακραίες συνθήκες εκτόνωσης, όπως μικρές ΔT_n^{sat} , μεγάλες P^{in} και μικρές ροές ατμού (R_n^W). Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται τεχνικές μαθηματικού προγραμματισμού και νέες στρατηγικές για τον υπολογισμό των παραμέτρων λειτουργίας των τουρμπίνων, οι οποίες αυξάνουν σημαντικά την ακρίβεια του THM και γενικεύουν τη εφαρμογή του σχεδόν σε κάθε πρόβλημα ολοκλήρωσης.

7.4. Στρατηγικές μαθηματικής μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης της συμπαραγωγής

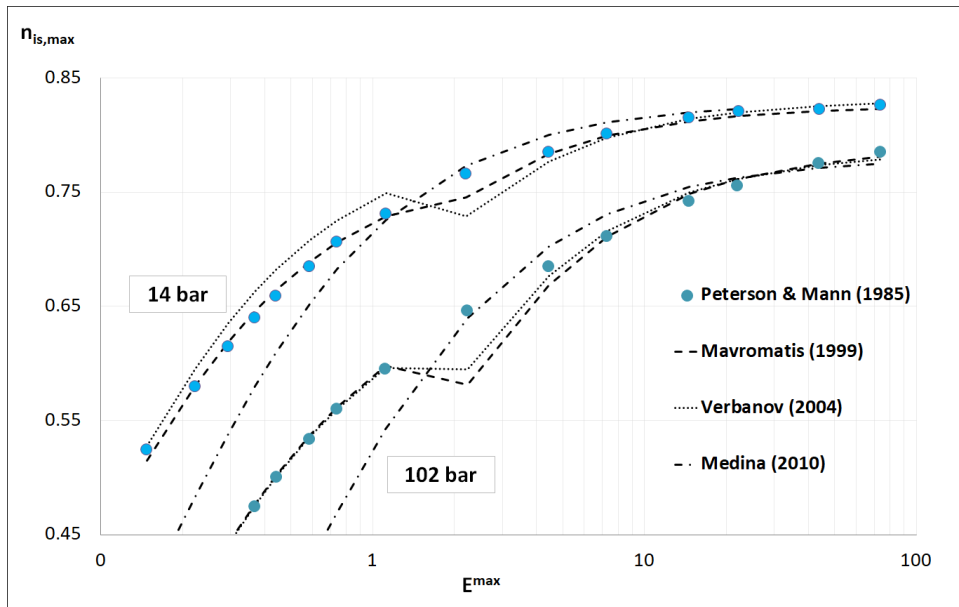
Η παρούσα μεθοδολογία ακολουθεί μία διαφορετική, πιο αυστηρή, προσέγγιση επιλογής επιπέδων ατμού σε σχέση με την απλοϊκή τακτική του Σχήματος 7.7α. Το προτεινόμενο σχήμα βελτιστοποίησης επιπέδων ατμού αξιοποιεί ένα πυκνό πλέγμα υποψήφιων πιέσεων που εκτείνονται σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος της Συνολικής Μονάδας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.9, με στόχο την

προσέγγιση του βέλτιστου συνδυασμού επιπέδων ατμού και των βέλτιστων στόχων ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής. Στην περίπτωση αντιμετώπισης υποψήφιων διεργασιών, τότε το αναλυτικό σύστημα επιπέδων εκτείνεται σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος που διαμορφώνεται λαμβάνοντας υπόψη τα ρεύματα όλων των υποψηφίων διεργασιών. Το εν λόγω σχήμα προϋποθέτει την εφαρμογή του THM σε κάθε (στενή) ζώνη εκτόνωσης μεταξύ διαδοχικών επιπέδων που σχηματίζεται από τα πολλαπλά υποψήφια επίπεδα του Σχήματος 7.9.



Σχήμα 7.9: Αναλυτικό σύστημα υποψήφιων επιπέδων βοηθητικών παροχών

Η εφαρμογή του THM για τον υπολογισμό της ισχύος και της ισεντροπικής απόδοσης, σύμφωνα με τις υπάρχουσες στρατηγικές της βιβλιογραφίας του Πίνακα 7.1, είναι αρκετά ικανοποιητική, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.10, για τα πειραματικά αποτελέσματα των Peterson and Mann (1985). Το σχήμα παρουσιάζει δύο περιπτώσεις τουρμπίνας που λειτουργούν με ατμό 14 και 102 bar και πίεση εξόδου ατμοσφαιρική. Ωστόσο, οι στρατηγικές της βιβλιογραφίας καταλήγουν σε σημαντικές αποκλίσεις (ακόμα και αρνητικές τιμές ισχύος), όταν οι συνθήκες λειτουργίας αφορούν στενές ζώνες εκτόνωσης (μικρά ΔT^{sat}) ή/και μικρές ροές ατμού. Αυτός φαίνεται να είναι κύριος λόγος για τον οποίον έχει επικρατήσει η χρήση απλοϊκών σχημάτων υποψήφιων επιπέδων ατμού, όπως αυτό του Σχήματος 7.7α, τα οποία διασφαλίζουν μεγάλες ΔT^{sat} και καταλήγουν σε ικανοποιητικά ποσοστά ακρίβειας ισάξια με αυτά που αποτυπώνονται στο Σχήμα 7.10. Οι αποκλίσεις των υφιστάμενων στρατηγικών εξηγούνται στο ακόλουθο παράδειγμα.



Σχήμα 7.10: Πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα ισεντροπικής απόδοσης-ισχύος

Η εφαρμογή της εξίσωσης Eq.7.17: $E^{max} = \frac{1}{B} \cdot \left(\frac{\Delta T^{sat} \cdot Q}{433.59} - A \right)$ για πολύ μικρά ΔT^{sat} , σύμφωνα με τα δεδομένα του Πίνακα 7.1, παρουσιάζει σημαντικά σφάλματα στην εκτίμηση της συμπαραγωγής και της ισεντροπικής απόδοσης. Παραδείγματος χάριν, λαμβάνεται η εκτόνωση ατμού πολύ υψηλής πίεσης από τα 85 bar στα 75 bar, με αντίστοιχες θερμοκρασίες κορεσμού $T_{in}^{sat} = 300 \text{ } ^\circ\text{C}$ και $T_{out}^{sat} = 290 \text{ } ^\circ\text{C}$, και άρα $\Delta T^{sat} = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$. Για μικρές αποδόσεις ισχύος (της τάξης των 1-2 MW) χρησιμοποιείται η Eq.7.18 για τον υπολογισμό των παραμέτρων A και B , έναντι της Eq.7.19 (σύμφωνα με τον Πίνακα 7.1), και προκύπτουν οι εξής περιπτώσεις:

(1) Mavromatis and Kokossis (1998):

- $A = 0.22$
- $B = 1.443$

(2) Varbanov et al. (2004):

- $A = 0.0108$
- $B = 1.114$

(3) Medina and Picon (2010):

- $A = 0.553$
- $B = 1.269$

Οι αποκλίσεις των τιμών των παραμέτρων A και B σε κάθε περίπτωση είναι εμφανείς.

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

Η Eq.7.17 δίνει θετικές τιμές ισχύος, όταν ο όρος $\frac{\Delta T^{sat} \cdot Q}{433.59} - A$ είναι θετικός, δηλαδή όταν:

(1) $Q > 9.54 \text{ MW}$ (Mavromatis and Kokossis, 1998)

(2) $Q > 0.47 \text{ MW}$ (Varbanov et al., 2004)

(3) $Q > 23.98 \text{ MW}$ (Medina and Picon, 2010)

Οι περιπτώσεις (1) και (3) παρουσιάζουν αρνητικές τιμές ισχύος για φορτώσεις ατμού μικρότερες των 9.54 και 23.98 MW, αντίστοιχα. Στην περίπτωση (2), αν και το μοντέλο φαίνεται ικανό να προβλέπει ακόμα και μικρές ροές ατμού (μέχρι 0.47 MW), θα αποδίδει την ίδια ισχύ (E^{max}) και ισεντροπική απόδοση ($n_{is,max}$) για κάθε πίεση εισόδου στην τουρμπίνα, εφόσον ο υπολογισμός των παραμέτρων A και B βασίζεται αποκλειστικά στη διαφορά θερμοκρασίας κορεσμού (ΔT^{sat}) και η ειδική ενθαλπία εισόδου θεωρείται σταθερή ($q^{in}=0.557 \text{ MWh/tn}$). Ακόμα και αν γίνεται χρήση της πραγματικής q_{in} στο μοντέλο της περίπτωσης (2), οι μεταβολές στην πίεση εισόδου θα επιφέρουν απειροελάχιστες μεταβολές στην ισεντροπική απόδοση, λόγω της αποκλειστικής εξάρτησης των A και B από την ΔT^{sat} .

Οι αποκλίσεις μεταξύ των διαφορετικών προσεγγίσεων της βιβλιογραφίας παρουσιάζονται για διάφορα παραδείγματα συνθηκών λειτουργίας στον Πίνακα 7.2. Στην περιοχή A του πίνακα φαίνονται οι αποκλίσεις στην εκτίμηση της ισχύος και της ισεντροπικής απόδοσης για μικρές (9 MW) και μεγάλες (200 MW) ροές ατμού μεταξύ των τριών περιπτώσεων (1), (2) και (3), για μικρά $\Delta T^{sat} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ και σταθερό $q^{in}=0.557 \text{ MWh/tn}$. Στην περιοχή B του πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της περίπτωσης (2) για μικρές και μεγάλες ΔT^{sat} και χρησιμοποιώντας τις πραγματικές τιμές q_{in} , αναδεικνύοντας τις (εσφαλμένα) μη-υπολογίσιμες μεταβολές της ισχύος και της απόδοσης για διαφορετικές πιέσεις ατμού στην είσοδο της τουρμπίνας, όπως συζητήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Πίνακας 7.2: Συγκριτικά αποτελέσματα ισχύος και ισεντροπικής απόδοσης διαφορετικών τεχνικών υπολογισμού της συμπαραγωγής

	Περίπτωση	Πηγή	P ⁱⁿ [bar]	T ^{sat} [°C]	ΔT ^{sat} [°C]	Q [MW]	M [tn/hr]	E ^{max} [MW]	η _{is,max}
Α	1	Mavromatis and Kokossis, 1998	90	303	10	9.0	16.2	-0.01	-
	2	Varbanov et al., 2004	90	303	10	9.0	16.2	0.18	85%
	3	Medina and Picon, 2010	90	303	10	9.0	16.2	-0.29	-
		Παρούσα μεθοδολογία (βάσει Πίνακα 7.3)	90	303	10	9.0	16.2	0.15	70%
	1	Mavromatis and Kokossis, 1998	90	303	10	200	359	2.89	63%
	2	Varbanov et al., 2004	90	303	10	200	359	3.94	85%
	3	Medina and Picon, 2010	90	303	10	200	359	3.17	69%
		Παρούσα μεθοδολογία (βάσει Πίνακα 7.3)	90	303	10	200	359	3.69	80%
Β	2	Varbanov et al., 2004	90	303	10	83.6	150.0	1.72	89.247%
	2	Varbanov et al., 2004	70	285	10	84.3	150.0	1.74	89.254%
	2	Varbanov et al., 2004	40	250	10	85.7	150.0	1.78	89.266%
	2	Varbanov et al., 2004	90	303	50	83.6	150.0	7.97	82.75%
	2	Varbanov et al., 2004	40	250	50	86.5	150.0	8.39	82.84%
	2	Varbanov et al., 2004	15.5	200	50	88.3	150.0	8.67	82.90%
	2	Varbanov et al., 2004	4.8	150	50	89.2	150.0	8.82	82.93%
Γ		Παρούσα μεθοδολογία (βάσει Πίνακα 7.3)	90	303	10	83.6	150.0	1.42	73.6%
		Παρούσα μεθοδολογία (βάσει Πίνακα 7.3)	70	285	10	84.9	150.0	1.47	74.7%
		Παρούσα μεθοδολογία (βάσει Πίνακα 7.3)	40	250	10	87.1	150.0	1.58	77.0%
		Παρούσα μεθοδολογία (βάσει Πίνακα 7.3)	90	303	50	83.6	150.0	7.58	78.6%
		Παρούσα μεθοδολογία (βάσει Πίνακα 7.3)	40	250	50	86.9	150.0	8.20	80.4%
		Παρούσα μεθοδολογία (βάσει Πίνακα 7.3)	15.5	200	50	88.9	150.0	8.68	82.1%
		Παρούσα μεθοδολογία (βάσει Πίνακα 7.3)	4.8	150	50	89.8	150.0	9.01	83.8%

Από τη μία, η αιτία σφαλμάτων και αποκλίσεων στις περιπτώσεις (1) και (3) για μικρά ΔT^{sat} οφείλεται κυρίως στη χρήση της παραμέτρου A , η οποία σύμφωνα με τον ορισμό της ισεντροπικής απόδοσης δεν έχει κάποια φυσική σημασία, όπως φαίνεται ακολούθως:

- ΤΗΜ (Eq.7.11): $E^{max} = \frac{1}{B} \cdot (\overline{\Delta H}_{is} \cdot M^{max} - A) = \frac{1}{B} \cdot \overline{\Delta H}_{is} \cdot M^{max} - \frac{A}{B}$
- Ισεντροπική απόδοση: $E^{max} = \eta_{is,max} \cdot \overline{\Delta H}_{is} \cdot M^{max}$

Η παράμετρος A αποτελεί προϊόν παλινδρόμησης των πειραματικών αποτελεσμάτων του Σχήματος 7.4β, με σκοπό την γραμμικοποίηση της ισεντροπικής απόδοσης με την ισχύ μέσω της Eq.7.6:

$$\frac{E^{max}}{\eta_{is,max}} = A + B \cdot E^{max}. \text{ Ωστόσο, η σχέση των } E^{max} \text{ και } \frac{E^{max}}{\eta_{is,max}} \text{ δεν είναι απολύτως γραμμική και από τα}$$

πειραματικά αποτελέσματα (Σχήμα 7.4β) προκύπτει το λογικό συμπέρασμα ότι: όταν $E^{max} \rightarrow 0$, τότε

$$\frac{E^{max}}{\eta_{is,max}} \rightarrow 0, \text{ και άρα } A \rightarrow 0. \text{ Ο όρος } A \text{ διαταράσσει την ακρίβεια του ΤΗΜ, η οποία μάλιστα μειώνεται}$$

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

αρκετά σε συνθήκες μικρών θερμοκρασιακών διαφορών ΔT^{sat} ή για μικρές ροές ατμού και στις τρεις περιπτώσεις (1), (2) και (3).

Από την άλλη, τα σφάλματα οφείλονται και στις διάφορες συμβάσεις κάθε μεθόδου της βιβλιογραφίας (Πίνακα 7.1), όσον αφορά τα μεγέθη Φ_n που χρησιμοποιούνται για την παλινδρόμηση των πειραματικών αποτελεσμάτων του Σχήματος 7.4β. Τα ζητήματα αυτά τονίζονται και από τον Smith (2005) σύμφωνα με τον οποίο: «Τα απαραίτητα δεδομένα που απαιτούνται για τον καθορισμό των συντελεστών υπολογισμού των A και B αφορούν:

- την παραγόμενη ισχύ - E^{max}
- τη θερμοκρασία κορεσμού του ατμού εισόδου - T_{in}^{sat}
- την πραγματική θερμοκρασία εισόδου - T_{in}
- τη θερμοκρασία κορεσμού του ατμού εξόδου - T_{out}^{sat}
- τη ροή του ατμού - M^{max} »

Άμεσα ή έμμεσα, κάθε τεχνική υπολογισμού των παραμέτρων A και B της βιβλιογραφίας λαμβάνουν υπόψη μόνο ένα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά (βλ. Πίνακα 7.1). Στην παρούσα μεθοδολογία το πρόβλημα υπολογισμού των παραμέτρων A και B αναθεωρείται καταλήγοντας σε ένα νέο σύστημα εξισώσεων, το οποίο εμπλέκει όλες τις παραπάνω σχεδιαστικές παραμέτρους (Smith, 2005), εκτός από αυτήν της ροής ατμού, για λόγους διατήρησης της γραμμικότητας του μοντέλου. Η νέα στρατηγική παρουσιάζει υψηλότερη ακρίβεια υπολογισμού της ισχύος επιτρέποντας την εφαρμογή του γραμμικού μοντέλου THM ακόμα και σε πολύ στενές ζώνες εκτόνωσης, όπως αυτές του Σχήματος 7.9, με απώτερο σκοπό τη βελτιστοποίηση των ανταγωνιστικών ωφελειών της έμμεσης ολοκλήρωσης και της συμπαραγωγής.

Επιπλέον, θα αντιμετωπιστούν τρία ακόμη ζητήματα που εμφανίζονται κατά την ενσωμάτωση του THM στο συνολικό μοντέλο σύνθεσης, ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής, τα οποία αφορούν:

- απώλειες ακρίβειας λόγω χρήσης σταθερής q^{in} σε όλα τα επίπεδα ατμού, για σκοπούς διατήρησης της γραμμικότητας του μοντέλου.
- τη συγκέντρωση πολλαπλών σφαλμάτων, όταν η τουρμπίνα παρουσιάζει μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές και απαιτείται η άθροιση της ισχύος πολλαπλών επιμέρους κυλίνδρων που εφαρμόζονται μεταξύ στενών ζωνών του πυκνού συστήματος επιπέδων του Σχήματος 7.9.

- την εξάρτηση των παραμέτρων A και B από την ισχύ (βλ. E^b στις Eq.7.18 και Eq.7.19), η οποία δεν συνυπολογίζεται στα μοντέλα της βιβλιογραφίας για λόγους διατήρησης της γραμμικότητας.

7.4.1. Αναθεώρηση μοντέλου υπολογισμού του ειδικού φορτίου θερμότητας ατμού εισόδου

Υπέρθερμος ατμός πολύ υψηλής πίεσης (VHP: 90 bar, 500-510 °C) παράγεται στον καυστήρα της Συνολικής Μονάδας και εκτονώνεται στα κατάντη επίπεδα ατμού “ n ” του κεντρικού συστήματος βοηθητικών παροχών (USS). Η Eq.7.15 χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της q^{in} σε κάθε επίπεδο ως εξής:

$$q_n^{out} = q_n^{in} + c_{p,n} \cdot \Delta T_n^{sat} - \frac{E_n}{M_n} \quad \forall n \in W_m, m \in S \quad (Eq. 7.15)$$

όπου

$$q_1^{in} = q_{VHP}^{in} = 0.557 MWh/tn \quad Eq. 7.21.1$$

$$M_n = \frac{Q_z}{q_n^{in}} \quad \forall n \in W_m, m \in S \quad Eq. 7.21.2$$

$$c_{p,n} = K_1 + K_2 \cdot T_n^{sat} \quad \forall n \in W_m, m \in S \quad Eq. 7.21.3$$

$$q_{n+1}^{in} = q_n^{out} \quad \forall n \in W_m, m \in S \quad Eq. 7.21.4$$

Στην περίπτωση όπου ατμός (M_n^{ind}) παράγεται και σε ενδιάμεσα επίπεδα από διαθέσιμη ενέργεια των διεργασιών (Q_n^{ind}), τότε η Eq.7.21.4 αντικαθίσταται από τις Eq.7.22

$$q_{n+1}^{in} = \frac{q_n^{out} \cdot M_n + \Delta H_n^{lg} \cdot M_n^{ind}}{M_n + M_n^{ind}} \quad \forall n \in W_m, m \in S \quad Eq. 7.22.1$$

$$M_n^{ind} = \frac{Q_n^{ind}}{\Delta H_n^{lg}} \quad \forall n \in W_m, m \in S \quad Eq. 7.22.2$$

$$\Delta H_n^{lg} = K_3 + K_4 \cdot T_n^{sat} \quad \forall n \in W_m, m \in S \quad Eq. 7.22.3$$

όπου ΔH_n^{lg} η ειδική λανθάνουσα θερμότητα κορεσμένου νερού στο επίπεδο n . Το σύνολο των εξισώσεων Eq.7.15 μαζί με τις Eq.7.21 και Eq.7.22 χρησιμοποιούνται για την αναλυτική προσέγγιση της ειδικής ενθαλπίας εισόδου, q^{in} , η οποία ως εξαρτημένη μεταβλητή από τη ροή ατμού (M_z) και την ισχύ

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

(E_z) εντάσσει ανεπιθύμητες μη-γραμμικότητες στις εξισώσεις του THM. Εναλλακτικά, για σκοπούς διατήρησης της γραμμικότητας, η ειδική ενθαλπία εισόδου της τουρμπίνας λαμβάνεται σταθερή και ίση με αυτή του υπέρθερμου ατμού (90 bar, 500-510 °C) που παράγεται στον καυστήρα, $q_n^{in} = q_1^{in} = q_{VHP}^{in} = 0.557 MWh/tn \quad \forall n \in W_m, m \in S$, απλοποιώντας σημαντικά το πρόβλημα εκτίμησης της συμπαραγωγής.

Ωστόσο, η παρούσα μεθοδολογία χρησιμοποιεί μία νέα στρατηγική προσέγγισης της q_n^{in} , η οποία, ναί μεν, δεν αποδίδει την ακρίβεια του αναλυτικού μη-γραμμικού μοντέλου (Eq.7.15, Eq.7.21 και Eq.7.22), αλλά παρουσιάζει αρκετά βελτιωμένη ακρίβεια σε σχέση με το εκφυλισμένο γραμμικό μοντέλο που χρησιμοποιεί σταθερή q_n^{in} . Η εξίσωση υπολογισμού της ειδικής ενθαλπίας εισόδου (Eq.7.15) επαναδιατυπώνεται συνδυαζόμενη κατάλληλα με τον ορισμό της ισεντροπικής απόδοσης (Eq.7.2), ως εξής:

$$q_n^{out} = q_n^{in} + c_{p,n} \cdot \Delta T_n^{sat} - \frac{E_n}{M_n} \xleftrightarrow{n_{is,max} = \frac{E^{max}}{\Delta H_{is} \cdot M^{max}} \text{ (Eq.7.2)}} \leftarrow$$

$$q_n^{out} = q_n^{in} + c_{p,n} \cdot \Delta T_n^{sat} - n_{is,max_n} \cdot \overline{\Delta H}_{is_n} \quad \forall n \in W_m, m \in S \quad \text{Eq.7.23}$$

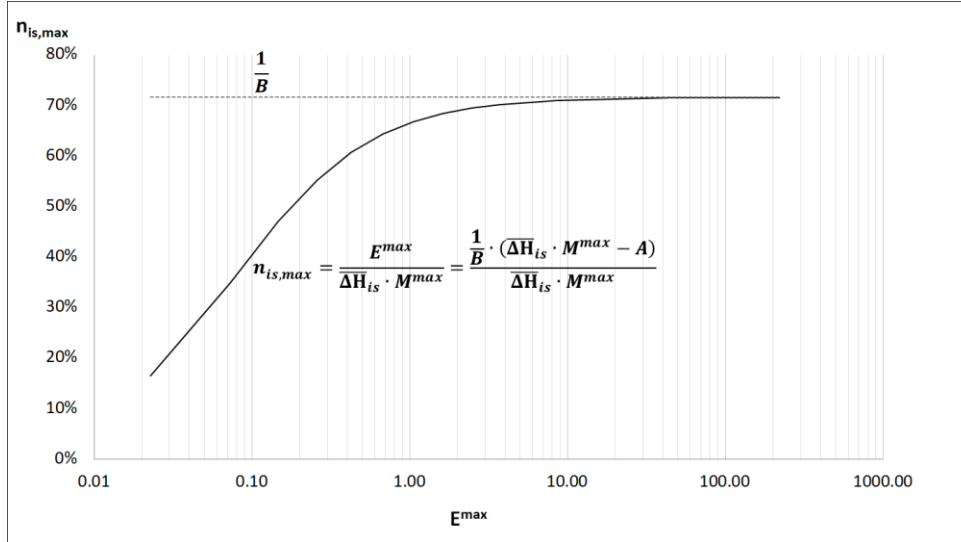
Έτσι, το πρόβλημα υπολογισμού του μη-γραμμικού όρου $\frac{E_n}{M_n}$ αντικαθίσταται από τον υπολογισμό της ισεντροπικής απόδοσης, ενώ το $\overline{\Delta H}_{is_n}$ εξαρτάται από τη ΔT_n^{sat} (παράμετρος) και το q_n^{in} .

Μία εναλλακτική μορφή του THM είναι η εξής: $E^{max} = \left(\frac{1}{B} \cdot - \frac{A}{B \cdot \overline{\Delta H}_{is} \cdot M^{max}} \right) \cdot \overline{\Delta H}_{is} \cdot M^{max}$, η οποία για πολύ μεγάλες ροές ατμού M^{max} (δηλαδή τουρμπίνες που λειτουργούν στη μέγιστη εφικτή ισεντροπική απόδοση), ισχύει ότι $\frac{A}{B \cdot \overline{\Delta H}_{is} \cdot M^{max}} \rightarrow 0$, και καταλήγει στη μορφή: $E^{max} = \frac{1}{B} \cdot \overline{\Delta H}_{is} \cdot M^{max}$, η οποία αναδεικνύει ομοιότητες με τον ορισμό της ισεντροπικής απόδοσης: $E^{max} = n_{is,max} \cdot \overline{\Delta H}_{is} \cdot M^{max}$ και προκύπτει ότι $n_{is,max} \rightarrow \frac{1}{B}$, όταν $M^{max} \rightarrow \infty$.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.4α, η ισεντροπική απόδοση μίας τουρμπίνας με δεδομένες πιέσεις εισόδου-εξόδου αυξάνεται με την ισχύ, δηλαδή με τη ροή ατμού. Έτσι, η μέγιστη εφικτή ισεντροπική απόδοση μίας τουρμπίνας αντικατοπτρίζεται από την τιμή του όρου $\frac{1}{B}$, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.11. Η καμπύλη του Σχήματος 7.11 παρουσιάζει την ισεντροπική απόδοση $n_{is,max} = \frac{E^{max}}{\overline{\Delta H}_{is} \cdot M^{max}}$ υπολογισμένη σύμφωνα με την ισχύ E^{max} που υπολογίζεται από το THM, για μία τυπική περίπτωση

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

κυλίνδρου που δουλεύει από τα 85 bar στα 15.5 bar. Μάλιστα, στο παράδειγμα του Σχήματος 7.11 αναδεικνύεται το γεγονός ότι, η προσέγγιση της ισεντροπικής απόδοσης $n_{is,max}$ μέσω του όρου $\frac{1}{B}$ είναι αρκετά ικανοποιητική ήδη για ισχύ άνω των 3 MW.



Σχήμα 7.11: Διάγραμμα ισεντροπικής απόδοσης-ισχύος του ρυθμιστή για $T_{in}^{sat}=300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και $\Delta T^{sat}=10 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ισεντροπική απόδοση της Eq.7.23 αντικαθίσταται με τον όρο $\frac{1}{B}$ και το μοντέλο υπολογισμού της ειδικής ενθαλπίας καταλήγει στη μορφή:

$$q_z^{out} = q_z^{in} + c_{p,n} \cdot \Delta T_n^{sat} - \frac{1}{B_n} \cdot \overline{\Delta H}_n^{is} \quad \forall n \in W_m, m \in S \quad \begin{array}{l} \text{Eq.7.14} \\ \text{Eq.7.18} \\ \longleftrightarrow \end{array}$$

$$q_n^{out} = q_n^{in} + (K_1 + K_2 \cdot T_n^{sat}) \cdot \Delta T_n^{sat} - \frac{1}{a_2 + a_3 \cdot \Phi_n} \cdot \frac{\Delta T_n^{sat}}{1854 - 1931 \cdot q_n^{in}} \quad \forall n \in W_m, m \in S \quad \text{Eq.7.24}$$

όπου

- $q_1^{in} = q_{VHP}^{in}$ (Eq.7.21.1)
- $q_{n+1}^{in} = q_n^{out} \quad \forall n \in W_m, m$ (Eq.7.21.1)
- $\Phi_n \equiv T_n^{sat}$ ή ΔT_n^{sat} ή P_n^{in} σύμφωνα με τα μοντέλα παλινδρόμησης που χρησιμοποιούνται
- T_n^{sat} , ΔT_n^{sat} και P_n^{in} είναι παράμετροι του πλέγματος υποψήφιων επιπέδων ατμού (Σχήμα 7.9)

- K_1, K_2 παράμετροι υπολογισμού της ειδικής θερμοχωρητικότητας ($c_{p,n}$) συναρτήσει της T_n^{sat}

Η εξίσωση Eq.7.24 αποτελεί ένα γραμμικό και συντομευμένο μοντέλο και προφέρει μία καλύτερη προσέγγιση της q_{in} στα διάφορα επίπεδα του καταρράκτη-τουρμπίνων για μέγιστες αποδόσεις τουρμπίνων (έναντι της υπόθεσης σταθερής τιμής) διατηρώντας ταυτόχρονα τη γραμμικότητα του μοντέλου THM. Δεδομένου ενός πλέγματος υποψήφιων επιπέδων ατμού, **οι τιμές της ειδικής ενθαλπίας εισόδου υπολογίζονται εκ των προτέρων και μεταχειρίζονται ως παράμετροι του THM.**

7.4.2. Αναθεώρηση μοντέλων υπολογισμού παραμέτρων του THM

Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία (Mavromatis and Kokossis, 1998; Varbanov et al., 2004; Medina and Picon, 2010), οι παράμετροι A και B του THM προκύπτουν ύστερα από παλινδρόμηση των πειραματικών αποτελεσμάτων των Peterson and Mann (1985) συναρτήσει ενός μόνο δεδομένου της τουρμπίνας: της T_{in}^{sat} ή της ΔT^{sat} ή της P_{in} . Εναλλακτικά, η παρούσα μεθοδολογία εντάσσει μία νέα στρατηγική, η οποία χρησιμοποιεί ταυτόχρονα τρία δεδομένα (T_{in}^{sat} , ΔT^{sat} και q^{in}) για την παλινδρόμηση των πειραματικών γραμμών λειτουργίας των τουρμπίνων επιτυγχάνοντας σημαντική βελτίωση στην ακρίβεια εκτίμησης της ισχύος (E^{max}) και της ισεντροπικής απόδοσης. Σε αντιδιαστολή με τις εξισώσεις Eq.7.18 και Eq.7.19 που εφαρμόζονται στη βιβλιογραφία, η νέα προσέγγιση χρησιμοποιεί το ακόλουθο σύστημα:

για $E^{max} < E^b$

- $A = a_0 + a_1 \cdot T_{in}^{sat} + a_2 \cdot \Delta T^{sat} + a_3 \cdot q^{in}$
- $B = a_4 + a_5 \cdot T_{in}^{sat} + a_6 \cdot \Delta T^{sat} + a_7 \cdot q^{in}$ Eq.7.25

για $E^{max} > E^b$

- $A = a_0 + a_1 \cdot T_{in}^{sat} + a_2 \cdot \Delta T^{sat} + a_3 \cdot q^{in}$
- $B = a_4 + a_5 \cdot T_{in}^{sat} + a_6 \cdot \Delta T^{sat} + a_7 \cdot q^{in}$ Eq.7.26

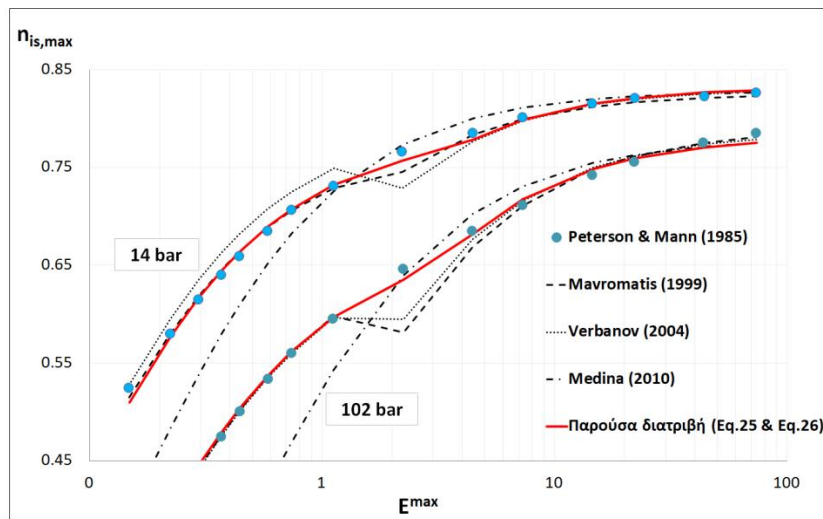
Το παρόν μοντέλο λαμβάνει υπόψη: (i) την παραγόμενη ισχύ μέσω της E^b , (ii) τη θερμοκρασία κορεσμού του ατμού εισόδου (T_{in}^{sat}), (iii) τη θερμοκρασία κορεσμού στην εξόδου συνδυάζοντας την T_{in}^{sat} με την διαφορά θερμοκρασίας (ΔT^{sat}) και (iii) τη θερμοκρασία εισόδου (T_{in}) του ατμού μέσω των προσεγγίσεων q^{in} σύμφωνα με την προηγούμενη ενότητα 7.4.1. Ύστερα από παλινδρόμηση των

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

πειραματικών δεδομένων του Σχήματος 7.4α, οι συντελεστές a_0 - a_7 των Eq.7.25 και Eq.7.26 για όλο το εύρος αποδόσεων ισχύος παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.3. Το Σχήμα 7.12 συνοψίζει τα αποτελέσματα της παραγόμενης ισχύος και της ισεντροπικής απόδοσης που υπολογίζονται με τη νέα στρατηγική σε σχέση με τα πειραματικά και τα αποτελέσματα των μοντέλων της βιβλιογραφίας. Οι προβλέψεις της ισχύος και της ισεντροπικής απόδοσης σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας (μικρές ΔT^{sat}) σύμφωνα με τις νέα στρατηγική (Eq.7.25 και Eq.7.26) παρουσιάζονται και συγκρίνονται με αυτές της βιβλιογραφίας στον Πίνακα 7.2.

Πίνακας 7.3: Βελτιωμένοι παράμετροι υπολογισμού των παραμέτρων παλινδρόμησης A και B

	$E^b < 3.26 \text{ MW}$		$E^b > 3.26 \text{ MW}$	
a_0	0	[MW]	0	[MW]
a_1	0	[MW/°C]	0	[MW/°C]
a_2	0.001067	[MW/°C]	0.003911	[MW/°C]
a_3	0	[MW/MWh/tn]	0	[MW/MWh/tn]
a_4	1.000953	[MW]	1.088029	[MW]
a_5	0.001138	[MW/°C]	0.000491	[MW/°C]
a_6	0.000541	[MW/°C]	0.000173	[MW/°C]
a_7	0.001003	[MW/MWh/tn]	0.001178	[MW/MWh/tn]



$\overline{Error} (\%) = \left(\sum_i \frac{Exp_i - Calc_i}{Exp_i} \right) / N$	Mavromatis (1999)	Verbanov (2004)	Medina (2010)	Παρούσα διατριβή
14 bar	0.6%	2.0%	3.3%	0.5%
102 bar	1.4%	1.2%	11.2%	0.8%

Σχήμα 7.12: Πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα ισεντροπικής απόδοσης-ισχύος

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

Στην συνέχεια, υπολογίζονται οι παράμετροι ειδικής ενθαλπίας εισόδου για ένα σύνολο υποψήφιων επιπέδων συνδυάζοντας το συντομευμένο μοντέλο της εξίσωσης Eq.7.24 με τις νέες εκφράσεις υπολογισμού των παραμέτρων B σύμφωνα με τις Eq.7.25, Eq.7.26 και τον Πίνακα 7.3. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 7.4 και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα ύστερα από τη χρήση του αναλυτικού μοντέλου (Eq.7.15, Eq.7.21 και Eq.7.22) υπολογισμού της q^{in} για διάφορες ροές ατμού (1 MW, 10 MW και 100 MW), καθώς και με τη σταθερή τιμή $q^{in} = 0.557 \text{ MWh/tn}$. Σημειώνεται, ότι προτείνεται η χρήση της νέα προσέγγισης υπολογισμού των παραμέτρων A και B μέσω του Πίνακα 7.3 και των εκτεταμένων εξισώσεων Eq.7.25 και Eq.7.26, αντί των προσεγγίσεων της βιβλιογραφίας, καθώς εγγυάται καλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό των E^{max} και $n_{is,max}$ σε στενές ζώνες εκτόνωσης και μικρές παροχές ατμού.

Πίνακας 7.4: Σύγκριση εκτιμήσεων της q^{in} με τη χρήση του συντομευμένου μοντέλου, του αναλυτικού μοντέλου και της υπόθεσης σταθερής τιμής

T_{in}^{sat}	Συντομευμένο q^{in} (Eq.7.24)	Q [MW]	Αναλυτικό q^{in} (Eq.7.15)	Σφάλμα (Αναλυτικό – Συντομευμένο)	Σφάλμα (Αναλυτικό – Σταθερό 0.557 MWh/tn)	Q [MW]	Αναλυτικό q^{in} (Eq.7.15)	Σφάλμα (Αναλυτικό – Συντομευμένο)	Σφάλμα (Αναλυτικό – Σταθερό 0.557 MWh/tn)	Q [MW]	Αναλυτικό q^{in} (Eq.7.15)	Σφάλμα (Αναλυτικό – Συντομευμένο)	Σφάλμα (Αναλυτικό – Σταθερό 0.557 MWh/tn)
300	0.557	1	0.557	0.0%	0%	10	0.557	0.0%	0%	100	0.557	0.0%	0%
280	0.567	1	0.576	1.5%	3%	10	0.568	0.2%	2%	100	0.566	0.2%	2%
260	0.576	1	0.585	1.6%	5%	10	0.576	0.2%	3%	100	0.574	0.2%	3%
240	0.583	1	0.592	1.6%	6%	10	0.583	0.2%	5%	100	0.581	0.2%	4%
220	0.588	1	0.598	1.6%	7%	10	0.589	0.2%	5%	100	0.587	0.2%	5%
200	0.592	1	0.602	1.7%	8%	10	0.593	0.2%	6%	100	0.592	0.1%	6%
180	0.595	1	0.605	1.7%	8%	10	0.596	0.2%	7%	100	0.595	0.1%	6%
160	0.597	1	0.607	1.7%	8%	10	0.598	0.2%	7%	100	0.596	0.1%	7%
140	0.597	1	0.608	1.8%	8%	10	0.598	0.2%	7%	100	0.597	0.0%	7%
120	0.596	1	0.607	1.8%	8%	10	0.597	0.2%	7%	100	0.597	0.0%	7%
100	0.594	1	0.605	1.8%	8%	10	0.596	0.2%	6%	100	0.595	0.1%	6%
			Μέσο σφάλμα:	1.7%	7%		Μέσο σφάλμα:	0.2%	5%		Μέσο σφάλμα:	0.1%	5%

Τα σφάλματα που υπολογίζονται στον Πίνακα 7.4 αφορούν τη σύγκριση του αναλυτικού μοντέλου με τα αποτελέσματα του συντομευμένου μοντέλου της ενότητας 7.4.1 και της σταθερής τιμής (0.557 MWh/tn). Όπως φαίνεται στην τελευταία γραμμή, τα αποτελέσματα του συντομευμένου μοντέλου δίνουν σημαντικά μικρότερες αποκλίσεις, 1.7%, 0.2% και μόλις 0.1%, από τα πραγματικά-αναλυτικά αποτελέσματα έναντι της υπόθεσης σταθερής τιμής που παρουσιάζει αντίστοιχα σφάλματα 7%, 5% και 5%. Μάλιστα, στην περίπτωση μεγάλης χωρητικότητας τουρμπίνων, 100 MW ατμού, παρατηρούνται αποκλίσεις μόλις στο τρίτο δεκαδικό εκτίμησης της q^{in} με χρήση του συντομευμένου μοντέλου, επιβεβαιώνοντας την υπόθεση $n_{is,max} = \frac{1}{B}$ για μεγάλες ροές ατμού. Το μη-γραμμικό και αναλυτικό μοντέλο υπολογισμού της q^{in} της βιβλιογραφίας μπορεί να αντικατασταθεί από την εξίσωση Eq.7.24, και οι προσεγγίσεις των ειδικών ενθαλπιών εισόδου μπορούν να αντιμετωπιστούν ως παράμετροι του

ΤΗΜ κατά την εφαρμογή του μαζί με το συνδυαστικό μοντέλο σύνθεσης, ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής.

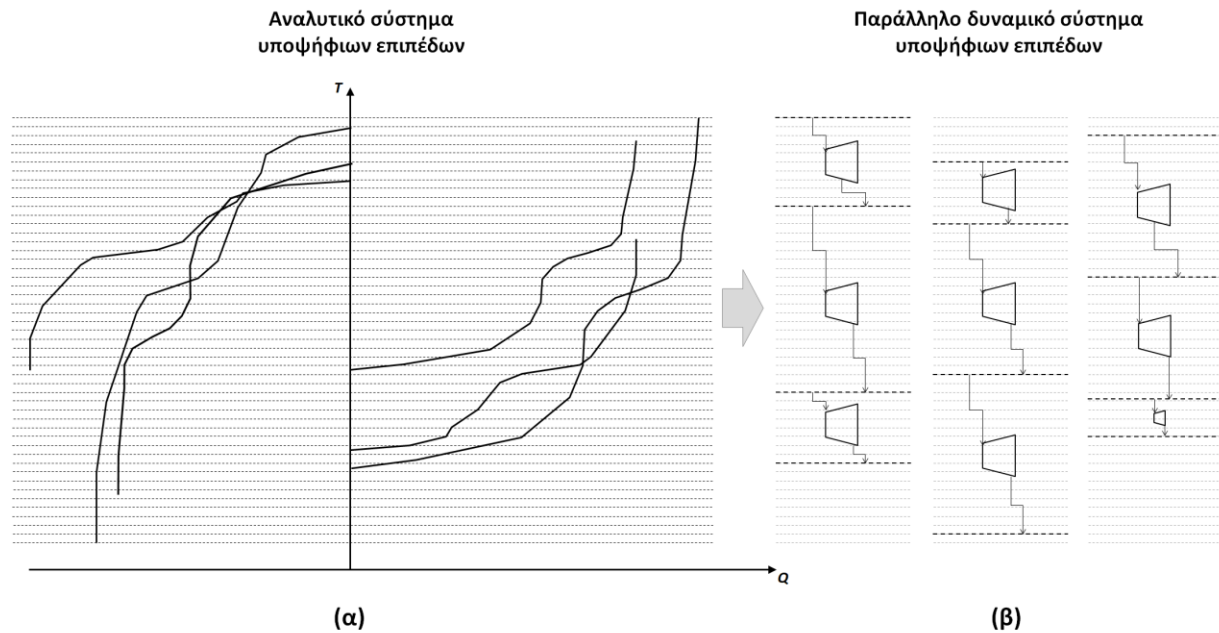
7.4.3. Παράλληλο δυναμικό σύστημα βελτιστοποίησης επιπέδων ατμού

Η βελτιστοποίηση των επιπέδων πίεσης με χρήση περιορισμένου αριθμού επιλογών, όπως του Σχήματος 7.7α, δεν επαρκεί για να εντοπίσει τις βέλτιστες πύλες (επίπεδα) ενεργειακής ανταλλαγής μεταξύ των διεργασιών στην Συνολική Μονάδα και παράλληλα να μεγιστοποιήσει τις αποδόσεις συμπαραγωγής έργου. Μάλιστα, τέτοια σχήματα υποκρύπτουν μεροληψία στην επιλογή υποψήφια επιπέδων. Αντί αυτών, προτείνεται η χρήση αναλυτικών συστημάτων, όπως αυτό του Σχήματος 7.9, ως αντίμετρο στην αντιμετώπιση των επιπέδων πίεσης ατμού ως συνεχείς μεταβλητές. Τα υποψήφια επίπεδα πρέπει να μπορούν να εφαρμόσουν παροχές καθ' όλο το θερμοκρασιακό εύρος της Συνολικής Μονάδας για τον εντοπισμό ροών θερμότητας σε οποιαδήποτε θερμοκρασιακό ενδιαμέσο. Η χρήση του βελτιωμένου μοντέλου ΤΗΜ (Eq.7.11, Eq.7.24, Eq.7.25 και Eq.7.26) είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ορθότητας των αποτελεσμάτων σε περίπτωση που επιλεγούν στενές ζώνες εκτόνωσης για κάποιον κύλινδρο.

Η χρήση αναλυτικών συστημάτων επιπέδων ατμού αναπτύσσουν καταρράκτες πολλαπλών στενών ζωνών εκτόνωσης. Ως εκ τούτου, κατά τον υπολογισμό της ισοδύναμης ισχύος μίας σύνθετης τουρμπίνας αναμένεται η άθροιση πολλαπλών επιμέρους σφαλμάτων για κάθε κύλινδρο σε κάθε στενή ζώνη. Είναι φανερό ότι τέτοιοι κύλινδροι δεν αντιπροσωπεύουν τους πραγματικούς μεμονωμένους κυλίνδρους της σύνθετης τουρμπίνας, αλλά περιγράφουν την παραγόμενη ισχύ σε όλες τις ενδιάμεσες βαθμίδες πίεσης ($\frac{\Delta E^{max}}{\Delta P}$) του πραγματικού κυλίνδρου. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να προκαλέσει ανησυχίες μόνο σε περιπτώσεις τουρμπίνων με πολύ μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές, π.χ. για τουρμπίνα που λειτουργεί με θερμοκρασιακή διαφορά 150 °C και η χρήση υποψήφια ζωνών εκτόνωσης ανά 5 °C θα χρειαστεί την άθροιση της ισχύος 29 επιμέρους ψευδο-κυλίνδρων. Για αυτό τον λόγο, προτείνεται το αναλυτικό σύστημα επιπέδων να προετοιμάζει ένα παράλληλο δυναμικό σύστημα επιπέδων που θα περιλαμβάνει τα επίπεδα που επιλέγονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης και όπου θα εφαρμόζεται το βελτιωμένο ΤΗΜ, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.13.

Από τη μία, το αναλυτικό σύστημα επιτρέπει την επιλογή οποιοδήποτε συνδυασμού πιέσεων ξεπερνώντας τα ζητήματα που προκύπτουν από τη χρήση των χαλαρών συστημάτων της βιβλιογραφίας. Από την άλλη, η μεταφορά των επιλεγμένων επιπέδων – αυτά αντικατοπτρίζουν τα

πραγματικά επίπεδα της σύνθετης τουρμπίνας και της Συνολικής Μονάδας – σε ένα παράλληλο σύστημα επιπέδων θα επιτρέψει τον υπολογισμό της πραγματικής ισχύος των κυλίνδρων της σύνθετης τουρμπίνας παραβλέποντας (τα σφάλματα που αθροίζονται από) όλες τις ενδιάμεσες βαθμίδες πίεσης. Σημειώνεται ότι, η στρατηγική αυτή δεν αποκλείει την επιλογή κυλίνδρων σε μικρές θερμοκρασιακές διαφορές στο παράλληλο σύστημα.



Σχήμα 7.13: Πυκνό σύστημα υποψήφιων επιπέδων βοηθητικών παροχών (α) και ανάπτυξη παράλληλου δυναμικού συστήματος ζωνών εκτόνωσης ατμού (β)

Το πυκνό σύστημα επιπέδων λειτουργεί ως δεξαμενή υποψήφιων επιπέδων, τα οποία επιλέγονται και ενεργοποιούνται με τη χρήση δυαδικών μεταβλητών. Τα ενεργοποιημένα επίπεδα σχηματίζουν ένα παράλληλο σύστημα επιπέδων ατμού (Σχήμα 7.13β) για τα οποία εφαρμόζονται οι υπολογισμοί συμπαραγωγής και της ολοκλήρωσης. Το παράλληλο σύστημα επιπέδων μπορεί να φιλοξενήσει κάθε συνδυασμό επιπέδων ατμού από το πυκνό σύστημα. Τα επίπεδα του πυκνού συστήματος απαρτίζουν τα υποψήφια επίπεδα του USS (Κεφάλαιο 5), τα οποία επιλέγονται με τη χρήση δυαδικών μεταβλητών (y_m και y_n) και χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης με τη χρήση των μοντέλων μεταφόρτωσης ICT ή CIT.

Τα θερμικά υπόλοιπα R_n^W υποδεικνύονται από τις ψευδο-ψυχρές παροχές, δηλαδή $\forall n \in W_m \subseteq W$. Τα στοιχεία του W_m περιλαμβάνουν όλες τις υποψήφιες θέσεις ατμού του πυκνού συστήματος επιπέδων.

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

Ακολούθως, ορίζονται πανομοιότυπα σύνολα $n', n'' \in W_m$. Το THM εφαρμόζεται για κάθε ζώνη εκτόνωσης που σχηματίζεται από την επιλογή συνδυασμών n' και n'' . Ακολούθως η ΔT^{sat} κάθε ζώνης ορίζεται για κάθε ζεύγος $n'-n'' \in W_m$, όπου το επίπεδο n' αφορά επίπεδο υψηλότερης θερμοκρασίας από αυτό του n'' , ως εξής:

$$\Delta T_{n',n''} = T_{n'} - T_{n''} \quad \forall n', n'' \in W_m: T_{n'}^{sat} > T_{n''}^{sat} \quad Eq. 7.27$$

Δεδομένου ότι τα επίπεδα του πυκνού συστήματος είναι γνωστά εκ των προτέρων, όλα τα $\Delta T_{n',n''}$ αποτελούν παραμέτρους του προβλήματος. Ακολούθως, εισάγονται λογικοί περιορισμοί για τη διαμόρφωση του παράλληλου συστήματος επιπέδων, τα οποία προορίζονται για τη δημιουργία των (εν σειρά) ζωνών εκτόνωσης.

Έστω, $y_{n',n''}$ η δυαδική μεταβλητή επιλογής κάθε ζεύγους $n'-n''$. Τα επίπεδα του USS που επιλέγονται μέσω των δυαδικών μεταβλητών y_n για κάθε ψευδο-ψυχρή παροχή (βλ. Κεφάλαιο 5) ακολούθως καθορίζουν τα ζεύγη των επιλεγμένων επιπέδων του παράλληλου συστήματος επιπέδων, ως εξής:

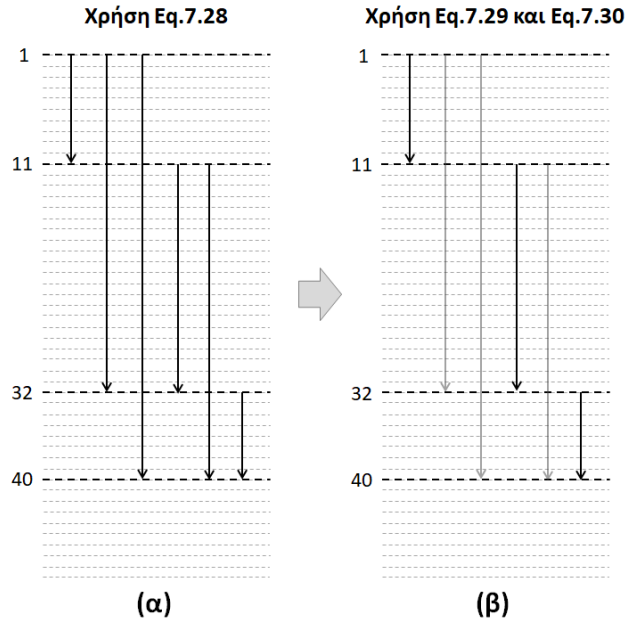
$$2 \cdot y_{n',n''} \leq y_{n'} + y_{n''} \quad \forall n', n'' \in W_m: T_{n'}^{sat} > T_{n''}^{sat} \quad Eq. 7.28$$

Η εξίσωση Eq.7.28 σχηματίζει όλες τις πιθανές ζώνες εκτόνωσης που προκύπτουν από ένα σύνολο ενεργοποιημένων επιπέδων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.14α. Η ενεργοποίηση των επιπέδων 1, 11, 32 και 40 οδηγεί, μέσω της Eq.7.28, στο σχηματισμό 6 επικαλυπτόμενων ζωνών εκτόνωσης που αφορούν κάθε συνδυασμό των επιλεγμένων επιπέδων. Για την αποφυγή σχηματισμού επικαλυπτόμενων ζωνών, και το σχηματισμό εν σειρά ζωνών, όπου ορίζονται οι κύλινδροι της σύνθετης τουρμπίνας εισάγονται οι ακόλουθοι περιορισμοί:

$$\sum_{n'' \in W: T_{n'} > T_{n''}} y_{n',n''} < 1 \quad \forall n' \in W_m \quad Eq. 7.29$$

$$\sum_{n' \in W: T_{n'} > T_{n''}} y_{n',n''} < 1 \quad \forall n'' \in W_m \quad Eq. 7.30$$

Ύστερα, από την εφαρμογή των Eq.7.29 και Eq.7.30, οι ζώνες του Σχήματος 7.14α περικόπτονται και διαμορφώνουν το σύμπλεγμα των ζωνών του Σχήματος 7.14β: 1-11, 11-32 και 32-40, οι οποίες καθορίζουν το καταρράκτη απλών τουρμπίνων.



Σχήμα 7.14: Αποκλεισμός επικαλυπτόμενων ζωνών εκτόνωσης

Προαιρετικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ακόλουθος περιορισμός, ο οποίος επαληθεύει τον αριθμό των σχηματισμένων ζωνών συναρτήσει του αριθμού των ενεργοποιημένων επιπέδων:

$$\sum_{n \in W_m} y_n - 1 = \sum_{n', n'' \in W_m: T_{n'}^{sat} > T_{n''}^{sat}} y_{n', n''} \quad Eq. 7.31$$

Επίσης προαιρετικά, χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση για τον καθορισμό της ελάχιστης θερμοκρασιακής διαφοράς των ζωνών εκτόνωσης του παράλληλου συστήματος που επιτρέπει ο χρήστης για πρακτικούς λόγους ή λόγους ακρίβειας του μοντέλου συμπαραγωγής που χρησιμοποιεί:

$$y_{n'} + y_{n''} \leq 1 \quad \forall n', n'' \in W_m: (T_{n'} - T_{n''} \leq \Delta T^{LB}) \quad Eq. 7.32$$

όπου η παράμετρος ΔT^{LB} αποτελεί την ελάχιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ δύο επιλεγμένων επιπέδων από το πυκνό σύστημα. Τέλος, υπενθυμίζεται ότι ο μέγιστος αριθμός των επιλεγμένων επιπέδων του USS ορίζεται από τις εξισώσεις Eq.5.12/Eq.5.26 που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα μεταφόρτωσης.

Οι εξισώσεις Eq.7.28 έως Eq.7.32 καθορίζουν το σχηματισμό ζωνών εκτόνωσης με σκοπό την εκτίμηση της συμπαραγωγής. Ακολούθως, παρουσιάζονται προγραμματιστικές τεχνικές για την εφαρμογή του μοντέλου συμπαραγωγής σε κάθε ζώνη του παράλληλου συστήματος επιπέδων.

7.4.4. Προγραμματιστικές τεχνικές εφαρμογής του αναβαθμισμένου μοντέλου THM

Το THM *απαρτίζεται από τις εξισώσεις Eq.7.11, Eq.7.25 και Eq.7.26:*

- $E^{max} = \frac{1}{B} (\overline{\Delta H}_{is} \cdot M^{max} - A)$ (Eq. 7.11)

- για $E^{max} < E^b$

- $A^1 = a_0 + a_1 \cdot T_{in}^{sat} + a_2 \cdot \Delta T^{sat} + a_3 \cdot q^{in}$

- $B^1 = a_4 + a_5 \cdot T_{in}^{sat} + a_6 \cdot \Delta T^{sat} + a_7 \cdot q^{in}$ (Eq. 7.25)

- για $E^{max} > E^b$

- $A^2 = a_0 + a_1 \cdot T_{in}^{sat} + a_2 \cdot \Delta T^{sat} + a_3 \cdot q^{in}$

- $B^2 = a_4 + a_5 \cdot T_{in}^{sat} + a_6 \cdot \Delta T^{sat} + a_7 \cdot q^{in}$ (Eq. 7.26)

όπου τα E^b και a_0 - a_7 δίνονται στον Πίνακα 7.3, ενώ τα $\overline{\Delta H}_{is}$, q^{in} , και ΔT^{sat} αποτελούν **παραμέτρους** του μοντέλου – δεδομένων των επιπέδων του πυκνού συστήματος υποψήφιων επιπέδων – και υπολογίζονται από τις **Eq.7.14, Eq.7.24 και Eq.7.27**, ως εξής:

- $\overline{\Delta H}_{is} = \frac{\Delta T^{sat}}{1854 - 1931 \cdot q^{in}}$ (Eq. 7.14)

- $q_n^{out} = q_n^{in} + c_p \cdot \Delta T_n^{sat} - \frac{1}{a_4 + a_5 \cdot T_{in}^{sat} + a_6 \cdot \Delta T^{sat} + a_7 \cdot q^{in}} \cdot \overline{\Delta H}_{is} \quad \forall n \in W_m, m \in S$ (Eq. 7.24)

- $\Delta T_{n',n''} = T_{n'} - T_{n''} \quad \forall n', n'' \in W_m: T_{n'}^{sat} > T_{n''}^{sat}$ (Eq. 7.27)

Οι τιμές των παραμέτρων A και B εξαρτώνται από τα αποτελέσματα ισχύος που αναμένονται από το μοντέλο και αναλόγως υπολογίζονται μέσω των Eq.7.25 ή την Eq.7.26. Το γεγονός αυτό προκαλεί ανεπιθύμητες μη-γραμμικότητες κατά την εφαρμογή του THM στα πλαίσια ενός μοντέλου βελτιστοποίησης και στη βιβλιογραφία αντιμετωπίζονταν με την επιλογή μίας εκ των δύο εκδοχών υπολογισμού (συνήθως αυτή της που ισχύει για μικρές αποδόσεις ισχύος) αναλόγως τα εύρη ισχύος

που αναμένονται σε κάθε περίπτωση σχεδιασμού. Για την αποφυγή τέτοιων σφαλμάτων στην εκτίμηση της συμπαραγωγής προτείνεται μία προγραμματιστική τεχνική για την εναλλαγή των παραμέτρων A και B του THM σύμφωνα με την πραγματική υπολογισμένη ισχύ από το μοντέλο κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης.

Οι παράμετροι A και B οφείλουν να προσαρμόζονται σύμφωνα με τη ισχύ που εκτιμάται από το THM, ενώ ταυτόχρονα το THM πρέπει να προσαρμόζεται σύμφωνα με τις κατάλληλες τιμές των παραμέτρων A και B . Ως εκ τούτου, τα THM ορίζεται για κάθε περίπτωση εύρους ισχύος (E^b) και αναλύεται στη μορφή:

$$E_{n',n''}^1 = \frac{1}{B_{n',n''}^1} \cdot \left(\overline{\Delta H}_{isn',n''} \cdot \frac{R_{n'}}{q_{n',n''}^{in}} - A_{n',n''}^1 \right) \quad \forall n', n'' \in W_m: T_{n'} > T_{n''} \quad Eq. 7.33.1$$

$$E_{n',n''}^2 = \frac{1}{B_{n',n''}^2} \cdot \left(\overline{\Delta H}_{isn',n''} \cdot \frac{R_{n'}}{q_{n',n''}^{in}} - A_{n',n''}^2 \right) \quad \forall n', n'' \in W_m: T_{n'} > T_{n''} \quad Eq. 7.33.2$$

όπου τα A^1 και B^1 υπολογίζονται από την Eq.7.25 και τα A^2 και B^2 από την Eq. 7.26. Ωστόσο, οι εξισώσεις της Eq.7.33 εφαρμόζονται για κάθε συνδυασμό ζωνών εκτόνωσης n', n'' και επαναδιατυπώνονται κατάλληλα για τον υπολογισμό της ισχύος μόνο στις ζώνες του παράλληλου συστήματος επιπέδων που έχουν επιλεγεί μέσω των δυαδικών μεταβλητών $y_{n',n''}$, και αναλύονται ως εξής:

- η Eq.7.33.1 αναλύεται στις:

$$- E_{n',n''}^1 \leq \frac{1}{B_{n',n''}^1} \cdot \left(\overline{\Delta H}_{isn',n''} \cdot \frac{R_{n'}}{q_{n',n''}^{in}} - A_{n',n''}^1 \right) + (1 - y_{n',n''}) \cdot U \quad Eq. 7.34.1$$

$$- E_{n',n''}^1 \geq \frac{1}{B_{n',n''}^1} \cdot \left(\overline{\Delta H}_{isn',n''} \cdot \frac{R_{n'}}{q_{n',n''}^{in}} - A_{n',n''}^1 \right) + (y_{n',n''} - 1) \cdot U \quad Eq. 7.34.2$$

$$- E_{n',n''}^1 \leq y_{n',n''} \cdot U \quad Eq. 7.34.3$$

$$- E_{n',n''}^1 \geq -y_{n',n''} \cdot U \quad Eq. 7.34.4$$

$$\forall n', n'' \in W_m: T_{n'} > T_{n''}$$

- και η 7.33.2 αναλύεται στις:

$$- E_{n',n''}^2 \leq \frac{1}{B_{n',n''}^2} \cdot \left(\overline{\Delta H}_{isn',n''} \cdot \frac{R_{n'}}{q_{n',n''}^{in}} - A_{n',n''}^2 \right) + (1 - y_{n',n''}) \cdot U \quad Eq. 7.35.1$$

$$- E_{n',n''}^2 \geq \frac{1}{B_{n',n''}^2} \cdot \left(\overline{\Delta H}_{is_{n',n''}} \cdot \frac{R_{n'}}{q_{n',n''}^{in}} - A_{n',n''}^2 \right) + (y_{n',n''} - 1) \cdot U \quad Eq. 7.35.2$$

$$- E_{n',n''}^2 \leq y_{n',n''} \cdot U \quad Eq. 7.35.3$$

$$- E_{n',n''}^2 \geq -y_{n',n''} \cdot U \quad Eq. 7.35.4$$

$$\forall n', n'' \in W_m: T_{n'} > T_{n''}$$

όπου $R_{n'}$ η θερμότητα του ατμού στην εισόδου της τουρμπίνας και U ένας πολύ μεγάλος αριθμός.

Οι ανισότητες Eq.7.34.1-2 και Eq.7.35.1-2 υπολογίζουν την ισχύ στις επιλεγμένες ζώνες εκτόνωσης, ενώ οι Eq.7.34.3-4 και Eq.7.35.3-4 μηδενίζουν την ισχύ στις ζώνες που δεν έχουν επιλεγεί. Οι ακόλουθες εξισώσεις ενσωματώνονται επιπλέον για τον έλεγχο των τιμών $E_{n',n''}^1$ και $E_{n',n''}^2$ συναρτήσει της οριακής τιμής E^b με σκοπό την εναλλαγή μεταξύ των δύο διατυπώσεων του THM για άνω ή κάτω του E^b :

$$\frac{E_{n',n''}^1 + E_{n',n''}^2}{2} \leq y_{n',n''}^C \cdot E^b + (1 - y_{n',n''}^C) \cdot U \quad \forall n', n'' \in W_m: T_{n'} > T_{n''} \quad Eq. 7.36.1$$

$$\frac{E_{n',n''}^1 + E_{n',n''}^2}{2} \geq (1 - y_{n',n''}^C) \cdot E^b \quad \forall n', n'' \in W_m: T_{n'} > T_{n''} \quad Eq. 7.36.2$$

όπου: $y_{n',n''}^C = \begin{cases} 1, \text{ισχύς μικρότερη του } E^b \\ 0, \text{ισχύς μεγαλύτερη του } E^b \end{cases}$. Στην περίπτωση του αναθεωρημένου THM: $E^b =$

3.26 MW (Πίνακας 7.3)

Η πραγματική ισχύς κάθε ζώνης, $E_{n',n''}$, υπολογίζεται μέσω της συνεισφοράς (ή όχι) των δύο επιμέρους μεταβλητών ισχύος $\overline{E_{n',n''}^1}$ και $\overline{E_{n',n''}^2}$ που αντικατοπτρίζουν τις εκτιμήσεις ισχύος κάτω και άνω του E^b , αντίστοιχα, ως εξής:

$$E_{n',n''} = \overline{E_{n',n''}^1} + \overline{E_{n',n''}^2} \quad Eq. 7.37$$

όπου:

$$\bullet \overline{E_{n',n''}^1} \leq E_{n',n''}^1 + (1 - y_{n',n''}^C) \cdot U \quad Eq. 7.38.1$$

$$\bullet \overline{E_{n',n''}^1} \geq E_{n',n''}^1 + (y_{n',n''}^C - 1) \cdot U \quad Eq. 7.38.2$$

$$\bullet \overline{E_{n',n''}^1} \leq y_{n',n''}^C \cdot U \quad Eq. 7.38.3$$

$$\bullet \overline{E_{n',n''}^1} \geq -y_{n',n''}^C \cdot U \quad Eq. 7.38.4$$

$$\bullet \overline{E_{n',n''}^2} \leq E_{n',n''}^2 + y_{n',n''}^C \cdot U \quad \text{Eq. 7.38.5}$$

$$\bullet \overline{E_{n',n''}^2} \geq E_{n',n''}^2 - y_{n',n''}^C \cdot U \quad \text{Eq. 7.38.6}$$

$$\bullet \overline{E_{n',n''}^2} \leq (1 - y_{n',n''}^C) \cdot U \quad \text{Eq. 7.38.7}$$

$$\bullet \overline{E_{n',n''}^2} \geq (y_{n',n''}^C - 1) \cdot U \quad \text{Eq. 7.38.8}$$

$$\forall n', n'' \in W_m: (T_{n'} > T_{n''})$$

Η μαθηματική διατύπωση του αναθεωρημένου μοντέλου THM απαρτίζεται από τις εξισώσεις Eq.7.34-Eq.7.38 για την εκτίμηση της συμπαραγωγής σε κάθε ζώνη εκτόνωσης και ενσωματώνεται στο μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης ICT/CIT, αντικαθιστώντας την απλοποιημένη μορφή του THM της εξίσωσης Eq.7.11. Το αναλυτικό σύστημα εξισώσεων του THM λειτουργεί ως εξής:

1. Οι Eq.7.34 και Eq.7.35 υπολογίζουν την τιμή ισχύος, $E_{n',n''}^1$ και $E_{n',n''}^2$, σε κάθε περιοχή ισχύος (άνω/κάτω 3.26 MW) χρησιμοποιώντας και τις δύο περιπτώσεις τιμών των παραμέτρων A και B .

a. Εάν η ζώνη $n'-n''$ υφίσταται στο παράλληλο σύστημα ($y_{n',n''} = 1$), τότε οι $E_{n',n''}^1 \neq 0$ και $E_{n',n''}^2 \neq 0$ μέσω των Eq.34.1-2 και Eq.35.1-2.

b. Ειδάλλως ($y_{n',n''} = 0$), $E_{n',n''}^1 = 0$ και $E_{n',n''}^2 = 0$ μέσω των Eq.7.34.3-4 και Eq.7.35.3-4.

c. Η Eq.7.36 εκτιμά εάν η μέση τιμή των τιμών ισχύος ($E_{n',n''}^1$ και $E_{n',n''}^2$) κάθε περιοχής βρίσκεται άνω ($y_{n',n''}^C = 0$) ή κάτω ($y_{n',n''}^C = 1$) των 3.26 MW (Πίνακας 7.3).

2. Η Eq.7.38 μεταφέρει τα αποτελέσματα ισχύος ($E_{n',n''}^1$ και $E_{n',n''}^2$) στις ενδιάμεσες μεταβλητές $\overline{E_{n',n''}^1}$ και $\overline{E_{n',n''}^2}$ σύμφωνα με την περιοχή που εκτιμήθηκε (από την Eq.7.36) ότι ανήκει η τιμή της ισχύος. Ακολουθως:

a. Εάν η ισχύς $< 3.26 \text{ MW}$ $\xrightarrow{\text{Eq.7.36.1 και Eq.7.36.2}}$ $y_{n',n''}^C = 1$, τότε:

$$1) \overline{E_{n',n''}^1} = E_{n',n''}^1 \quad (\text{Eq. 7.38.1 και Eq. 7.38.2})$$

$$2) \overline{E_{n',n''}^2} = 0 \quad (\text{Eq. 7.38.7 και Eq. 7.38.8})$$

b. Εάν η ισχύς $> 3.26 \text{ MW}$ $\xrightarrow{\text{Eq.7.36.1 και Eq.7.36.2}}$ $y_{n',n''}^C = 0$, τότε:

i. $\overline{E_{n',n''}^1} = 0$ (Eq. 7.38.3 και Eq. 7.38.4)

ii. $\overline{E_{n',n''}^2} = E_{n',n''}^2$ (Eq. 7.38.5 και Eq. 7.38.6)

3. Η Eq.7.37 υπολογίζει την τελική τιμή ισχύος συνυπολογίζοντας την συνεισφορά των $\overline{E_{n',n''}^1}$ και $\overline{E_{n',n''}^2}$, πραγματοποιώντας την εναλλαγή μεταξύ των αποτελεσμάτων που δίνει το THM για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων A και B , ως εξής:

a. Εάν ισχύς $< 3.26 MW$: $E_{n',n''} = \overline{E_{n',n''}^1} = E_{n',n''}^1$ (Eq. 7.37)

b. Για ισχύ $> 3.26 MW$: $E_{n',n''} = \overline{E_{n',n''}^2} = E_{n',n''}^2$ (Eq. 7.37)

4. Στην περίπτωση όπου μία ζώνη δεν επιλέχθηκε στο παράλληλο σύστημα επιπέδων, τότε:

a. $E_{n',n''}^1 = 0$ και $E_{n',n''}^2 = 0$ (Eq. 7.34)

b. $\overline{E_{n',n''}^1} = \overline{E_{n',n''}^2} = 0$ (Eq. 7.38)

c. $E_{n',n''} = \overline{E_{n',n''}^1} + \overline{E_{n',n''}^2} = 0$ (Eq. 7.37)

Η συνολική ισχύς της Συνολικής Μονάδας υπολογίζεται ως:

$$E_{cogen} = \sum_{\forall n',n'' \in W_m: T_{n'} > T_{n''}} E_{n',n''} \quad Eq. 7.39$$

Το συνολικό μοντέλο THM περιλαμβάνει τις γραμμικές εξισώσεις Eq.7.28-Eq.7.32 για το σχηματισμό του παράλληλου συστήματος επιπέδων και τις Eq.7.34-Eq.7.38 για τον ασφαλή υπολογισμό της συμπαραγωγής σε κάθε επιλεγμένη ζώνη εκτόνωσης. Προαιρετικά, ο χρήστης μπορεί να παραλείψει τις εξισώσεις αυτές, και να χρησιμοποιεί απευθείας το απλοποιημένο μοντέλο THM με τις εξισώσεις Eq.7.11, Eq.7.25 και Eq.7.26, λαμβάνοντας υπόψη την ενσωμάτωση σφαλμάτων στην εκτίμηση της συμπαραγωγής.

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος ενεργειακής βελτιστοποίησης – όπως παρουσιάστηκε στα μοντέλα μεταφόρτωσης μέσω των εξισώσεων Eq.5.13/Eq.5.27 – επεκτείνεται, ως εξής:

$$Min \quad E^{TS} = \sum_{m \in S} c_m \cdot Q_m^{TS} + \sum_{n \in W} c_n \cdot Q_n^{TS} - E_{cogen} \cdot c_{cogen} \quad Eq. 7.40$$

όπου c_{cogen} αποτελεί την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και ο όρος $E_{cogen} \cdot c_{cogen}$ εκφράζει είτε την εξοικονόμηση πόρων ηλεκτρικής ενέργειας είτε το κέρδος από την πώλησή της στο δίκτυο.

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

Το αναθεωρημένο μοντέλο THM συνδυάζεται με τα μοντέλα ενεργειακής μεταφόρτωσης ICT ή CIT του Κεφαλαίου 5 για την ταυτόχρονη εφαρμογή άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης και την εκτίμηση της συμπαραγωγής Συνολικής Μονάδας αντικαθιστώντας τις γραφικές παραστάσεις SSSP ή άλλα μοντέλα ενεργειακής βελτιστοποίησης της βιβλιογραφίας. Οι δυαδικές μεταβλητές απόφασης y_n (επιλέγουν επίπεδα του USS) αποτελούν κοινές μεταβλητές των μοντέλων μεταφόρτωσης και του THM συνδέοντας τα δύο μοντέλα μεταξύ τους.

Τα μοντέλα μεταφόρτωσης ενσωματώνουν τις επιλογές διαχείρισης ενέργειας σε κάθε θερμοκρασιακό ενδιάμεσο της Συνολικής Μονάδας. Οι ροές Q_{pn} (για το ICT) και Q_{ink} (για το CIT) εντοπίζουν διαθέσιμη θερμότητα, ενώ οι ροές Q_{nm} και R_n^W αντίστοιχα μοιράζουν τη διαθέσιμη θερμότητα είτε για έμμεση ολοκλήρωση προς άλλα ενδιάμεσα της Συνολικής Μονάδας, είτε για σκοπούς συμπαραγωγής, αντίστοιχα. Το αναλυτικό σύστημα υποψήφιων επιπέδων του USS επιτρέπει τη εφαρμογή των ενεργειακών ρών των μοντέλων μεταφόρτωσης σε πολλαπλά σημεία κατά μήκος του θερμοκρασιακού εύρους της Συνολικής μονάδας ενισχύοντας τις αποδόσεις ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής.

Η παροχή θέρμανσης εξασφαλίζεται **μόνον** από φρέσκο ατμό πολύ υψηλής πίεσης (παράγεται στον καυστήρα της Μονάδας), ο οποίος εκτονώνεται σε κατώτερα θερμοκρασιακά επίπεδα παράγοντας τα ενδιάμεσα επίπεδα ατμού σύμφωνα με τις επιλογές που γίνονται στο σύστημα υποψήφιων επιπέδων. Ως εκ τούτου, όλες οι ενδιάμεσες παροχές φρέσκου ατμού Q_m^S των ICT/CIT απενεργοποιούνται εκτός από αυτήν που βρίσκεται στο υψηλότερο επίπεδο (VHP), το οποίο επιλέγεται σε κάθε περίπτωση. Τα υποψήφια επίπεδα του USS αναπτύσσονται μεταξύ της υψηλότερης (π.χ. 300 °C, ατμός 90 bar) και χαμηλότερης (100 °C, ατμός 1 bar) θερμοκρασίας κορεσμού, ενώ ενδιάμεσα συμπληρώνονται υποψήφια επίπεδα σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους (π.χ. 10 °C) ή σε αποστάσεις σύμφωνα με την κρίση του χρήστη και τη μορφολογία του SSSP (εάν είναι γνωστή). Σε αυτά προστίθενται και τα επίπεδα ψυχρών παροχών, όπως κρύο νερό 25 °C και κύκλα ψύξης (0 °C, -10 °C κ.ά.).

Το συνολικό μοντέλο βελτιστοποίησης απαρτίζεται από:

- 1) τις εξισώσεις ολοκλήρωσης: Eq.5.1-Eq.5.12 (ICT) **ή** Eq.5.14-Eq.5.26 (CIT)
- 2) τις εξισώσεις συμπαραγωγής: Eq.7.11, Eq.7.25.Eq.7.26 **ή** το αναλυτικό μοντέλο Eq.7.34-Eq.7.38 για την ορθή χρήση των παραμέτρων A και B
- 3) τις εξισώσεις του παράλληλου συστήματος επιπέδων: Eq.7.28-Eq.7.32 και

- 4) την αντικειμενική συνάρτηση (Eq.7.40) υπολογισμού του κόστους βοηθητικών παροχών και της κερδοφορίας από τη συμπαραγωγή.

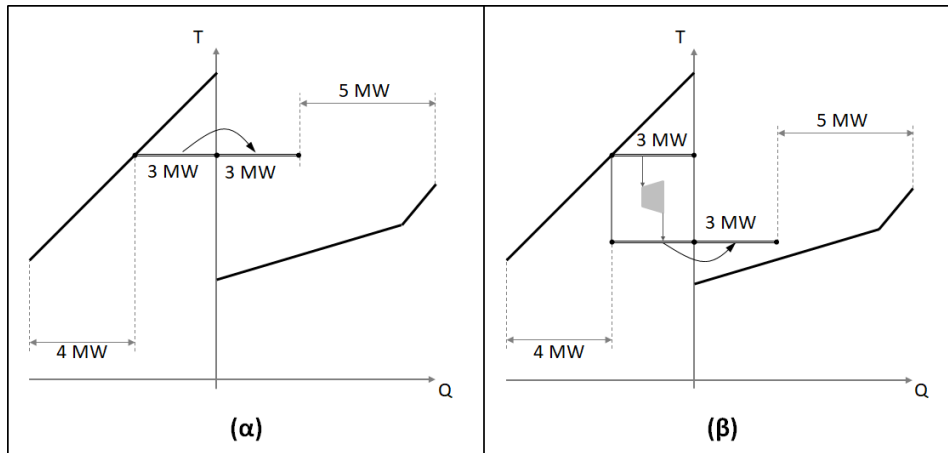
Στην περίπτωση όπου το πρόβλημα αφορά τη διερεύνηση υποψήφιων διεργασιών, τότε συνδυάζονται και οι εξισώσεις του BBR, και το συνολικό μοντέλο BBR-ICT-THM ή BBR-CIT-THM εφαρμόζεται για τη σύνθεση της ενεργειακά (Eq.7.40) ή οικονομικά (Eq.5.28) βέλτιστης Συνολικής Μονάδας.

7.5. Παραδείγματα και εφαρμογές

7.5.1. Ανταγωνιστικότητα έμμεσης ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής

Στο παράδειγμα περιγράφονται οι βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος ανταγωνιστικότητας μεταξύ έμμεσης ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής και η συνδυαστική χρήση των ICT/CIT-THM για την αντιμετώπισή του. Διαθέσιμη θερμότητα διεργασιών εξάγεται για την παραγωγή ατμού, ο οποίος είτε χρησιμοποιείται απευθείας από τη Συνολική Μονάδα, είτε εκτονώνεται για την παραγωγή έργου και έπειτα αξιοποιείται από τη Συνολική Μονάδα ως υποβαθμισμένος ατμός. Αν και το δεύτερο σενάριο φαίνεται αποδοτικότερο από το πρώτο, κινδυνεύει να αποφέρει μικρότερες αποδόσεις λόγω απωλειών έμμεσης ολοκλήρωσης ενεργοβόρων ρευμάτων κατά μήκος της ζώνης εκτόνωσης. Οι κυρίαρχοι βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος παρουσιάζονται μέσω των SSSP των Σχημάτων 7.15 και 7.16.

Στο Σχήμα 7.15α παρουσιάζεται η διαδικασία ολοκλήρωσης, όταν η συμπαραγωγή δεν λαμβάνεται υπόψη. 3 MW ατμού προέρχονται από τις πηγές του SSSP και αξιοποιούνται απευθείας στις καταβόθρες, ενώ οι υπόλοιπες ανάγκες καλύπτονται από φρέσκο ατμό (5 MW). Στο Σχήμα 7.15β, αξιοποιούνται στο μέγιστο οι δυνατότητες συμπαραγωγής. Η Συνολική Μονάδα παράγει 3 MW ατμού, ο οποίος εκτονώνεται για παραγωγή έργου, ενώ ο εκρέων ατμός καλύπτει 3 MW των αναγκών της Συνολικής Μονάδας. 5 MW φρέσκου ατμού χρειάζονται και στο Σχήμα 7.15β για τις υπόλοιπες ανάγκες της Συνολικής Μονάδας. Οι ιδανικές συνθήκες του SSSP του Σχήματος 7.15 επιτρέπουν την αξιοποίηση όλης της διαθέσιμης θερμότητας τόσο για την παραγωγή έργου τουρμπίνας όσο και για εξοικονόμηση ατμού μεγιστοποιώντας τις ενεργειακές αποδόσεις. Ωστόσο, η στρατηγική που ακολουθήθηκε στο Σχήμα 7.15β δεν γενικεύεται ως η καταλληλότερη σε κάθε περίπτωση Συνολικής Μονάδας.



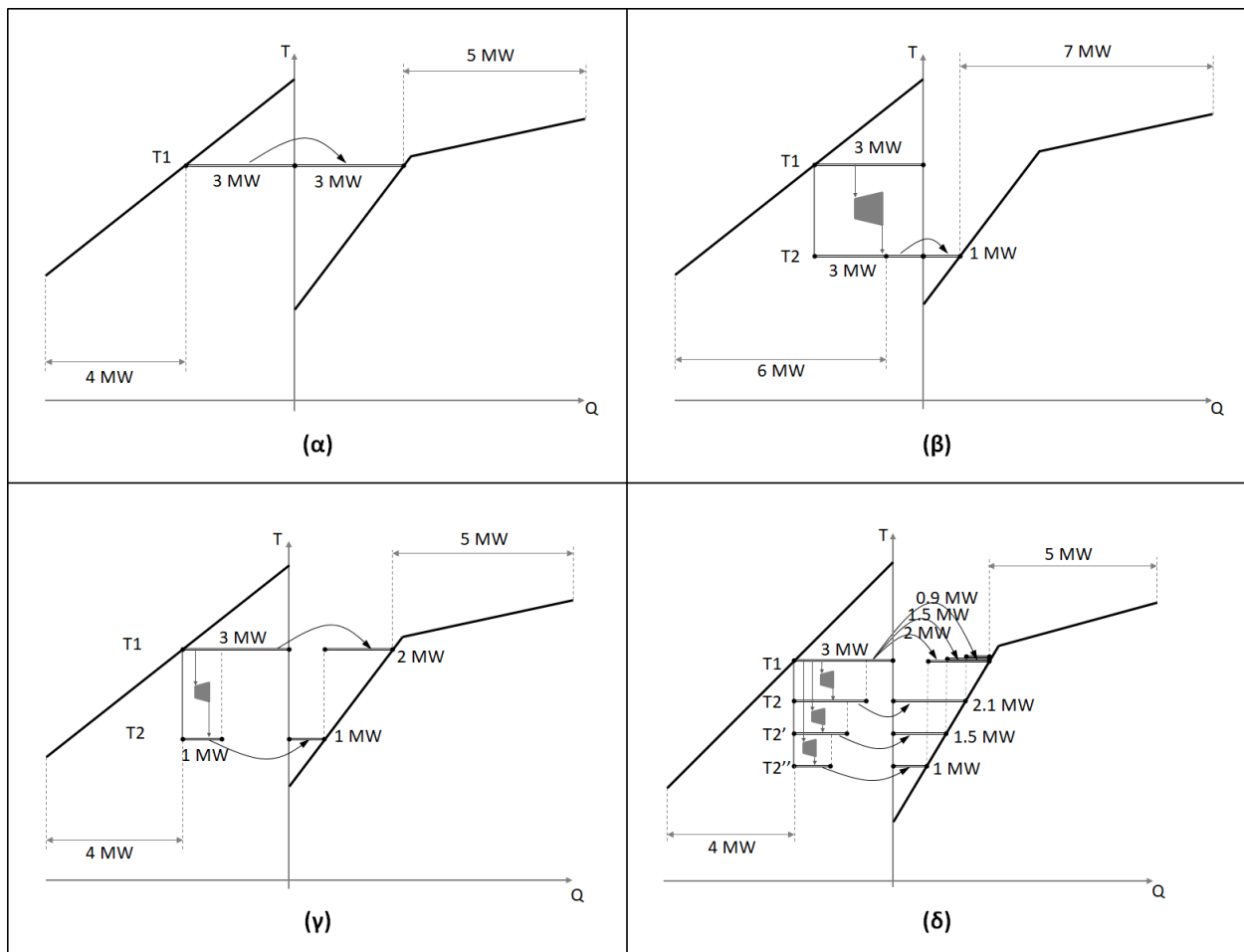
Σχήμα 7.15: Ανταγωνιστικότητα έμμεσης ολοκλήρωσης-συμπαραγωγής: (α) μόνο έμμεση ολοκλήρωση, (β) έμμεση ολοκλήρωση και συμπαραγωγή

Στη Συνολική Μονάδα του Σχήματος 7.16α (εν τη απουσία συμπαραγωγής) παράγονται 3 MW ατμού, τα οποία καλύπτουν τις ανάγκες των καταβοθρών του SSSP. Στο Σχήμα 7.16β το πρόβλημα ελέγχεται για σκοπούς συμπαραγωγής. 3 MW ατμού θερμοκρασίας T1 εκτονώνονται παράγοντας έργο, ενώ ο εκρέον ατμός θερμοκρασίας T2 καλύπτει τις ανάγκες των καταβοθρών της Συνολικής Μονάδας. Λόγω της μορφολογίας του SSSP μόνον 1 MW ατμού θερμοκρασίας T2 δύναται να αξιοποιηθεί από τις καταβόθρες της Συνολική Μονάδας, χρεώνοντας επιπλέον 2 MW φρέσκου ατμού (και 2 MW ψύξης) σε σχέση με την περίπτωση του Σχήματος 7.16α. Μία εναλλακτική λύση, είναι αυτή του Σχήματος 7.16γ, όπου μέρος του παραγόμενου ατμού θερμοκρασίας T1 αξιοποιείται απευθείας από τις καταβόθρες, ενώ ο υπόλοιπος εκτονώνεται και, έπειτα, αξιοποιείται **πλήρως** ως ατμός θερμοκρασίας T2.

Το παράδειγμα του Σχήματος 7.16γ, υποδεικνύει ότι το ποσοστό του ατμού που κατανέμεται για ολοκλήρωση στα επίπεδα T1 και T2 εξαρτάται από τη μορφολογία του SSSP. Μάλιστα, οι T1 και T2 αποτελούν βαθμούς ελευθερίας που καθορίζουν τα φορτία θερμότητας που εξάγονται και κατανέμονται από/στα διάφορα θερμοκρασιακά επίπεδα, σύμφωνα με τη μορφολογία των πηγών και των καταβοθρών. Είτε το SSSP είναι δεδομένο, είτε βαθμός ελευθερίας (υποψήφιος διεργασίες), το ποσοστό του ατμού που κατανέμεται στις T1 και T2 αποτελεί επίσης βαθμό ελευθερίας που εξαρτάται από τις επιλογές των θερμοκρασιών T1, T2 και την επιλογή διεργασιών (αλυσίδες προϊόντων). Παράλληλα, ορίζονται άπειρα σενάρια συμπαραγωγής για κάθε ζώνη εκτόνωσης που σχηματίζεται από την επιλογή των T1-T2. Τα παραπάνω, ορίζουν το συνδυαστικό πρόβλημα ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.16δ.

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

Στο Σχήμα 7.16δ παρουσιάζονται εναλλακτικά σενάρια συμπαραγωγής σύμφωνα τη μεταβολή της θερμοκρασίας εκτόνωσης T2 και υπό την προϋπόθεση πλήρους αξιοποίησης του παραγόμενου ατμού για σκοπούς έμμεσης ολοκλήρωσης. Ωστόσο, οι αποδόσεις της συμπαραγωγής καθορίζονται με φυσικό τρόπο και από την επιλογή της T1, και η πολυπλοκότητα του προβλήματος μεγαλώνει ακόμα περισσότερο, όταν η T1 μεταβάλλεται. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος εκτοξεύεται, όταν εμπλέκονται υποψήφιες διεργασίες και η μορφολογία του SSSP δεν είναι δεδομένη, αλλά συμπεριφέρεται ως επιπλέον βαθμός ελευθερίας. Υπό αυτές τις συνθήκες, όλα τα στοιχεία του Σχήματος 7.16δ (γραμμές πηγών-καταβοθρών, θερμοκρασίες επιπέδων T1-T2, έμμεση ολοκλήρωση και συμπαραγωγή) αποτελούν βαθμούς ελευθερίας και ο εντοπισμός βέλτιστων στρατηγικών δεν είναι προφανής παρά μόνον με τη χρήση τεχνικών μαθηματικού προγραμματισμού.



Σχήμα 7.16: Ανταγωνιστικότητα έμμεσης ολοκλήρωσης-συμπαραγωγής: (α) μόνο έμμεση ολοκλήρωση, (β) προτεραιότητα αξιοποίησης συμπαραγωγής, (γ) υποψήφιο σενάριο συνδυαστικής ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής, (δ) βαθμοί ελευθερίας προβλήματος βελτιστοποίησης.

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης των αποδόσεων ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής εξαρτάται:

- (1) από τη μορφολογία του SSSP της (κάθε υποψήφιας) Συνολικής Μονάδας,
- (2) τις επιλογές των επιπέδων πίεσης (π.χ. οι T1 και T2) και
- (3) το διαμοιρασμό του παραγόμενου ατμού (στα διάφορα επίπεδα ατμού) προς έμμεση ολοκλήρωση ή/και συμπαραγωγή.

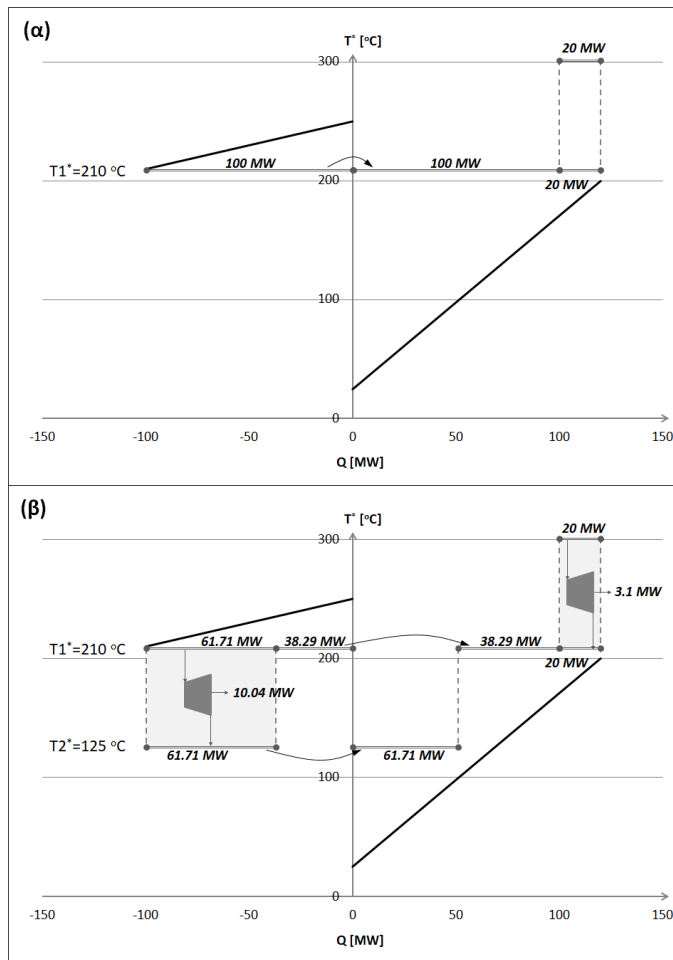
Το αναλυτικό/πυκνό σχήμα επιλογής επιπέδων του Σχήματος 7.13 (και όχι του Σχήματος 7.7) είναι απαραίτητο για το εντοπισμό των καλύτερων ζευγαριών επιπέδων που μεγιστοποιούν τις αποδόσεις ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής και αντιμετωπίζουν σχεδιαστικές προκλήσεις, όπως αυτές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.16δ.

Το μοντέλο βελτιστοποίησης ICT-THM εφαρμόζεται στην απλή περίπτωση του Σχήματος 7.17, που απαρτίζεται από 2 δεδομένες διεργασίες, όπου καθεμία περιλαμβάνει ένα μόνο ρεύμα. Η πρώτη διεργασία χρησιμοποιεί ένα θερμό ρεύμα: $T_{in}=255\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{out}=215\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $Q=100\text{ MW}$, και η δεύτερη ένα ψυχρό ρεύμα: $T_{in}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{out}=195\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $Q=120\text{ MW}$. Το μοναδιαίο κόστος ατμού υψηλής πίεσης ορίζεται στα $0.1654\text{ M}\text{€}/\text{MW}/\text{yr}$, και το κόστος νερού ψύξης στα $0.0481\text{ M}\text{€}/\text{MW}/\text{yr}$.

Στο Σχήμα 7.17α παρουσιάζεται το ενεργειακό προφίλ (SSSP) της συνολικής μονάδας, όπου μπορούν γραφικά να εντοπιστούν τα μέγιστα περιθώρια έμμεσης ολοκλήρωσης. Οι πηγές της Συνολικής Μονάδας δύνανται να παράγουν έως 100 MW ατμού $205\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T^*=210\text{ }^{\circ}\text{C}$), τα οποία μπορούν να καλύψουν το 83.3% των αναγκών των καταβοθρών, ενώ οι υπόλοιπες ανάγκες (20 MW) καλύπτονται από φρέσκο ατμό υψηλής πίεσης. Ύστερα από την εφαρμογή του μοντέλου βελτιστοποίησης, εντοπίζονται οι βέλτιστες θερμοκρασίες των επιπέδων ατμού και των αποδόσεων ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.17β.

Τα μοντέλα επέλεξε τρία επίπεδα ατμού. Το ένα επιλέχθηκε για την παραγωγή φρέσκου ατμού υψηλής πίεσης (δεδομένη επιλογή), το δεύτερο ($210\text{ }^{\circ}\text{C}$) για την εξαγωγή της διαθέσιμης θερμότητας, και το τρίτο ($125\text{ }^{\circ}\text{C}$) για την εκτόνωση του παραγόμενου ατμού. Αφενός, η λύση αξιοποιεί πλήρως τον παραγόμενο ατμό, χρεώνοντας τις ίδιες ανάγκες φρέσκου ατμού (20 MW) με αυτές του Σχήματος 7.17α. Αφετέρου, η επιλογή του επιπέδου ατμού $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ και η κατανομή 61.71 MW του παραγόμενου ατμού για συμπαραγωγή μεγιστοποιεί την απόδοση συμπαραγωγής έργου, με αποτέλεσμα να ολοκληρώνει απευθείας μόλις το 38.19 MW ($210\text{ }^{\circ}\text{C}$), ενώ τα υπόλοιπα (61.71 MW) ως υποβαθμισμένος ατμός τουρμπίνας ($125\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας



Σχήμα 7.17: Παράδειγμα βελτιστοποίησης αποδόσεων ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής: (α) μόνο έμμεση ολοκλήρωση, (β) βέλτιστη λύση και αποτελέσματα μοντέλου

Τα βέλτιστα επίπεδα 210 °C και 125 °C αντικατοπτρίζουν στις θερμοκρασίες T1 και T2 του Σχήματος 7.16 και αντιμετωπίστηκαν ως βαθμοί ελευθερίας για τη μεγιστοποίηση του κέρδους από τη συμπαραγωγή διασφαλίζοντας παράλληλα τις μέγιστες αποδόσεις έμμεσης ολοκλήρωσης. Αν και η επιλογή του επιπέδου 210 °C (T1) φαίνεται προφανής, καθώς δεν εντοπίζονται πηγές σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, η επιλογή της T2 (125 °C) δεν είναι προφανής από τη μελέτη της γραφικής παράστασης. Μάλιστα, για διαφορετική μορφολογία της γραμμής των πηγών, ούτε η επιλογή της T1 θα ήταν προφανής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η θερμότητα ατμού που αξιοποιήθηκε στην τουρμπίνα και, έπειτα, για έμμεση ολοκλήρωση στους 125 °C **δεν είναι ίση, αλλά μικρότερη** από τη θερμότητα που μπορούν να αξιοποιήσουν οι καταβόθρες στην θερμοκρασία αυτή. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι η βέλτιστη λύση

του Σχήματος 7.17β αποτελεί υποπερίπτωση των περιπτώσεων που περιγράφονται στο Σχήμα 7.16δ και αναδεικνύει την πολυπλοκότητα του προβλήματος και την αδυναμία πρόβλεψης της βέλτιστης κατανομής του παραγόμενου ατμού για απευθείας ολοκλήρωση και συμπαραγωγή χωρίς τη χρήση υπολογιστικών εργαλείων. Στην επόμενη ενότητα, το συνδυαστικό μοντέλο βελτιστοποίησης εξετάζει μία περίπτωση 33 υποψήφια διεργασιών και αναδεικνύει περιπτώσεις Συνολικών Μονάδων πολύ υψηλών αποδόσεων σε συμπαραγωγή έργου.

7.5.2. Σύνθεση ενεργειακά βέλτιστου βιοδιυλιστηρίου

Το συνδυαστικό μοντέλο ολοκλήρωσης και εκτίμησης της συμπαραγωγής εφαρμόζεται για την επανεξέταση του παραδείγματος της ενότητας 5.5.6. (Κεφάλαιο 5) και τον εντοπισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων διεργασιών και προϊόντων για την ανάπτυξη ενός νέου λιγνοκυτταρινούχου βιοδιυλιστηρίου. Στην ενότητα 5.5.6., η επιλογή διεργασιών και επιπέδων βοηθητικών παροχών υπόκειται μόνον σε περιορισμούς άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης. Στην παρούσα προσέγγιση εξετάζεται, παράλληλα, η επίδραση του δυναμικού συμπαραγωγής στις επιλογές διεργασιών και τους στόχους ενεργειακής κατανάλωσης και κερδοφορίας.

Το πυκνό σύστημα υποψήφια επιπέδων που χρησιμοποιείται στο USS απαρτίζεται από 41 επίπεδα ατμού μεταξύ των θερμοκρασιών κορεσμού 100 °C και 300 °C και σταθερό βήμα 5 °C για τα ενδιάμεσα επίπεδα, ενώ έως 4 επίπεδα ατμού επιτρέπονται να επιλεχθούν για σκοπούς ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής. Ακολούθως, υπολογίζονται οι παράμετροι $\Delta T_{n',n''}$, q_{in} και παλινδρόμησης A και B για κάθε επίπεδο και συνδυασμό επιπέδων του USS, σύμφωνα με τις εξισώσεις Eq.7.24-Eq.7.26 και τον Πίνακα 7.3. Οι διεργασίες του BBR του Σχήματος 5.23 και τα ρεύματα των υποψήφια διεργασιών παραμένουν ως έχουν, όπως στο παράδειγμα 5.5.6. Το πρόβλημα βελτιστοποιείται σύμφωνα με δύο εναλλακτικές αντικειμενικές συναρτήσεις, μία για τον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης και της συμπαραγωγής σύμφωνα με την εξίσωση Eq.7.40, και μία για τον υπολογισμό της κερδοφορίας σύμφωνα την εξίσωση Eq.5.28. Στην τελευταία προστίθεται και ο όρος κερδοφορίας λόγω συμπαραγωγής: « $E_{cogen} \cdot C_{cogen}$ ».

Λιγνοκυτταρινούχο βιοδιυλιστήριο μέγιστων ενεργειακών αποδόσεων

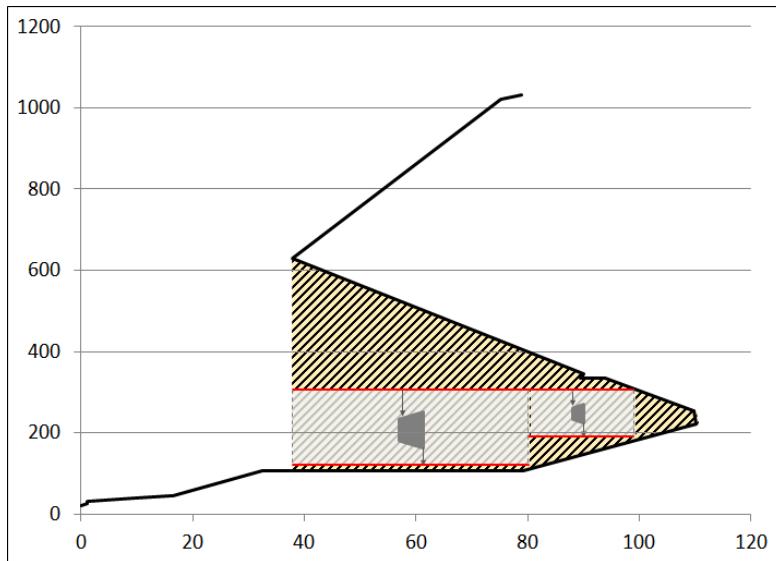
Στο μοντέλο βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκαν εξισώσεις integer cuts για την εύρεση των 30 καλύτερων βιοδιυλιστηρίων με το ελάχιστο ενεργειακό κόστος (κόστος ενέργειας μείον κέρδος από συμπαραγωγή). Τα αποτελέσματα των 5 καλύτερων λύσεων συνοψίζονται στον Πίνακα 7.5. Η διεργασία της αεριοποίησης κυριαρχεί σχεδόν σε όλα (28 από τα 30 καλύτερα) χαρτοφυλάκια διεργασιών, ενώ οι πρώτες 5 θέσεις καλύπτονται αποκλειστικά από διεργασίες παραγωγής καυσίμων, λόγω των χαμηλών ενεργειακών απαιτήσεων που παρουσιάζουν, παρά το γεγονός ότι η εξοικονόμηση ενέργειας λόγω έμμεσης ολοκλήρωσης είναι μηδενική. Η επανειλημμένη επιλογή της διεργασίας αεριοποίησης οφείλεται στο υψηλό ενεργειακό δυναμικό που παρουσιάζει προς όφελος της συμπαραγωγής, αν και η διεργασία «αποτελεί πρόβλημα ουδού και δεν παρουσιάζει διαθέσιμη θερμότητα για έμμεση ολοκλήρωση, όπως αναλύεται ακολούθως».

Πίνακας 7.5: Αποτελέσματα 5 καλύτερων λύσεων ενεργειακών αποδόσεων

Λύση	Βιοδιυλιστήριο	Θερμές Παροχές [MW]	Ψυχρές Παροχές [kW]	Έμμεση ολοκλήρωση [MW]	Ενέργεια τσέπης [MW]	Συμπαραγωγή [MW]	Ενεργειακό κόστος [M€/yr]
1		78.9	-	-	61.1	32.4	13.1
2		71.2	20	-	55.0	29.1	11.8
3		71.5	307	-	55.0	29.3	11.9
4		63.8	327	-	48.9	26.1	10.7
5		2.1	198	-	-	0.148	0.449

Το μοντέλο **εντοπίζει και αξιοποιεί θερμότητα από τις ενεργειακές τσέπες των διεργασιών**, η οποία δεν προσφέρεται για παραγωγή ατμού έμμεση ολοκλήρωση. Ως ενεργειακές τσέπες (rockets) ορίζονται περιπτώσεις όπου θερμά και ψυχρά ρεύματα μπορούν να ανταλλάσουν θερμότητα σε διαφορετικά θερμοκρασιακά ενδιάμεσα της διεργασίας χωρίς να επηρεάζουν τις συνολικές ανάγκες φρέσκων παροχών της διεργασίας. Οι ενεργειακές τσέπες κάθε διεργασίας εντοπίζονται γραφικά μέσω των GCC των μεμονωμένων διεργασιών, όταν αλλάζει το πρόσημο της κλίσης των ενεργειακών προφίλ, όπως φαίνεται στην γραμμοσκιασμένη περιοχή του Σχήματος 7.18. Το Σχήμα 7.18 αφορά την περίπτωση ουδού της αεριοποίησης, όπου διαθέσιμη ενέργεια πάνω από το pinch (αποτυπώνεται από τις γραμμές

αρνητικής κλίσης) ολοκληρώνεται με ρεύματα που συναντώνται στο κάτω μέρος της γραμμοσκιασμένης περιοχής (γραμμές θετικής κλίσης), επίσης, πάνω από το pinch.



Σχήμα 7.18: GCC διεργασίας αεριοποίησης: ενεργειακές τσέπες και δυναμικό συμπαραγωγής

Οι τσέπες λειτουργούν ως αυτόνομο σύστημα ολοκλήρωσης και η θερμότητα που περιλαμβάνουν δεν μπορεί να αξιοποιηθεί για σκοπούς έμμεσης ολοκλήρωσης, ειδάλλως η διεργασία θα χρεωθεί με επιπλέον φρέσκες παροχές ατμού, με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται εξοικονόμηση. Με άλλα λόγια, θερμότητα τσέπης μπορεί να καλύψει άλλες διεργασίες, αλλά θα χρεώσει με την ίδια θερμότητα τη διεργασία από όπου προέρχεται, με αποτέλεσμα η Συνολική Μονάδα να παρουσιάζει μηδενική εξοικονόμηση ατμού. Ωστόσο, η θερμότητα τσέπης μπορεί να αξιοποιηθεί για παραγωγή ατμού και συμπαραγωγή έργου και να επιστρέψει στο σύστημα της τσέπης ως υποβαθμισμένος ατμός. Η εφικτότητα και οι αποδόσεις αυτής της διαδικασίας εξαρτώνται από τα θερμοκρασιακά εύρη και τη θερμότητα που ανταλλάσσεται στην τσέπη. Η αρκετά διευρυμένη τσέπη της διεργασίας αεριοποίησης στο Σχήμα 7.18 αποτελεί ιδανική περίπτωση για την παραγωγή έργου.

Η εμφάνιση μεγάλων τσεπών είναι σχετικά ασυνήθιστη, και γενικότερα αποφεύγεται η ενεργειακή ολοκλήρωση άλλων μονάδων εντός των τσεπών για την αποφυγή πολύπλοκων συστημάτων με πολλαπλά ενδιάμεσα στάδια ολοκλήρωσης. Παρά ταύτα, περιπτώσεις τσεπών με μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές και φορτία παραμένουν ικανές και πρόσφορες για την ενίσχυση της συμπαραγωγής.

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

Σύμφωνα με τις συμβατικές έννοιες ολοκλήρωσης, τα θερμά και ψυχρά ρεύματα μίας τσέπης ανταλλάσσουν θερμότητα μόνο μέσω άμεσης ολοκλήρωσης και δεν προσφέρονται για σκοπούς έμμεσης ολοκλήρωσης. Για αυτό, σύμφωνα με τη συμβατική γραφική διαδικασία ολοκλήρωσης (Dhole and Linhoff, 1993; Kemp, 2007), οι τσέπες των GCC διαγράφονται κατά τη ανάπτυξη των SSSP, και έτσι οι γραμμές των SSSP παρουσιάζουν σταθερή μονοτονία. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις (όπως της αεριοποίησης) δεν παύουν να είναι ωφέλιμες για σκοπούς συμπαραγωγής. Το δυναμικό αυτό δεν μπορεί να εντοπιστεί ούτε μέσω της γραφικής μεθόδου SSSP, ούτε από τον τριπλό-καταρράκτη των Shang and Kokossis (2004), ο οποίος χρησιμοποιεί τα δεδομένα των SSSP. Ωστόσο, μπορεί να εντοπιστεί από το συνδυαστικό μοντέλο ICT/CIT-THM, το οποίο αφενός ενσωματώνει δυνατότητες άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης, και αφετέρου διαχειρίζεται απευθείας τα ενεργειακά περιεχόμενα των ρευμάτων (και όχι των SSSP). Παράλληλα, η χρήση του αναλυτικού συστήματος επιπέδων ατμού επιτρέπει την ανίχνευση τέτοιων χρήσιμων περιοχών, ακόμα και σε στενές ζώνες τσεπών, για την άντληση θερμότητας προς όφελος της συμπαραγωγής. Σε κάθε περίπτωση, η παραπάνω διαδικασία δεν λογαριάζεται ως έμμεση ολοκλήρωση, καθότι η θερμότητα τσέπης που εξάγεται επιστρέφει πάντα στην ίδια διεργασία, ειδάλλως παρουσιάζει άσκοπη χρέωση των παροχών της Συνολικής Μονάδας.

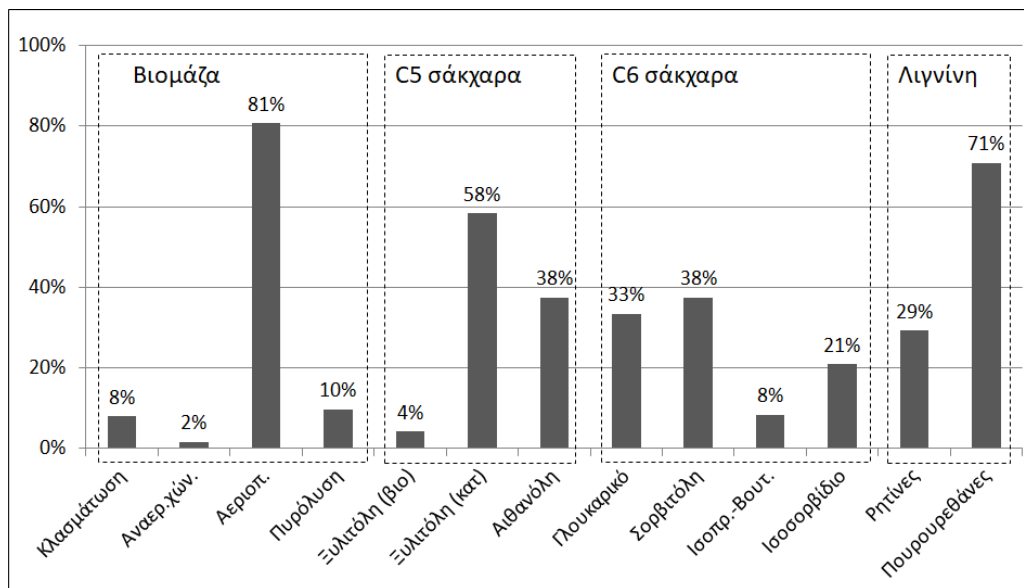
Η θερμότητα τσέπης της αεριοποίησης (πρώτη λύση του Πίνακα 7.5) διαθέτει έως και 61 MW για παραγωγή έργου, για αυτό και αποτελεί βασική επιλογή στις προτιμήσεις του διεργασιών του BBR, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα προτιμήσεων του Σχήματος 7.19. Μάλιστα, σημειώνεται ότι η διεργασία της αεριοποίησης δεν παρουσιάζει τα ίδια ποσοστά προτίμησης στο προηγούμενο παράδειγμα 5.5.6. (βλ. Σχήμα 5.9), όπου απουσίαζε η μελέτη των δυναμικών συμπαραγωγής.

Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 7.19, η αεριοποίηση αποτελεί την καταλληλότερη επιλογή για την αξιοποίηση της βιομάζας και την παραγωγή ενεργειακών φορέων (καυσίμων και ηλεκτρικής ενέργειας), ενώ όταν επιλέγεται η κλασμάτωση βιομάζας (σε επόμενες λύσεις), η ξυλιτόλη, η σορβιτόλη και οι πολυουρεθάνες αποτελούν τις καλύτερες επιλογές, παρουσιάζοντας τις ίδιες προτιμήσεις με αυτές του προηγούμενου παραδείγματος της ενότητας 5.5.6.

Τα επίπεδα ατμού που κυριαρχούν στις επιλογές των 30 καλύτερων λύσεων, αφορούν ατμό 185 °C, 115 °C και 100 °C, με αντίστοιχα ποσοστά εμφάνισης 34%, 33% και 33%, ενώ άλλα επίπεδα δεν επιλέγονται σε καμία από τις λύσεις. Ο λόγος οφείλεται στην έντονη παρουσία της διεργασίας αεριοποίησης και τη χρήση των βέλτιστων επιπέδων για την άντληση (στους 185 °C) και επαναφορά (στους 115 °C και 100 °C) της θερμότητας τσέπης της διεργασίας αεριοποίησης (βλ. Σχήμα 7.18). Από τα αποτελέσματα επιβεβαιώνεται τόσο η ανάγκη χρήσης αναλυτικών σχημάτων υποψήφιων επιπέδων για τον εντοπισμό

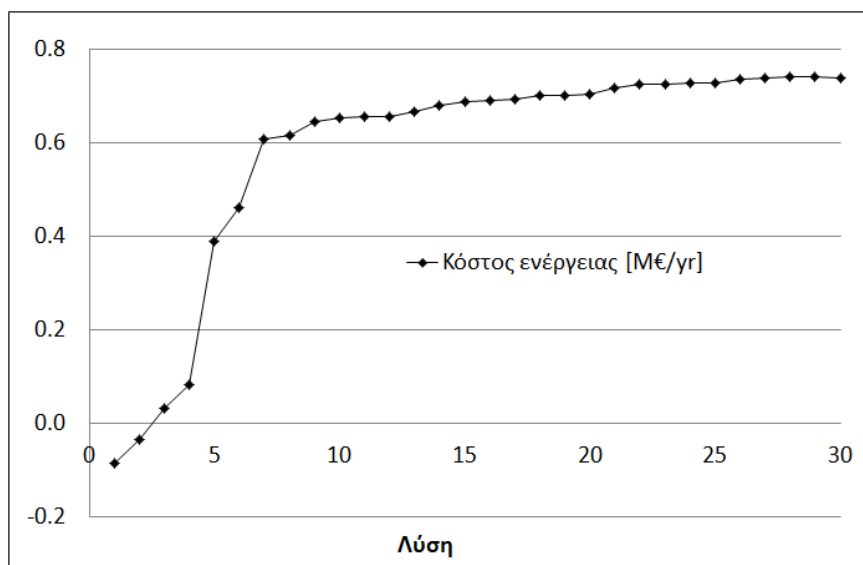
Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

στοχευμένων ενεργειακών διαθεσίμων (όπως τις τσέπες), όσο και η αναθεώρηση των παραμέτρων του μοντέλου THM (Πίνακας 7.3) για την βελτίωση της ακρίβειας εκτίμησης της συμπαραγωγής σε κυλίνδρους τουρμπίνων μικρών θερμοκρασιακών διαφορών. Στο παρόν παράδειγμα, ο μικρότερος κύλινδρος λειτουργεί για $\Delta T^{sat} = 15 \text{ }^\circ\text{C} = 115 \text{ }^\circ\text{C} - 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Μικρές θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ επιπέδων μπορούν να αποβούν ιδιαίτερα χρήσιμες σε περιπτώσεις όπως αυτές του Σχήματος 7.18 (ή γενικότερα του Σχήματος 7.16δ), όπου μεγάλες πηγές και καταβόθρες της Συνολικής Μονάδας (π.χ. ένας εξώθερμος αντιδραστήρας ή μία απόσταξη) μπορεί να βρίσκονται σε κοντινές θερμοκρασίες.



Σχήμα 7.19: Αποτελέσματα προτιμήσεων διεργασιών των BBR του Σχήματος 5.23 σύμφωνα με κριτήρια ενεργειακού κόστους και συμπαραγωγής

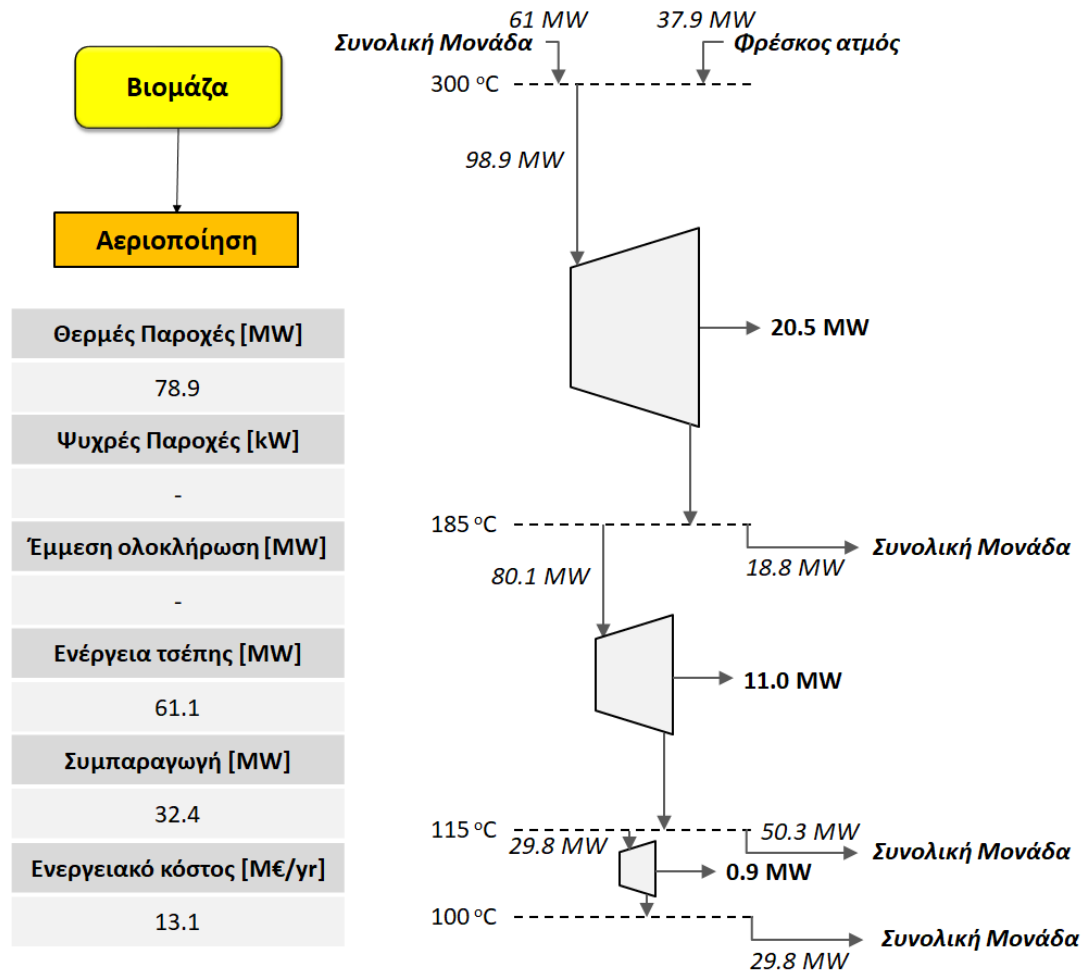
Στο Σχήμα 7.20 συνοψίζονται οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για τις 30 καλύτερες λύσεις, με τις αρνητικές τιμές στις δύο πρώτες λύσεις να αντιπροσωπεύουν περιπτώσεις, όπου το κέρδος από τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγαλύτερο από το κόστος βοηθητικών παροχών. Στις επόμενες λύσεις (3^1 - 30^1), το κέρδος από τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υπολείπεται του κόστους βοηθητικών παροχών έως και κατά 0.74 Μ€/γρ.



Σχήμα 7.20: Πορεία αντικειμενικής συνάρτησης υπολογισμού ενεργειακού κόστους και συμπαραγωγής για τις 30 καλύτερες λύσεις

Στο Σχήμα 7.21 παρουσιάζεται το σύστημα συμπαραγωγής της καλύτερης λύσης που εντοπίστηκε σύμφωνα με ενεργειακά κριτήρια, η οποία περιλαμβάνει μόνο τη διεργασία αεριοποίησης. Από τα 78.9 MW φρέσκου ατμού που απαιτούνται στη Συνολική Μονάδα, τα 41.1 MW καταναλώνονται απευθείας από την διεργασία, ενώ τα υπόλοιπα 37.9 MW, μαζί με την ενέργεια τσέπης (61 MW) της διεργασίας, διατίθενται για παραγωγή ατμού και συμπαραγωγή έργου. Η τουρμπίνα της Συνολικής Μονάδας περιλαμβάνει τρεις κυλίνδρους, οι οποίοι λειτουργούν μεταξύ των 300 °C, 185 °C, 115 °C και 100 °C και παράγουν αντίστοιχα 20.5 MW, 11 MW και 0.9 MW, ενώ μέρος του ατμού στην έξοδο κάθε κυλίνδρου διατίθεται για την κάλυψη των αναγκών της Συνολικής Μονάδας. Η περίπτωση αποτελεί πρόβλημα ουδού και δεν παρουσιάζει ανάγκες ψύξης.

Επειδή οι διεργασίες βιοκαυσίμων και ιδιαίτερα η αεριοποίηση, εμπλέκονται σχεδόν σε κάθε λύση βελτιστοποίησης των ενεργειακών αποδόσεων, το παράδειγμα επανεξετάζεται δεσμεύοντας την τροφοδοσία βιομάζας προς τη διεργασία κλασμάτωσης και την παραγωγή προϊόντων υψηλής αξίας.



Σχήμα 7.21: Βιοδιυλιστήριο μέγιστων ενεργειακών αποδόσεων και σύστημα συμπαραγωγής έργου

Το BBR βελτιστοποιήθηκε με τη χρήση τόσο του πυκνού πλέγματος υποψήφιων επιπέδων ατμού, όσο και με τη χρήση ενός πιο χαλαρού πλέγματος, όπως αυτό του Σχήματος 7.7. Το πυκνό σύστημα διαθέτει 41 υποψήφια επίπεδα (βαθμούς ελευθερίας) στο εύρος [300 °C, 100 °C, -5 °C], ενώ το χαλαρό χρησιμοποιεί 4 υποψήφιες θέσεις για το σχεδιασμό κάθε είδους ατμού: υψηλής πίεσης (280 °C, 270 °C, 260 °C, 250 °C), μέση πίεσης (210 °C, 200 °C, 190 °C, 180 °C) και χαμηλής (140 °C, 130 °C, 120 °C, 110 °C). Από τη μία, η στρατηγική του αναλυτικού συστήματος παράγει 112,791 συνδυασμούς επιπέδων πίεσης ατμού, υπό την προϋπόθεση ότι επιτρέπονται μέχρι 4 επίπεδα ατμού να επιλεγθούν από το μοντέλο. Από την άλλη, το χαλαρό σύστημα παράγει μόλις 256 συνδυασμούς, οι οποίοι μάλιστα εκτείνονται γύρω από συγκεκριμένες περιοχές του συνολικού εύρους θερμοκρασιών της Συνολικής Μονάδας.

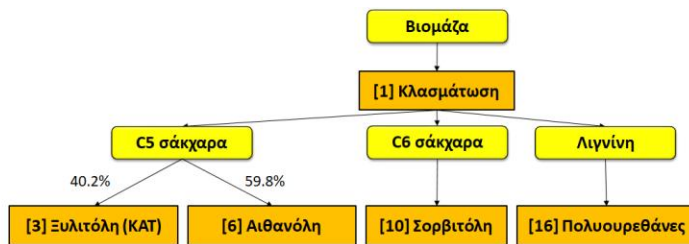
Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

Τα βέλτιστα χαρτοφυλάκια που εντοπίστηκαν σε κάθε περίπτωση δεν είναι ίδια. Το αναλυτικό σύστημα επιπέδων οδήγησε στην επιλογή ξυλιτόλης, αιθανόλης, σορβιτόλης και πολυουρεθανών, με τις δύο πρώτες να μοιράζονται το κλάσμα C5 σακχάρων κατά 40-60%. Το χαλαρό σύστημα παρουσίασε το ίδιο χαρτοφυλάκιο πλην της παραγωγής αιθανόλης, με τα C5 σάκχαρα να αξιοποιούνται πλήρως για παραγωγή ξυλιτόλης. Αντίστοιχα, η τιμή κάθε αντικειμενικής (κόστος παροχών μείον κέρδη συμπαραγωγής) υπολογίστηκαν στα 6 Μ€/γρ (αναλυτικό) και 7.2 Μ€/γρ (χαλαρό) αναδεικνύοντας κέρδη (ή μικρότερο κόστος) της τάξης του 20% λόγω της καλύτερης διαχείρισης των επιπέδων ατμού από το αναλυτικό σύστημα. Ωστόσο, για σκοπούς σύγκρισης των ενεργειακών αποδόσεων, των στρατηγικών ολοκλήρωσης και του συστήματος συμπαραγωγής, η βέλτιστη λύση που εντοπίστηκε κατά τη χρήση του αναλυτικού συστήματος επιπέδων επανεξετάστηκε με τη χρήση του χαλαρού συστήματος. Τα ενεργειακά αποτελέσματα και τα συστήματα τουρμπίνων που επιλέχθηκαν σε κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στα Σενάρια 1 και 2 του Σχήματος 7.22.

Το χαλαρό σύστημα επιπέδων του Σεναρίου 2 κατάφερε να εξοικονομήσει 5.1 MW ατμού λιγότερα από αυτό του Σεναρίου 1 λόγω περιορισμένων επιλογών επιπέδων (και κατ' επέκταση έμμεσης ολοκλήρωσης), χρεώνοντας 5.1 MW περισσότερα σε βοηθητικές παροχές θέρμανσης και ψύξης. Το γεγονός αυτό επέφερε υψηλότερο κόστος βοηθητικών παροχών κατά 0.9 Μ€/γρ στη Συνολική Μονάδα του Σεναρίου 2. Παράλληλα, οι περιορισμένες επιλογές επιπέδων του Σεναρίου 2 κόστισαν επιπλέον 0.5 MW συμπαραγωγής λιγότερα από αυτά του Σεναρίου 1, τα οποία αντιστοιχούν σε απώλειες κέρδους 0.2 Μ€/γρ. Συνολικά, το Σενάριο 1 είναι πιο οικονομικό (ενεργειακά) από το Σενάριο 2 κατά 1.1 Μ€/γρ.

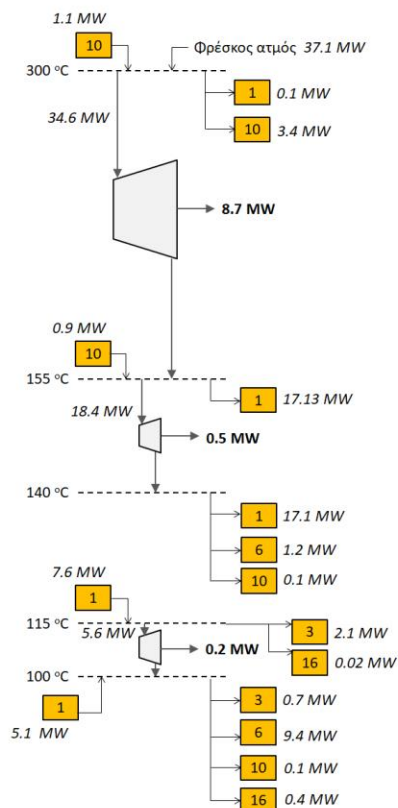
Οι επιλογές επιπέδων ατμού και οι αποδόσεις των κυλίνδρων κάθε σεναρίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.22. Αν και το Σενάριο 2 εκτονώνει περισσότερα MW σε κάθε κύλινδρο από ότι το Σενάριο 1, δεν επιτυγχάνει μεγαλύτερες αποδόσεις συμπαραγωγής λόγω ελλιπούς εκμετάλλευσης και διαχείρισης των επιπέδων ατμού. Από τα παραπάνω αναδεικνύονται οι αρκετά υψηλότερες ενεργειακές αποδόσεις και οι περισσότερες επιλογές που διαθέτει το Σενάριο 1, ώστε να βελτιστοποιήσει την κατανομή της διαθέσιμης θερμότητας προς όφελος της έμμεσης ολοκλήρωσης και της συμπαραγωγής, αντιμετωπίζοντας καλύτερα τις σχεδιαστικές προκλήσεις που περιγράφηκαν μέσω του παραδείγματος του Σχήματος 7.16.

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας



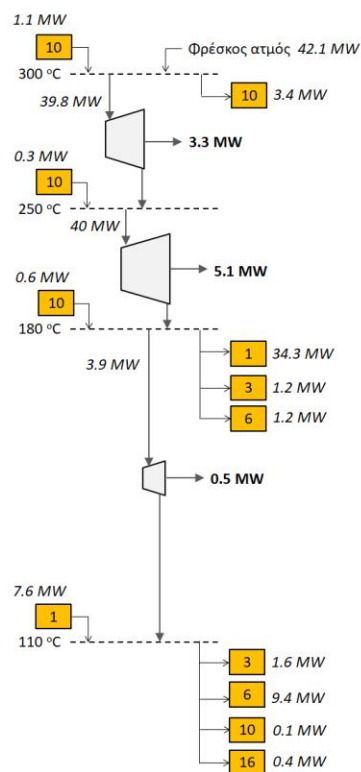
Σενάριο 1: Αναλυτικό σύστημα υποψήφιων επιπέδων, Σχήμα 7.13

Θερμές Παροχές [MW]	37.1
Ψυχρές Παροχές [MW]	37.1
Έμμεση ολοκλήρωση [MW]	14.7
Ενέργεια τσέπης [MW]	0.103
Συμπαραγωγή [MW]	9.4
Ενεργειακό κόστος [Μ€/γρ]	10



Σενάριο 2: Υποψήφια επίπεδα ανά περιοχή ατμού (4 ανά περιοχή), Σχήμα 7.7

Θερμές Παροχές [MW]	42.1
Ψυχρές Παροχές [MW]	42.1
Έμμεση ολοκλήρωση [MW]	9.7
Ενέργεια τσέπης [MW]	0.132
Συμπαραγωγή [MW]	8.9
Ενεργειακό κόστος [Μ€/γρ]	11.1



Σχήμα 7.22: Αποτελέσματα χρήσης πυκνού (Σχήμα 7.13) και χαλαρού (Σχήμα 7.9) συστήματος υποψήφιων επιπέδων

Λιγνοκυτταρινούχο βιοδιυλιστήριο μέγιστης κερδοφορίας

Το BBR του Σχήματος 5.23 επανεξετάζεται για τον εντοπισμό βιοδιυλιστηρίων υψηλής κερδοφορίας. Σε αντίθεση με την αντικειμενική συνάρτηση κερδοφορίας που χρησιμοποιήθηκε στο παράδειγμα της ενότητας 5.5.6., στην παρούσα περίπτωση η αντικειμενική συνάρτηση (Eq.5.28) περιλαμβάνει τον επιπλέον όρο κερδοφορίας από τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ($+E_{cogen} \cdot c_{cogen}$). Οι εξισώσεις του μοντέλου και οι υποθέσεις του προβλήματος είναι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης των ενεργειακών αποδόσεων. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε η ίδια συντηρητική προσέγγιση της κερδοφορίας (με αυτή της ενότητας 5.5.6) θεωρώντας αποκλίσεις στις τιμές των προϊόντων κατά -30% και προσαυξημένο κόστος επένδυσης και λειτουργίας κατά +30%.

Το πρόβλημα μεγιστοποίησης της κερδοφορίας εφαρμόστηκε (με χρήση integer cuts) για την εύρεση των 30 καλύτερων λύσεων και την εξαγωγή τάσεων κερδοφόρων διεργασιών και προϊόντων και της καταλληλότητας επιπέδων ατμού, θεωρώντας 41 υποψήφια επίπεδα ατμού, ενώ μέχρι 4 επίπεδα επιτρέπεται να επιλεγθούν. Στον Πίνακα 7.6 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των 5 καλύτερων λύσεων.

Πίνακας 7.6: Αποτελέσματα 5 καλύτερων λύσεων υψηλής κερδοφορίας

Λύση	Βιοδιυλιστήριο	Κόστος θέρμανσης [Μ€/yr]	Κόστος ψύξης [Μ€/yr]	Εξοικονόμηση θέρμανσης [Μ€/yr]	Ενεργειακό κόστος [Μ€/yr]	Συμπαραγωγή [MW]	Κερδοφορία [Μ€/yr]
1		7.9	6.7	2.2	14.6	13.1	66.47
2		7.6	6.5	2.2	14.2	13.2	66.46
3		7.7	6.5	2.2	14.2	13.2	66.29
4		7.4	6.3	2.2	13.7	12.7	66.28
5		5.7	4.9	1.9	10.6	9.2	66.27

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

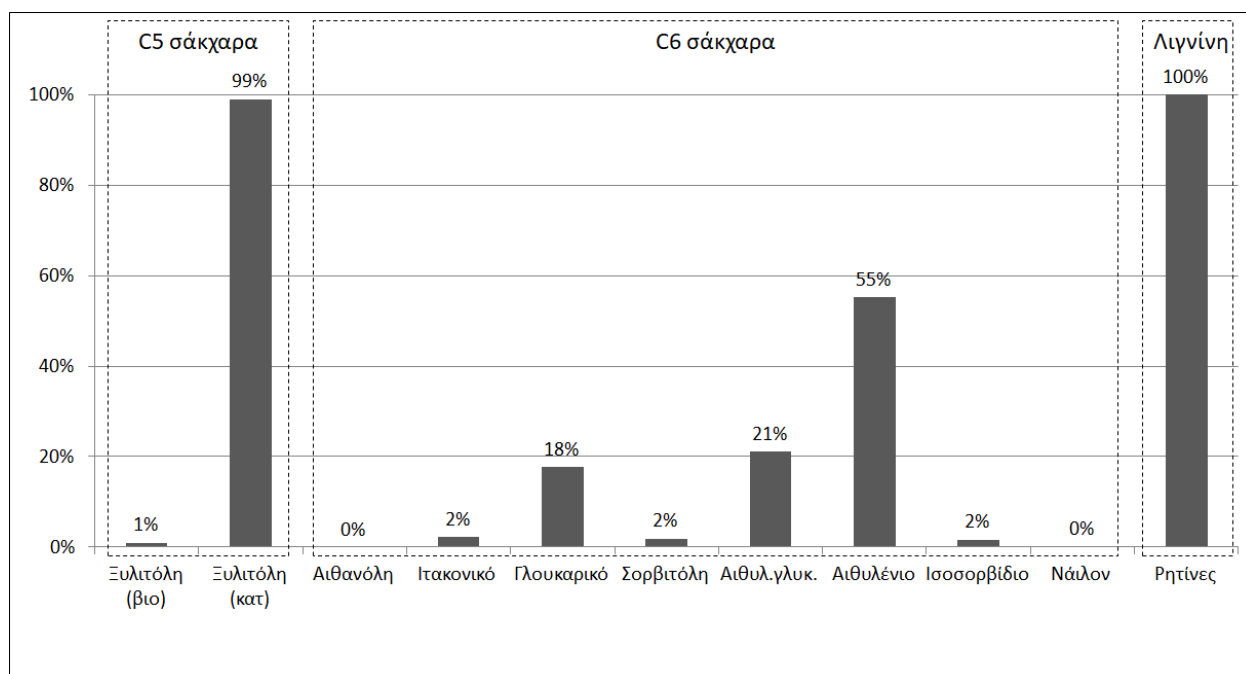
Τα χαρτοφυλάκια διεργασιών του Πίνακα 7.6 είναι ίδια με αυτά που εντοπίστηκαν στον Πίνακα 5.11 της προηγούμενης ενότητας 5.5.6. (εν τη απουσία υπολογισμού της συμπαραγωγής) – ωστόσο, με διαφοροποιήσεις στην σειρά προτίμησης – επιβεβαιώνοντας την οικονομική ευρωστία των διεργασιών. Διαφοροποιήσεις παρουσιάζονται επίσης όσον αφορά το κόστος θέρμανσης, καθότι στην παρούσα περίπτωση το κόστος ατμού λογαριάζεται μόνον για τον ατμό πολύ υψηλής πίεσης που παράγεται στον φούρνο, και έχει αποκλειστεί η παροχή θερμότητας σε ενδιάμεσα επίπεδα χαμηλότερου κόστους. Βέβαια, το κόστος αυτό αντισταθμίζεται πλήρως από τα κέρδη της συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτελέσματα η συνολική κερδοφορία των λύσεων να είναι σχεδόν ίδια με αυτή του παραδείγματος 5.5.6.

Συγκεκριμένα, στην 1^η καλύτερη λύση του Πίνακα 7.6 (ίδια με αυτή του Πίνακα 5.11), το αυξημένο κόστος θέρμανσης κατά 5.35 Μ€/γρ (σε σχέση με αυτό του Πίνακα 5.11) αντισταθμίζεται πλήρως από την παραγωγή 5.48 Μ€/γρ ηλεκτρικής ενέργειας καταλήγοντας σχεδόν στην ίδια μέγιστη κερδοφορία 66.47 Μ€/γρ (έναντι 66.37 Μ€/γρ του Πίνακα 5.11 της ενότητας 5.5.6). Παρόμοια περιστατικά αντιστάθμισης παρατηρούνται και στα αποτελέσματα των υπόλοιπων λύσεων του Πίνακα 7.6.

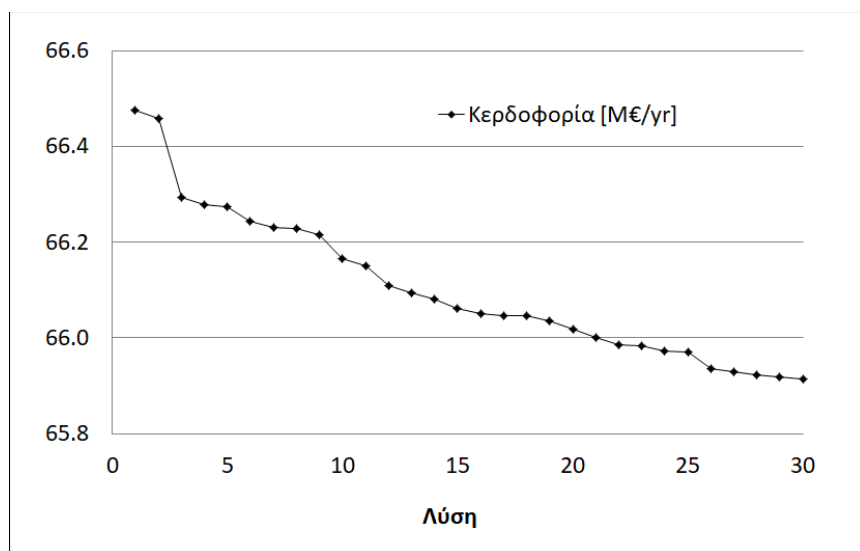
Σημειώνεται ότι κατά την συντηρητική εκτίμηση της κερδοφορίας από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας θεωρούνται αποκλίσεις (πέραν των κρατήσεων φόρων 50%) στην τιμή kWh κατά -50% (με αρχική τιμή τα 0.1€/kWh). Υπό συνθήκες κανονικής τιμολόγησης, η συνολική κερδοφορία των λύσεων του Πίνακα 7.6 αναμένεται να είναι υψηλότερη (λόγω συμπαραγωγής) έως και κατά +2.8 Μ€/γρ από αυτές του Πίνακα 7.6.

Στο Σχήμα 7.23 συνοψίζονται οι προτιμήσεις διεργασιών και προϊόντων από την ανάλυση των 30 καλύτερων λύσεων. Όπως επιβεβαιώνεται και από την βέλτιστη λύση του Πίνακα 7.6, η ξυλιτόλη (KAT), το αιθυλένιο και οι ρητίνες αποτελούν τις βέλτιστες επιλογές. Το γλουκαρικό οξύ και η αιθυλενογλυκόλη αποτελούν επόμενες καταλληλότερες γραμμές παραγωγής σύμφωνα με οικονομικά κριτήρια. Στο Σχήμα 7.24 παρουσιάζεται η πορεία της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για το σύνολο των 30 καλύτερων λύσεων, ενώ στο Σχήμα 7.25 συνοψίζονται οι προτιμήσεις των πιο χρήσιμων επιπέδων ατμού για το σύνολο των 30 λύσεων.

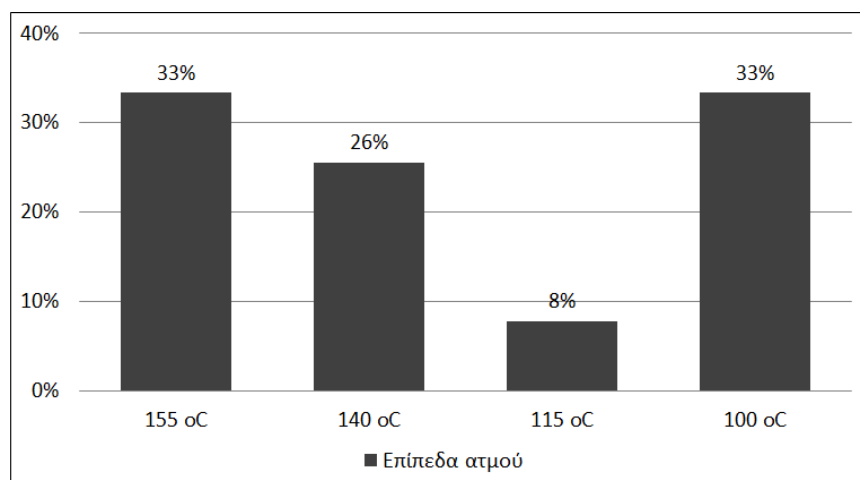
Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας



Σχήμα 7.23: Αποτελέσματα προτιμήσεων διεργασιών των BBR του Σχήματος 5.23 σύμφωνα με κριτήρια κερδοφορίας βιοδιυλιστηρίου



Σχήμα 7.24: Πορεία αντικειμενικής συνάρτησης υπολογισμού κερδοφορίας για τις 30 καλύτερες λύσεις



Σχήμα 7.25: Αποτελέσματα προτιμήσεων επιπέδων ατμού σύμφωνα με κριτήρια κερδοφορίας βιοδιυλιστηρίου

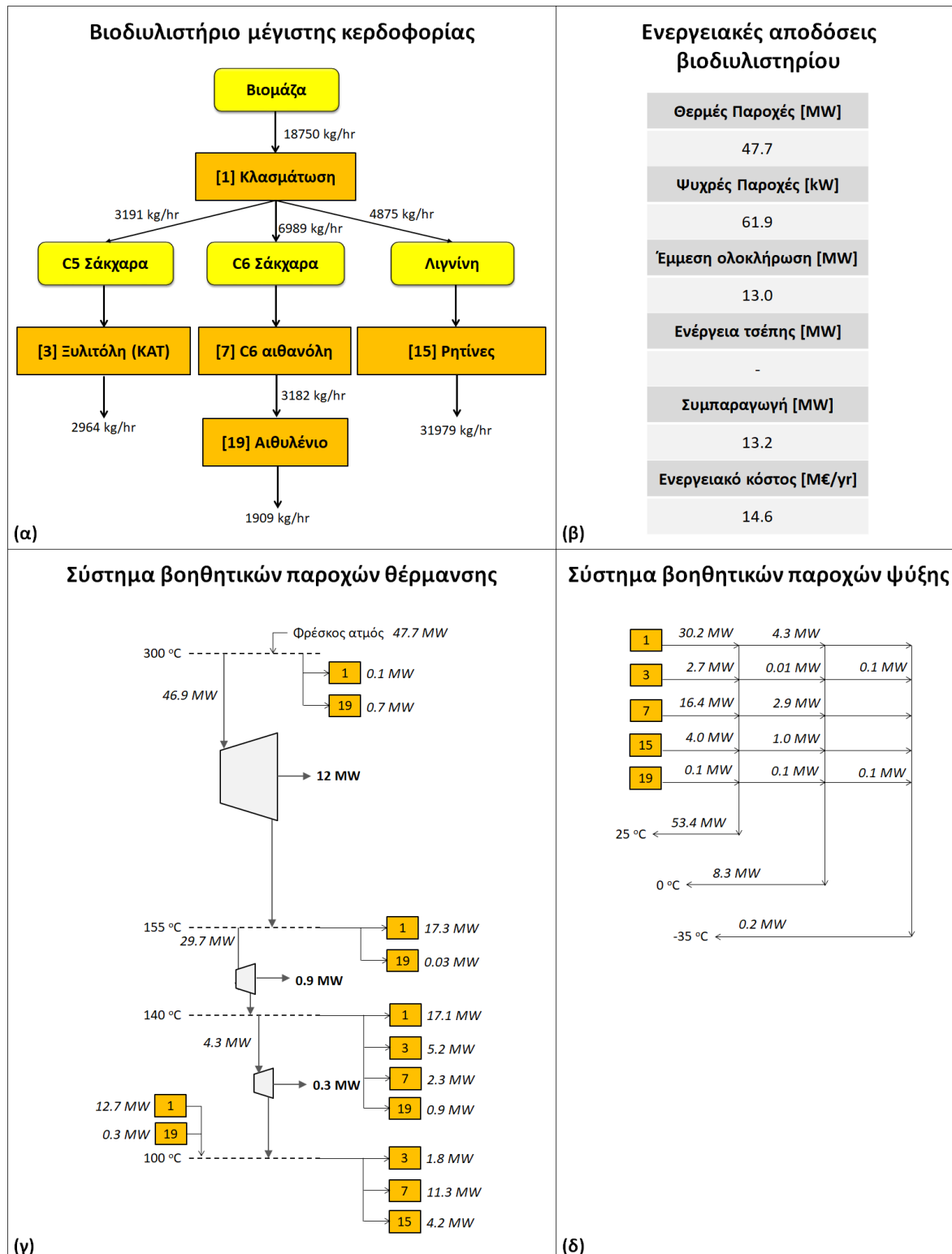
Το Σχήμα 7.25 αναδεικνύει προτιμήσεις για τα επίπεδα ατμού με θερμοκρασίες κορεσμού στους 300 °C, 155 °C, 140 °C, 115 °C και 100 °C. Και εδώ – όπως και στις περιπτώσεις των Σχημάτων 7.21 και 7.22 - το συνδυαστικό μοντέλο ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής επανειλημμένα παρουσιάζει προτιμήσεις στα χαμηλότερα επίπεδα ατμού, καθώς τόσο η διαθέσιμη θερμότητα θερμών ρευμάτων (όταν υπάρχει) όσο και οι ανάγκες των ψυχρών ρευμάτων συγκεντρώνονται σε μεγάλο ποσοστό σε θερμοκρασίες κάτω των 200 °C. Ως εκ τούτου, η συμπλήρωση επιπέδων στις αντίστοιχες θερμοκρασιακές περιοχές, αφενός διασφαλίζει υψηλά ποσοστά εξοικονόμησης (παραγωγής-επαναχρησιμοποίησης) ατμού και αφετέρου ενισχύει τη συμπαραγωγή εισάγοντας πολλαπλά στάδια εκτόνωσης. Η χρήση αναλυτικών/αυστηρών συστημάτων υποψήφιων επιπέδων ατμού καθίσταται απαραίτητη για την ανίχνευση τέτοιων χρήσιμων διαθεσίμων θερμότητας και κατάλληλων ενεργειακών καταβοθρών με σκοπό την ταυτόχρονη ενίσχυση των αποδόσεων ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής. Ένα χαλαρό σύστημα επιπέδων θα παρουσίαζε απώλειες στον εντοπισμό τέτοιων δυνατοτήτων και δεν θα μπορούσε να εφαρμόσει (εάν χρειαστεί) αποδοτικές στρατηγικές ολοκλήρωσης-συμπαραγωγής, όπως συνέβη στο Σενάριο 2 του Σχήματος 7.22.

Τέλος, στο Σχήμα 7.26 παρουσιάζονται τα οικονομικά και ενεργειακά αποτελέσματα του βιοδιυλιστηρίου μέγιστης κερδοφορίας (1^η λύση Πίνακα 7.6). Στο Σχήμα 7.26α παρουσιάζονται οι αποδόσεις των επιλεχθέντων διεργασιών σε ενδιάμεσα και τελικά προϊόντα (ξυλιτόλη, αιθυλένιο και ρητίνες). Στο Σχήμα 7.26β συνοψίζονται οι ενεργειακές αποδόσεις του βέλτιστου βιοδιυλιστηρίου σε θερμές/ψυχρές παροχές, εξοικονόμηση ενέργειας (έμμεσης ολοκλήρωσης) και συμπαραγωγή

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας

ηλεκτρικής ενέργειας. Το Σχήμα 7.26γ παρουσιάζει το αναλυτικό σύστημα βοηθητικών παροχών θέρμανσης, συμπεριλαμβανομένης της συνεισφοράς κάθε διεργασίας για την παραγωγή ατμού και των ενεργειακών φορτίων που εκτονώνονται για παραγωγή έργου στα τέσσερα βέλτιστα επίπεδα ατμού (300 °C, 155 °C, 140 °C και 100 °C). Αντίστοιχα, το Σχήμα 7.26δ παρουσιάζει την κατανομή των ενεργειακών φορτίων που απορρίπτονται από τις διεργασίες μέσω βοηθητικών παροχών ψύξης στους 25 °C (κρύο νερό), 0 °C και -35 °C.

Κεφάλαιο 7. Η προοπτική της συμπαραγωγής ως πρόσθετο προϊόν της Συνολικής Μονάδας



Σχήμα 7.26: Ισοζύγιο μάζας, ενεργειακές αποδόσεις και συστήματα βοηθητικών παροχών θέρμανσης και ψύξης βιοδιυλιστηρίου μέγιστης κερδοφορίας

Βιβλιογραφία

1. Varbanov P.S., Doyle S., Smith R., 2004. Modelling And Optimization Of Utility Systems. Chemical Engineering Research And Design, 82, 561-578
2. Ghannadzadeh A., Perry S., Smith R., 2012. Cogeneration Targeting For Site Utility Systems. Applied Thermal Engineering, 43, 60-66
3. Tarighaleslami, A.H., Walmsley, T.G., Atkins, M.J., Walmsley, M.R.W., Neale, J.R., 2017. Total Site Heat Integration: Utility selection and optimisation using cost and exergy derivative analysis. Energy 141, 949-963
4. Liew, P.Y., Wan Alwi, S.R., Varbanov, P.S., Manan, Z.A., Klemeš, J.J., 2013. Centralised utility system planning for a Total Site Heat Integration network. Comp. and Chem. Eng., 57, 104-111
5. Douglas, T., Alabo, A.B., 2018. A generic algorithm of sustainability (GAS) function for industrial complex steam turbine and utility system optimisation. Energy, 164, 881-897
6. Medina, J.M.F., Nunez, M.P., 2010. Modelling the power production of single and multiple extraction steam turbines. Chemical Engineering Science, 65, 2811-2820
7. Mavromatis, S.P., Kokossis A.C., 1998. Conceptual optimisation of utility networks for operational variations-I. Targets and level optimisation. Chemical Engineering Science, 53, 8, 1585-1608
8. Chou, C.C., Shih Y.S., 1987. A Thermodynamic Approach to the Design and Synthesis of Plant Utility Systems. Ind. Eng. Chem. Res., 26, 1100-1108
9. Shang, Z., Kokossis, A., 2004. A transshipment model for the optimisation of steam levels of total site utility system for multiperiod operation. Computers and Chemical Engineering, 28, 1673-1688
10. Petroulas, T., Reklaitis, G.V., 1984. Computer-Aided Synthesis and Design of Plant Utility Systems. AIChE Journal, 30, 1, 69-78
11. Manesh, M.H.K., Amidpour M., S. Abadi, K., Hamed M.H., 2013. A new cogeneration targeting procedure for total site utility system. Applied Thermal Engineering, 54, 272-280
12. Dhole, V.R., Linnhoff, B., 1993. Total site targets for fuel, co-generation, emissions, and cooling. Computers & Chemical Engineering, 17, 1, S101-S109
13. Dhole, V.R., Linnhoff, B., 1994. Overall design of low temperature processes. Computers & Chemical Engineering, 18, 1, S105-S111
14. Linnhoff, B., Dhole, V.R., 1993. Targeting for CO₂ Emissions for Total Sites. Chem. Eng. Technol., 16, 252-259
15. Papoulias, S.A., Grossmann, I.E., 1983a. A structural optimization approach in process synthesis. I. Utility systems. Computers and Chemical Engineering, 7, 695-706
16. Papoulias, S.A., Grossmann, I.E., 1983b. A structural optimization approach in process synthesis. II. Heat recovery networks. Computers and Chemical Engineering, 7, 707-721
17. Papoulias, S.A., Grossmann, I.E., 1983c. A structural optimization approach in process synthesis. III. Total processing systems. Computers and Chemical Engineering, 7, 723-734
18. Colmenares, T.R., Seider, W. D., 1989. Synthesis of utility systems integrated with chemical processes. Industrial Engineering, Chemical Process Design and Development, 28, 84-93
19. Chou, C.C., Shih, Y.S., 1987. A Thermodynamic approach to the design and synthesis of plant utility systems. Ind. Engng Chem. Res. 26, 1100-1108
20. Peterson, J.F., Mann, W.L., 1985, Steam system design: how it evolves, Chem Eng, 92, 21, 62-74
21. Koufoulioulios, D., Nikolakopoulos, A., Pyrgakis K., Kokossis A., 2014. A Mathematical Decomposition for the Synthesis and the Application of Total Site Analysis on Multi-product Biorefineries. Computer Aided Chemical Engineering, 34, 549-554
22. Kemp, IC, 2007. Pinch Analysis And Process Integration. A User Guide On Process Integration For The Efficient Use Of Energy (2nd edition). Oxford: Butterworth-Heinemann, Elsevier.
23. Smith, R., 2005. Chemical process design and integration. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.

Κεφάλαιο 8.

Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

8.1. Τεχνικές ενεργειακής ολοκλήρωσης διεργασιών απόσταξης

Τα προηγούμενα κεφάλαια αντιμετωπίζουν σοβαρές προκλήσεις που αφορούν τον ανερχόμενο τομέα βιοδιυλιστηρίων και τη μείωση του ενεργειακού κόστους με τη χρήση τεχνικών ολοκλήρωσης. Οι τεχνικές προτείνουν λύσεις ενεργειακής διαχείρισης και εξοικονόμησης αντιμετωπίζοντας την ενεργειακή κατανάλωση στο σύνολο των διεργασιών της βιομηχανικής εγκατάστασης, παρά σε επιμέρους ενεργοβόρες μονάδες των διεργασιών. Ωστόσο, συχνά το ενεργειακό κόστος επεξεργασίας δεν μπορεί να υποστηρίξει τις επιλεγμένες διεργασίες, εκτός εάν παρέχεται κατάλληλη και ενδεδειγμένη ολοκλήρωση σε αυτές. Η απόσταξη, αν και ιδιαίτερα ενεργοβόρα διεργασία, παραμένει ως κορυφαία επιλογή για το διαχωρισμό πολυσυστατικών μιγμάτων σε περιπτώσεις ανάκτησης διαλυτών και αντιδρώντων, τον καθαρισμό προϊόντων και την απομάκρυνση ανεπιθύμητων συστατικών.

Στον τομέα των βιοδιυλιστηρίων, το κόστος απόσταξης είναι συχνά πολύ υψηλό είτε λόγω των χαμηλών αποδόσεων μετατροπής της πρώτης ύλης (βιομάζα) και της συνύπαρξης πολλών βιοπαραπροϊόντων σε διεργασίες ζύμωσης, είτε λόγω της χρήσης μεγάλων ποσοτήτων νερού ως βασικό μέσο καλλιέργειας και διαλυτοποίησης της βιομάζας, είτε για την ανάκτηση διαλυτών. Όλα τα παραπάνω ενισχύουν τα κίνητρα για τη διερεύνηση αποδοτικότερων διατάξεων και τεχνικών απόσταξης. Η εφαρμογή τεχνολογιών ολοκλήρωσης σε διατάξεις απόσταξης καθίσταται ζωτικής σημασίας για την εξοικονόμηση ενεργειακού κόστους διαχωρισμού και πολλές φορές για την διασφάλιση της βιωσιμότητας της διεργασίας.

Η εξοικονόμηση ενέργειας σε συστήματα απόσταξης είναι εφικτή στα πλαίσια: (1) **αυτόνομης ολοκλήρωσης** με αποκλειστική αναφορά στις μονάδες απόσταξης, όπως την αναδιάταξη ακολουθιών και βαθμίδων απόσταξης και τον βέλτιστο σχεδιασμό των προδιαγραφών λειτουργίας και (2) **ολοκλήρωσης της απόσταξης με την υπόλοιπη διεργασία**, δηλαδή το σχεδιασμό μονάδων απόσταξης που ανταλλάσσουν και αξιοποιούν με τον καλύτερο εφικτό τρόπο ενεργειακού πόρου που διατίθενται από τη διεργασία.

Αναφορικά με το (1), ο σχεδιασμός εξετάζει τις εναλλακτικές συνθέσεις βαθμίδων και στηλών για τη μείωση του θερμοδυναμικού κόστους και την εξοικονόμηση ενέργειας στα παρακείμενα στάδια απόσταξης, εξασφαλίζοντας καλύτερες αποδόσεις διαχωρισμού. Όσον αφορά το (2), το πρόβλημα εξετάζει την ολοκλήρωση επιπέδων και στηλών απόσταξης με τις περιβάλλουσες μονάδες της υπόλοιπης διεργασίας, οι οποίες καλούνται και ως «**υποβάθρο**». Σε αυτό το πλαίσιο, εξετάζεται η ενίσχυση των περιθωρίων άμεσης ανταλλαγής ενέργειας αναβραστήρα και συμπυκνωτήρα των συστημάτων απόσταξης με τα θερμά/ψυχρά ρεύματα του υποβάθρου.

Σε επόμενα στάδια ολοκλήρωσης, η διεργασία θα μπορούσε να συνεισφέρει στα πλαίσια έμμεσης ολοκλήρωσης με άλλες διεργασίες της Συνολικής Μονάδας, όπως συζητήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει και συνδέει με συστηματικό τρόπο τους βαθμούς ελευθερίας αυτόνομης ολοκλήρωσης συστημάτων απόσταξης και της ολοκλήρωσής τους με την υπόλοιπη διεργασία καταλήγοντας σε ένα αυτοματοποιημένο εργαλείο σχεδιασμού και ολοκλήρωσης αποστακτικών στηλών (Pyrgakis and Kokossis, 2019). Το εργαλείο μπορεί να συνδεθεί με τα υπάρχοντα μοντέλα ICT και CIT για την ολοκλήρωση διεργασίας-προς-διεργασία, ωστόσο, ο σχεδιασμός στο παρόν κεφάλαιο στοχεύει στα ρεύματα και τα συστήματα απόσταξης εντός της διεργασίας.

8.1.1 Αυτόνομη ολοκλήρωση απόσταξης

Για την εφαρμογή αυτόνομης ολοκλήρωσης διατίθεται ένας μακρύς κατάλογος επιλογών σχεδιασμού. Ο Westerberg (1985) παρουσίασε ένα πλήθος σχημάτων ολοκλήρωσης της απόσταξης και τις προκλήσεις που παρουσιάζονται για την εύρεση καλύτερων ενεργειακών στόχων. Τα μέσα που χρησιμοποιούνται είναι η αναδιάταξη των διαφόρων βαθμίδων ή/και στηλών απόσταξης μεταξύ τους καταλήγοντας σε πολυπλοκότερα συστήματα απόσταξης, τα οποία συχνά εντοπίζονται με την ονομασία Thermally Coupled Distillation Systems (TCDS) και αφορούν συστήματα προ-κλασμάτωσης (pre-fractionator), Petlyuk, βοηθητικές στήλες απογύμνωσης (stripper) και εμπλουτισμού (rectifier),

στήλες διαχωρισμένων τοιχωμάτων (divided-wall), αντλίες θερμότητας, πλαϊνά προϊόντα (side-products), επανασυμπύεση ατμών, απόσταξη πολλαπλών-επιπέδων (multiple-effect distillation), κ.ά. Αργότερα, οι Dhole and Linnhoff (1993) εισήγαγαν γραφικά εργαλεία για τη αξιολόγηση των αποδόσεων εξοικονόμησης κατά το σχεδιασμό ενεργειακά ολοκληρωμένων συστημάτων απόσταξης (Μεγάλα Σύνθετα Γραφήματα Αποστακτικών Στηλών, αγγλιστί Column Grand Composite Curves - CGCC).

Στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα μεθόδων εφαρμογής σχημάτων ολοκλήρωσης ιδιαίτερα κατά την αντιμετώπιση του πολυσυζητημένου προβλήματος σύνθεσης συστοιχιών απόσταξης για τον διαχωρισμό πολυσυστατικών μιγμάτων. Οι Rathore et al. (1974α) παρουσίασαν στρατηγικές για την ολοκλήρωση συστοιχιών απόσταξης, ενώ η εργασία τους αργότερα επεκτείνεται παρουσιάζοντας σχήματα ενεργειακής ολοκλήρωσης με το υπόβαθρο της διεργασίας (Rathore et al., 1974β). Οι Naka et al. (1982) παρουσίασαν έναν αλγόριθμο για τον ίδιο σκοπό στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση των απωλειών παροχής θερμότητας/ψύξης. Οι στρατηγικές σύνθεσης συστοιχιών συχνά αντιμετωπίζονται ως υπερδομές, οι οποίες αφορούν την άμεση ολοκλήρωση συνδυασμών συμπυκνωτήρων-αναβραστήρων (Caballero and Grossmann, 1999; Benz and Cerda, 1992), ή/και θερμών-ψυχρών ρευμάτων διαφόρων τμημάτων της απόσταξης (Alcántara-Avila and Hasebe, 2013). Αναλυτικότερες προσεγγίσεις αφορούν το σχεδιασμό δικτύων εναλλακτών θερμότητας (Floudas and Paulesg, 1988; Aggarwal and Floudas, 1992). Οι Umeda et al. (1979) πρότειναν μια εξελικτική διαδικασία βασισμένη σε γραφικές μεθόδους για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης απόσταξης χρησιμοποιώντας αντλίες θερμότητας και σχήματα ολοκλήρωσης, όπως αυτό της απόσταξης πολλαπλών-επιπέδων. Αργότερα, οι Andrecovich και Westerberg (1985α, 1985β) συνδύασαν ευρετικές μεθόδους για την εκτίμηση της ελάχιστης ενεργειακής κατανάλωσης κάθε υποψήφιας αλληλουχίας αποστάξεων. Το έργο τους επεκτάθηκε συστηματοποιώντας τους βαθμούς ελευθερίας του προβλήματος υπό τη μορφή υπερδομών, οι οποίες βελτιστοποιούνται με τη χρήση τεχνικών μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού για την σύνθεση ενεργειακά ολοκληρωμένων συστοιχιών απόσταξης (Andrecovich και Westerberg, 1985γ). Οι Psycha et al. (2014) παρουσίασαν μία εξελικτική διαδικασία για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων βιοδιυλιστηρίων μικρο-φίκων χρησιμοποιώντας συστήματα TCDS μειώνοντας το ενεργειακό κόστος απόσταξης μιγμάτων αιθανόλης-νερού-γλυκερίνης κατά 40% σε σχέση με απλά, μη-ολοκληρωμένα, συστήματα απόσταξης. Τέτοια σύνθετα σχήματα ολοκλήρωσης (TCDS) μελετήθηκαν και από τους Piyush και Kokossis (1999), οι οποίοι εισήγαγαν μία προσέγγιση βελτιστοποίησης για την επιλογή συστημάτων TCDS βασισμένη σε θερμοδυναμικά δεδομένα. Η προσέγγισή τους είχε ως αποτέλεσμα, την επαναδιατύπωση του μη-γραμμικού (MINLP) προβλήματος

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

σύνθεσης αποστάξεων TCDS ως γραμμικό πρόβλημα (ακέραιων και συνεχών μεταβλητών) επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση προβλημάτων ιδιαίτερα υψηλής πολυπλοκότητας.

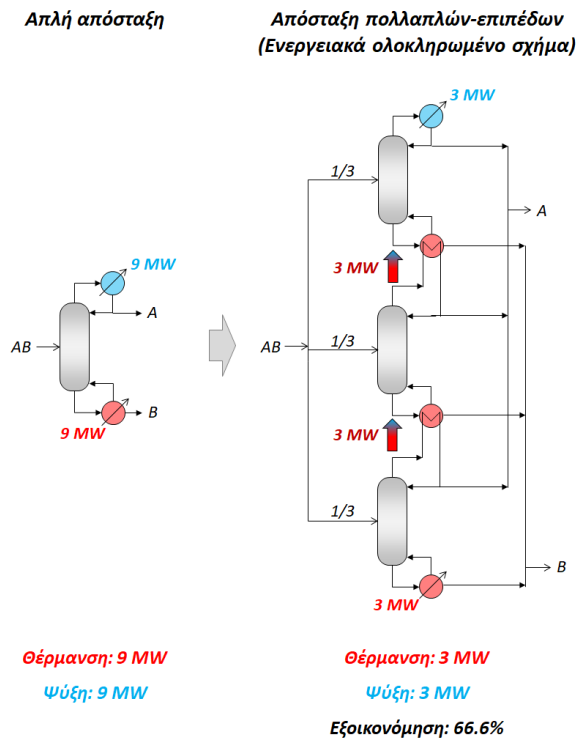
Από τη μία, τα σύνθετα σχήματα αυτόνομης ολοκλήρωσης TCDS συναντώνται συχνά στη βιβλιογραφία, ωστόσο αποφέρουν συχνά περιορισμένα επίπεδα ενεργειακής εξοικονόμησης λόγω θερμοδυναμικών περιορισμών στην επίτευξη των στόχων διαχωρισμού (καθαρότητα και ανάκτηση προϊόντων). Στην πλειονότητα των εφαρμογών TCDS, τα περιθώρια εξοικονόμησης είναι ισχυρά εξαρτώμενα από τις σχετικές πτητικότητες των συστατικών και τη σύσταση της τροφοδοσίας, και σε ορισμένες περιπτώσεις η εφαρμογή τους δεν είναι εφικτή. Από την άλλη, η χρήση απλών αποστάξεων, αν και προσφέρει αρκετούς βαθμούς ελευθερίας αναφορικά με τη σύνθεση συστοιχιών πολλαπλών διαχωρισμών, περιορίζεται από την ενεργειακή εξοικονόμηση που προσφέρει η άμεση ολοκλήρωσή τους με τους εναλλάκτες της υπόλοιπης διεργασίας (υπόβαθρο). Στον αντίποδα και των δύο περιπτώσεων (TCDS και απλών στηλών), το σχήμα αυτόνομης ολοκλήρωσης πολλαπλών-επιπέδων (Multiple-Effect Distillation systems, εφεξής MED) προσφέρει αρκετούς βαθμούς ελευθερίας σύνθεσης και ενεργειακής ολοκλήρωσής τόσο μεταξύ πολλαπλών διαφορετικών επιπέδων απόσταξης όσο και με το υπόβαθρο.

Η ολοκλήρωση του σχήματος MED βασίζεται στο διαμοιρασμό της αρχικής τροφοδοσίας σε παράλληλες στήλες απόσταξης, οι οποίες λειτουργούν με τις ίδιες προδιαγραφές ανάκτησης και καθαρότητας προϊόντων, αλλά σε διαφορετικές πιέσεις. Το γεγονός αυτό επιτρέπει στους αναβραστήρες και συμπυκνωτήρες του συστήματος να λειτουργούν σε διαφορετικά θερμοκρασιακά επίπεδα και κατ' επέκταση την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ τους, εφόσον διασφαλίζεται ο θερμοδυναμικός περιορισμός ελάχιστης θερμοκρασιακής διαφοράς, ΔT_{\min} , μεταξύ τους.

Τα ρεύματα ατμών κορυφής που διαχειρίζονται οι συμπυκνωτήρες αντιμετωπίζονται ως θερμά ρεύματα (πηγές) της διεργασίας, ενώ τα ρεύματα των αναβραστήρων ως ψυχρά (καταβόθρες). Εάν διασφαλίζεται η ΔT_{\min} μεταξύ τους, τότε τα ρεύματα κορυφής μίας στήλης μπορούν να ολοκληρωθούν άμεσα με τα ρεύματα πυθμένα κάποιας άλλης. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των συμπυκνωτήρων και αναβραστήρων (θερμοκρασία και ενεργειακό φορτίο) ενός συστήματος MED αποκαλύπτουν τις δυνατότητες ολοκλήρωσης μεταξύ των ρευμάτων και το πρόβλημα ολοκλήρωσης αντιμετωπίζεται ως κλασικό πρόβλημα ενεργειακής αποσυμφόρησης για την εύρεση των βέλτιστων ενεργειακών στόχων. Ένα σύστημα πολλαπλών παράλληλων στηλών απόσταξης (MED) μεταφέρει θερμότητα – με πορεία από τους συμπυκνωτήρες προς τους αναβραστήρες – διαδοχικά από στήλη σε στήλη, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.1.

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

Στα αριστερά του Σχήματος 8.1 παρουσιάζεται το αρχικό σενάριο μίας απλής απόσταξης που δεν χρησιμοποιεί τεχνικές ολοκλήρωσης. Το σύστημα MED (στα δεξιά του Σχήματος 8.1) αντικαθιστά την απλή αρχική στήλη διαμοιράζοντας την αρχική τροφοδοσία μεταξύ πολλαπλών στηλών που λειτουργούν σε διαφορετικές πιέσεις. Θερμότητα παρέχεται στον αναβραστήρα της πρώτης (υψηλότερης πίεσης) στήλης. Ακολούθως, θερμότητα μεταφέρεται διαδοχικά από υψηλότερης προς χαμηλότερης πίεσης στήλες, μέχρι να απορριφθεί στον συμπυκνωτήρα της τελευταίας (χαμηλότερης πίεσης) στήλης. Εφόσον η τροφοδοσία διαμοιράζεται ισάξια στις επιμέρους στήλες του MED, οδηγώντας σε αποστάξεις με σχεδόν ίδιες ανάγκες συμπυκνωτήρα/αναβραστήρα, τότε το MED του Σχήματος 8.1 χρεώνεται ενεργειακά μόνον στις ακραίες στήλες. Επίσης, εφόσον οι στήλες διαχειρίζονται μικρότερες παροχές τροφοδοσίας από την αρχική απλή στήλη θα παρουσιάζουν και μικρότερες ανάγκες, και ως εκ τούτου το συνολικό ενεργειακό κόστος απόσταξης του MED θα είναι μικρότερο από αυτό της αρχικής. Υπό αυτές τις συνθήκες, ένα σύστημα MED που περιλαμβάνει N στήλες απόσταξης μπορεί να εξασφαλίσει ενεργειακή εξοικονόμηση έως και κατά $\frac{N-1}{N} \%$. Υπενθυμίζεται, ότι η σύσταση των προϊόντων κορυφής και πυθμένα κάθε στήλης του MED είναι ίδια με αυτή της αρχικής απλής στήλης του Σχήματος 8.1.



Σχήμα 8.1: Σχήμα αυτόνομης ολοκλήρωσης πολλαπλών-επιπέδων απόσταξης (MED)

Το σχήμα MED αποτελεί ιδανική λύση για την αντικατάσταση ενεργοβόρων περιπτώσεων απόσταξης, προσφέροντας πολλές επιλογές σχεδιασμού και ιδιαίτερα υψηλές αποδόσεις εξοικονόμησης ενέργειας (Linnhoff et al., 1983). Δεδομένης της σχεδιαστικής ευελιξίας και των υψηλών αποδόσεων που παρουσιάζει το σχήμα ολοκλήρωσης MED, η παρακάτω ανάλυση εστιάζει στην ανάπτυξη τεχνικών σχεδιασμού και ολοκλήρωσης τέτοιων συστημάτων.

Η χρήση του σχήματος MED μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε περίπτωση βιομηχανικών εφαρμογών, όπως σε συστήματα αφαλάτωσης (Gabriel et al., 2015; Xue et al., 2018), την επεξεργασία αιθανόλης (Haelssig et al., 2008), ισομερών βουτανίου (Engelien and Skogestad, 2005), μεθυλοχλωροσιλανίου (Wang and Wang, 2012), ακατέργαστης μεθανόλης (Zhang et al., 2010), αλλά και σε διεργασίες βιοδιυλιστηρίων (Pyrgakis et al., 2015, Pyrgakis and Kokossis, 2019), αναφέροντας αποδόσεις ενεργειακής εξοικονόμησης απόσταξης 30-70%.

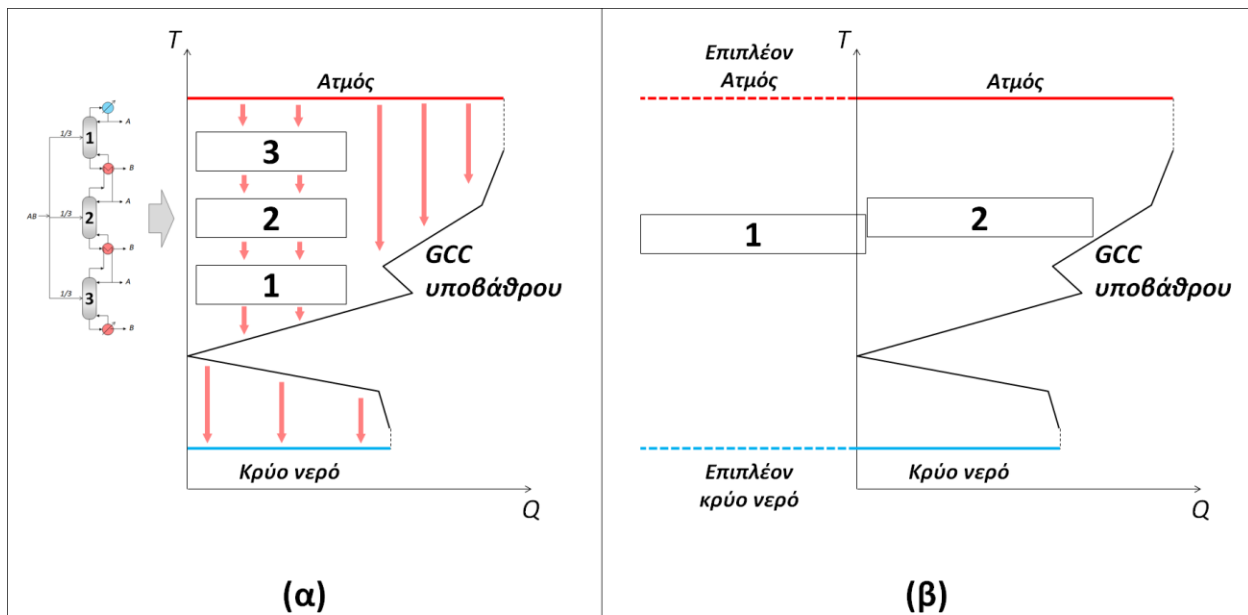
8.1.2 Ολοκλήρωση απόσταξης με την υπόλοιπη διεργασία

Πέραν της αυτόνομης ολοκλήρωσης συστημάτων απόσταξης, η ενεργειακή ολοκλήρωση των αναγκών αναβραστήρα και συμπυκνωτήρα με την υπόλοιπη διεργασία μπορεί να ενισχύσει περαιτέρω τα ποσοστά ενεργειακής εξοικονόμησης της απόσταξης. Η ιδέα βασίζεται στην άμεση ολοκλήρωση των εναλλακτών των MED με τις ανάγκες της υπόλοιπης διεργασίας, όπως αυτές αποτυπώνονται στα διαγράμματα GCC (βλ. Κεφάλαιο 2). Ένα σύστημα MED N-στηλών μπορεί να εξοικονομήσει έως και $\frac{N-1}{N}$ % των αρχικών αναγκών απόσταξης. Όταν το MED ολοκληρωθεί και με τα ρεύματα της υπόλοιπης διεργασίας, τότε μπορεί να καλύψει το υπόλοιπο ($\frac{1}{N}$ %) των αναγκών του από τις παροχές και τα ρεύματα του υποβάθρου καταλήγοντας έως και σε 100% εξοικονόμηση του κόστους απόσταξης, όπως φαίνεται στο GCC του Σχήματος 8.2α.

Το GCC αφορά την ολοκλήρωση των ρευμάτων του υποβάθρου της διεργασίας, χωρίς να εμπλέκονται τα ρεύματα της απόσταξης. Τα τελευταία ενσωματώνονται μέσω των τριών κουτιών (1, 2 και 3) που παρεμβάλλονται εντός του GCC του υποβάθρου. Οι άνω/κάτω πλευρές κάθε κουτιού αφορούν τις θερμοκρασίες του αναβραστήρα/συμπυκνωτήρα κάθε στήλης, ενώ το οριζόντιο μήκος των κουτιών ρυθμίζεται σύμφωνα με τις ενεργειακές ανάγκες κάθε εναλλάκτη της στήλης. Στα πλαίσια της παρούσας ανάλυσης θεωρείται ότι οι ανάγκες κορυφής/πυθμένα των στηλών απόσταξης είναι σχεδόν ίδιες. Υπενθυμίζεται ότι, το GCC χρησιμοποιεί τις μετατοπισμένες θερμοκρασίες των ρευμάτων (υποβάθρου και απόσταξης), επομένως οι προϋποθέσεις ανταλλαγής θερμότητας (ΔT_{\min}) μεταξύ των

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

στηλών του MED και με την υπόλοιπη διεργασία διασφαλίζονται όταν τα κουτιά δεν τέμνονται μεταξύ τους και με τις γραμμές του GCC, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 8.2α, ο ατμός που απαιτείται (ούτως ή άλλως από το υπόβαθρο) τροφοδοτεί το σύστημα πολλαπλών-αποστάξεων, και η θερμότητα καταλήγει στις καταβόθρες του GCC. Ένα εναλλακτικό σχήμα MED θα μπορούσε να τοποθετηθεί κάτω από το pinch, όπου οι στήλες θα λειτουργούσαν χρησιμοποιώντας τη θερμότητα των πηγών και τις ανάγκες ψυχρών παροχών του υποβάθρου της διεργασίας. Η ροή θερμότητας πάντοτε ακολουθεί πορεία από τις υψηλότερες προς τις χαμηλότερες θερμοκρασίες του GCC.



Σχήμα 8.2: Ολοκλήρωση συστημάτων MED με την υπόλοιπη διεργασία (υπόβαθρο): (α) πλήρως ενεργειακά ολοκληρωμένο MED 3-επιπέδων, (β) μερικώς ενεργειακά ολοκληρωμένο MED 2-επιπέδων

Το σύστημα MED του Σχήματος 8.2α ολοκληρώνεται πλήρως εντός του GCC του υποβάθρου και αξιοποιεί στο μέγιστο βαθμό την ενέργεια της διεργασίας, με αποτέλεσμα να μην επιβαρύνει τη συνολική διεργασία με επιπλέον παροχές θέρμανσης/ψύξης. Αντίθετα, στην περίπτωση του Σχήματος 8.2β, οι στήλες υπερκαλύπτουν η μία την άλλη (Kemp, 2007), και καθίσταται θερμοδυναμικά ανέφικτη η μεταφορά θερμότητας από τον συμπυκνωτήρα της μίας στήλης στον αναβραστήρα τη άλλης. Έτσι, το MED καλεί επιπλέον ανάγκες βοηθητικών παροχών από αυτές που απαιτούνται από την υπόλοιπη διεργασία. Το ίδιο θα ίσχυε αν τα κουτιά διέσχιζαν το Pinch, δηλαδή οι στήλες θα εξοβελίζονταν εκτός (στα αριστερά) του GCC. Το σκαρίφημα του Σχήματος 8.2β δεν είναι πλήρως ενεργειακά ολοκληρωμένο

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

και απαιτείται ο επανασχεδιασμός των πιέσεων των στηλών του MED με σκοπό την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ των στηλών και την πλήρη ενσωμάτωσή τους εντός του χώρου του GCC του υποβάθρου.

Οι μεθοδολογίες που εφαρμόζονται για την ολοκλήρωση απόσταξης-υποβάθρου, ως επί το πλείστον βασίζονται στη μέθοδο Pinch Analysis (βλ. Κεφάλαιο 2) και αφορούν τη χρήση γραφικών εργαλείων (Dhole and Linnhoff, 1993; Linnhoff et al., 1983), όπως αυτά του Σχήματος 8.2, για τη διασφάλιση των θερμοδυναμικών περιορισμών (Αρχές Κατάλληλης Τοποθέτησης ή αλλιώς Appropriate Placement Principles) σύμφωνα με τους οποίους δεν επιτρέπεται η επικάλυψη των κουτιών (στηλών) μεταξύ τους και με το GCC, ώστε να είναι θερμοδυναμικά εφικτή (διασφάλιση ΔT_{\min}) η μεταφορά θερμότητας μεταξύ στηλών και στηλών-υποβάθρου.

Ο σχεδιασμός αφορά την κατάλληλη επιλογή πιέσεων και στρατηγικών διαμοιρασμού της τροφοδοσίας στις επιμέρους στήλες καθορίζοντας το ενεργειακό προφίλ (κουτιών) του MED και τις δυνατότητες ενσωμάτωσής του εντός του χώρου του GCC του υποβάθρου. Το ενεργειακό προφίλ της υπόλοιπης διεργασίας αποτελεί παράμετρο του συστήματος ολοκλήρωσης εφόσον αφορά την ολοκλήρωση συγκεκριμένης διεργασίας ή μπορεί να είναι βαθμός ελευθερίας, όταν η ολοκλήρωση αφορά υπο διερεύνηση διεργασίες, όπως στην περίπτωση των αλυσίδων προϊόντων. Εφόσον καθοριστεί η διεργασία ολοκλήρωσης, οι βαθμοί ελευθερίας σχεδιασμού του MED αξιοποιούνται για τη μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας αναζητώντας καλύτερα συστήματα στηλών που ολοκληρώνονται με το υπόβαθρο της διεργασίας.

Η ολοκλήρωση συστημάτων MED με το υπόβαθρο διεργασιών έχει εφαρμοστεί εκτεταμένα στη βιβλιογραφία, ενώ εφαρμογές της συναντώνται και σε προβλήματα σχεδιασμού βιοδιυλιστηρίων, όπως για την παραγωγή αιθανόλης από ζαχαροκάλαμο (Dias et al., 2011), άχυρο σιταριού (Kravanja et al., 2013; Pyrgakis et al., 2015), σουίτσγκρας (Matrín and Grossmann, 2011), και καλαμποκιού (Karuppiyah et al., 2008; Martín and Grossmann, 2013). Η χρήση MED δύο επιπέδων σε βιοδιυλιστήριο ζαχαροκάλαμου (Dias et al., 2011) απέφερε ενεργειακή εξοικονόμηση έως 74% συγκριτικά με το μη ολοκληρωμένο σύστημα απόσταξης. Σε βιοδιυλιστήρια που αξιοποιούν άχυρα σιταριού προτάθηκαν πλήρως ενεργειακά ολοκληρωμένα συστήματα MED και εξάτμισης επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση 15% (Kravanja et al., 2013), ενώ άλλες περιπτώσεις MED 2-επιπέδων επέφεραν μείωση κατά 33% (Pyrgakis et al., 2015). Η χρήση λεπτομερών μοντέλων απόσταξης (MINLPs) σε συνδυασμό με κλασικά μοντέλα ολοκλήρωσης (μεταφόρτωσης) οδήγησαν σε διαμορφώσεις MED που αποδίδουν εξοικονόμηση ενέργειας έως και 65% (Matrín and Grossmann, 2011; Karuppiyah et al., 2008; Martín and Grossmann,

2013), ενώ η χρήση MED σε συστήματα συμπαραγωγής (CHP) βελτίωσε τις ενεργειακές αποδόσεις κατά 30% (Tamburini et al., 2016).

Στη συντριπτική πλειοψηφία των μελετών της βιβλιογραφίας, η εξέταση των βαθμών ελευθερίας για τον σχεδιασμό και την ολοκλήρωση των MED πραγματοποιείται μέσω της γραφικής ανάλυσης GCC, όπως στο Σχήμα 8.2. Πέραν απλών και μικρών προβλημάτων σχεδιασμού, αυτή η μέθοδος καθίσταται αναποτελεσματική και μη πρακτική, καθώς:

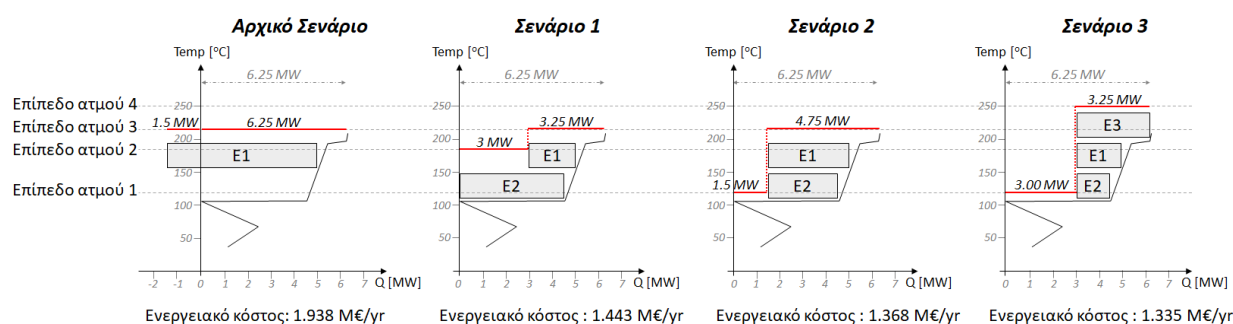
- τα στάδια γραφικής ανάλυσης δεν έχουν συστηματοποιηθεί και η διαδικασία βασίζεται στον πειραματισμό σεναρίων MED επί του GCC του υποβάθρου.
- είναι ιδιαίτερος χρονοβόρα, καθώς κάθε σενάριο οφείλει να αναλυθεί περεταίρω για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών των στηλών (θερμοκρασία, πίεση λειτουργίας, λόγος αναρροής, αριθμός βαθμίδων και ενεργειακή κατανάλωση).
- είναι επιρρεπής στην απώλεια βέλτιστων λύσεων.
- η χρήση της αντιμετωπίζει ζητήματα μεροληψίας, τα οποία σχετίζονται με κριτήρια απόφασης του μηχανικού για την επιλογή στηλών (κουτιά), πιέσεων και την ολοκλήρωσή τους εντός του GCC.
- σε προβλήματα σύνθεσης διεργασιών – όπως στην περίπτωση αλυσίδων προϊόντων – η ολοκλήρωση των MED εκτίθεται σε εναλλακτικά και μεταβαλλόμενα ενεργειακά προφίλ (GCC) υποβάθρων, τα οποία χρίζουν διαλογής ταυτόχρονα με τον σχεδιασμό και την ολοκλήρωση των MED με τις επιλεχθείσες διεργασίες.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προκλήσεων καθίσταται αναγκαία η συστηματοποίηση των επιλογών σχεδιασμού των MED και της αυτοματοποίησης της διαδικασίας ολοκλήρωσής με την υπόλοιπη διεργασία. Η παρούσα μεθοδολογία συνδυάζει κανόνες σχεδιασμού και ολοκλήρωσης των MED με τεχνικές μαθηματικού προγραμματισμού κατασκευάζοντας τις επιλογές σύνθεσης και ολοκλήρωσης αποστάξεων ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύεται με χρήση μικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού (MILP). Η προσέγγιση εξετάζει τόσο τα περιθώρια εξοικονόμησης θερμότητας, όσο και θέματα που προκύπτουν από την αύξηση του κόστους κεφαλαίου από τη χρήση επιπλέον στηλών MED. Όσες περισσότερες στήλες χρησιμοποιεί το MED (αύξηση κόστους επένδυσης), τόσες περισσότερες επιλογές ολοκλήρωσης προσφέρει (μείωση ενεργειακού

κόστους). Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι τα μοντέλα μπορούν να κλιμακωθούν για αυθαίρετα μεγάλα προβλήματα πολλαπλών διαφορετικών αποστάξεων (π.χ. συστοιχίες απόσταξης), και για περιπτώσεις αλυσίδων προϊόντων (πολλαπλά υποψήφια GCC). Η απλότητα του μοντέλου, επίσης, επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωσή του με άλλα προβλήματα σχεδιασμού, όπως το σχεδιασμό συστοιχίας αποστάξεων (distillation sequencing), την σύνθεση διεργασιών (Βλ. Κεφάλαιο 3 και 4), την ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων αντίδρασης-απόσταξης, κ.ά.

8.2. Περιγραφή του προβλήματος ολοκλήρωσης της απόσταξης με την υπόλοιπη διεργασία

Ελεύθερες επιλογές για το σχεδιασμό των MED είναι: (α) ο **αριθμός** των επιπέδων (στηλών) απόσταξης, (β) οι **πιέσεις** λειτουργίας τους και (γ) οι **στρατηγικές διαμοιρασμού** της αρχικής τροφοδοσίας. Όσον αφορά το (α), οι αρχικές ενεργειακές ανάγκες διαχωρισμού μοιράζονται σε πολλαπλά επίπεδα απόσταξης, τα οποία μπορούν να ανταλλάσσουν και να εξοικονομούν ενέργεια μεταξύ τους. Η επιλογή αυτή παίζει καθοριστικό ρόλο και θέτει μέγιστα όρια ($\frac{N-1}{N} \%$) στα ποσοστά εξοικονόμησης. Η επιλογή (β) ρυθμίζει τις θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ συμπυκνωτήρων-αναβραστήρων και διασφαλίζει τη ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ τους, καθώς επίσης καθορίζει τα περιθώρια ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ MED και υποβάθρου. Μέσω της επιλογής (γ) καθορίζονται η χωρητικότητα και το μέγεθος κάθε στήλης και ως εκ τούτου οι ενεργειακές απαιτήσεις αναβραστήρα και συμπυκνωτήρα της απόσταξης. Όταν η ολοκλήρωση συνδυάζεται με τις ανάγκες του υπόβαθρου, τα ενεργειακά προφίλ MED και υποβάθρου θα καθορίσουν την στρατηγική κατανομής της τροφοδοσίας στις στήλες και τις ανάγκες των συμπυκνωτήρων και αναβραστήρων. Ένα τέτοιο παράδειγμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.3.



Σχήμα 8.3: Γραφική ανάλυση σχεδιασμού και ολοκλήρωσης MED: κατανομή επιπέδων ατμού για μείωση του ενεργειακού κόστους

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

Το Σχήμα 8.3 παρουσιάζει το GCC του υποβάθρου μίας διεργασίας, ενώ με (γκρι) κουτιά αναπαριστώνται οι ενεργειακές ανάγκες κάθε αποστακτικής στήλης. Στα αριστερά του Σχήματος 8.3 παρουσιάζεται το αρχικό σενάριο απόσταξης, η οποία ολοκληρώνεται μερικώς με το υπόβαθρο. Στο αρχικό σενάριο, οι βοηθητικές παροχές θέρμανσης (6.25 MW + 1.5 MW) καλύπτουν μέρος των αναγκών του υποβάθρου και πλήρως τις ανάγκες του αναβραστήρα της E1. Οι υπόλοιπες ανάγκες του υποβάθρου (πάνω από τον κόμβο) καλύπτονται από τον συμπυκνωτήρα της E1. Τέλος, οι ψυχρές παροχές καλύπτουν τις ανάγκες του υποβάθρου κάτω από τον κόμβο, και μέρος των αναγκών του συμπυκνωτήρα της E1. Οι ενεργειακές ανάγκες της συνολικής διεργασίας (απόσταξη και υπόβαθρο) είναι κατά 1.5 MW μεγαλύτερες από αυτές που απαιτούνται αποκλειστικά από το υπόβαθρο, εφόσον η στήλη του αρχικού σεναρίου δεν μπορεί να στοιχηθεί πλήρως εντός του GCC. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί την εισαγωγή επιπλέον στηλών, οι οποίες θα μοιραστούν το αρχικό ενεργειακό φορτίο και θα επιτρέψουν καλύτερες αποδόσεις ολοκλήρωσης. Είναι σημαντικό τα ενεργειακά οφέλη από τη χρήση επιπλέον στηλών να οδηγούν σε λογικούς χρόνους απόσβεσης κεφαλαίου που θα χρειαστεί για τις επιπλέον στήλες. Ελλείψει μαθηματικής προσέγγισης, το πρόβλημα θα εξεταστεί γραφικά επιθεωρώντας τις δυνατότητες του GCC για την ενσωμάτωση επιπλέον στηλών απόσταξης.

Η χρήση 2 στηλών του Σεναρίου 1 είναι αρκετή, ώστε να ολοκληρωθούν πλήρως οι ανάγκες απόσταξης με την υπόλοιπη διεργασία. Το σχέδιο ολοκλήρωσης περιλαμβάνει τα εξής:

- i. 3.25 MW θερμής παροχής ατμού εξυπηρετούν τον αναβραστήρα της E1 και μέρος του υποβάθρου.
- ii. ο συμπυκνωτήρας της E1 τροφοδοτεί μέρος των αναγκών του αναβραστήρα της E2 και μέρος του υποβάθρου.
- iii. 3 MW παροχής ατμού εξυπηρετούν τις υπόλοιπες ανάγκες του αναβραστήρα E2.
- iv. ο συμπυκνωτήρας της E2 καλύπτει τις υπόλοιπες ανάγκες του υποβάθρου.

Παρότι το συνολικό θερμοδυναμικό κόστος (σε MW) είναι το ελάχιστο εφικτό, και ίσο με το κόστος του υποβάθρου, η ανάλυση θέτει νέους στόχους για μείωση του κόστους ενέργειας, το οποίο συσχετίζεται με το κόστος των επιπέδων ατμού που εφαρμόζονται.

Το παράδειγμα διαθέτει τέσσερα επίπεδα ατμού για την κάλυψη των αναγκών της συνολικής διεργασίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.3. Τα μοναδιαία κόστη κάθε επίπεδου ατμού 120 °C, 185 °C, 215 °C και 250 °C είναι αντίστοιχα 0.12, 0.21, 0.25 και 0.3 Μ€/MW/yr. Ο μηχανικός καλείται να επαναπροσδιορίσει τις επιλογές σχεδιασμού του MED με στόχο την κατάλληλη χρέωση των συνολικών αναγκών (6.25 MW) στα επίπεδα ατμού και την επίτευξη μικρότερου ενεργειακού κόστους.

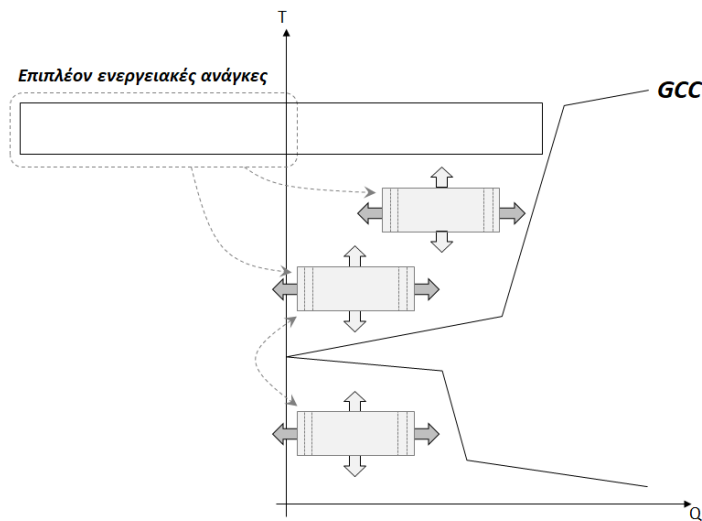
Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν περιθώρια λειτουργίας των E1 και E2 του Σεναρίου 1 σε χαμηλότερα θερμοκρασιακά επίπεδα, εξετάζεται η επιλογή αλλαγής της τροφοδοσίας μεταξύ τους, πριν από την εφαρμογή επιπλέον στήλης που θα αύξανε το κόστος επένδυσης. Το Σενάριο 2 παρουσιάζει τις δύο στήλες με νέες δυναμικότητες επιτυγχάνοντας την αντικατάσταση του επιπέδου ατμού 2 με το επίπεδο 1 διατηρώντας παράλληλα και το επίπεδο ατμού 3. Το ενεργειακό κόστος του Σεναρίου 2 (1.368 Μ€/yr) καταλήγει μικρότερο από αυτό του Σεναρίου 1 (1.443 Μ€/yr). Τέλος, δοκιμάζεται η χρήση τρίτης στήλης (E3) στο Σενάριο 3, με στόχο την ενίσχυση του φθηνότερου επιπέδου ατμού 1, ωστόσο με τίμημα την ένταξη του ακριβότερου επιπέδου 4. Αυτή η επιλογή σχεδιασμού οδήγησε σε επιπλέον μείωση του κόστους ενέργειας της συνολικής διεργασίας μόλις κατά 2.4%.

Τέτοιες μεταβάσεις μεταξύ σεναρίων, όπως αυτές από το Σενάριο 1 στο 2 και από το 2 στο 3, που στοχεύουν στην αντικατάσταση ακριβότερων επιπέδων βοηθητικών παροχών και την ενίσχυση φθηνότερων δεν είναι προφανείς, ούτε δεδομένες. Η μετάβαση από το Σενάριο 1 στο 2, καθίσταται επικερδής μόνο εφόσον ισχύει η σχέση: $c_2 \geq (c_1 + c_3)/2$ – όπου c_n το μοναδιαίο κόστος κάθε επιπέδου n – ειδάλλως το Σενάριο 1 είναι οικονομικότερο από το Σενάριο 2. Το ίδιο ισχύει και για την μετάβαση από το Σενάριο 2 στο 3, η οποία είναι επικερδής όταν ισχύει: $c_3 \geq (c_1 + 2 \cdot c_4)/3$, ειδάλλως επιλέγεται το Σενάριο 2. Παράλληλα με την ανίχνευση καλύτερων ενεργειακά λύσεων, ο μηχανικός οφείλει να δίνει ανάλογη προσοχή στο κόστος επένδυσης της λύσης συναρτήσει της εξοικονόμησης του ενεργειακού κόστους. Παραδείγματος χάριν, η λύση του Σεναρίου 3 προσφέρει μόλις 2.4% μικρότερο κόστος ενέργειας από το Σενάριο 2 με κόστος την ένταξη μίας επιπλέον στήλης, γεγονός που ενδέχεται να καταλήξει σε ανεπιθύμητα μεγάλους χρόνους απόσβεσης.

Το συνολικό πρόβλημα καλείται να αντιμετωπίσει συμβιβασμούς μεταξύ του κόστους ενέργειας και επένδυσης, τα οποία εξαρτώνται τόσο από τον σχεδιασμό των MED, όσο και από τα επίπεδα βοηθητικών παροχών που μπορούν να εφαρμοστούν στη συνολική διεργασία. Από το παράδειγμα του Σχήματος 8.3 προκύπτουν σοβαρά κίνητρα για την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση των επιπέδων παροχών θέρμανσης και ψύξης μαζί με τα προβλήματα σχεδιασμού και ολοκλήρωσης των MED. Η συνδυαστική φύση του προβλήματος καθιστά ανέφικτη τη χρήση των γραφικών εργαλείων για τον εντοπισμό βέλτιστων (και ορθών) λύσεων σχεδιασμού. Ωστόσο, από το παράδειγμα του Σχήματος 8.3 αναδεικνύονται βασικά χαρακτηριστικά και συμπεράσματα για την τοπολογική συμπεριφορά των συστημάτων MED επί των γραφημάτων GCC, τα οποία αξιοποιούνται κατάλληλα για την συστηματοποίηση των επιλογών σύνθεσης και την αυτοματοποίηση της διαδικασίας.

Το πρόβλημα καθορίζεται από τη συνδυαστική φύση τριών επιλογών: **αριθμός** επιπέδων απόσταξης, **πιέσεις** λειτουργίας και **στρατηγικές διαμοιρασμού** τροφοδοσίας (Pyrgakis and Kokossis, 2019). Η τοπολογική συμπεριφορά κάθε επιλογής επί του GCC επαναδιατυπώνεται με γενικό τρόπο στο Σχήμα 8.4. Η **χρήση επιπέδων στηλών** τεμαχίζει την αρχική στήλη σε μικρότερες, οι οποίες μετατοπίζονται κατακόρυφα σύμφωνα με τις **επιλογές πιέσεων**, ενώ το μέγεθός τους ρυθμίζεται σύμφωνα με τις **στρατηγικές διαμοιρασμού της τροφοδοσίας**. Στόχος των μεταβολών είναι η κατάλληλη τοποθέτηση των επιμέρους στηλών εντός του GCC, ενώ παράλληλα η εφαρμογή οικονομικών κριτηρίων θα αναδείξουν βέλτιστες λύσεις σχεδιασμού.



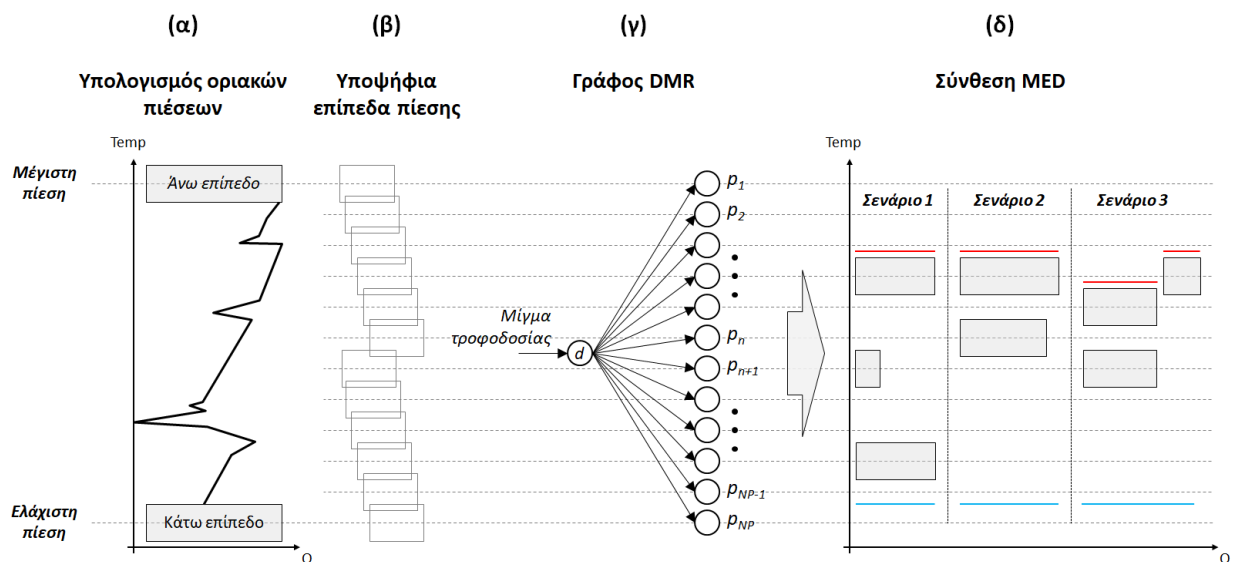
Σχήμα 8.4: Τοπολογική συμπεριφορά επιπέδων απόσταξης MED συναρτήσει του GCC του υποβάθρου

Η μεθοδολογία μεταφράζει τις τρεις επιλογές σχεδιασμού των MED σε μία αναπαράσταση, η οποία ερμηνεύει την συμπεριφορά των επιπέδων απόσταξης (Σχήμα 8.4) και ενσωματώνει στοιχεία λήψης αποφάσεων (Pyrgakis and Kokossis, 2019). Η αναπαράσταση παίρνει τη μορφή ενός γενικευμένου γράφου που χρησιμοποιείται για την σύνθεση συστημάτων MED ανεξαρτήτως του είδους της τροφοδοσίας και της μορφολογίας του GCC του υποβάθρου. Ο γράφος μπορεί να συνδυαστεί με κλασικά μοντέλα ενεργειακής ολοκλήρωσης κατασκευάζοντας ένα γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης (MILP) για την ταυτόχρονη σύνθεση και ολοκλήρωση MED με την υπόλοιπη διεργασία του υποβάθρου.

8.3. Μεθοδολογία

8.3.1. Γράφος Distillation Mapping Representation

Η μεθοδολογία προτάθηκε από τους Pyrgakis and Kokossis (2019) και εισάγει μία αναπαράσταση για τη χαρτογράφηση όλων των πιθανών σχηματισμών MED, η οποία καλείται Distillation Mapping Representation (DMR). Η αναπαράσταση ενοποιεί όλες τις επιλογές σχεδιασμού MED και απεικονίζεται στο Σχήμα 8.5γ. Το DMR περιλαμβάνει ένα πλέγμα υποψήφιων πιέσεων, κάθε μία από τις οποίες μπορεί να φιλοξενήσει μία αποστακτική στήλη. Δεδομένων των απαιτήσεων του διαχωρισμού (σύσταση τροφοδοσίας και προϊόντων), το πλέγμα πιέσεων αντιστοιχίζεται σε ένα πλέγμα θερμοκρασιών αναβραστήρων/συμπυκνωτήρων που εκτίνεται σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος του μελετώμενου GCC. Το πλέγμα παρουσιάζεται με τη μορφή ενός διμερούς γράφου που συνδέει την τροφοδοσία (Σύνολο στοιχείων 1) με τα στοιχεία-γεγονότα (στήλες απόσταξης) του πλέγματος (Σύνολο στοιχείων 2), διαμορφώνοντας έναν κατευθυνόμενο διμερή γράφο (directed bipartite graph) με τόσα άκρα όσα και τα στοιχεία του Συνόλου 2. Οι **συνδέσεις** μεταξύ των στοιχείων (τροφοδοσία και επίπεδα πίεσης) μεταφράζονται σε ροές του προβλήματος σύνθεσης και **καθορίζουν τις στρατηγικές διαμορισμού** της τροφοδοσίας. Το **πλήθος μη-μηδενικών ροών** καθορίζει το **πλήθος** των επιλεγμένων στηλών απόσταξης, ενώ τα άκρα τους καταδεικνύουν τα επίπεδα **πίεσης** των στηλών του MED.



Σχήμα 8.5: (α) οριακές πιέσεις DMR, (β) υποψήφια επίπεδα DMR, (γ) γράφος DMR, (δ) σενάρια MED

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

Το DMR ορίζεται ως ένας bipartite directed graph που αποτελείται από:

- σημεία και κόμβους γεγονότων, τα οποία αντιστοιχούν στα μείγματα τροφοδοσίας, και τις υποψήφιες πιέσεις,
- τόξα που αντιπροσωπεύουν το διαμοιρασμό της τροφοδοσίας προς κάθε γεγονός (επίπεδα πίεσης),
- κόμβους γεγονότων που λειτουργούν ως καταβόθρες τροφοδοσίας και έχουν αυστηρά μόνο εισερχόμενες ροές,

Οι εισερχόμενες ροές των κόμβων αντιπροσωπεύουν τις τροφοδοσίες των επιμέρους στηλών του MED και αφορούν κορεσμένα υγρά, των οποίων η θερμική κατάσταση μεταβάλλεται (προς τα επάνω ή προς τα κάτω) από βοηθητικούς εναλλάκτες θερμότητας – παρεμβάλλονται μεταξύ της αρχικής τροφοδοσίας και κάθε υποψήφιας στήλης στα υποψήφια επίπεδα – σύμφωνα με τη πίεση-στόχο της στήλης.

Το σημείο τροφοδοσίας λαμβάνει την τροφοδοσία της απόσταξης, και το DMR εφαρμόζεται για το σχεδιασμό ενός συστήματος MED σύμφωνα με την τροφοδοσία και τις προδιαγραφές προϊόντων που ορίζονται από το πρόβλημα απόσταξης. Εάν η διεργασία περιλαμβάνει περισσότερες από μία διαφορετικές περιπτώσεις απόσταξης (π.χ. ανάκτηση διαλυτών και καθαρισμό τελικών προϊόντων), τότε η αναπαράσταση DMR εφαρμόζεται ξεχωριστά για κάθε διαφορετική τροφοδοσία και την αντιμετώπιση κάθε προβλήματος σχεδιασμού MED. Ωστόσο, όλα τα MED ολοκληρώνονται μεταξύ τους και με την υπόλοιπη διεργασία. Κάθε MED μπορεί να χρησιμοποιεί το ίδιο, ή και διαφορετικό, πλέγμα υποψήφιων πιέσεων λειτουργίας αναλόγως τις ανάγκες και τους θερμοδυναμικούς περιορισμούς κάθε προβλήματος διαχωρισμού, όπως παραδείγματος χάριν την ανάπτυξη αζεότροπων μιγμάτων, τα οποία ενδέχεται να περιορίσουν το θερμοκρασιακό εύρος εφαρμογής της απόσταξης.

Κρίσιμη πρόκληση της ενεργειακής ολοκλήρωσης των MED με το υπόβαθρο είναι η κατάλληλη αντιστοίχιση του ενεργειακού προφίλ των MED με το προφίλ του GCC με στόχο τη μεγιστοποίηση της ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ τους. Σε αντίθεση με το έργο των Andrecovich και του Westerberg (1985γ), ο μεγάλος αριθμός υποψήφιων επιπέδων πίεσης λειτουργίας που προσφέρει ο διμερής γράφος είναι απαραίτητος, ώστε να μπορεί να προβλέψει τις σχετικές θέσεις των αποστάξεων (κουτιών) μεταξύ τους και ως προς των ιδιαίτερων μορφολογιών του GCC. Εφόσον τα περιθώρια εξοικονόμησης εξαρτώνται από τη μορφολογία του GCC, το θερμοκρασιακό εύρος απόσταξης που προβλέπεται από ένα πλέγμα υποψήφιων πιέσεων προτείνεται να σχετίζεται με τα θερμοκρασιακά όρια του GCC. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.5α, οι άνω-κάτω πιέσεις του πλέγματος πιέσεων ρυθμίζονται

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

σύμφωνα με τα θερμοκρασιακά άκρα του GCC, ενώ ύστερα το πλέγμα συμπληρώνεται με επίπεδα (Σχήμα 8.5β) είτε σε ίσα διαστήματα είτε μέσω τεχνικών ανάπτυξης πλέγματος που μπορεί να στοχεύουν σε ειδικά θερμοκρασιακά εύρη του GCC. Ο γράφος DMR (Σχήμα 8.5γ) παράγει αναπαραστάσεις ισοδύναμες με αυτές των υπερδομών, ενώ οι ροές επιτρέπουν τη διαμόρφωση ισοζυγίων μάζας για την επιλογή και τη σύνθεση κάθε πιθανού σχηματισμού MED (Σχήμα 8.5δ).

Έστω, $d = \{d | d = 1, ND\}$ το σύνολο των διαφορετικών μιγμάτων τροφοδοσίας και αφορούν κάθε διαχωρισμό απόσταξης που εμφανίζεται στη διεργασία και $p = \{p | p = 1, NP\}$ το σύνολο των επιπέδων πίεσης του πλέγματος του DMR. Ορίζεται η παράμετρος F_d^{FEED} ως η συνολική παροχή τροφοδοσίας κάθε μίγματος d καθώς και η συνεχής μεταβλητή $F_{d,p}$ ως η παροχή του μίγματος d που κατανέμεται στο επίπεδο πίεσης p και οριοθετείται από το F_d^{FEED} . Ακολουθως ορίζεται το κλάσμα διαίρεσης (split fraction) $Y_{d,p} = \frac{F_{d,p}}{F_d^{FEED}}$, το οποίο κυμαίνεται στο διάστημα $[0,1]$. Ισοζύγια μάζας διαμορφώνονται γύρω από κάθε μίγμα τροφοδοσίας d , τα οποία αντικατοπτρίζουν με συμπαγή τρόπο και τις τρεις επιλογές σύνθεσης των MED, ως εξής:

$$\sum_{p \in P} Y_{d,p} = 1, \quad \forall d \in D \quad \text{Eq. 8.1}$$

Τα ισοζύγια μάζας του DMR συνδυάζονται με μοντέλα ενεργειακής ολοκλήρωσης θερμών-ψυχρών ρευμάτων για την ελαχιστοποίηση του κόστους βοηθητικών παροχών θέρμανσης και ψύξης. Η ολοκλήρωση ρευμάτων μπορεί να περιγραφεί είτε με μοντέλα μεταφοράς (transportation) είτε μεταφόρτωσης (transshipment), ωστόσο τα τελευταία χρησιμοποιούνται στην πλειοψηφία της βιβλιογραφίας καθώς καταλήγουν σε γραμμικά προβλήματα αρκετά μικρότερου μεγέθους και πολυπλοκότητας.

Τα μοντέλα μεταφόρτωσης αναλαμβάνουν την ενεργειακή αποσυμφόρηση ενεργειακών καταρρακτών σύμφωνα με τη συνεισφορά των ρευμάτων σε κάθε θερμοκρασιακό ενδιάμεσο (βλ. Κεφάλαιο 2). Τα ισοζύγια μάζας αξιοποιούνται για τη ρύθμιση της συνεισφοράς των αναβραστήρων/συμπυκνωτήρων των επιλεγμένων στηλών του DMR, ενώ η συνεισφορά των ρευμάτων του υποβάθρου είναι δεδομένη. Για την αντιμετώπιση προβλημάτων διερεύνησης υποψήφιων διεργασιών (βλ. Κεφάλαιο 4), το DMR μπορεί να συνδυαστεί με την αναπαράσταση BBR για τη ρύθμιση της συνεισφοράς των ρευμάτων διαφορετικών υποβάθρων ανταγωνιστικών διεργασιών.

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

Η συνδυαστική χρήση του DMR και των μοντέλων μεταφόρτωσης διαμορφώνεται ως ένα μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης που επιλύεται με χρήση MILP. Η μέθοδος είναι απαλλαγμένη από στάδια ανάλυσης που βασίζονται σε επιθεώρηση γραφικών εργαλείων, και σε σύγκριση με αυτά, είναι σε θέση:

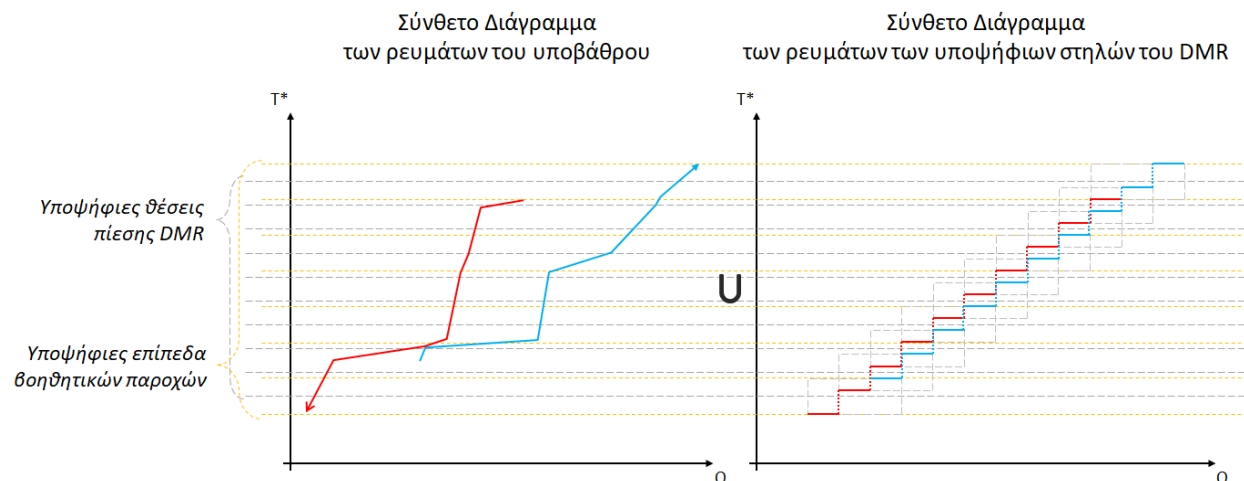
- i. να μελετήσει αντισταθμίσεις κόστους ενέργειας και κεφαλαίου για τις στήλες.
- ii. να ενσωματώσει εύκολα επιπλέον βαθμούς ελευθερίας, όπως επιλογές υποψήφιων διεργασιών με ανταγωνιστικά ενεργειακά προφίλ υποβάθρου, επιλογές σύνθεσης συστοιχιών αποστάξεων πολλαπλών-συστατικών (distillation sequencing), ή συνδυαστικά προβλήματα αντίδρασης-διαχωρισμού, κ.ά.
- iii. να επιλύσει το πρόβλημα μέσω αυστηρής βελτιστοποίησης (rigorous optimization) και να βρει βέλτιστες λύσεις που αντιμετωπίζουν πρακτικούς περιορισμούς. Όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα του DMR, τόσο περισσότερο διασφαλίζεται η συσχέτιση των MED με τη μορφολογία του GCC, με αποτέλεσμα να προσεγγίζεται η πραγματική βέλτιστη λύση, που αφορά το (ιδιαίτερα πολύπλοκο) μη-γραμμικό πρόβλημα συνεχούς πίεσης λειτουργίας των στηλών. Ωστόσο, η χρήση διακριτών θέσεων πίεσης του DMR που προσεγγίζουν μέχρι και το 1% μεταξύ διαδοχικών πιέσεων, αφενός διασφαλίζει τη γραμμικότητα του προβλήματος και την εγγύηση εύρεσης βέλτιστης λύσης, ενώ αφετέρου η ακρίβεια διακριτοποίησης (1%) υπερκερά πρακτικούς περιορισμούς σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, όπου συχνά παρατηρούνται αρκετά μεγαλύτερες (του 1%) διακυμάνσεις στην πίεση λειτουργίας.

8.3.2. Ενεργειακή ολοκλήρωση MED με την υπόλοιπη διεργασία

Η διαδικασία ενεργειακής ολοκλήρωσης ενός συστήματος MED με τα ρεύματα του υποβάθρου της διεργασίας συνδυάζει, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.6, τα εξής:

- i. το Σύνθετο διάγραμμα (βλ. Κεφάλαιο 2) των θερμών/ψυχρών ρευμάτων του υποβάθρου της διεργασίας,
- ii. το Σύνθετο διάγραμμα όλων των υποψήφιων θερμών (συμπυκνωτήρων) και ψυχρών (αναβραστήρων) ρευμάτων του DMR και
- iii. τα υποψήφια επίπεδα βοηθητικών παροχών θέρμανσης και ψύξης.

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

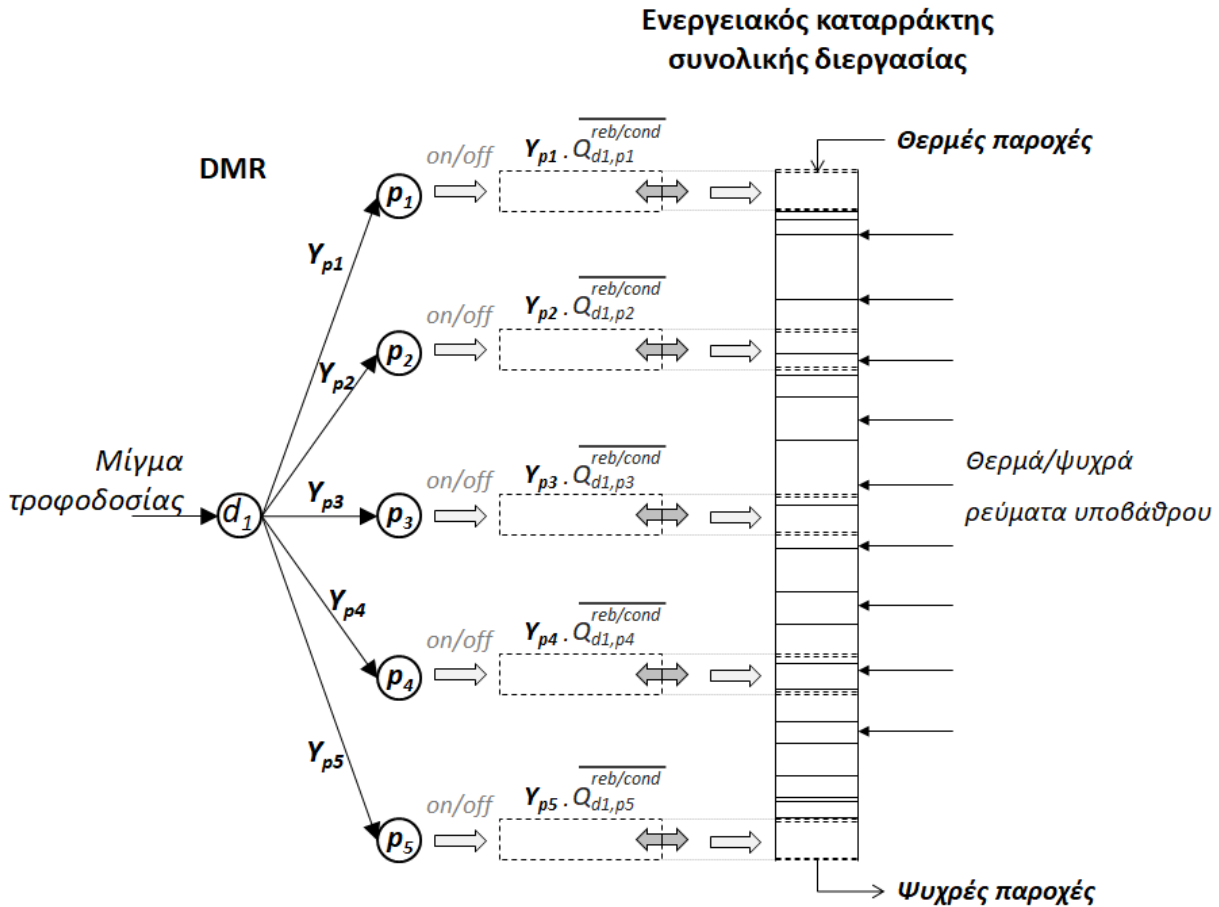


Σχήμα 8.6: Σύνθετα Διαγράμματα ρευμάτων του υποβάθρου και των στηλών απόσταξης στα υποψήφια επίπεδα πίεσης του DMR και υποψήφια επίπεδα βοηθητικών παροχών

Οι θερμοκρασίες συμπυκνωτήρων και αναβραστήρων και οι μέγιστες ενεργειακές καταναλώσεις κάθε υποψήφιας στήλης του DMR δύναται να υπολογιστούν εκ των προτέρων, δεδομένων (α) της συνολικής παροχής της τροφοδοσίας, (β) των προεπιλεγμένων υποψήφιων πιέσεων του DMR και (γ) των συστάσεων τροφοδοσίας και προϊόντων κορυφής/πυθμένα. Η θερμοκρασιακή διαφορά στην είσοδο-έξοδο των συμπυκνωτήρων και αναβραστήρων (αλλαγή φάσης) των υποψήφιων στηλών θεωρείται ίση με: $\Delta T^{reb/cond} = +/ - 1 \text{ } ^\circ C$, και χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση των θερμοκρασιακών ενδιαμέσων του GCC. Οι θερμοκρασίες όλων των στηλών του DMR συμμετέχουν σε αυτή τη διαδικασία, ώστε να υπάρχουν θερμοκρασιακά ενδιάμεσα ολοκλήρωσης κατά τη συνεισφορά οποιασδήποτε υποψήφιας στήλης που μπορεί να επιλεγθεί. Όλα τα ρεύματα (αποστάξεων και υποβάθρου) ολοκληρώνονται στον ενεργειακό καταρράκτη της διεργασίας, και η διαδικασία ολοκλήρωσης παίρνει τη μορφή του Σχήματος 8.7.

Οι παράμετροι του μοντέλου αφορούν τα χαρακτηριστικά των υποψήφιων στηλών, όπως θερμοκρασίες κορυφής/πυθμένα στήλης, την ειδική λανθάνουσα θερμότητα προϊόντων και τους λόγους αναρροής, τα οποία υπολογίζονται, εκ των προτέρων, με τη χρήση κλασικών συντομευμένων μεθόδων, όπως εξισώσεις ισορροπίας (VLE), μοντέλα Fenske-Underwood και θερμοδυναμικές συσχετίσεις (DIPPR, PPDS, IK-CAPE, NIST equations). Ακολούθως, υπολογίζονται οι θερμοκρασίες εισόδου/εξόδου και οι μέγιστες ενεργειακές απαιτήσεις των βοηθητικών εναλλακτών ($\overline{Q}_{d,p}^{aux}$) – μεταβάλλουν (προς τα πάνω ή προς τα κάτω) τη θερμική κατάσταση της αρχικής τροφοδοσίας στην

πίεση λειτουργίας κάθε στήλης – δεδομένων της πίεσης και της παροχής τροφοδοσίας (από το πρόβλημα) και των πιέσεων των υποψήφιων στηλών (από το DMR). Ο ενεργειακός καταρράκτης φιλοξενεί τις διαδικασίες ολοκλήρωσης μεταξύ όλων των ρευμάτων της συνολικής διεργασίας, επομένως τα θερμοκρασιακά ενδιάμεσα διαμορφώνονται από (1) τα ρεύματα του υποβάθρου της διεργασίας, (2) των υποψήφιων στηλών του DMR, (3) τις θερμοκρασίες των βοηθητικών εναλλακτών και (4) τα υποψήφια επίπεδα βοηθητικών παροχών θέρμανσης και ψύξης.



Σχήμα 8.7: Επιλογή και συνεισφορά συμπυκνωτήρων/αναβραστήρων για την ολοκλήρωση MED με την υπόλοιπη διεργασία και καταρράκτης ολοκλήρωσης της συνολικής διεργασίας

Όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 8.7, οι βαθμοί ελευθερίας αφορούν τα κλάσματα διαίρεσης, $Y_{d,p}$, κάθε στήλης και τις βοηθητικές παροχές. Τα κλάσματα ρυθμίζουν την ενεργειακή συνεισφορά των ρευμάτων κάθε στήλης σε σχέση με τη μέγιστη ενεργειακή συνεισφορά της, η οποία αφορά λειτουργία για μέγιστη δυναμικότητα όταν η στήλη λαμβάνει όλη την αρχική τροφοδοσία. Η ειδική λανθάνουσα

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

θερμότητα προϊόντων, οι λόγοι αναρροής και η παροχή της αρχικής τροφοδοσίας χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των μέγιστων ενεργειακών αναγκών, $\overline{Q_{d,p}^{reb}}$, $\overline{Q_{d,p}^{cond}}$, κάθε υποψήφιας στήλης p που διαχειρίζεται την τροφοδοσία d . Η πραγματικά συνεισφερόμενη θερμότητα κάθε στήλης, $Q_{d,p}^{reb}$, $Q_{d,p}^{cond}$, στα ενδιάμεσα του καταρράκτη (Σχήμα 8.7) ρυθμίζεται μέσω των αποφάσεων του DMR, ως εξής:

$$Q_{d,p}^{reb/cond} = Y_{d,p} \cdot \overline{Q_{d,p}^{reb/cond}} \quad Eq. 8.2$$

Είναι προφανές ότι η επιλογή μίας στήλης του DMR συνεπάγεται αυτόματα την επιλογή και τη συνεισφορά του αντίστοιχου βοηθητικού εναλλάκτη που προετοιμάζει την τροφοδοσία της. Και οι δύο συνεισφορές είναι ισάξιες ως προς τις μέγιστες συνεισφορές τους, εφόσον αφορούν το ίδιο κλάσμα της αρχικής τροφοδοσίας. Έστω, $\overline{Q_{d,p}^{aux}}$ η μέγιστη ενεργειακή απαίτηση του βοηθητικού εναλλάκτη που υπολογίζεται βάσει της πίεσης της τροφοδοσίας d και της στήλης p και τη μέγιστη παροχή της αρχικής τροφοδοσίας. Η πραγματική ενεργειακή συνεισφορά ($Q_{d,p}^{aux}$) κάθε βοηθητικού εναλλάκτη στον καταρράκτη της συνολικής διεργασίας υπολογίζεται ως εξής:

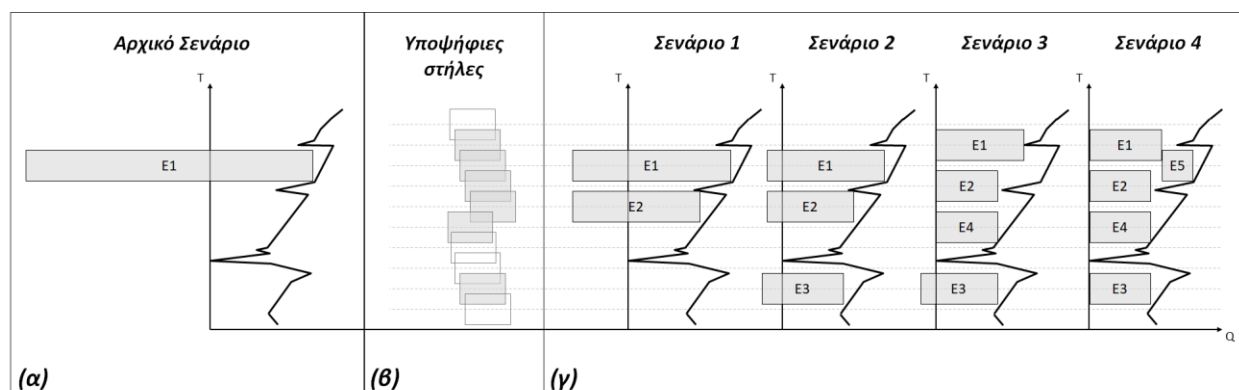
$$Q_{d,p}^{aux} = Y_{d,p} \cdot \overline{Q_{d,p}^{aux}} \quad Eq. 8.3$$

Οι εξισώσεις Eq.8.2 και Eq.8.3 συνδέουν τα ισοζύγια μάζας του DMR με τα ισοζύγια ενέργειας των μοντέλων μεταφόρτωσης που αποσυμφορούν και βελτιστοποιούν τις ροές του καταρράκτη της συνολικής διεργασίας (Σχήμα 8.7). Κλασικά μοντέλα μεταφόρτωσης (Paroulias and Grossmann, 1983; Floudas et al., 1986) χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των επιλογών ανταλλαγής θερμότητας (ισοζύγια ενέργειας) μεταξύ ρευμάτων και βοηθητικών παροχών σε κάθε θερμοκρασιακό ενδιάμεσο του καταρράκτη και τη βελτιστοποίηση του ενεργειακού κόστους. Οι περιορισμοί του μοντέλου βελτιστοποίησης περιλαμβάνουν τα ισοζύγια μάζας του DMR και τα ισοζύγια ενέργειας του μοντέλου μεταφόρτωσης, ενώ η αντικειμενική συνάρτηση υπολογίζει το κόστος ενέργειας (της συνολικής διεργασίας) και επένδυσης (των αποστάξεων του MED). Το ακόλουθο παράδειγμα παρουσιάζει την εφαρμογή του DMR για τη λήψη αποφάσεων κατά το σχεδιασμό συστημάτων MED συναρτήσεως του GCC του υποβάθρου και τη βελτίωση της εξοικονόμησης ενέργειας με τη χρήση ακριβότερων συστημάτων απόσταξης.

Το αρχικό σενάριο του Σχήματος 8.8α αναδεικνύει το ενεργειακό μέγεθος του προβλήματος απόσταξης, ενώ στο Σχήμα 8.8β παρουσιάζονται τα υποψήφια επίπεδα πίεσης-στηλών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την βελτίωση των ενεργειακών αναγκών του αρχικού σεναρίου. Στο Σενάριο 1 (Σχήμα 8.8γ) παρουσιάζεται η χρήση απόσταξης 2-επιπέδων περιορίζοντας το ενεργειακό κόστος

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

απόσταξης περίπου κατά το ήμισυ, ωστόσο αφήνοντας ένα μεγάλο μέρος των αναγκών απόσταξης ανολοκλήρωτο με την υπόλοιπη διεργασία. Στο Σενάριο 2 επιλέγεται μία ακόμα στήλη του DMR (η E3) που θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει θερμότητα πηγών κάτω από το pinch. Στο Σενάριο 3 επανασχεδιάζονται οι πιέσεις των στηλών E1 και E2 (χρησιμοποιώντας υψηλότερες πιέσεις του DMR) παρέχοντας διαθέσιμο χώρο για την ενσωμάτωση της E4 πάνω από το pinch. Για την πλήρη ολοκλήρωση των ενεργειακών αναγκών απόσταξης που εξέχουν του GCC στο Σενάριο 3, επιλέγεται (στο Σενάριο 4) η μείωση του μεγέθους της E1 προσφέροντας χώρο στην E5 να ενσωματωθεί εντός της υψηλότερης τσέπης του GCC. Το σύστημα 5-επιπέδων ενσωματώνει πλήρως το ενεργοβόρο αρχικό σενάριο απόσταξης εντός του GCC επιτυγχάνοντας 100% εξοικονόμηση του θερμοδυναμικού κόστους απόσταξης, ωστόσο με πολύ υψηλό κόστος επένδυσης για την ενσωμάτωση 4 επιπλέον στηλών από το αρχικό σενάριο.



Σχήμα 8.8: (α) αρχικό σενάριο απόσταξης, (β) υποψήφια επίπεδα πίεσης αποστακτικών στηλών MED, (γ) σενάρια σύνθεσης MED και ολοκλήρωση με το υπόβαθρο της διεργασίας

Ο χρόνος απόσβεσης του κόστους επένδυσης των MED συναρτήσκει της εξοικονόμησης ενεργειακού κόστους απόσταξης παίζει βασικό ρόλο στη λήψη αποφάσεων για το σχεδιασμό των MED. Η εύρεση της πραγματικά βέλτιστης λύσης δεν είναι προφανής, καθότι οι ειδικές σταθμίσεις κάθε όρου κόστους εξαρτώνται από τις οικονομικές συνθήκες κάθε περίπτωσης και το πρόβλημα έχει να αντιμετωπίσει συμβιβασμούς μεταξύ του διαθέσιμου κεφαλαίου και του ελάχιστου ενεργειακού κόστους που αφορά τη χρήση πολλών (τυπικά άπειρων) επιπέδων απόσταξης.

Η χρήση συγκεκριμένων συντελεστών απόσβεσης δεν μπορεί απαραίτητα να εγγυηθεί την ορθή κατανομή της προσπάθειας σχεδιασμού και δεν ενδείκνυται στην προσπάθεια γενίκευσης της στρατηγικής σύνθεσης, δεδομένης της μεροληψίας στην επιλογή τιμών ετησιοποίησης του κόστους

κεφαλαίου κάθε φορά. Για αυτό το σκοπό, η μεθοδολογία χρησιμοποιεί μία διαδικασία μετατροπής των όρων κόστους ενέργειας και κεφαλαίου σε όρους οικονομικών στόχων σε σχέση με τις καλύτερες και χειρότερες επιδόσεις που παρουσιάζουν και η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης υπολογίζει την συνολική απόδοση των όρων-στόχων κόστους (Total Cost Performance). Εναλλακτικά, το πρόβλημα μπορεί να χρησιμοποιήσει κλασσικές τεχνικές ετησιοποίησης του συνολικού κόστους (Total Annualized Cost) στην αντικειμενική συνάρτηση. Ακολούθως, περιγράφεται η διαδικασία προετοιμασίας του μοντέλου βελτιστοποίησης και των διαδικασιών κοστολόγησης των λύσεων.

8.3.3. Προετοιμασία του μοντέλου βελτιστοποίησης

Η αξιολόγηση των λύσεων με μοναδικό κριτήριο την ενεργειακή κατανάλωση θα οδηγούσε σε μη πρακτικές λύσεις, όπως αυτή του Σεναρίου 4 του Σχήματος 8.8. Αντίθετα, η αποκλειστική μέριμνα για ελάχιστο κόστος επένδυσης θα οδηγούσε σε μη βιώσιμες ενεργειακά λύσεις, όπως το αρχικό σενάριο του Σχήματος 8.8. Κατά συνέπεια, μία γενικότερη προσέγγιση που εξετάζει τη συνολική απόδοση κόστους (Total Cost Performance, ή TCP) θα έπαιρνε τη μορφή:

$$TCP = w_1 \cdot Cost^{OPEX} + w_2 \cdot Cost^{CAPEX} \quad Eq. 8.4$$

όπου τα w_1 και w_2 αφορούν τις ειδικές σταθμίσεις κάθε όρου κόστους και τα $Cost^{OPEX}$ και $Cost^{CAPEX}$ αποτελούν αντίστοιχα το κόστος ενέργειας της συνολικής διεργασίας και το κόστος κεφαλαίου των επιλεγμένων στηλών και υπολογίζονται, ως εξής:

$$Cost^{OPEX} = \sum_{m \in S} c_m \cdot Q_m^S + \sum_{n \in W} c_n \cdot Q_n^W \quad Eq. 8.5$$

$$Cost^{CAPEX} = Cost^{COL} + Cost^{COND} + Cost^{REB} \quad Eq. 8.6$$

όπου Q_m^S και Q_n^W τα φορτία βοηθητικών παροχών θέρμανσης και ψύξης, c_m και c_n τα αντίστοιχα μοναδιαία κόστη των παροχών και $Cost^{COL}$, $Cost^{COND}$ και $Cost^{REB}$ τα επιμέρους κόστη επένδυσης της κολώνας απόσταξης και των εναλλακτών κορυφής (CONDenser) και πυθμένα (REBoiler).

Το ενεργειακό κόστος ($Cost^{OPEX}$) υπολογίζεται ύστερα από την αποσυμφόρηση του καταρράκτη της συνολικής διεργασίας (βλ. Σχήμα 8.7) με την εφαρμογή μοντέλων μεταφόρτωσης. Για τον υπολογισμό κάθε επιμέρους κόστους κεφαλαίου (στήλης και εναλλακτών) μπορούν να χρησιμοποιηθούν

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

οποιαδήποτε μοντέλα κοστολόγησης της βιβλιογραφίας. Στην παρούσα ανάλυση γίνεται χρήση των συντομευμένων μοντέλων των Douglas (1988) και Mullet et al. (1981). Τα μοντέλα κοστολόγησης εφαρμόζονται στα στάδια προετοιμασίας του προβλήματος για την παραγωγή δεδομένων, τα οποία παλινδρομούνται με σκοπό την ανάπτυξη γραμμικών συσχετίσεων του κόστους κεφαλαίου συναρτήσει της δυναμικότητας (παροχή τροφοδοσίας) κάθε υποψήφιας στήλης. Για τη χρήση των μοντέλων κοστολόγησης αξιοποιούνται βασικές πληροφορίες που αφορούν τα στοιχεία του DMR:

- Σημεία τροφοδοσίας: σύσταση και παροχή (F_d^{FEED}) μίγματος τροφοδοσίας d (δεδομένα του προβλήματος),
- Κόμβοι-γεγονότα: πίεση λειτουργίας και σύσταση προϊόντων κάθε στήλης p (δεδομένα του προβλήματος),
- Συνδέσεις: ροές $F_{d,p}$ της τροφοδοσίας d που κατευθύνονται σε κάθε στήλη p (μεταβλητές του προβλήματος).

Η διαδικασία κοστολόγησης περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

1. Υπολογισμός των ελάχιστων λόγων αναρροής (RR_{min}) και αριθμού βαθμίδων (N_{min}) με χρήση συντομευμένων μοντέλων (Fenske-Underwood), καθώς και των πραγματικών λόγων αναρροής (RR_{act}) και αριθμού βαθμίδων (N_{act}) με χρήση συντελεστών διόρθωσης (π.χ. $CF = 1.1$) και των αποδόσεων των στηλών (π.χ. $E_0 = 0.6$) για κάθε υποψήφια στήλη του DMR, ως εξής:

$$RR_{act} = CF \cdot RR_{min}$$

$$N_{act} = \frac{N_{min}}{E_0}$$

2. Υπολογισμός θερμοκρασιών αναβραστήρα και συμπυκνωτήρα (κανόνες ιδανικής ή μη-ιδανικής ανάμιξης). Οι θερμοκρασίες συμβάλουν και στη διαμόρφωση των ενδιαμέσων του καταρράκτη.
3. Υπολογισμός ύψους (H) και διαμέτρου (D) στήλης, ως εξής (Douglas, 1988):

$$H = 2.3 \cdot N_{act}$$

$$D = \sqrt{\frac{8.2 \cdot 10^{-4} (RR_{act} + 1) \cdot F^{TOP} \cdot \sqrt{\frac{M_G}{\rho_m}}}{\pi}}$$

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

όπου F^{TOP} η παροχή της κορυφής υπολογιζόμενη συναρτήσει της παροχής τροφοδοσίας $F_{d,p}$ και των συστάσεων τροφοδοσίας και προϊόντων, M_G το μέσο μοριακό βάρος των ατμών και ρ_m η μοριακή πυκνότητα.

4. Υπολογισμός του κόστους στήλης σύμφωνα με το μοντέλο των Mullet et al. (1981):

$$\begin{aligned}
 - \text{Cost}^{COL} &= (C1 + C2 + C3) \cdot 2.24 \cdot 10^{-6} \\
 - C1 &= 2190 \cdot w^{0.1808} \cdot e^{0.02468 \cdot (\ln w)^2} \\
 - C2 &= \left(\frac{996 \cdot N}{1.0414 \cdot N} \right) \cdot (1.401 + 0.072 \cdot D) \cdot e^{0.174 \cdot D} \\
 - C3 &= 151.8 \cdot D^{0.63316} \cdot H^{0.80161} \\
 - w &= 54.265 \cdot D \cdot (H + 0.8116 \cdot D) \cdot T \\
 - T &= \begin{cases} \frac{T_w + T_g + T_p}{2}, & \text{if } T_w + T_g > T_p \\ T_p, & \text{if } T_w + T_g \leq T_p \end{cases} \\
 - T_w &= 0.0023 \cdot \frac{(D \cdot 12 + 19) \cdot H^2}{(D \cdot 12 + 1)^2} \\
 - T_g &= \frac{PR \cdot D}{3881 + 0.067 \cdot P} \\
 - T_p &= \begin{cases} \frac{(PR - 1) \cdot D}{132 - 0.0068 \cdot P}, & \text{if } PR \geq 1 \text{ atm} \\ T_e, & \text{if } PR < 1 \text{ atm} \end{cases}
 \end{aligned}$$

όπου PR η πίεση [atm] λειτουργίας της στήλης.

5. Υπολογισμός ενεργειακών απαιτήσεων αναβραστήρα και συμπυκνωτήρα ως εξής:

$$Q^{COND/REB} = \overline{\Delta H}_{VAP}^{COND/REB} \cdot F^{TOP/BOT}$$

όπου $\overline{\Delta H}_{VAP}^{COND/REB}$ η ειδική ενθαλπία εξάτμισης του μίγματος αναβραστήρα/συμπυκνωτήρα, $F^{TOP/BOT}$ οι ρυθμοί ροής μάζας κάθε εναλλάκτη, που προκύπτουν συναρτήσει της παροχής τροφοδοσίας $F_{d,p}$ και των συστάσεων τροφοδοσίας και προϊόντων.

6. Υπολογισμός κόστους αναβραστήρα/συμπυκνωτήρα σύμφωνα με τις εξισώσεις του Douglas (1988)

$$\text{Cost}^{COND/REB} = \frac{M\&S}{280} \cdot 101.3 \cdot (A^{COND/REB}) \cdot (2.29 + F_c)$$

όπου $M\&S$: Marshall and Swift Cost Index, F_c : συντελεστής διόρθωσης που σχετίζεται με τον τύπο, την πίεση και το υλικό του εναλλάκτη, $A^{COND/REB}$: η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας υπολογιζόμενη ως:

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

$$A^{COND/REB} = \frac{Q^{COND/REB}}{U^{COND/REB} \cdot \Delta T_{lm}^{COND/REB}}, \text{ όπου } U^{COND/REB} \text{ και } \Delta T_{lm}^{COND/REB} \text{ αποτελούν το συνολικό}$$

συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και τη μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά του εναλλάκτη.

Σύμφωνα με τα παραπάνω βήματα 1-6, το κόστος κεφαλαίου των στηλών εξαρτάται από (i) τις πιέσεις κάθε επιπέδου p , (ii) τις συγκεντρώσεις τροφοδοσίας και προϊόντων και (iii) τη ροή τροφοδοσίας $F_{d,p}$ κάθε στήλης. Τα (i) και (ii) καθορίζουν τις παραμέτρους ενός μη-γραμμικού μοντέλου κοστολόγησης του $Cost^{CAPEX}$ συναρτήσει της ροής τροφοδοσίας $F_{d,p}$. Τα παραπάνω βήματα 1-6 επαναλαμβάνονται για διάφορες τιμές τροφοδοσίας $F_{d,p}$ στο εύρος $[0, F_d^{FEED}]$ παράγοντας πολλαπλά αποτελέσματα $Cost^{CAPEX}$, τα οποία επεξεργάζονται με ανάλυση παλινδρόμησης για την ανάπτυξη γραμμικών συσχετισμών του $Cost^{CAPEX}$ με τη ροή τροφοδοσίας $F_{d,p}$. Το γραμμικό μοντέλο κόστους κεφαλαίου ενσωματώνεται στο μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης, ως εξής:

$$Cost_{d,p}^{CAPEX} = Cost_{d,p}^{COL} + Cost_{d,p}^{COND} + Cost_{d,p}^{REB} = K_{d,p}^1 \cdot F_{d,p} + K_{d,p}^2 \quad Eq. 8.7$$

όπου $K_{d,p}^1$ και $K_{d,p}^2$ αποτελούν τις παραμέτρους της παλινδρόμησης. Ύστερα από αντικατάσταση της ροής τροφοδοσίας με το κλάσμα διαίρεσης $(Y_{d,p} = \frac{F_{d,p}}{F_d^{FEED}})$, η εξίσωση Eq.8.7 παίρνει τη μορφή:

$$Cost_{d,p}^{CAPEX} = K_{d,p}^3 \cdot Y_{d,p} + K_{d,p}^2 \quad Eq. 8.8$$

$$\text{όπου } K_{d,p}^3 = K_{d,p}^1 \cdot F_d^{FEED}.$$

Το συνολικό κόστος κεφαλαίου των MED αποτελείται από τα κόστη όλων των επιλεγμένων στηλών p που επεξεργάζονται κάθε διαφορετικό μίγμα τροφοδοσίας d της διεργασίας, ως εξής:

$$Cost^{CAPEX} = \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} Cost_{d,p}^{CAPEX} = \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} K_{d,p}^3 \cdot Y_{d,p} + K_{d,p}^2 \quad Eq. 8.9$$

Η σημειογραφία του μοντέλου κοστολόγησης (Eq.8.9) βασίζεται στις επιλογές που προσφέρει το DMR, δηλαδή για κάθε επίπεδο πίεσης p και κάθε τροφοδοσία d . Ωστόσο, το πρόβλημα ολοκλήρωσης διατυπώνεται με τη χρήση μοντέλων μεταφόρτωσης, των οποίων η σημειογραφία αφορά όλα τα θερμά και ψυχρά ρεύματα που συμβάλουν στη συνολική διεργασία, δηλαδή αναβραστήρες, συμπυκνωτήρες, βοηθητικοί εναλλάκτες και ρεύματα διεργασίας. Έτσι, η Eq.8.9 επαναδιατυπώνεται αντιστοιχίζοντας τα σύνολα που χρησιμοποιεί το DMR (p και d) με τα σύνολα της διαδικασίας ολοκλήρωσης, συγχρονίζοντας τα δύο προβλήματα σχεδιασμού των MED και ολοκλήρωσης της συνολικής διεργασίας.

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

Ακολουθως, εισάγονται τα υπερσύνολα $i \in H$ και $j \in C$ που αντίστοιχα περιλαμβάνουν όλα τα θερμά και ψυχρά ρεύματα του προβλήματος, δηλαδή (α) του υποβάθρου, (β) των υποψήφιων στηλών και (γ) των βοηθητικών εναλλακτών που μεταβάλλουν τη θερμική κατάσταση της αρχικής τροφοδοσίας στην πίεση λειτουργίας κάθε στήλης. Ακολουθως, εισάγονται τα υποσύνολα $H_d^{EF} \subset H$ και $C_d^{EF} \subset C$ που αφορούν τα θερμά και ψυχρά ρεύματα των υποψήφιων στηλών του DMR που κλασμάτουν κάθε τροφοδοσία- d . Κάθε στοιχείο του υποσυνόλου H_d^{EF} , που αφορά τον συμπυκνωτήρα μίας στήλης, αντιστοιχίζεται με το στοιχείο του υποσυνόλου C_d^{EF} , που αφορά τον αναβραστήρα της ίδιας στήλης, σχηματίζοντας ζευγάρια ρευμάτων $i-j$ ($i \in H_d^{EF}$ και $j \in C_d^{EF}$).

Η μεταβλητή $Y_{d,p}$ εκφράζει το ποσοστό της συνολικής τροφοδοσίας- d που μοιράζεται στην στήλη πίεσης- p και ρυθμίζει τη ενεργειακή συνεισφορά της στήλης ως προς τη μέγιστη κατανάλωσή της (Eq.8.2). Ως εκ τούτου, κατ' αντιστοιχία των κλασμάτων διαίρεσης της τροφοδοσίας $Y_{d,p}$, ορίζονται τα κλάσματα διαίρεσης της μέγιστης ενεργειακής κατανάλωσης, δηλαδή τα ενεργειακά μερίδια, του συμπυκνωτήρα (Y_i^H) και του αναβραστήρα (Y_j^C) της ίδιας στήλης- p , για τα οποία ισχύει: $Y_{d,p} = Y_i^H = Y_j^C$, $\forall i \in H_d^{EF}$ και $j \in C_d^{EF}$. Δηλαδή τα στοιχεία των υποσυνόλων συμπυκνωτήρων H_d^{EF} και αναβραστήρων C_d^{EF} αντικατοπτρίζουν τα επίπεδα πίεσης των DMR για κάθε τροφοδοσία d . Κατά την ίδια αντιστοιχία, για τους συντελεστές της Eq.8.9 ισχύει: $K_{d,p}^3 = a_i$ και $K_{d,p}^2 = b_j$, $\forall i \in H_d^{EF}$ και $j \in C_d^{EF}$. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η Eq.8.9, η οποία αθροίζει τα κόστη όλων των στηλών- p , επαναδιατυπώνεται βάσει των αντίστοιχων συνόλων H_d^{EF} και C_d^{EF} – τα οποία έχουν τόσα στοιχεία όσα και ο αριθμών των στηλών p κάθε DMR της τροφοδοσίας d – ως εξής:

$$Cost^{CAPEX} = \sum_{d \in D} \sum_{i \in H_d^{EF}} a_i \cdot Y_i^H + b_i \quad Eq. 8.10$$

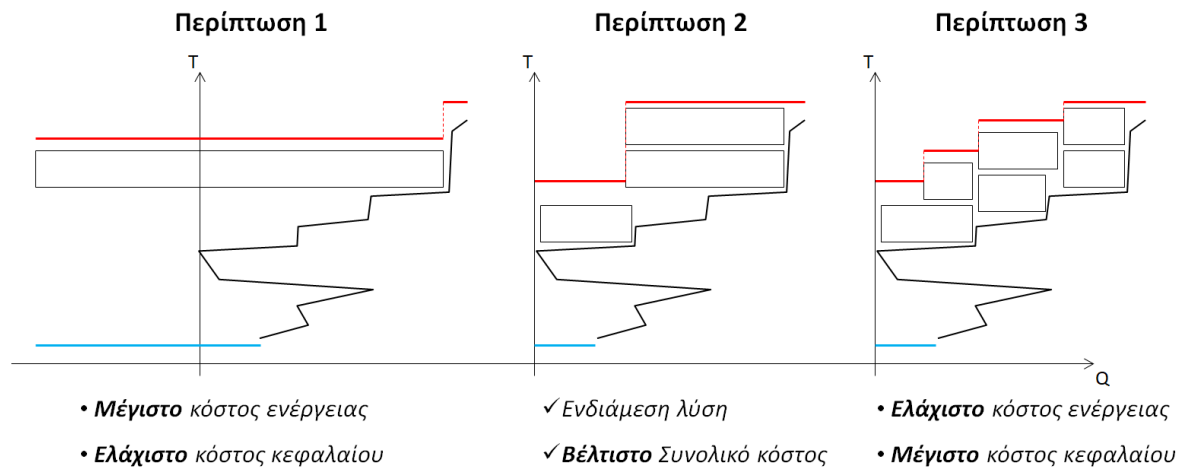
ή εναλλακτικά – εφόσον έχουν οριστεί ζεύγη $i-j$, τα οποία αφορούν τους εναλλάκτες κορυφής και πυθμένα της ίδιας στήλης- p – ως εξής:

$$Cost^{CAPEX} = \sum_{d \in D} \sum_{j \in C_d^{EF}} a_j \cdot Y_j^C + b_j \quad Eq. 8.11$$

Οι γραμμικοί συσχετισμοί υπολογισμού του κόστους ενέργειας, Eq.8.5, και επένδυσης, Eq.8.11, ενσωματώνονται στην αρχική εξίσωση (Eq.8.4) για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους κάθε πιθανής λύσης. Οι τιμές των w_1 και w_2 της Eq.8.4 μπορούν να αποφασισθούν αυθαίρετα ή μέσω μίας διαδικασίας ετησιοποίησης του κόστους κεφαλαίου, ως εξής: $w_1 = 1$ και $w_2 = \frac{1}{\text{χρόνος απόσβεσης}}$.

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

Ωστόσο, εξετάζεται μία διαφορετική προσέγγιση στάθμισης, η οποία βασίζεται στις καλύτερες και χειρότερες επιδόσεις κάθε όρου κόστους. Οι επιδόσεις αυτές εντοπίζονται ερευνώντας τις λύσεις MED που προκύπτουν βελτιστοποιώντας για κάθε όρο κόστους ξεχωριστά, δηλαδή όταν το w_1 ή το w_2 είναι μηδέν. Οι αντισταθμίσεις μεταξύ κόστους ενέργειας και κεφαλαίου εντοπίζονται στο Σχήμα 8.9 (Pyrgakis and Kokossis, 2019).



Σχήμα 8.9: Περιπτώσεις βελτιστοποίησης συστημάτων MED

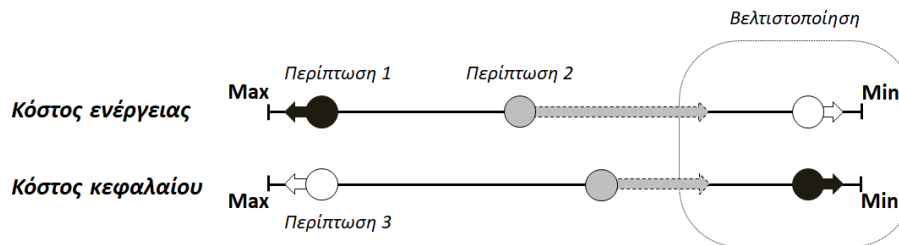
Η Περίπτωση 1 του Σχήματος 8.9 αντιστοιχεί στην λύση με το μικρότερο κόστος κεφαλαίου ($Cost^{CAPEX} = Cost_{min}^{CAPEX}$), όταν το κόστος ενέργειας δεν επηρεάζει τα κριτήρια επιλογής ($w_1 = 0$ και $w_2 \neq 0$). Η λύση περιλαμβάνει μία μόνο στήλη, η οποία αναμένεται να λειτουργεί σε ατμοσφαιρικές συνθήκες. Παράλληλα, η λύση της Περίπτωσης 1 θεωρείται ως αυτή με τη χειρότερη επίδοση ενεργειακής ολοκλήρωσης MED-υποβάθρου, εφόσον δεν λαμβάνεται υπόψη η χρήση σχημάτων ολοκλήρωσης της απόσταξης, και υποδεικνύει το υψηλότερο κόστος ενέργειας ($Cost^{OPEX} = Cost_{max}^{OPEX}$). Αντίθετα, στην Περίπτωση 3, όταν το πρόβλημα επηρεάζεται μόνο από το κόστος ενέργειας ($w_1 \neq 0$ και $w_2 = 0$), εντοπίζεται το ελάχιστο εφικτό ($Cost^{OPEX} = Cost_{min}^{OPEX}$) με χρήση πολλαπλών επιπέδων απόσταξης, τα οποία υποδεικνύουν το υψηλότερο κόστους κεφαλαίου ($Cost^{CAPEX} = Cost_{max}^{CAPEX}$). Σε κάθε άλλη περίπτωση ($w_1 \neq 0$ και $w_2 \neq 0$), τα βάρη σταθμίζουν περισσότερο/λιγότερο άλλοτε τον έναν ή τον άλλον όρο κόστους οδηγώντας σε ενδιάμεσες λύσεις (Περίπτωση 2 του Σχήματος 8.9) μεταξύ των δύο ακραίων λύσεων των Περιπτώσεων 1 και 3.

Οι ελάχιστες τιμές κόστους επένδυσης ($Cost_{min}^{CAPEX}$) της Περίπτωσης 1 και κόστους ενέργειας ($Cost_{min}^{OPEX}$) της Περίπτωσης 2 αποτελούν αποτελέσματα βελτιστοποίησης κάθε όρου ξεχωριστά, και

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

δεν τίθενται υπο αμφισβήτηση. Ωστόσο, οι μέγιστες τιμές κόστους που εντοπίζονται σε κάθε περίπτωση – $Cost_{max}^{OPEX}$ στην Περίπτωση 1 και $Cost_{max}^{CAPEX}$ στην Περίπτωση 2 – μπορούν θεωρητικά να προσεγγίζουν το άπειρο, ύστερα από αλόγιστη χρήση βοηθητικών παροχών και στηλών. Βέβαια, η χρήση τέτοιων τιμών (άπειρο) δεν θα είχε πρακτικό νόημα κατά την στάθμιση κάθε όρου κόστους συναρτήσει των ελάχιστων-μέγιστων επιδόσεων που μπορούν να επιτύχουν.

Η Περίπτωση 1/Περίπτωση 3 του Σχήματος 8.9 αντιστοιχεί στην μικρότερη/μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας απαιτώντας αντίστοιχα το μικρότερο/μεγαλύτερο κόστος κεφαλαίου για τις στήλες του MED, ενώ η Περίπτωση 2 εξισορροπεί τους δύο όρους κόστους. Αυτή η ισορροπία απεικονίζεται στο Σχήμα 8.10, όπου οι μαύρες και λευκές κουκίδες αφορούν αντίστοιχα τις Περιπτώσεις 1 και 3 του Σχήματος 8.9, ενώ οι γκρι αφορούν κάθε ενδιάμεση Περίπτωση 2.



Σχήμα 8.10: Οριακές τιμές κόστους ενέργειας και επένδυσης και στόχοι βελτιστοποίησης

Ο **επιθυμητός στόχος** είναι η τελική λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης να προσεγγίσει κατά το δυνατόν τις ελάχιστες τιμές κάθε όρου κόστους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.10. Ως εκ τούτου, τα βάρη προσδιορίζονται με τη χρήση των οριακών τιμών (min/max) κάθε όρου κόστους του Σχήματος 8.10 μετατρέποντας τα πραγματικά κόστη σε όρους στόχων οικονομικής απόδοσης, οι οποίοι αντικατοπτρίζουν το συνολικό ποσοστό επιτυχίας του επιθυμητού στόχου (Pyrgakis and Kokossis, 2019). Ακολουθώντας, η εξίσωση Eq.8.4 διαμορφώνεται εξής:

$$TCP = \frac{1}{Cost_{max}^{OPEX} - Cost_{min}^{OPEX}} \cdot Cost^{OPEX} + \frac{1}{Cost_{max}^{CAPEX} - Cost_{min}^{CAPEX}} \cdot Cost^{CAPEX} \quad Eq. 8.12$$

όπου η συνολική απόδοση κόστους, TCP , είναι αδιάστατος αριθμός, και οι παράμετροι $w_1 = (Cost_{max}^{OPEX} - Cost_{min}^{OPEX})^{-1}$ και $w_2 = (Cost_{max}^{CAPEX} - Cost_{min}^{CAPEX})^{-1}$ προετοιμάζονται με ξεχωριστή βελτιστοποίηση του συνολικού προβλήματος σύνθεσης και ολοκλήρωσης σύμφωνα με τις υποθέσεις των Περιπτώσεων 1 και 3 του Σχήματος 8.9.

8.3.4. Μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης

Το μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης συνδυάζει τα ισοζύγια μάζας του DMR, τα ισοζύγια ενέργειας του μοντέλου μεταφόρτωσης (βλ. Κεφ. 2) και λογικούς περιορισμούς για την επιλογή των επιπέδων πίεσης του DMR και των επιπέδων θέρμανσης και ψύξης της συνολικής διεργασίας.

Το μοντέλο (Pyrgakis and Kokossis, 2019) περιγράφει την επιλογή στηλών μέσω της επιλογής ροών του DMR. Σε αντίθεση με την Eq.8.1, όπου χρησιμοποιούνται τα κλάσματα διαίρεσης της τροφοδοσίας ($Y_{d,p}$), τα ισοζύγια μάζας του μοντέλου βελτιστοποίησης διατυπώνονται με ισοδύναμο τρόπο μέσω των ενεργειακών μεριδίων (Y_i^H και Y_j^C) των μέγιστων ενεργειακών αναγκών συμπτυκνωτήρων και αναβραστήρων κάθε υποψήφιας στήλης του DMR. Τα ενεργειακά μερίδια, Y_i^H και Y_j^C , είναι ισότιμα με τα κλάσματα διαίρεσης, $Y_{d,p}$, κάθε στήλης, θεωρώντας γραμμική συσχέτιση μεταξύ της ενεργειακής κατανάλωσης με την παροχή τροφοδοσίας, για δεδομένες ποιότητες τροφοδοσίας και προϊόντων απόσταξης. Για κάθε ζεύγος $i-j$ ($i \in H_d^{EF}$ και $j \in C_d^{EF}$) που αφορούν την ίδια στήλη απόσταξης ισχύει ότι:

- 1) $Y_i^H = Y_j^C = 1$, όταν η στήλη λαμβάνει όλη την τροφοδοσία F_d^{FEED} ,
- 2) $Y_i^H = Y_j^C = 0$, όταν η στήλη δεν επιλέγεται,
- 3) $0 < Y_i^H = Y_j^C < 1$, όταν η στήλη λαμβάνει μέρος της αρχικής τροφοδοσίας F_d^{FEED} .

Ακολούθως, εισάγεται το σύνολο $HC = \{(i, j) | i \in H_d^{EF} \text{ και } j \in C_d^{EF}\}$, το οποίο περιλαμβάνει ζεύγη των στοιχείων των δύο υποσύνολων θερμών (H_d^{EF}) και ψυχρών (C_d^{EF}) ρευμάτων των υποψήφιας στηλών, τα οποία αφορούν ρεύματα (τον συμπτυκνωτήρα και τον αναβραστήρα) της ίδιας στήλης. Είναι προφανές ότι, για τα ενεργειακά μερίδια που αφορούν τον αναβραστήρα και τον συμπτυκνωτήρα της ίδιας στήλης ισχύει:

$$Y_i^H = Y_j^C, \quad \forall (i, j) \in HC \tag{Eq. 8.13}$$

Ακολούθως, τα ισοζύγια μάζας διατυπώνονται γύρω από κάθε μίγμα τροφοδοσίας- d αποτυπώνοντας τις τρεις επιλογές σύνθεσης του DMR στη συμπαγή μορφή:

$$\sum_{i \in H_d^{EF}} Y_i^H = 1, \quad \forall d \in D \tag{Eq. 8.14}$$

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

Λογικοί περιορισμοί χρησιμοποιούνται για την επιλογή και ενεργοποίηση υποψήφιων στηλών του DMR ως εξής:

$$Y_i^H \geq y_i \cdot Y^{LB}, \quad \forall d \in D, i \in H_d^{EF} \quad Eq. 8.15$$

$$Y_i^H \leq y_i, \quad \forall d \in D, i \in H_d^{EF} \quad Eq. 8.16$$

όπου οι y_i αποτελούν δυαδικές μεταβλητές απόφασης για την επιλογή θερμών ρευμάτων. Η παράμετρος Y^{LB} αφορά την ελάχιστη επιτρεπόμενη δυναμικότητα μίας στήλης και χρησιμοποιείται για πρακτικούς λόγους βιομηχανικής εφαρμογής (αποφυγή πολύ μικρών δυναμικοτήτων) και εκφράζεται με τους ίδιους όρους που εκφράζονται τα ενεργειακά μερίδια, Y_i^H και Y_j^C , υπονοώντας το ελάχιστο εφικτό μερίδιο της τροφοδοσίας που είναι εφικτό να μοιραστεί σε κάθε στήλη (π.χ. 10% της μέγιστης τροφοδοσίας).

Οι εξισώσεις Eq.8.14-Eq.8.16 εκφράζουν την επιλογή στηλών μέσω των ενεργειακών μεριδίων των συμπυκνωτήρων (i). Εφόσον ισχύει η εξίσωση Eq.8.13, οι εξισώσεις Eq.8.14-Eq.8.16 μπορούν εναλλακτικά να εκφραστούν μέσω των ενεργειακών μεριδίων των αναβραστήρων Y_j^C , αντί των Y_i^H , και αντίστοιχα οι Eq.8.15 και Eq.8.16 να χρησιμοποιούν δυαδικές μεταβλητές για την ενεργοποίηση των αναβραστήρων y_j , έναντι των συμπυκνωτήρων y_i .

Για κάθε ενεργοποιημένη στήλη απόσταξης αναλαμβάνεται η χρήση ενός βοηθητικού εναλλάκτη για την μεταβολή της θερμικής κατάστασης της τροφοδοσίας της. Ακολούθως, ορίζονται τα υποσύνολα $H_d^{HE} \subset H$ και $C_d^{HE} \subset C$, τα οποία περιλαμβάνουν τα θερμά/ψυχρά ρεύματα των βοηθητικών εναλλακτών κάθε στήλης. Τέλος, τα υποσύνολα $H^{PR} \subset H$ και $C^{PR} \subset C$ περιλαμβάνουν τα θερμά και ψυχρά ρεύματα της διεργασίας, έτσι ώστε: $H^{EF} \cup H^{HE} \cup H^{PR} \triangleq H$ και $C^{EF} \cup C^{HE} \cup C^{PR} \triangleq C$, τα οποία (H και C) περιλαμβάνουν όλα τα θερμά/ψυχρά ρεύματα του προβλήματος, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Ένα παράδειγμα προετοιμασίας των στοιχείων των υποσυνόλων του προβλήματος (H_d^{EF} , H_d^{HE} , H^{PR} , C_d^{EF} , C_d^{HE} και C^{PR}) περιγράφεται σε επόμενη ενότητα 8.4.1.

Σύμφωνα με την συζήτηση της ενότητας 8.3.2, η ενεργειακή συνεισφορά (ως προς τη μέγιστη) των στηλών και των βοηθητικών εναλλακτών που προετοιμάζουν την τροφοδοσία τους είναι ισάξια, επομένως, τα ενεργειακά μερίδια των στηλών και των βοηθητικών εναλλακτών τους θα είναι ίδια:

$$Y_i^H = Y_{i'}^H, \quad \forall d \in D, i \in H_d^{EF}, i' \in H_i^{HE} \text{ και } Y_j^C = Y_{j'}^C, \quad \forall d \in D, j \in C_d^{EF}, j' \in C_j^{HE} \quad Eq. 8.17$$

Επίσης, τίθενται όρια για τα ενεργειακά μερίδια των υποψήφιων στηλών:

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

$$0 \leq Y_i^H \leq 1, \quad \forall d \in D, i \in H_d^{EF} \text{ και } 0 \leq Y_j^C \leq 1, \quad \forall d \in D, j \in C_d^{EF} \quad \text{Eq. 8.18}$$

καθώς επίσης και για τη δεδομένη ενεργειακή συνεισφορά των ενεργειακών μεριδίων που αφορούν τα θερμά/ψυχρά ρεύματα του υποβάθρου της διεργασίας:

$$Y_i^H = 1, \quad \forall i \in H^{PR} \text{ και } Y_j^C = 1, \quad \forall j \in C^{PR} \quad \text{Eq. 8.19}$$

Για την ανάπτυξη των ισοζυγίων ενέργειας με τη χρήση μοντέλων μεταφόρτωσης χρησιμοποιείται η ακόλουθη ονοματολογία (Biegler et al., 1997):

Σύνολα:

- K = $\{k \mid k=1, NK: \text{θερμοκρασιακά ενδιάμεσα από υψηλότερες προς χαμηλότερες θερμοκρασίες}\}.$
- H_k και C_k = $\{i \in HS \text{ and } j \in CS \mid \text{θερμό ρεύμα } i \text{ και ψυχρό ρεύμα } j, \text{ το οποίο είναι παρόν στο ενδιάμεσο } k\}.$
- S = $\{m \mid m=1, NS: \text{θερμή βοηθητική παροχή } m\}.$
- W = $\{n \mid n=1, NW: \text{ψυχρή βοηθητική παροχή } n\}.$
- S_k και W_k = $\{m \in S \text{ and } n \in W \mid \text{θερμή παροχή } m \text{ και ψυχρή παροχή } n \text{ που τροφοδοτεί και εξάγει, αντίστοιχα, θερμότητα στο/από το ενδιάμεσο } k\}.$

Μη-μηδενικές μεταβλητές:

- Q_m^S και Q_n^W = ενεργειακό φορτίο θερμής παροχής m και ψυχρής παροχής n .
- R_k = ενεργειακό υπόλοιπο που εξέρχεται από το ενδιάμεσο k .

Διαδικές μεταβλητές

- y_m και y_n = μεταβλητές απόφασης για την επιλογή της θερμής παροχής m και ψυχρής παροχής n .

Παράμετροι:

- Q_{ik}^H και Q_{jk}^C = μέγιστα ενεργειακά περιεχόμενα (ή δεδομένα περιεχόμενα για τα ρεύματα του υποβάθρου) θερμών (i) και ψυχρών (j) ρευμάτων στο ενδιάμεσο k .
- UB_m^S και UB_n^W = άνω όρια θερμής παροχής m και ψυχρής παροχής n .
- N^H, N^C και N^U = μέγιστος αριθμός επιλεγμένων επιπέδων θερμών παροχών (N^H) ή/και ψυχρών παροχών (N^C), όπου $N^U = N^H + N^C$.

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

- c_m και c_n = μοναδιαίο κόστος θερμής παροχής m και ψυχρής παροχής n .

Τα ισοζύγια ενέργειας, για την ολοκλήρωση όλων των ρευμάτων της συνολικής διεργασίας, καταγράφονται σε κάθε θερμοκρασιακό ενδιάμεσο του καταρράκτη, ως εξής:

$$R_{k-1} + \sum_{m \in S_k} Q_m^S + \sum_{i \in H_k} Y_i^H \cdot Q_{ik}^H = R_k + \sum_{n \in W_k} Q_n^W + \sum_{j \in C_k} Y_j^C \cdot Q_{jk}^C, \quad \forall k \in K \quad Eq. 8.20$$

Η Eq.8.20 περιλαμβάνει τους βαθμούς ελευθερίας, Y_i^H , Y_j^C , για την ρύθμιση της συνεισφοράς των ρευμάτων του υποβάθρου, των υποψήφιων στηλών και των βοηθητικών εναλλακτών κάθε στήλης, με τη συνεισφορά των πρώτων να θεωρείται δεδομένη μέσω της Eq.8.19. Επιπλέον, τίθεται οι περιορισμοί $R_0 = R_{NK} = 0$ για τα ενεργειακά υπόλοιπα στην κορυφή και τον πυθμένα του καταρράκτη κλείνοντας το συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο ρευμάτων και βοηθητικών παροχών.

Δεδομένου ενός συνόλου υποψήφιων επιπέδων θέρμανσης και ψύξης, εισάγονται οι ακόλουθοι λογικοί περιορισμοί για την επιλογή των βέλτιστων επιπέδων:

$$Q_m^S \leq y_m \cdot UB_m^S, \quad \forall m \in S \quad Eq. 8.21$$

$$Q_n^W \leq y_n \cdot UB_n^W, \quad \forall n \in W \quad Eq. 8.22$$

όπου $UB_m^S = \sum_{j \in C, k \in K} Q_{jk}^C$ και $UB_n^W = \sum_{i \in H, k \in K} Q_{ik}^H$.

Ο μέγιστος αριθμός θερμών, ψυχρών και συνολικών επιπέδων που επιλέγεται από το μοντέλο καθορίζεται από τους ακόλουθους περιορισμούς, οι οποίοι μπορούν να εφαρμοστούν με οποιονδήποτε συνδυασμό σύμφωνα με τις ανάγκες κάθε προβλήματος:

$$\sum_{m \in S} y_m \leq N^H \text{ και/ή } \sum_{n \in W} y_n \leq N^C \text{ και/ή } \sum_{m \in S} y_m + \sum_{n \in W} y_n \leq N^T \quad Eq. 8.23$$

Το μοντέλο βελτιστοποίησης εφαρμόζεται και εξετάζεται σύμφωνα με δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις για την αντικειμενική συνάρτηση. Η πρώτη αφορά την ελαχιστοποίηση του Συνολικού Ετησιοποιημένου Κόστους (Total Annualized Cost):

$$TAC = \left(\sum_{m \in S} c_m \cdot Q_m^S + \sum_{n \in W} c_n \cdot Q_n^W \right) + \frac{1}{a_f} \cdot \left(\sum_{d \in D} \sum_{i \in H_d^{EF}} a_i \cdot Y_i^H + y_i \cdot b_i \right) \quad Eq. 8.24$$

όπου a_f αφορά προεπιλεγμένους χρόνους απόσβεσης του κόστους κεφαλαίου των στηλών. Η δεύτερη προσέγγιση αφορά τη βελτιστοποίηση της Συνολικής Απόδοσης Κόστους, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, ως εξής:

$$TCP = w_1 \cdot \left(\sum_{m \in S} c_m \cdot Q_m^S + \sum_{n \in W} c_n \cdot Q_n^W \right) + w_2 \cdot \left(\sum_{d \in D} \sum_{i \in H_d^{EF}} a_i \cdot Y_i^H + y_i \cdot b_i \right) \quad Eq. 8.25$$

όπου $w_1 = (Cost_{max}^{OPEX} - Cost_{min}^{OPEX})^{-1}$ και $w_2 = (Cost_{max}^{CAPEX} - Cost_{min}^{CAPEX})^{-1}$.

Καθώς ισχύει η εξίσωση Eq.8.13, τότε οι εξισώσεις Eq.8.24 και Eq.8.25 μπορούν εναλλακτικά να διατυπωθούν με τη χρήση των μεταβλητών Y_j^C , αντί των μεταβλητών Y_i^H .

Το πεδίο ορισμού του προβλήματος περιλαμβάνει τα ενεργειακά μερίδια των υποψήφιων στηλών και των βοηθητικών εναλλακτών, τις δυαδικές μεταβλητές επιλογής στηλών και επιπέδων βοηθητικών παροχών, τα ενεργειακά υπόλοιπα του καταρράκτη και τις φρέσκες παροχές θέρμανσης και ψύξης. Το γραμμικό μοντέλο βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί συνεχείς και ακέραιες μεταβλητές και περιλαμβάνει τις εξισώσεις Eq.8.13-Eq.8.23 και την αντικειμενική συνάρτηση Eq.8.24 ή Eq.8.25. Η πρώτη (Eq.8.24) βελτιστοποιεί το συνολικό ετησιοποιημένο κόστος σύμφωνα με προεπιλεγμένους χρόνους απόσβεσης, ενώ η δεύτερη (Eq.8.25) προσφέρει μία γενικευμένη προσέγγιση της οικονομικής απόδοσης ανεξαρτητοποιημένη από επιλογές οικονομικών συντελεστών. Και οι δύο προσεγγίσεις εφαρμόζονται και συγκρίνονται στο παράδειγμα του επόμενου Κεφαλαίου 8.4.2. Το μοντέλο επιλύεται με χρήση επιλυτών MILP με ελάχιστη υπολογιστική προσπάθεια και χρόνους επίλυσης μικρότερους του 1 δευτερολέπτου.

8.4. Παραδείγματα

8.4.1. Παράδειγμα επεξήγησης και προετοιμασίας του προβλήματος βελτιστοποίησης

Το παράδειγμα περιγράφει τη διαδικασία κατασκευής των συνόλων και των υποσυνόλων του μαθηματικού μοντέλου σύνθεσης και ολοκλήρωσης MED. Έστω, το υπόβαθρο μίας διεργασίας που περιλαμβάνει 3 θερμά ρεύματα (H1, H2 και H3) και 2 ψυχρά (C1 και C2). Επίσης, θεωρείται ένα όχι πολύπλοκο DMR με μόλις 4 υποψήφια επίπεδα πίεσης (P1, P2, P3 και P4).

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

Ακολούθως, κατασκευάζονται τα αντίστοιχα υποσύνολα θερμών ρευμάτων των υποψήφιων στηλών με στοιχεία: $H^{EF} = \{P1, P2, P3, P4\}$ και του υποβάθρου ως: $H^{PR} = \{H1, H2, H3\}$. Για κάθε υποψήφια στήλη υπάρχει ένας βοηθητικός εναλλάκτης μεταβολής της θερμικής κατάστασης της τροφοδοσίας της σχηματίζοντας το υποσύνολο: $H^{HE} = \{HE1, HE2, HE3, HE4\}$. Τελικά, διαμορφώνεται το υπερσύνολο θερμών ρευμάτων, ως εξής: $H = \{P1, P2, P3, P4, HE1, HE2, HE3, HE4, H1, H2, H3\}$. Αντίστοιχα, κατασκευάζονται τα υποσύνολα ψυχρών ρευμάτων: $C^{EF} = \{P1, P2, P3, P4\}$, $C^{HE} = \{CE1, CE2, CE3, CE4\}$ και $C^{PR} = \{C1, C2\}$, και το υπερσύνολο ψυχρών ρευμάτων ως: $C = \{P1, P2, P3, P4, CE1, CE2, CE3, CE4, C1, C2\}$.

Από τα ισοζύγια μάζας του DMR, ισχύουν τα ακόλουθα για τα ενεργειακά μερίδια όλων των θερμών ($Y_i^H \ \forall i \in H$) και ψυχρών ($Y_j^C \ \forall j \in C$) ρευμάτων:

1. $Y_{P1}^H = Y_{P1}^C$, $Y_{P2}^H = Y_{P2}^C$, $Y_{P3}^H = Y_{P3}^C$ και $Y_{P4}^H = Y_{P4}^C$, που αφορούν τους συμπυκνωτήρες και αναβραστήρες των ίδιων υποψήφιων στηλών, μέσω της Eq.8.13.
2. $Y_{P1}^H + Y_{P2}^H + Y_{P3}^H + Y_{P4}^H = 1$, μέσω της Eq.8.14.
3. $Y_{P1}^H = Y_{HE1}^H$, $Y_{P2}^H = Y_{HE2}^H$, $Y_{P3}^H = Y_{HE3}^H$, $Y_{P4}^H = Y_{HE4}^H$ και $Y_{P1}^C = Y_{CE1}^C$, $Y_{P2}^C = Y_{CE2}^C$, $Y_{P3}^C = Y_{CE3}^C$, $Y_{P4}^C = Y_{CE4}^C$, για την ενεργοποίηση των βοηθητικών εναλλακτών κάθε υποψήφιας τροφοδοσίας στήλης, μέσω της Eq.8.17.
4. σύμφωνα με τα παραπάνω σημεία 1-3 και την εξίσωση Eq.8.18, τα $Y_{P1}^H, Y_{P2}^H, Y_{P3}^H, Y_{P4}^H, Y_{HE1}^H, Y_{HE2}^H, Y_{HE3}^H, Y_{HE4}^H$ και $Y_{P1}^C, Y_{P2}^C, Y_{P3}^C, Y_{P4}^C, Y_{CE1}^C, Y_{CE2}^C, Y_{CE3}^C, Y_{CE4}^C$ παίρνουν τιμές στο εύρος $[0,1]$ αντικατοπτρίζοντας την επιλεχθείσα στρατηγική διαμοιρασμού της τροφοδοσίας.
5. η συνεισφορά των ρευμάτων του υποβάθρου είναι δεδομένη: $Y_{H1}^H = Y_{H2}^H = Y_{H3}^H = Y_{C1}^C = Y_{C2}^C = 1$, μέσω της Eq.8.19.

Από τα υπερσύνολα H και C επιλέγονται τα θερμά και ψυχρά ρεύματα που συνεισφέρουν σε κάθε θερμοκρασιακό ενδιάμεσο του καταρράκτη (Eq.8.20) μέσω των όρων $\sum_{i \in H_k} Y_i^H \cdot Q_{ik}^H$ και $\sum_{j \in C_k} Y_j^C \cdot Q_{jk}^C$, αντίστοιχα. Τα $Q_{P1,k}^H, Q_{P2,k}^H, Q_{P3,k}^H, Q_{P4,k}^H$ αφορούν τα μέγιστα θερμικά περιεχόμενα των συμπυκνωτήρων των υποψήφιων στηλών του DMR, ενώ τα $Q_{P1,k}^C, Q_{P2,k}^C, Q_{P3,k}^C, Q_{P4,k}^C$ τα μέγιστα περιεχόμενα των αναβραστήρων, όπως υπολογίστηκαν στο 5^ο βήμα της ενότητας 8.3.3 και αντιστοιχούν για λειτουργία με τη συνολική αρχική τροφοδοσία. Ακολούθως, τα $Q_{H1,k}^H, Q_{H2,k}^H, Q_{H3,k}^H$ και

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

$Q_{C1,k}^C$, $Q_{C2,k}^C$ αφορούν τα δεδομένα/γνωστά θερμικά περιεχόμενα των θερμών και ψυχρών ρευμάτων του υποβάθρου της διεργασίας, τα οποία προέρχονται είτε από προσομοιώσεις είτε πραγματικά δεδομένα της βιομηχανίας.

Για λόγους γενίκευσης της διαδικασίας προετοιμασίας του προβλήματος, ο βοηθητικός εναλλάκτης κάθε στήλης συμμετέχει εις διπλούν μέσω των υποσυνόλων H^{HE} και C^{HE} των θερμών (H) και ψυχρών (C) ρευμάτων αντίστοιχα, παρά το γεγονός ότι δεν υφίσταται ταυτόχρονα και ως θερμό και ως ψυχρό ρεύμα. Παραδείγματος χάριν, η ενεργοποίηση της πρώτης βαθμίδας $P1$ κατά 40% της μέγιστης δυναμικότητας οδηγεί σε:

- a) $Y_{P1}^H = 0.4$, ενεργοποίηση συμπυκνωτήρα
- b) $Y_{P1}^C = 0.4$, ενεργοποίηση αναβραστήρα
- c) $Y_{HE1}^H = 0.4$, ενεργοποίηση βοηθητικού εναλλάκτη ψύξης της τροφοδοσίας της $P1$
- d) $Y_{CE1}^C = 0.4$, ενεργοποίηση βοηθητικού εναλλάκτη θέρμανσης της τροφοδοσίας της $P1$

Στην πραγματικότητα, τα σημεία (c) και (d) δεν ισχύουν ταυτόχρονα. Εφόσον, η αρχική και τελική θερμική κατάσταση των τεσσάρων βοηθητικών εναλλακτών (των τεσσάρων υποψήφιων στηλών του DMR) είναι γνωστές, μηδενίζονται τα ενεργειακά περιεχόμενα ($Q_{HE,k}^H$ ή $Q_{CE,k}^C$) των βοηθητικών εναλλακτών που δεν έχουν φυσική υπόσταση απενεργοποιώντας τη συνεισφορά τους στον καταρράκτη, παρά το γεγονός ότι τα ενεργειακά τους μερίδια μπορεί να πάρουν μη-μηδενικές τιμές. Υπενθυμίζεται ότι, η συνεισφορά στον καταρράκτη ορίζεται μέσω των όρων $\sum_{i \in H_k} Y_i^H \cdot Q_{ik}^H$ και $\sum_{j \in C_k} Y_j^C \cdot Q_{jk}^C$ του μοντέλου μεταφόρτωσης.

Συγκεκριμένα, εάν ένας βοηθητικός εναλλάκτης λειτουργεί ως θερμό ρεύμα τότε: $Q_{HE1,k}^H \neq 0$ και $Q_{CE1,k}^C = 0 \quad \forall k \in K$, ενώ αν λειτουργεί ως ψυχρό τότε: $Q_{HE1,k}^H = 0$ και $Q_{CE1,k}^C \neq 0 \quad \forall k \in K$. Οι μηδενικές τιμές ορίζονται από το χρήστη. Οι μη-μηδενικές τιμές αφορούν τα μέγιστα ενεργειακά περιεχόμενα των βοηθητικών εναλλακτών και υπολογίζονται, εκ των προτέρων, σύμφωνα με την θερμική κατάσταση της τροφοδοσίας και των υποψήφιων στηλών. Έτσι, στα παραπάνω σημεία (c) και (d), αν και τα ενεργειακά μερίδια Y_{HE1}^H και Y_{CE1}^C ενεργοποιούνται αμφότερα για προγραμματιστικούς λόγους, τα ενεργειακά περιεχόμενα $Q_{HE1,k}^H$ και $Q_{CE1,k}^C$ θα καθορίσουν εάν οι εναλλάκτες θα συνεισφέρουν ως θερμά ή ως ψυχρά ρεύματα στον καταρράκτη.

Το DMR είναι υπεύθυνο για τη σύνθεση σεναρίων MED και τις επιλογές ενεργειακών μεριδίων των στηλών και των βοηθητικών εναλλακτών. Οι όροι $\sum_{i \in H_k} Y_i^H \cdot Q_{ik}^H$ και $\sum_{j \in C_k} Y_j^C \cdot Q_{jk}^C$ αναλαμβάνουν τη ρύθμιση της συνεισφοράς όλων των ρευμάτων και το μοντέλο μεταφόρτωσης εκτελεί την ενεργειακή αποσυμφόρηση του καταρράκτη της συνολικής διεργασίας υπολογίζοντας τις ελάχιστες ενεργειακές παροχές θέρμανσης και ψύξης.

8.4.2. Σχεδιασμός και ενεργειακή βελτιστοποίηση συστημάτων απόσταξης ενός πραγματικού λιγνοκυτταρινούχου βιοδιυλιστηρίου

Το παράδειγμα αφορά τον επανασχεδιασμό των συστημάτων απόσταξης ενός πραγματικού λιγνοκυτταρινούχου βιοδιυλιστηρίου (Pyrgakis and Kokossis, 2019). Η σύνθεση των επιμέρους μονάδων του βιοδιυλιστηρίου (BIOCORE, 2014; Kokossis et. al, 2015) παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.11.

Το βιοδιυλιστήριο κλασμάτνει λιγνοκυτταρινούχες τροφοδοσίες για την παραγωγή C5 και C6 σακχάρων και λιγνίνης. Τα σάκχαρα υδrolύονται προς ξυλόζη και γλυκόζη, αντίστοιχα, οι οποίες μαζί με την λιγνίνη αποτελούν τα τελικά προϊόντα της διεργασίας. Στην παρούσα μελέτη λαμβάνεται επιπλέον υπόψη, η περίπτωση ενσωμάτωσης συστήματος ζύμωσης (Σχήμα 8.11) για την μετατροπή των μονοσακχαριτών ξυλόζης και γλυκόζης σε αιθανόλη. Σε αντίθεση με τα παραδείγματα των Κεφαλαίων 5, 6, και 7, το παρόν παράδειγμα δεν εξετάζει τις διεργασίες μετατροπής χημικών ως βαθμούς ελευθερίας, παρά μόνον τα συστήματα απόσταξης και τα επίπεδα πίεσης βοηθητικών παροχών. Η βιομηχανία περιλαμβάνει δύο ενεργοβόρες περιπτώσεις απόσταξης, οι οποίες σχετίζονται με:

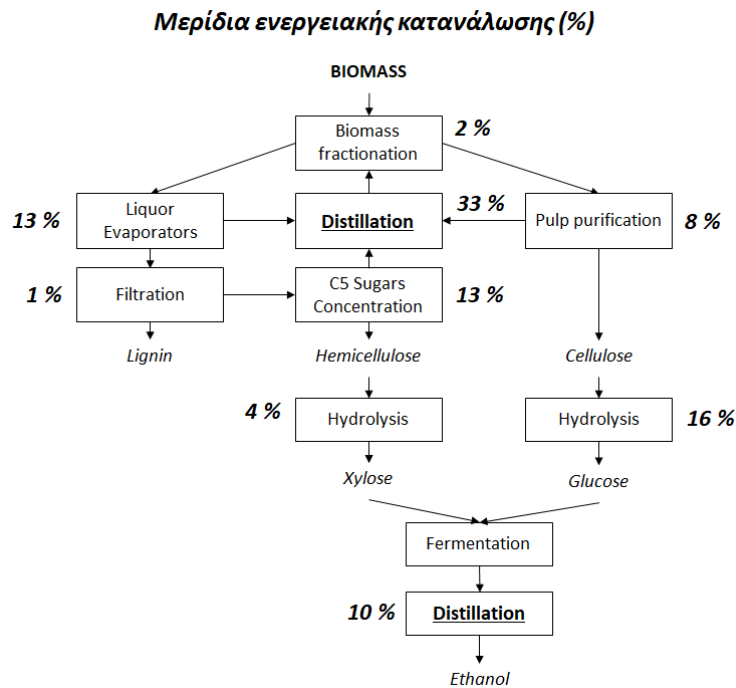
- την ανάκτηση οργανικών διαλυτών (D1) και
- τον καθαρισμό του τελικού προϊόντος αιθανόλης (D2).

Σύμφωνα με τα στοιχεία του Σχήματος 8.11, η ενεργειακή κατανάλωση των αποστάξεων D1 και D2 αφορά το 43% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης (σε MW) του βιοδιυλιστηρίου. Οι ενεργειακές ανάγκες του υποβάθρου του βιοδιυλιστηρίου αποτελούν δεδομένα του προβλήματος σχεδιασμού.

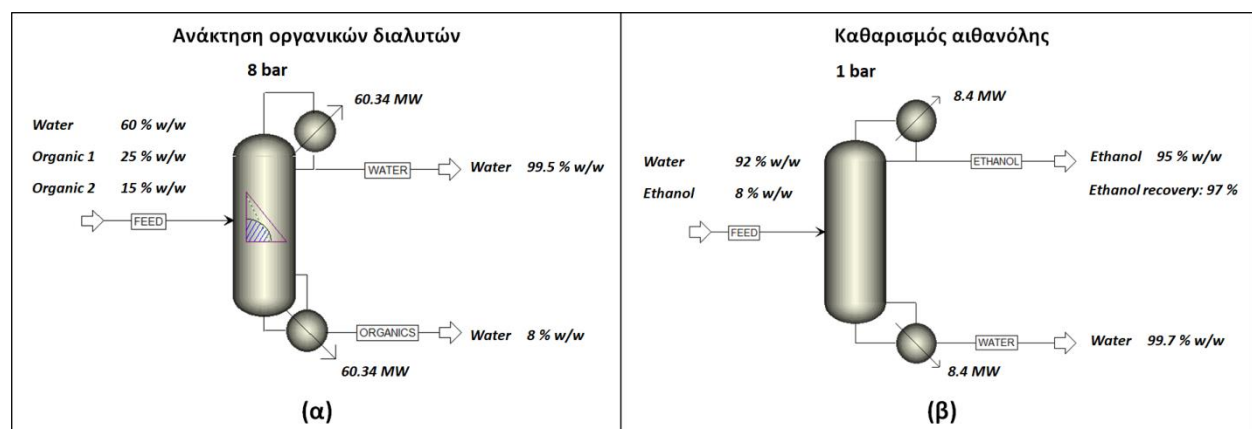
Ο αρχικός σχεδιασμός που προβλέπεται για την εφαρμογή των αποστάξεων αφορά τη χρήση μίας στήλης για κάθε περίπτωση σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Σχήματος 8.12. Η απόσταξη του μίγματος οργανικών διαλυτών-νερού στοχεύει σε προϊόν κορυφής με συγκέντρωση οργανικών 0.5% w/w, και προϊόν πυθμένα συγκέντρωσης σε νερό 8% w/w. Αντίστοιχα, για την απόσταξη αιθανόλης προβλέπεται ανάκτηση της αιθανόλης κατά 97% και καθαρότητα αιθανόλης 95% w/w. Οι αρχικές συνθήκες λειτουργίας κάθε απόσταξης έχουν τεθεί στα 8 bar (D1) και 1 bar (D2), ενώ οι ενεργειακές

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

απαιτήσεις υπολογίζονται στα 60 MW (D1) και 8.4 MW (D2). Οι αναβραστήρες και οι συμπυκνωτήρες θεωρείται ότι παρουσιάζουν σχεδόν ίδιες ενεργειακές απαιτήσεις. Οι συγκεντρώσεις τροφοδοσίας και προϊόντων και η συνολική παροχή τροφοδοσίας κάθε απόσταξης (Σχήμα 8.12) αποτελούν δεδομένα του προβλήματος και πρέπει να επιβεβαιώνονται σε κάθε πρόταση σχεδιασμού.



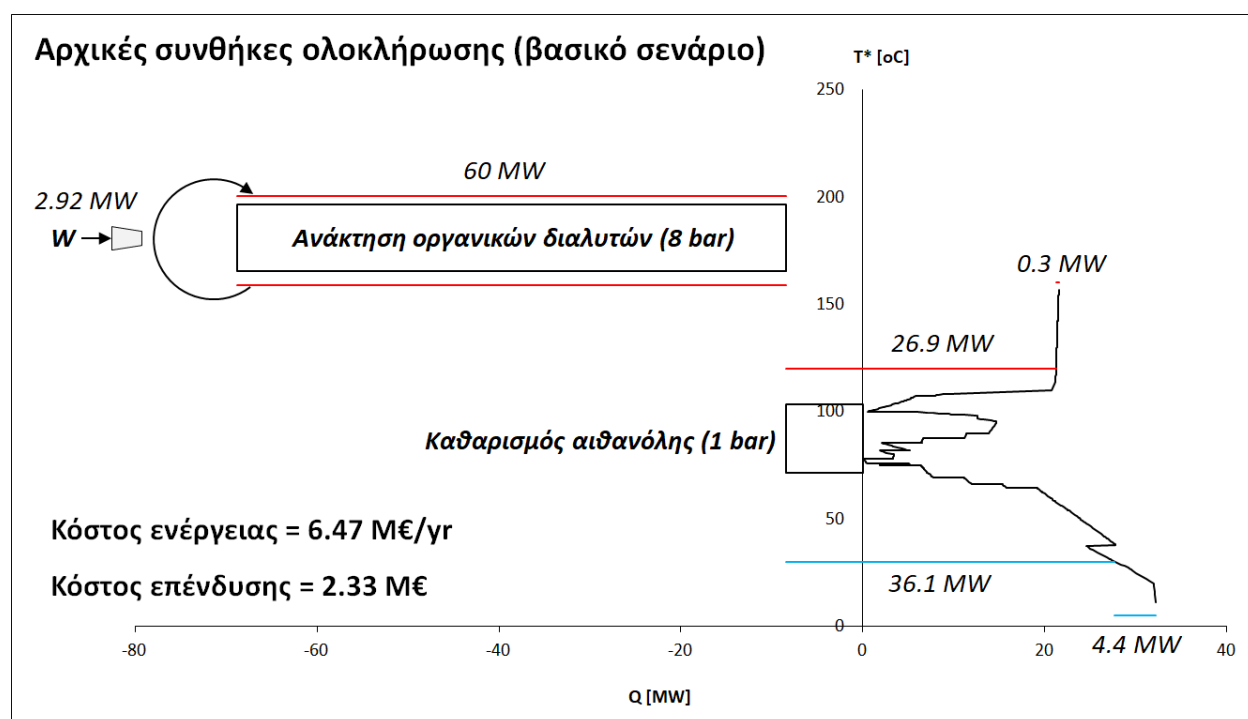
Σχήμα 8.11: Λιγνοκυτταρινούχο βιοδιυλιστήριο παραγωγής βιοαιθανόλης



Σχήμα 8.12: Αρχικός σχεδιασμός (τροφοδοσίες, προϊόντα, πιέσεις) αποστάξεων βιοδιυλιστηρίου: (α) ανάκτηση οργανικών διαλυτών, (β) καθαρισμός βιοαιθανόλης

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

Το αρχικά μη-ολοκληρωμένα σενάρια απόσταξης σε σχέση με του αρχικούς ενεργειακούς στόχους του υποβάθρου παρουσιάζονται στο GCC του Σχήματος 8.13. Οι ανάγκες του υποβάθρου, ύστερα από άμεση ολοκλήρωση των δεδομένων ρευμάτων της διεργασίας, υπολογίζονται στα 21.5 MW και 32.1 MW θερμών και ψυχρών παροχών, αντίστοιχα. Η συνολική ενεργειακή κατανάλωση του αρχικού σεναρίου του Σχήματος 8.13 ανέρχεται στα 27.2 MW και 40.5 MW για τις θερμές και ψυχρές παροχές, αντίστοιχα. Οι βοηθητικές παροχές εξυπηρετούν το υπόβαθρο και την απόσταξη αιθανόλης, ενώ η απόσταξη οργανικών διαλυτών χρησιμοποιεί ένα σύστημα αυτόνομης ολοκλήρωσης με συμπίεση των ατμών κορυφής κόστους 2.92 MW (Σχήμα 8.13). Σύμφωνα με τα μοντέλα κοστολόγησης της προηγούμενης ενότητας (Κεφάλαιο 8.3.3.), το αρχικό κόστος επένδυσης των δύο αποστακτικών στηλών υπολογίζεται στα 1.58 Μ€ για την D1 και στα 0.75 Μ€ για την D2, ενώ το αρχικό ενεργειακό κόστος του αρχικού μη-ολοκληρωμένου σεναρίου του Σχήματος 8.13 υπολογίζεται στα 6.47 Μ€/yr.



Σχήμα 8.13: Αρχικό σενάριο ολοκλήρωσης αποστάξεων βιοδιυλιστηρίου με το υπόβαθρο

Το πρόβλημα στοχεύει στην ανίχνευση συστημάτων MED (και για τις δύο περιπτώσεις απόσταξης) και των περιθωρίων ενεργειακής ολοκλήρωσής τους με το υπόβαθρο του βιοδιυλιστηρίου για την μείωση του ενεργειακού κόστους της συνολικής διεργασίας. Η προσέγγιση βελτιστοποίησης αντιμετωπίζει ως βαθμούς ελευθερίας τις πιέσεις λειτουργίας των στηλών των MED (για την D1 και D2), στρατηγικές

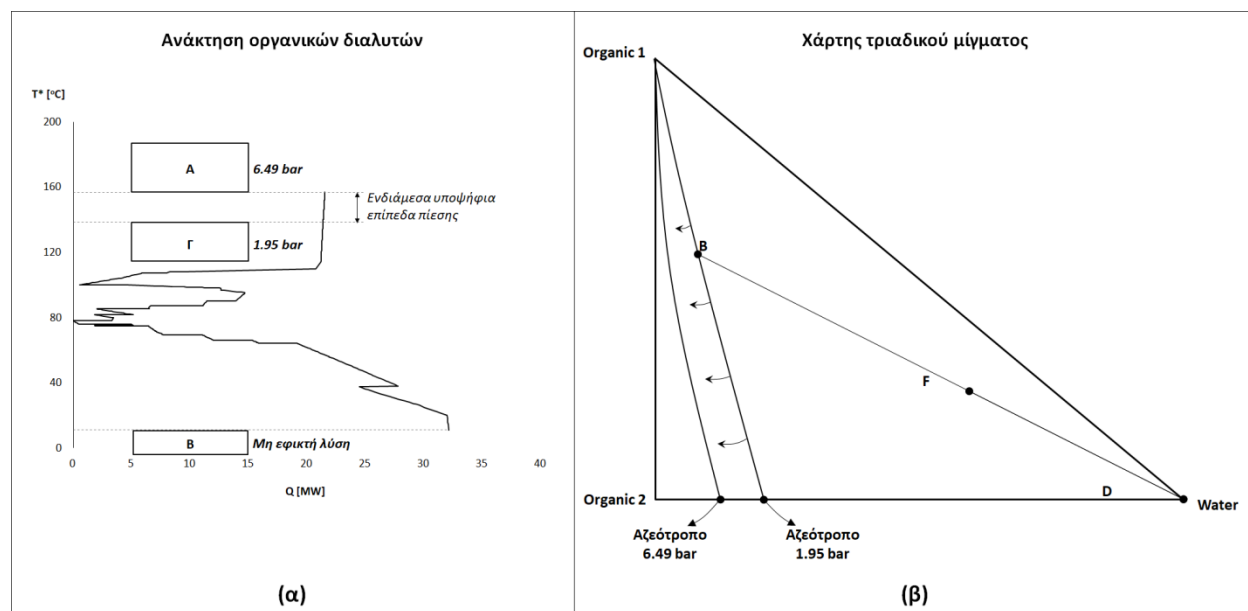
Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

διαμοιρασμού των αρχικών τροφοδοσιών στα συστήματα MED, επιλογές ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ των MED και του υποβάθρου και υποψήφια επίπεδα βοηθητικών παροχών με στόχο την ελαχιστοποίηση του ενεργειακού κόστους με το ελάχιστο εφικτό κόστος επένδυσης για τα συστήματα MED.

Η μελέτη χρησιμοποιεί δυο διαφορετικά πυκνά πλέγματα υποψήφιων επιπέδων πίεσης (DMR) για κάθε περίπτωση απόσταξης (D1 και D2) σύμφωνα με τις οδηγίες του Κεφαλαίου 8.3.1. Τα άνω και κάτω επίπεδα πίεσης κάθε DMR επιλέγονται συναρτήσει των άνω και κάτω θερμοκρασιακών ορίων του GCC του υποβάθρου (βλ. Σχήμα 8.5α και 8.5β). Ωστόσο, η ύπαρξη αζεότροπων μιγμάτων στα προϊόντα και των δύο αποστάξεων θέτουν επιπλέον θερμοδυναμικούς περιορισμούς στην επιλογή των οριακών πιέσεων κάθε DMR. Η στρατηγική επιλογής των υποψήφιων επιπέδων πίεσης κάθε απόσταξης παρουσιάζεται στα Σχήματα 8.14 και 8.15.

Τα κουτιά A και B του Σχήματος 8.14α αντιπροσωπεύουν τις αρχικές οριακές θέσεις αποστακτικών στηλών σύμφωνα με την ανώτερη και κατώτερη θερμοκρασία του GCC του υποβάθρου. Παράλληλα, στο Σχήμα 8.14β παρουσιάζεται ο τριαδικός χάρτης του μίγματος απόσταξης με τα σημεία B, F και D να αντιπροσωπεύουν τις συστάσεις πυθμένα, τροφοδοσίας και κορυφής της στήλης, σύμφωνα με τους στόχους του προβλήματος (Σχήμα 8.12α). Η ύπαρξη αζεοτρόπου οργανικού διαλύτη-νερού αναπτύσσει επιπλέον οριακές γραμμές εντός του τριαδικού χάρτη περιορίζοντας τον εφικτό χώρο απόσταξης προϊόντων. Η απόσταξη λαμβάνει χώρα στα δεξιά της οριακής γραμμής και παραμένει εφικτή μέχρι την πίεση των 1.95 bar, όπου η οριακή γραμμή εφάπτεται της συγκέντρωσης του προϊόντος πυθμένα. **Όσο αυξάνεται η πίεση**, η οριακή γραμμή μετακινείται προς τα αριστερά και **η απόσταξη παραμένει εφικτή για πιέσεις μεγαλύτερες των 1.95 bar**. Οι θερμοκρασίες αναβραστήρα και συμπυκνωτήρα της στήλης των 1.95 bar αντιπροσωπεύονται από το κουτί Γ του Σχήματος 8.14α, ενώ απόσταξη σε χαμηλότερες πιέσεις (και χαμηλότερα θερμοκρασιακά εύρη) δεν θα είναι εφικτή σύμφωνα με τον τριαδικό χάρτη. Το κάτω άκρο του DMR καθορίζεται από την ύπαρξη αζεοτρόπου στα 1.95 bar και ανέρχεται (από τη θέση του κουτιού B) στη νέα θέση του κουτιού Γ. Το άνω άκρο του DMR καθορίζεται κανονικά σύμφωνα με την άνω θερμοκρασία του GCC και αναφέρεται στην πίεση 6.49 bar. Μεταξύ των πιέσεων 1.95-6.49 bar ορίζονται 48 υποψήφια επίπεδα πίεσης (ίσων αποστάσεων μεταξύ τους) για την απόσταξη D1. Με παρόμοιο τρόπο διαμορφώνονται τα άκρα του DMR για την απόσταξη D2.

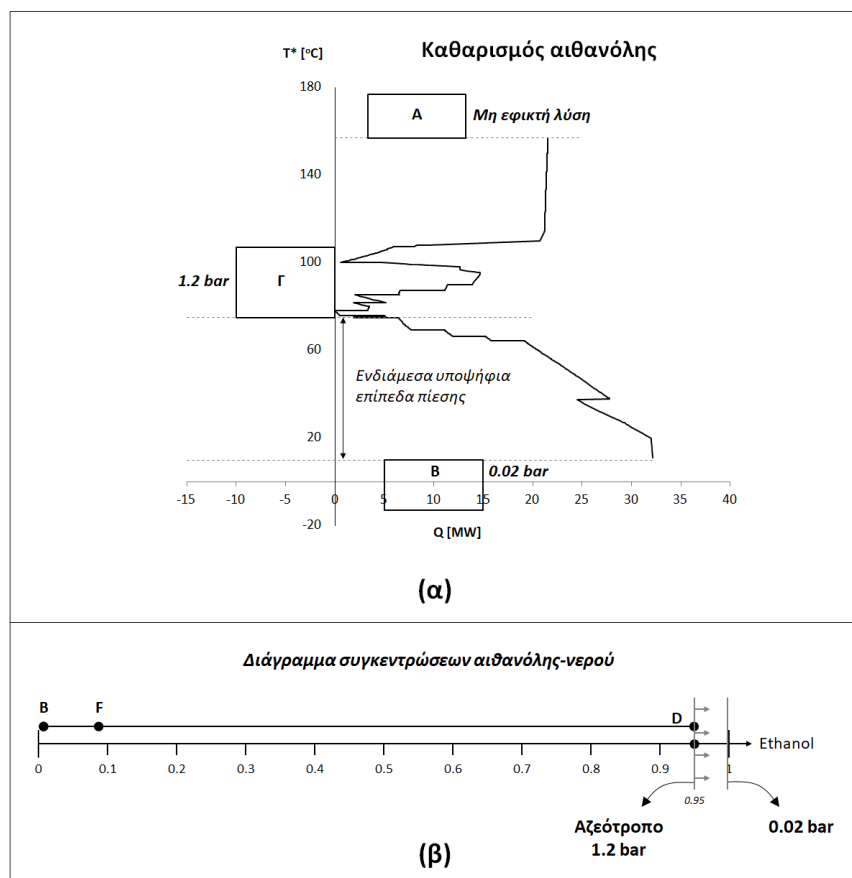
Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών



Σχήμα 8.14: Διαμόρφωση των επιπέδων πίεσης του DMR της D1: (α) οριακές πιέσεις DMR-D1, (β) διάγραμμα απόσταξης τριαδικού μίγματος τροφοδοσίας της D1

Στο Σχήμα 8.15α, τα κουτιά A και B αντιπροσωπεύουν τις άνω/κάτω θέσεις του DMR σύμφωνα με τα θερμοκρασιακά άκρα του GCC του υποβάθρου. Η πίεση λειτουργίας του κουτιού B υπολογίζεται στα 0.02 bar. Σύμφωνα με τη γραμμή συγκεντρώσεων του δυαδικού μίγματος αιθανόλης-νερού (Σχήμα 8.15β), το αζεότροπο αιθανόλης-νερού στην πίεση 1.2 bar παρουσιάζει ίδια σύσταση (95% αιθανόλης) με αυτή του προϊόντος κορυφής (σημείο D). Η απόσταξη παραμένει εφικτή για πιέσεις ίσες και μεγαλύτερες των 1.2 bar, καθώς το αζεότροπο απομακρύνεται προς τα δεξιά της γραμμής απόσταξης B-F-D μέχρι την τιμή 0.02 bar, η οποία ορίζεται από το κάτω άκρο του GCC και στην οποία το αζεότροπο χάνεται. Η απόσταξη των 1.2 bar εκπροσωπείται από το κουτί Γ του Σχήματος 8.15α. Το κάτω άκρο του DMR (κουτί B-0.02 bar) παραμένει σύμφωνα με τη χαμηλότερη θερμοκρασία του GCC, ενώ το αζεότροπο αιθανόλης-νερού κατεβάζει το άνω όριο πίεσης του DMR (από τη θέση του κουτιού A) στη θέση του κουτιού Γ στην πίεση των 1.2 bar. Μεταξύ των 0.02-1.2 bar, το DMR συμπληρώνεται με 48 υποψήφια επίπεδα πίεσης (ίσων αποστάσεων μεταξύ τους) για την απόσταξη D2.

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών



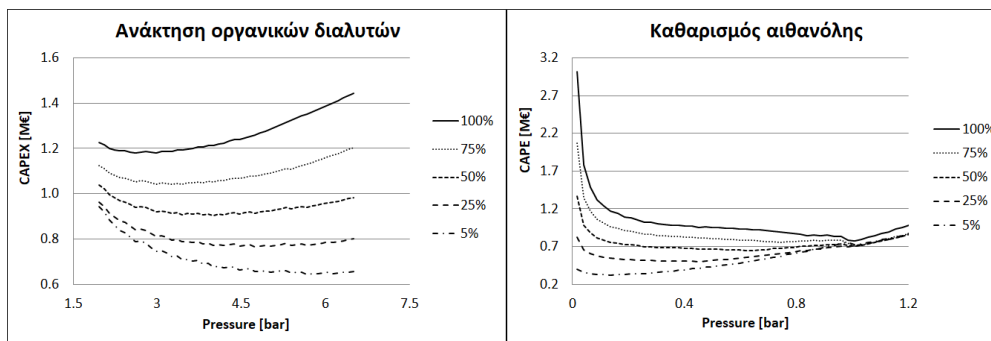
Σχήμα 8.15: Διαμόρφωση των επιπέδων πίεσης του DMR της D2: (α) οριακές πιέσεις DMR-D2, (β) διάγραμμα απόσταξης δυαδικού μίγματος τροφοδοσίας της D2

Και τα δύο DMR χρησιμοποιούν 50 υποψήφια επίπεδα πίεσης λειτουργίας. Ακολούθως, υπολογίζονται οι θερμοκρασίες και τα μέγιστα θερμικά φορτία αναβραστήρων και συμπυκνωτήρων σε κάθε πίεση λειτουργίας σύμφωνα με την παροχή κάθε μίγματος τροφοδοσίας και τις συγκεντρώσεις τροφοδοσίας και προϊόντων που τίθενται από το βιοδιυλιστήριο. Ακολούθως, υπολογίζονται τα κόστη επένδυσης των υποψήφιων στηλών.

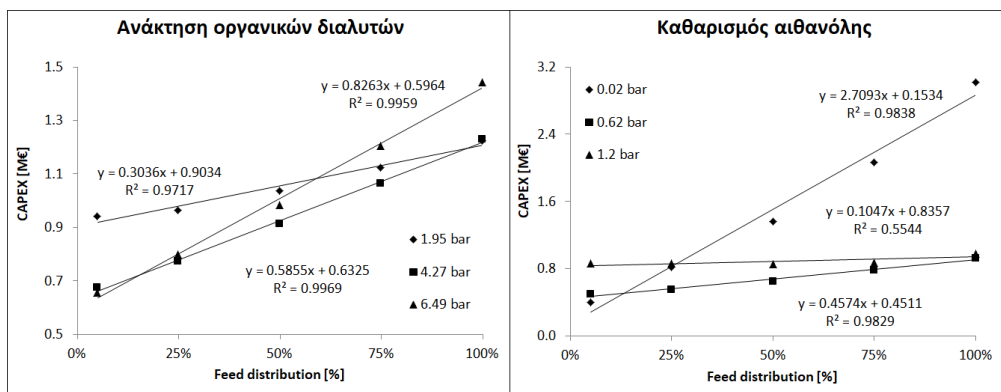
Τα μοντέλα των Mullet et al. (1981) και Douglas (1988) εφαρμόζονται ακολουθώντας τα βήματα 1-6 της ενότητας 8.3.3. για τον υπολογισμό του κόστους επένδυσης κάθε στήλης σε κάθε υποψήφιο επίπεδο πίεσης των δύο DMR. Δεδομένης της αρχικής παροχής κάθε μίγματος τροφοδοσίας (D1 και D2), τα μοντέλα κοστολόγησης εφαρμόστηκαν για τον υπολογισμό του κόστους επένδυσης για πέντε τιμές παροχής στο 5%, 25%, 50%, 75% και 100% της αρχικής τροφοδοσίας κάθε περίπτωσης απόσταξης. Τα διαγράμματα του Σχήματος 8.16 παρουσιάζουν την πορεία του κόστους επένδυσης συναρτήσει της

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

πίεσης λειτουργίας για κάθε στήλη D1 και D2 και για διάφορες τιμές δυναμικότητας. Στο Σχήμα 8.17 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα κόστη επένδυσης τριών αποστακτικών στηλών (στη μεγαλύτερη, τη μικρότερη και την ενδιάμεση πίεση λειτουργίας κάθε DMR) συναρτήσει της παροχής τροφοδοσίας αναδεικνύοντας τις δυνατότητες εξαγωγής γραμμικών συσχετίσεων με τη δυναμικότητα. Όλα τα αποτελέσματα κοστολόγησης των 100 υποψήφιων στηλών (50 για την D1 και 50 για την D2) παλινδρομούνται για την ανάπτυξη γραμμικών συσχετίσεων του κόστους επένδυσης συναρτήσει της δυναμικότητας και την εύρεση των παραμέτρων a_i και b_i των εξισώσεων Eq.8.24 και Eq.8.25. Ενδεικτικά, ο Πίνακας 8.1 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας, τα θερμικά δεδομένα, τα κόστη επένδυσης και τις τιμές των παραμέτρων a_i και b_i για τις στήλες του Σχήματος 8.17. Τέλος, τα θερμικά δεδομένα των γνωστών ρευμάτων του υποβάθρου της βιβλιογραφίας υπολογίζονται βάσει προσομοιώσεων (Aspen Plus, v8.6), τα αποτελέσματα των οποίων επαληθεύθηκαν με πραγματικά δεδομένα του βιοδιυλιστηρίου και πιλότων ζύμωσης σακχάρων (BIOCORE, 2014).



Σχήμα 8.16: Κόστος επένδυσης συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας για κάθε περίπτωση απόσταξης



Σχήμα 8.17: Γραμμικοποίηση κόστους επένδυσης συναρτήσει της παροχής τροφοδοσίας για κάθε περίπτωση απόσταξης

Πίνακας 8.1: Χαρακτηριστικά υποψήφιων στηλών σε διάφορα επίπεδα πίεσης των DMR (D1 και D2)

	Θέση DMR	Design specifications						CAPEX [Μ€]					Regression parameters	
		P [bar]	RR _{min}	T ^{reb} [°C]	T ^{cond} [°C]	Q [MW]	N _{stages}	Feed distribution [%]					ai	bi
								100%	75%	50%	25%	5%		
Organics Distillation	1	1.95	1.18	133.4	119.7	37.7	48	1.22	1.12	1.04	0.96	0.94	0.3036	0.9034
	26	4.27	1.62	163.2	145.7	44.4	30	1.23	1.06	0.91	0.77	0.68	0.5855	0.6325
	50	6.49	2.21	181.7	161.9	53.3	24	1.44	1.20	0.98	0.80	0.66	0.8263	0.5964
Ethanol distillation	1	0.02	7.97	5.0	-7.9	9.1	10	3.02	2.07	1.37	0.82	0.40	2.7093	0.1534
	26	0.62	7.70	87.3	66.6	8.3	33	0.93	0.79	0.65	0.56	0.50	0.4574	0.4511
	50	1.20	8.06	102.1	80.0	8.4	54	0.98	0.87	0.86	0.86	0.87	0.1047	0.8357

Στο πρόβλημα χρησιμοποιούνται 21 υποψήφια επίπεδα ατμού και 6 υποψήφια επίπεδα ψύξης. Το μοντέλο ρυθμίζεται ώστε να επιλέγει έως και 4 επίπεδα θερμών και 2 επίπεδα ψυχρών παροχών – δηλαδή $N^H = 4$ και $N^C = 4$ στην εξίσωση 8.23 – σύμφωνα με τις κατευθύνσεις της βιομηχανίας. Το μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης περιλαμβάνει τις εξισώσεις Eq.8.13-Eq.8.23, και παράγει βέλτιστες λύσεις σχεδιασμού σύμφωνα με δύο διαφορετικές προσεγγίσεις βελτιστοποίησης:

- Προσέγγιση A: ελαχιστοποίηση TAC σύμφωνα με την αντικειμενική συνάρτηση Eq.8.24
- Προσέγγιση B: ελαχιστοποίηση TCP σύμφωνα με την αντικειμενική συνάρτηση Eq.8.25

Προσέγγιση A

Η αντικειμενική συνάρτηση (Eq.8.24) της παρούσας προσέγγισης αθροίζει το ενεργειακό κόστος βοηθητικών παροχών της συνολικής διεργασίας και το ετησιοποιημένο κόστος επένδυσης των αποστακτικών στηλών σύμφωνα με προεπιλεγμένους χρόνους απόσβεσης (a_f). Η συνεισφορά του ενεργειακού κόστους στην αντικειμενική συνάρτηση είναι σταθερή, ενώ η επιβάρυνση της επένδυσης μεταβάλλεται άλλοτε περισσότερο και άλλοτε λιγότερο, σύμφωνα με τους συντελεστές απόσβεσης που χρησιμοποιούνται κάθε φορά. Μεγάλοι συντελεστές a_f θα επιτρέψουν την αξιοποίηση περισσότερων ή/και ακριβότερων στηλών με σκοπό τη στοίχιση των ενεργειακών αναγκών των MED όσο το δυνατόν καλύτερα εντός του GCC του υποβάθρου προς όφελος του ενεργειακού κόστους. Αντίθετα, μικροί συντελεστές a_f θα καταλήξουν στην επιλογή συστημάτων απόσταξης με περιορισμένες δυνατότητες ολοκλήρωσης και υψηλά ενεργειακά κόστη.

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

Η προσέγγιση βελτιστοποίησης πραγματοποιήθηκε για ένα μεγάλο εύρος συντελεστών απόσβεσης (από 1 μήνα έως πολλά έτη) για την διερεύνηση της βαρύτητας του κόστους επένδυσης έναντι του ενεργειακού και τον εντοπισμό των αποδοτικότερων σχεδίων ολοκλήρωσης MED. Το εύρος που μελετήθηκε περιλαμβάνει χρόνους απόσβεσης μεταξύ $[0.83-U]$ έτη, όπου U ένας πολύ μεγάλος αριθμός, έτσι ώστε, όταν $a_f = U$, η συνεισφορά του κόστους επένδυσης στην αντικειμενική συνάρτηση να εκφυλίζεται. Το μοντέλο βελτιστοποίησης εφαρμόστηκε για πάνω από 50 διαφορετικές, διακριτές τιμές a_f σε όλο το εύρος $[0.83-U]$ και εντόπισε επτά διαφορετικές λύσεις MED, οι οποίες επαναλαμβάνονται εντός επτά διαφορετικών χρονικών ενδιάμεσων του συνολικού εύρους a_f . Ο Πίνακας 8.2 συνοψίζει τα κόστη των επτά βέλτιστων λύσεων που εντοπίζονται, ενώ ο Πίνακας 8.3 παρουσιάζει τα επιλεγμένα επίπεδα πίεσης λειτουργίας των στηλών και τα ποσοστά κατανομής της συνολικής τροφοδοσίας στις στήλες κάθε συστήματος MED για τις D1 και D2.

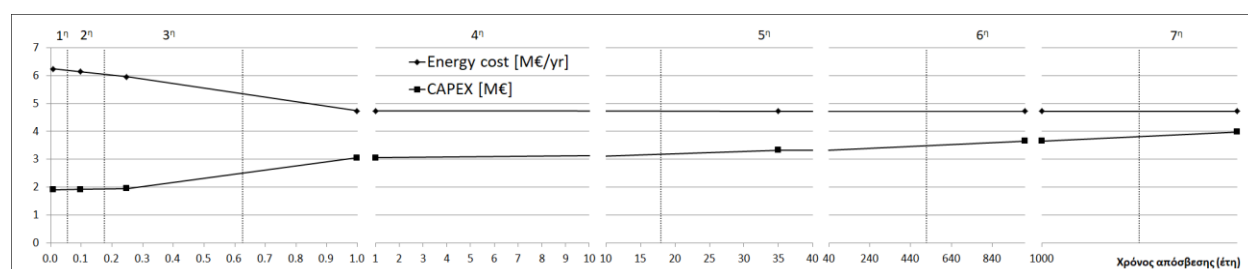
Πίνακας 8.2: Αποτελέσματα βέλτιστων λύσεων MED για διαφορετικές τιμές χρόνου απόσβεσης

Λύση MED	Χρόνος Απόσβεσης [yr]	Ενεργειακό Κόστος [Μ€/yr]	Κόστος επένδυσης [Μ€]	Ενεργειακή απόδοση $\left[\frac{6.47 - \text{Energy}_i}{6.47} \right]$	Απόδοση επένδυσης $\left[\frac{\text{Capital}_i}{2.33} \right]$	Συνολική Απόδοση $\left[\frac{\text{Ενεργειακή απόδοση}}{\text{Απόδοση επένδυσης}} \right]$
1 ^η	[0.01-0.1]	6.24	1.91	4%	82%	4%
2 ^η	[0.1-0.25]	6.14	1.92	5%	82%	6%
3 ^η	[0.25-1]	5.96	1.95	8%	84%	9%
4 ^η	[1-35]	4.74	3.05	26.79%	131%	20%
5 ^η	[35-1000]	4.73	3.33	26.93%	143%	19%
6 ^η	[1000-10000]	4.73	3.66	26.95%	157%	17%
7 ^η	[10000-U]	4.73	3.98	26.96%	171%	16%

Στους Πίνακες 8.2 και 8.3 παρουσιάζονται επτά διαφορετικά συστήματα MED για κάθε περίπτωση απόσταξης, τα οποία παραμένουν ως βέλτιστες λύσεις στις μεταβολές του χρόνου απόσβεσης εντός κάθε χρονικού ενδιάμεσου (2^η στήλη των Πινάκων 8.2 και 8.3) που μελετήθηκε. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.2, το ενεργειακό κόστος μειώνεται όσο αυξάνεται ο χρόνος απόσβεσης, καθότι η συνεισφορά του κόστους επένδυσης ελαττώνεται με αποτέλεσμα το μοντέλο να επηρεάζεται περισσότερο από το κόστος ενέργειας. Αντίθετα, το κόστος επένδυσης (Πίνακας 8.2) και ο αριθμός των επιλεγμένων στηλών (Πίνακας 8.3) αυξάνεται όσο αυξάνεται ο χρόνος απόσβεσης. Η πορεία κάθε όρου κόστους στα 7 ενδιάμεσα, όπου επαναλαμβάνονται οι λύσεις, παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.18, και τα κόστη (σημεία του σχήματος) αφορούν κάθε λύση MED (1^η-7^η) που εντοπίζεται σε κάθε ενδιάμεσο.

Πίνακας 8.3: Στρατηγικές κατανομής τροφοδοσίας βέλτιστων λύσεων MED

Λύση MED	Χρόνος Απόσβεσης [yr]	Επίπεδα πίεσης DMR απόσταξης οργανικών [bar]				Επίπεδα πίεσης DMR απόσταξη αιθανόλης [bar]				
		1.95	2.32	2.60	4.18	0.21	0.23	0.26	0.28	1.01
1 ^η	[0.01-0.1]			100%						100%
2 ^η	[0.1-0.25]		100%							100%
3 ^η	[0.25-1]	100%								100%
4 ^η	[1-35]	56%			44%	100%				
5 ^η	[35-1000]	56%			44%	17%		83%		
6 ^η	[1000-10000]	56%			44%	17%		55%	28%	
7 ^η	[10000-U]	56%			44%	10%	10%	52%	28%	



Σχήμα 8.18: Πορεία κόστους ενέργειας και επένδυσης συναρτήσει του χρόνου απόσβεσης

Η αξιολόγηση των λύσεων για την επιλογή της καταλληλότερης μπορεί να γίνει (υποκειμενικά) σύμφωνα με τις ειδικές οικονομικές συνθήκες της βιομηχανίας, ωστόσο προτείνεται μία γενική διαδικασία μετα-ανάλυσης των αποτελεσμάτων για την ανάδειξη λύσεων που παρουσιάζουν καλύτερες αποδόσεις στη χρήση ενέργειας και του κόστους επένδυσης από τις υπόλοιπες. Στην παρούσα μετα-ανάλυση, οι επτά λύσεις του Πίνακα 8.2 αξιολογούνται σύμφωνα με τις επιδόσεις εξοικονόμησης ενέργειας και του κόστους επένδυσης που απαιτήθηκε για αυτόν τον σκοπό, σε σχέση με τα κόστη του αρχικού σεναρίου. Το σκεπτικό είναι ανάλογο με αυτό της αντικειμενικής συνάρτησης υπολογισμού της Συνολικής Απόδοσης Κόστους (TCP) της εξίσωσης Eq.8.25, με τη διαφορά ότι η διαδικασία βαθμολόγησης των αποδόσεων κάθε όρου κόστους πραγματοποιείται κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης και όχι ως μετα-ανάλυση.

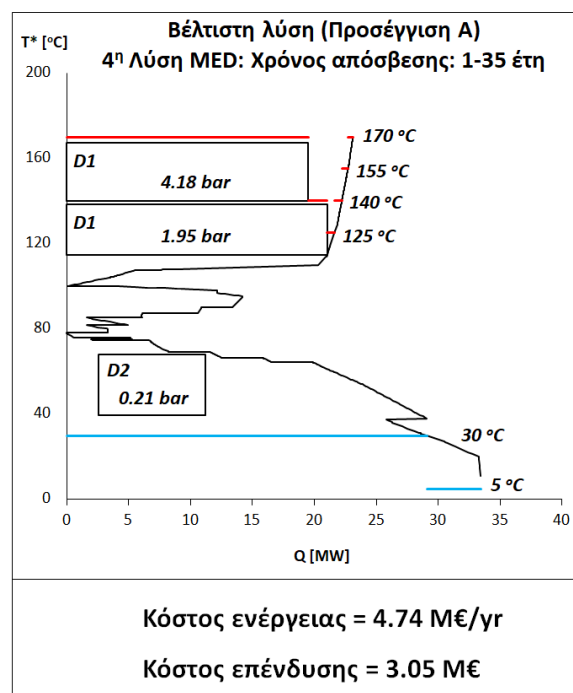
Στην 5^η στήλη του Πίνακα 8.2 παρουσιάζονται τα ποσοστά εξοικονόμησης ενεργειακού κόστους κάθε λύσης (με δείκτη i) συναρτήσει της κόστους (6.47 M€/yr) του αρχικού σεναρίου του Σχήματος 8.13. Ήδη από την 4^η λύση και μετά, τα ποσοστά εξοικονόμησης δείχνουν να σταθεροποιούνται κοντά στα μέγιστα

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

εφικτά (27%). Παράλληλα, στην 6^η στήλη του Πίνακα 8.2 υπολογίζεται το επιπλέον κόστος επένδυσης που απαιτείται για κάθε λύση (*i*) σε σχέση με το κόστος επένδυσης (2.33 Μ€) του αρχικού σεναρίου (Σχήμα 8.13). Τέλος, στην τελευταία στήλη (7^η) αξιολογούνται τα ποσοστά εξοικονόμησης που επιτεύχθηκαν ως προς το επιπλέον κόστους επένδυσης που απαιτείται. Η συνολική απόδοση της 7^{ης} στήλης αντιπροσωπεύει την ενεργειακή απόδοση των MED ανά μονάδα επιπλέον κόστους επένδυσης και μπορεί να αποτελέσει μία αντικειμενική διαδικασία βαθμολόγησης και κατάταξης των λύσεων. Από την παρούσα μετα-ανάλυση, η 4^η λύση παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συνολική απόδοση και μπορεί να χαρακτηριστεί ως καταλληλότερη από τις υπόλοιπες.

Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές εξισώσεις υπολογισμού των οικονομικών αποδόσεων του Πίνακα 8.2 συναρτήσει των μέγιστων/ελάχιστων επιδόσεων που εντοπίζονται στο εύρος χρόνων απόσβεσης που μελετήθηκαν, π.χ. $\frac{Energy_{max}-Energy_i}{Energy_{max}-Energy_{min}}$ (5^η στήλη) και $\frac{Capital_i}{Capital_{min}}$ (6^η στήλη). Μία άλλη εναλλακτική είναι η απευθείας χρήση της εξίσωσης Eq.8.25, αντί της εξίσωσης της 7^{ης} στήλης του Πίνακα 8.2, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα (ελάχιστες/μέγιστες τιμές) της 3^{ης} και 4^{ης} στήλης. Και στις δύο εναλλακτικές περιπτώσεις, η 4^η λύση αναδεικνύεται ως καλύτερη από τις υπόλοιπες.

Η 4^η λύση αφορά τη χρήση MED 2-επιπέδων για την ανάκτηση των οργανικών διαλυτών (D1), ενώ για την απόσταξη αιθανόλης (D2) δεν επιλέχθηκαν επιπλέον στήλες, παρά μόνον ο επανασχεδιασμός της πίεσης λειτουργίας σε σχέση με το αρχικό σενάριο του Σχήματος 8.13. Τα σχήμα ολοκλήρωσης όλων των συστημάτων απόσταξης μεταξύ τους και με το υπόβαθρο παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.19. Το MED οργανικών διαλυτών και η στήλη απόσταξης ολοκληρώνονται πλήρως εντός του υποβάθρου, με αποτέλεσμα η συνολική διεργασία να λειτουργεί με τις ίδιες βοηθητικές παροχές (σε MW) που απαιτούνται μόνο από το υπόβαθρο. Οι στήλες της D1 ολοκληρώνουν μεταξύ τους το 44% των αναγκών τους, ενώ οι υπόλοιπες ανάγκες τους καλύπτονται από φρέσκο ατμό 170 °C και τις καταβόθρες του υποβάθρου. Η απόσταξη αιθανόλης χρησιμοποιεί διαθέσιμη θερμότητα κάτω από το pinch. Το βελτιστοποιημένο σύστημα βοηθητικών παροχών περιλαμβάνει 4 επίπεδα ατμού στους 170 °C, 155 °C, 140 °C και 125 °C, και 2 επίπεδα ψύξης (κρύο νερό και στους 0 °C).



Σχήμα 8.19: Βέλτιστο σχέδιο ολοκλήρωσης συστημάτων MED (D1 και D2) με το υπόβαθρο της διεργασίας

Προσέγγιση B

Η Προσέγγιση A εφαρμόζεται για πολλαπλές, διακριτές τιμές στάθμισης του κόστους επένδυσης και ενέχει (σε μερικές περιπτώσεις) κινδύνους απώλειας λύσεων MED, οι οποίες μπορεί να αποτελούν λύσεις υψηλής οικονομικής απόδοσης. Αντίθετα, η Προσέγγιση B χρησιμοποιεί απευθείας μία αντικειμενική συνάρτηση (Eq.8.25) υπολογισμού της συνολικής απόδοσης κόστους (ως προς βέλτιστους στόχους που εντοπίζονται στο πρόβλημα) κατά τη διάρκεια της αναζήτησης λύσεων, αντικαθιστώντας την διαδικασία μετα-ανάλυσης της Προσέγγισης A.

Σύμφωνα με τη στρατηγική βελτιστοποίησης που συζητήθηκε στο Σχήμα 8.10, το μοντέλο βελτιστοποίησης εφαρμόζεται εις διπλούν για την προετοιμασία των δύο παραμέτρων στάθμισης, w_1 και w_2 , οι οποίοι αφορούν τη συμπεριφορά του προβλήματος σε ακραίες συνθήκες ολοκλήρωσης. Το μοντέλο εφαρμόζεται για τον εντοπισμό της λύσης ελάχιστου κόστους επένδυσης και ελάχιστου ενεργειακού κόστους χρησιμοποιώντας κάθε φορά μηδενικές τιμές (ή σχεδόν μηδέν, π.χ. 10^{-6}) για τα w_1 και w_2 , αντίστοιχα. Και στις δύο περιπτώσεις προτείνεται η χαλάρωση των εξισώσεων Eq.8.23,

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

επιτρέποντας τη χρήση ακόμα και όλων των υποψήφιων επιπέδων βοηθητικών παροχών για την εύρεση του ελάχιστου εφικτού κόστους.

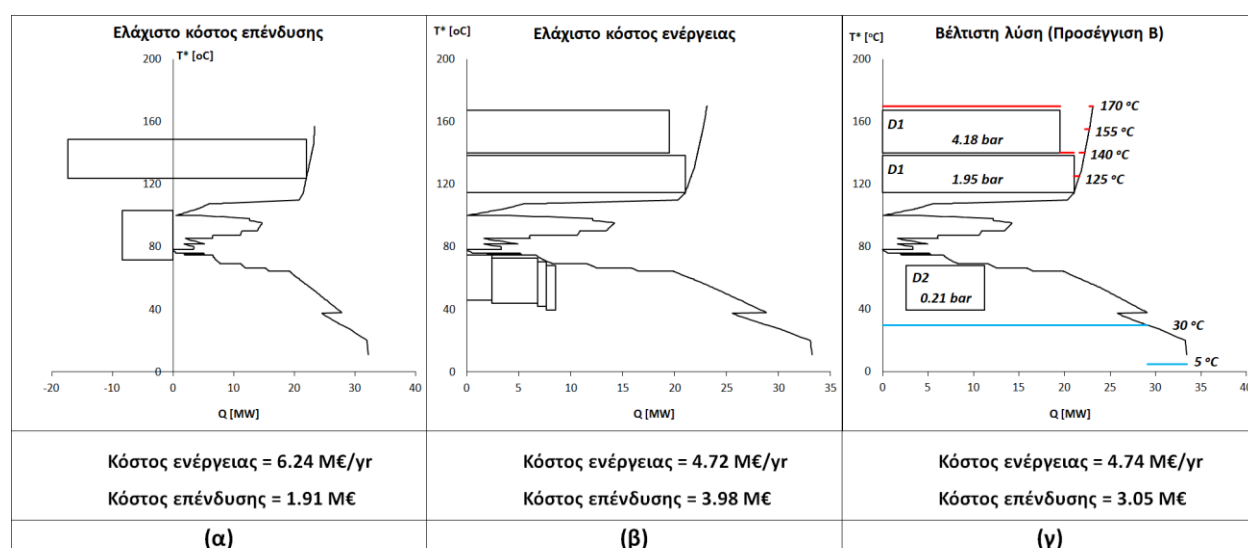
Κατά την προηγούμενη Προσέγγιση Α, ο υπολογισμός παρόμοιων ακραίων λύσεων, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν κατά τη μετα-ανάλυση των αποτελεσμάτων, αντικατοπτρίζεται από τη χρήση πολύ μικρών και πολύ μεγάλων χρόνων απόσβεσης που **ενδεχομένως** να επιλέξει ο χρήστης. Στην Προσέγγιση Β, αυτά τα ζητήματα αντιμετωπίζονται και οι ελάχιστες/μέγιστες επιδόσεις κάθε όρου κόστους υπολογίζονται με ακρίβεια για $w_1 \rightarrow 0$ ή $w_2 \rightarrow 0$.

Ύστερα από την εφαρμογή του μοντέλου για τιμές $w_1 = 10^{-6}$ και $w_2 = 10^{-6}$, εντοπίστηκαν αντίστοιχα οι λύσεις του Σχήματος 8.20α και 8.20β, οι οποίες αντικατοπτρίζουν αντίστοιχα τις συνθήκες ολοκλήρωσης των Περιπτώσεων 1 και 3 του Σχήματος 8.9. Ως εκ τούτου, προκύπτουν οι τιμές των παραμέτρων: $Cost_{min}^{CAPEX} = 1.91$ Μ€, $Cost_{max}^{OPEX} = 6.24$ Μ€/yr (Σχήμα 8.20α) και $Cost_{min}^{OPEX} = 4.72$ Μ€/yr, $Cost_{max}^{CAPEX} = 3.98$ Μ€ (Σχήμα 8.20β). Τα αποτελέσματα και οι επιλεχθείσες στήλες κάθε περίπτωσης βελτιστοποίησης συνοψίζονται στον Πίνακα 8.4. Ακολούθως, υπολογίζονται οι πραγματικές τιμές των παραμέτρων στάθμισης κάθε όρου κόστους, ως εξής: $w_1 = 0.658$ και $w_2 = 0.483$. Το μοντέλο βελτιστοποίησης εφαρμόζεται για τις πραγματικές τιμές w_1 και w_2 και καταλήγει στο βέλτιστο σχέδιο ολοκλήρωσης MED που ελαχιστοποιεί το κατάλληλα σταθμισμένο συνολικό κόστος (TCP). Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι, η βελτιστοποίηση του TCP με τη χρήση των συντελεστών στάθμισης w_1 και w_2 είναι ισοδύναμη με την βελτιστοποίηση του TAC χρησιμοποιώντας ως χρόνο απόσβεσης, a_f , ίσο με $\frac{w_1}{w_2} = 1.36$ έτη.

Η βέλτιστη λύση που εντοπίστηκε από την βελτιστοποίηση του TCP παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.20γ και είναι πανομοιότυπη με την καταλληλότερη λύση (4^η του Πίνακα 8.2) που εντοπίστηκε στην Προσέγγιση Α. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι αυτό το γεγονός δεν μπορεί να γενικευτεί, καθότι η αποδοτικότερη λύση (όπως η 4^η λύση του Πίνακα 8.2) είναι πιθανό να υφίσταται και να επαναλαμβάνεται για αρκετά μικρό εύρος χρόνων απόσβεσης, σε αντίθεση με το πλατό [1-35] έτη που εντοπίζεται στον Πίνακα 8.2. Υπό άλλες συνθήκες, οι πιθανότητες επιλογής του κατάλληλου χρόνου απόσβεσης στην Προσέγγιση Α για τον εντοπισμό της αποδοτικότερης λύσης ενδέχεται να είναι πολύ μικρές. Όταν η χρήση συγκεκριμένων συντελεστών απόσβεσης δεν απαιτείται από το πρόβλημα, τότε προτείνεται η χρήση του TCP, έναντι του TAC, έτσι ώστε να περιοριστεί η επίδραση του χρήστη στην λήψη αποφάσεων κατά την επιλογή χρόνων απόσβεσης, ενώ παράλληλα η διαδικασία βαθμολόγησης να εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

αναζήτησης καλύτερων λύσεων από το μοντέλο, ιδιαίτερα σε μεγαλύτερα και πολυπλοκότερα προβλήματα πολλαπλών αποστάξεων και υποψήφιων διεργασιών.



Σχήμα 8.20: (α) σενάριο ολοκλήρωσης ελάχιστου κόστους επένδυσης, (β) σενάριο ολοκλήρωσης ελάχιστου κόστους ενέργειας, (γ) βέλτιστο σενάριο σχεδιασμού και ολοκλήρωσης MED

Πίνακας 8.4: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης των σεναρίων ολοκλήρωσης του Σχήματος 8.20

Λύση MED	Ενεργειακό Κόστος [Μ€/γρ]	Κόστος επένδυσης [Μ€]	Επίπεδα πίεσης DMR απόσταξης οργανικών [bar]			Επίπεδα πίεσης DMR απόσταξη αιθανόλης [bar]				
			1.95	2.60	4.18	0.21	0.23	0.26	0.28	1.01
Ελάχιστο κόστος ενέργειας (E_{min} & C_{max})	4.72	3.98	56%		44%	10%	10%	52%	28%	
Ελάχιστο κόστος επένδυσης (C_{min} & E_{max})	6.24	1.91		100%						100%
Βέλτιστη λύση (TCP_{min})	4.74	3.05	56%		44%	100%				

Σύμφωνα με το GCC του Σχήματος 8.20γ, το αρχικό σενάριο μίας στήλης απόσταξης για την ανάκτηση οργανικών διαλυτών (D1) ενισχύεται με τη ενσωμάτωση μία ακόμα στήλης. Το MED 2-επιπέδων της D1 οργανώνεται εντός του GCC του υποβάθρου επιλέγοντας κατάλληλα τις πιέσεις λειτουργίας και τις στρατηγικές διαμοιρασμού τροφοδοσίας των στηλών. Από τη μία, οι πιέσεις επιλέγονται με στόχο την στοίχιση των στηλών (α) τη μία πάνω από την άλλη διασφαλίζοντας την ολοκλήρωση μεταξύ τους, και

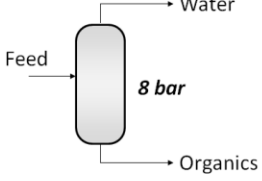
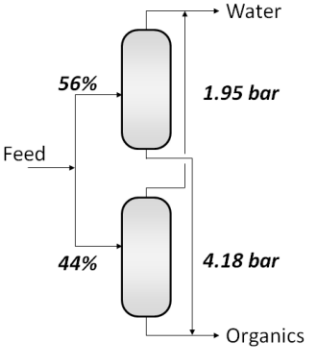
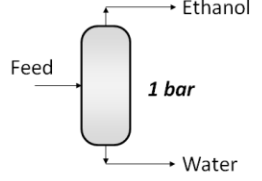
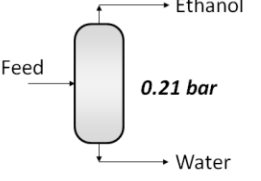
Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

(β) στα χαμηλότερα θερμοκρασιακά επίπεδα καλώντας χαμηλότερου κόστους βοηθητικές παροχές θέρμανσης. Από την άλλη, οι στρατηγικές διαμοιρασμού τροφοδοσίας επιλέγονται κατάλληλα (α) διατηρώντας τις στήλες εντός του GCC και (β) κατανέμοντας τις συνολικές ενεργειακές ανάγκες στα επιλεγμένα επίπεδα ατμού ελαχιστοποιώντας το κόστος θέρμανσης. Παρόμοιες στρατηγικές διαμοιρασμού συζητήθηκαν στο παράδειγμα επεξήγησης του Σχήματος 8.3.

Η αρχική θέση της απόσταξης αιθανόλης, η οποία διαπερνούσε το pinch στο Σχήμα 8.13, παρουσίαζε μηδενικές επιλογές ολοκλήρωσης με το υπόβαθρο της διεργασίας. Το μοντέλο επέλεξε μόνο τον επανασχεδιασμό της πίεσης λειτουργίας της στήλης – και όχι τη χρήση επιπλέον στηλών – μεταφέροντας την D2 κάτω από το pinch και επιτρέποντάς της να λειτουργεί πλήρως (χωρίς ενεργειακό κόστος) με διαθέσιμη θερμότητα της διεργασίας. Ο αναβραστήρας της D2 τροφοδοτείται από τις πηγές του υπόβαθρου, και ο συμπυκνωτήρας χρησιμοποιεί τις παροχές κρύου νερού που, ούτως ή άλλως, θα απαιτούσε το υπόβαθρο. Η ύπαρξη αρκετού χώρου ολοκλήρωσης κάτω από το pinch επιτρέπει τη χρήση μίας μόνο στήλης για την D2. Βέβαια, η χρήση επιπλέον στηλών αποφεύγεται και λόγω του γεγονότος ότι οι υποψήφιες στήλες που τοποθετούνται κάτω από το pinch λειτουργούν σε πιέσεις μικρότερες της 1 atm, και ως εκ τούτου παρουσιάζουν υψηλό κόστος επένδυσης. Ως αποτέλεσμα, επιλέχθηκε το υψηλότερο επίπεδο πίεσης λειτουργίας που επιτρέπει στην D2 να στοιχηθεί πλήρως κάτω από το pinch, δηλαδή σχεδόν εφάπτομενικά με τις άνω οριζόντιες γραμμές των καταβοθρών.

Το Σχήμα 8.21 συνοψίζει τις βέλτιστες επιλογές του μοντέλου για τις πιέσεις λειτουργίας των πλήρως ολοκληρωμένων συστημάτων απόσταξης D1 και D2, και τις στρατηγικές διαμοιρασμού των τροφοδοσιών μεταξύ των επιλεχθέντων στηλών. Το προτεινόμενο σχέδιο ολοκλήρωσης αποφέρει έως και 27% εξοικονόμηση ενεργειακού κόστους σε σχέση με το αρχικό σενάριο σχεδιασμού (Σχήμα 8.13), απαιτώντας 31% περισσότερο κεφάλαιο επένδυσης για τον επανασχεδιασμό των συστημάτων απόσταξης.

Κεφάλαιο 8. Ταυτόχρονος σχεδιασμός και ολοκλήρωση αποστακτικών στηλών

Αρχικός σχεδιασμός	Επανασχεδιασμός
Ανάκτηση οργανικών διαλυτών	
 <p>Κόστος επένδυσης = 1.58 Μ€</p>	 <p>Κόστος επένδυσης = 1.96 Μ€</p>
Καθαρισμός αιθανόλης	
 <p>Κόστος επένδυσης = 0.75 Μ€</p>	 <p>Κόστος επένδυσης = 1.09 Μ€</p>
<p>Κόστος ενέργειας = 6.47 Μ€/γρ Κόστος επένδυσης = 2.33 Μ€</p>	<p>Κόστος ενέργειας = 4.74 Μ€/γρ Κόστος επένδυσης = 3.05 Μ€</p> <p>Εξοικονόμηση κόστους ενέργειας = 27 %</p> <p>Επιπλέον κόστος επένδυσης = 31 %</p>

Σχήμα 8.21: Αρχικό σενάριο σχεδιασμού (βάσει Σχήματος 8.13) και βέλτιστο σενάριο επανασχεδιασμού (βάσει Σχήματος 8.19) των αποστάξεων του βιοδιυλιστηρίου, ύστερα από την εφαρμογή της μεθοδολογίας σύνθεσης και ολοκλήρωσης MED με το υπόβαθρο της διεργασίας

Βιβλιογραφία

1. Pyrgakis K.A., Kokossis A.C., 2019. Systematic synthesis and integration of multiple-effect distillation into overall processes: The case of biorefineries. *AIChE J.*, 65, e16631
2. Westerberg. A.W., 1985. The synthesis of distillation-based separation systems. *Comp. & Chem. Eng.*, 9, 5, 421-429
3. Dhole V.R., Linnhoff B., 1993. Distillation column targets. *Comp. & Chem. Eng.*, 17, 5-6, 549-560
4. Rathore R.N.S., Van Wormer K.A., Powers G.J., 1974α. Synthesis strategies for multicomponent separation systems with energy integration. *AIChE J.*, 20, 3, 491-502.
5. Rathore R.N.S., Van Wormer K.A., Powers G.J., 1974β. Synthesis of distillation systems with energy integration. *AIChE J.*, 20, 5, 940-950

6. Naka Y., Terashita M., Takamatsu T., 1982. A thermodynamic approach to multicomponent distillation system synthesis. *AIChE J.*, 28, 812-820
7. Caballero J.A., Grossmann I.E., 1999. Aggregated models for integrated distillation systems. *Ind Eng Chem Res.*, 38, 2330-2344
8. Benz S.J., Cerda J., 1992. Optimal synthesis of flexible heat-integrated distillation trains. *Comput Chem Eng.*, 16, 8, 753-776
9. Alcántara-Avila J.R., Hasebe S., 2013. New synthesis procedure to find the optimal distillation sequence with internal and external heat integrations. *Ind Eng Chem Res.*, 52, 4851-4862
10. Floudas C.A., Paulesg E.A., 1988. Mixed-integer nonlinear programming formulation for the synthesis of heat-integrated distillation sequences. *Comput Chem Eng.*, 12, 6, 531-546
11. Aggarwal A., Floudas C.A., 1992. Synthesis of heat integrated nonsharp distillation sequences. *Comput Chem Eng.*, 16, 2, 89-108
12. Umeda T., Niida K., Shiroko K., 1979. A thermodynamic approach to heat integration in distillation systems. *AIChE J.*, 25, 3, 423-429
13. Andrecovich M.J., Westerberg A.W., 1985 α . A simple synthesis method based on utility bounding for heat-integrated distillation sequences. *AIChE J.*, 31, 3, 363-375
14. Westerberg A.W., Andrecovich M.J., 1985 β . Utility bounds for nonconstant $Q\Delta t$ for heat-integrated distillation sequence synthesis. *AIChE J.*, 31, 9, 1475-1479
15. Andrecovich M.J., Westerberg A.W., 1985 γ . An Milp formulation for heatintegrated distillation sequence synthesis. *AIChE J.*, 31, 1461-1474
16. Linnhoff B., Dunford H., Smith R., 1983. Heat integration of distillation columns into overall processes. *Chem Eng Sci.*, 38, 8, 1175-1188
17. Piyush B.S., Kokossis A.C., 1999. Systematic optimisation technology for highlevel screening and scoping of complex distillation systems. *Comput Chem Eng.*, 23, S113-S116
18. Gabriel K.J., Linke P., El-Halwagi M.M., 2015. Optimization of multi-effect distillation process using a linear enthalpy model. *Desalination*, 365, 261-276
19. Xue Y., Du X., Ge Z., Yang L., 2018. Study on multi-effect distillation of seawater with low-grade heat utilization of thermal power generating unit. *Appl Therm Eng.*, 141, 589-599
20. Haelssig J.B., Tremblay A.Y., Thibault J., 2008. Technical and economic considerations for various recovery schemes in ethanol production by fermentation. *Ind Eng Chem Res.*, 47, 16, 6185-6191
21. Engelién H.K., Skogestad S., 2005. Multi-effect distillation applied to an industrial case study. *Chem Eng Process*, 44, 8, 819-826
22. Wang W., Wang W., 2012. Energy saving in methylchlorosilane distillation. *International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*, 290-293
23. Zhang J., Liang S., Feng X., 2010. A novel multi-effect methanol distillation process. *Chem Eng Process.*, 49, 10, 1031-1037
24. Psychá M., Pyrgakis A.K., Kokossis A.C., 2014. Process design analysis for the valorisation and selection of integrated micro-algae biorefineries. *Comput Aid Chem Eng.*, 33, 1543-1548
25. Kemp I.C., 2007. *Pinch Analysis and Process Integration. A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy.* 2nd ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, Elsevier
26. Dias M., Modesto M., Ensinas A., Nebra S., Filho R., Rossell C., 2011. Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems. *Energy*, 36, 6, 3691-3703
27. Kravanja P., Modarresi A., Friedl A., 2013. Heat integration of biochemical ethanol production from straw – a case study. *Appl Energy*, 102, 32-43
28. Pyrgakis K.A., Kipouros P.I., Kokossis A.C., 2015. A MILP transshipment model to integrate and re-engineer distillation columns into overall processes. *Comput Aid Chem Eng.*, 37, 2015-2020

29. Martín M., Grossmann I.E., 2011. Energy optimization of bioethanol production via gasification of switchgrass. *AIChE J.*, 57, 12, 3408-3428
30. Karuppiah R., Peschel A., Grossmann I.E., 2008. Martín M, Martinson W, Zullo L. Energy optimization for the design of corn-based ethanol plants. *AIChE J.*, 54, 6, 1499-1525
31. Martín M., Grossmann I.E., 2013. On the systematic synthesis of sustainable biorefineries. *Ind Eng Chem Res.*, 52, 9, 3044-3064
32. Tamburini A., Cipollina A., Micale G., Piacentino A., 2016. CHP (combined heat and power) retrofit for a large med-Tvc (multiple effect distillation along with thermal vapour compression) desalination plant: high efficiency assessment for different design options under the current legislative EU framework. *Energy*, 115, 1548-1559
33. Papoulias A., Grossmann I.E., 1983. A structural optimization approach in process synthesis—II: heat recovery networks. *Comput Chem Eng.*, 7, 6, 707-721
34. Floudas C.A., Ciric A.R., Grossmann I.E., 1986. Automatic synthesis of optimum heat exchanger network configurations. *AIChE J.*, 32, 2, 276-290
35. Biegler, L.T., Grossmann, I.E., Westerberg, A.W., 1997. Systematic methods of chemical process design. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall PTR
36. Douglas J., 1988. *Conceptual Design of Chemical Process*. McGraw- Hill Book Co, Singapore
37. Mulet A., Corripio A., Evans L., 1981. Estimate costs of distillation and adsorption towers via correlations. *Chem Eng.*, 88, 77-82
38. Biocore Project, 2014. <http://www.biocore-Europe.org/>. Accessed 12 February, 2020
39. Kokossis A.C., Tsakalova M., Pyrgakis K., 2015. Design of integrated biorefineries. *Comput Chem Eng.*, 81, 40-56
40. Aspen Technology, Inc., Aspen Plus, v8.6

Κεφάλαιο 9.

Επίλογος

Οι προκλήσεις που εμφανίζονται κατά το σχεδιασμό βιοδιυλιστηρίων και εφαρμογών κυκλικής οικονομίας αποτελούν βασικά κίνητρα του παρόντος έργου. Για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας τέτοιων εγχειρημάτων καθίσταται απαραίτητη η διερεύνηση των αποδόσεων ανερχόμενων βιοδιυλιστηριακών μονάδων αναβάθμισης υπολειμματικών ροών βιομάζας με, ή χωρίς, κατανεμημένες υφιστάμενες βιομηχανίες. Το παρόν έργο προτείνει μεθοδολογίες και εργαλεία μηχανικής για την αντιμετώπιση τέτοιων προκλήσεων.

9.1. Συμπεράσματα και επιστημονική συνεισφορά

Αρχικά, παρουσιάζεται ένας γενικευμένος διμερής γράφος με σκοπό τη χαρτογράφηση όλων των επιλογών σύνθεσης υποψήφιων και κατανεμημένων διεργασιών. Ο γράφος παράγει αναπαραστάσεις (BBR), οι οποίες ενσωματώνουν πολλαπλές, παράλληλες (αξιοποιούν διαφορετικές τροφοδοσίες), ανταγωνιστικές, υποψήφιες και υφιστάμενες (κατανεμημένες) αλυσίδες παραγωγής προϊόντων επιτρέποντας την ανάπτυξη συνδέσεων μεταξύ τους με οποιονδήποτε τρόπο. Οι αναπαραστάσεις προσφέρουν επιπλέον δυνατότητες (aBBR) αντιμετώπισης ανταγωνιστικών τροφοδοσιών που παρουσιάζουν εποχικές διακυμάνσεις διαθεσιμότητας, επιτρέποντας το χρονο-σχεδιασμό των λειτουργιών βιοδιυλιστηρίων πολλαπλών-διεργασιών και πολλαπλών-τροφοδοσιών. Ο γράφος αναλαμβάνει τη σύνθεση σεναρίων χαρτοφυλακίων τροφοδοσιών, διεργασιών και προϊόντων του βιοδιυλιστηρίου προετοιμάζοντας τις συνθήκες για την συστημική εφαρμογή τεχνολογιών ολοκλήρωσης. Η ολοκλήρωση διεργασιών με τη χρήση κλασσικών γραφικών αναλύσεων άμεσης και

Κεφάλαιο 9. Επίλογος

έμμεσης ολοκλήρωσης της βιβλιογραφίας αδυνατούν, καταρχήν, να αντιμετωπίσουν τις υποψήφιες διεργασίες ως επιπλέον βαθμούς ελευθερίας του προβλήματος ολοκλήρωσης.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται γενικευμένες μεθοδολογίες και αναπαραστάσεις με σκοπό τη μαθηματική προτυποποίηση των συμβατικών γραφικών εργαλείων, ενσωματώνοντας τα διαφορετικά επίπεδα άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης ως μία ενιαία διαδικασία. Οι νέες τεχνολογίες ολοκλήρωσης κατατίθενται μέσω δύο εναλλακτικών διατυπώσεων: ενός απλοποιημένου μοντέλου ενεργειακής μεταφόρτωσης (ICT) για γρήγορη ενεργειακή στόχευση βιοδιυλιστηρίων και ενός αναλυτικού, πιο απαιτητικού, μοντέλου ενεργειακής μεταφόρτωσης (CIT) που προσφέρει κάθε εφικτή επιλογή ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ θερμών-ψυχρών ρευμάτων των εμπλεκόμενων διεργασιών.

Το μαθηματικά μοντέλα ICT/CIT (i) μπορούν να αναπαραγάγουν τα αποτελέσματα των γραμμών πηγών και καταβοθρών των γραφικών αναπαραστάσεων SSSP και να αντικαταστήσουν πλήρως τις γραφικές μεθόδους. Τα ICT/CIT ενσωματώνουν όλες τις δυνατότητες των SSSP και προσφέρουν επιπλέον δυνατότητες ενεργειακής ανάλυσης, όπως (ii) την ταυτόχρονη εφαρμογή άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης επιτρέποντας στο μοντέλο να αποφασίσει τις βέλτιστες στρατηγικές ολοκλήρωσης μεταξύ οποιονδήποτε εμπλεκόμενων διεργασιών, (iii) την ενσωμάτωση επιλογών για την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της συμπαραγωγής και των επιπέδων ατμού της βιομηχανικής εγκατάστασης, και κυρίως (iv) αντιμετωπίζουν τις νέες σχεδιαστικές προκλήσεις ανάπτυξης βιοδιυλιστηρίων ενσωματώνοντας όλους τους βαθμούς ελευθερίας του προβλήματος για την συστημική εφαρμογή τεχνικών ολοκλήρωσης και την αξιολόγηση των αποδόσεων κάθε υποψήφιου χαρτοφυλακίου διεργασιών. Η μεθοδολογία συγχρονίζει κατάλληλα τις αναπαραστάσεις του γράφου με τα μοντέλα ενεργειακής μεταφόρτωσης και το πρόβλημα κατασκευάζεται ως ένα γραμμικό μοντέλο βελτιστοποίησης (MILP) για την σύνθεση πλήρως ολοκληρωμένων βιοδιυλιστηρίων.

Η ενοποίηση και η σύνδεση των δύο σταδίων άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης, οι οποίες μέχρι σήμερα εφαρμόζονταν ως δύο ξεχωριστές αναλύσεις, ως ένα ενιαίο εργαλείο στόχευσης αποτελεί σημαντική επέκταση των υφιστάμενων δυνατοτήτων ολοκλήρωσης της βιβλιογραφίας. Αφενός, ξεπερνά τους δεδομένους περιορισμούς των γραφικών αναλύσεων για την αντιμετώπιση συνδυαστικών προβλημάτων. Αφετέρου, επιτρέπει τη χαρτογράφηση επιλογών ενεργειακής διαχείρισης και ολοκλήρωσης που δεν περιλαμβάνονται στα συμβατικά γραφικά εργαλεία, όπως (α) την εναλλαγή προτεραιοτήτων εφαρμογής άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης προς όφελος του ενεργειακού κόστους της Συνολικής Μονάδας (βλ. ενότητα 6.4.1), (β) τη ταυτόχρονη χαρτογράφηση και βελτιστοποίηση των δυνατοτήτων συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Σχήμα 7.8), η οποία μέχρι

Κεφάλαιο 9. Επίλογος

σήμερα αντιμετωπίζονταν ως ξεχωριστή διαδικασία μετά την εφαρμογή άμεσης και έμμεσης ολοκλήρωσης και (γ) τον εντοπισμό πρόσφορης ενέργειας τσεπών για σκοπούς συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (βλ. Σχήμα 7.18), η οποία δεν είναι διαθέσιμη στα συμβατικά γραφικά εργαλεία.

Η εφαρμογή των μοντέλων ICT και CIT για σκοπούς βελτιστοποίησης της συμπαραγωγής, ανέδειξε νέες προκλήσεις όσον αφορά την ακρίβεια εκτίμησης της ισεντροπικής απόδοσης και τις επιδόσεις συμπαραγωγής που επιτυγχάνουν οι υπάρχουσες στρατηγικές της βιβλιογραφίας. Έτσι, προτείνονται νέες στρατηγικές, συντομευμένες εξισώσεις και προγραμματιστικές τεχνικές για τον επανυπολογισμό των παραμέτρων λειτουργίας των τουρμπίνων (Πίνακα 7.3), της ειδικής ενθαλπίας εισόδου στους κυλίνδρους (Πίνακας 7.4) και της βελτιστοποίησης των επιπέδων ατμού της βιομηχανικής εγκατάστασης (Σχήμα 7.13). Η συνδυαστική χρήση των νέων στρατηγικών συμπαραγωγής και μεθοδολογιών ολοκλήρωσης οδήγησε σε λύσεις υψηλότερης απόδοσης από αυτές υπολογίζονται από τις μεθόδους της βιβλιογραφίας, επιβεβαιώνοντας τα αρχικά επιχειρήματα που τέθηκαν στο παρόν έργο για αυστηρότερη βελτιστοποίηση των επιπέδων ατμού, τα οποία αξιοποιούνται (ταυτόχρονα) για σκοπούς έμμεσης ολοκλήρωσης και συμπαραγωγής, ενισχύοντας τις αποδόσεις και στις δύο περιπτώσεις (Σχήμα 7.22).

Τέλος, το παρόν έργο εστιάζει σε τεχνικές σχεδιασμού πλήρως ολοκληρωμένων συστημάτων απόσταξης, οι οποίες μέχρι τώρα εφαρμόζονταν αποκλειστικά με τη χρήση γραφικών αναλύσεων. Η μεθοδολογία συνδυάζει τους βαθμούς ελευθερίας αυτόνομης ολοκλήρωσης συστημάτων MED και της ολοκλήρωσής τους με την υπόλοιπη διεργασία, μέσω μίας γενικευμένης αναπαράστασης DMR, η οποία συστηματοποιεί τις επιλογές σχεδιασμού συστημάτων απόσταξης συναρτήσει των ενεργειακών αναγκών του υποβάθρου. Η αναπαράσταση DMR υποστηρίζει την μαθηματική προτυποποίηση της διαδικασίας σύνθεσης και ολοκλήρωσης MED (Σχήμα 8.7), αντικαθιστώντας τις κλασσικές γραφικές μεθόδους (Σχήμα 8.4) και αντιμετωπίζοντας σοβαρά ζητήματα που τις χαρακτηρίζουν. Το συντομευμένο, γραμμικό μοντέλο βελτιστοποίησης δίνει απαντήσεις όσον αφορά το σχεδιασμό (πίεση λειτουργίας και χωρητικότητα) αποστάξεων για την ελαχιστοποίηση του κόστους ενέργειας και επένδυσης, ενώ επιτρέπει την ενσωμάτωσή του εύκολα μαζί με άλλα σύνθετα προβλήματα σχεδιασμού που εμφανίζουν συστήματα απόσταξης.

9.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα και εφαρμογή

Οι μεθοδολογίες του παρόντος έργου έχουν αξιοποιηθεί επιτυχώς για την επίλυση πραγματικών προβλημάτων σχεδιασμού, όπως τον εντοπισμό συμπληρωματικών λιγνοκυτταρινούχων χημικών μονοπατιών (BIOCORE, 2014), και το σχεδιασμό αλγο-διυλιστηρίων (D-factory, 2014), αποστακτικών στηλών (CIMV, France) και πιλότου ζύμωσης για την παραγωγή μιγμάτων αλκοολών (Pyrgakis et al., 2016). Σε επόμενα στάδια, οι μεθοδολογίες μπορούν να αυτοματοποιηθούν ως ολοκληρωμένα πακέτα υπηρεσιών είτε με τη μορφή λογισμικού είτε ως διαδικτυακές υπηρεσίες επιτρέποντας την αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών φορέων που εμπλέκονται στον κλάδο της κυκλικής οικονομίας, όπως η βιομηχανία, οι παραγωγοί βιομάζας, οι ερευνητές, και λοιποί επαγγελματίες του κλάδου βιοτεχνολογίας και μηχανικών. Οι μεθοδολογίες μπορούν να υποστηρίξουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως την εύρεση τάσεων συμπληρωματικών γραμμών παραγωγής και τη λήψη αποφάσεων σε θέματα ολοκλήρωσης διεργασιών, προϊόντων και κοκτέιλ τροφοδοσιών, και το σχεδιασμό τουρμπίνων και ενεργοβόρων αποστάξεων.

Τεχνολογίες μελέτης εφαρμογών κυκλικής οικονομίας

Τα μαθηματικά μοντέλα ενεργειακής βελτιστοποίησης αποτελούν εργαλεία έτοιμα για χρήση, αρκεί να συνδυαστούν κατάλληλα με δεδομένα εισόδου που προέρχονται από γράφους χαρτογράφησης επιλογών σύνθεσης (BBR). Η εφαρμογή του γράφου, αν και είναι προφανής για τη χαρτογράφηση και την καταγραφή ισοζυγίων χημικών μονοπατιών (στο χαρτί), δεν είναι προφανής, όταν η πληροφορία που διαχειρίζεται μπορεί (και πρέπει) να είναι δυναμική. Δηλαδή, να αναβαθμίζεται και να εμπλουτίζεται συνεχώς με νέες χημείες, είδη τροφοδοσιών και πραγματικά (ποιοτικά και ποσοτικά) δεδομένα παραγωγής. Ο χρήστης (επενδυτής, παραγωγός, ερευνητής) χρειάζεται την ελευθερία να εισάγει δεδομένα κατά περίπτωση και να ελέγχει (τρέχει) σενάρια λειτουργίας με, ή χωρίς, την αλληλεπίδραση με δεδομένα άλλων χρηστών, όπως παρακείμενων βιομηχανιών, κοινοτήτων, παραγωγών βιομάζας, κ.ά.

Η αυτοματοποίηση της εφαρμογής του γράφου δεν αποτελεί εύκολη υπόθεση, ιδιαίτερα όταν διεσπαρμένα δεδομένα παρουσιάζουν σημαντικές ποιοτικές και ποσοτικές αποκλίσεις. Αν και τα υπάρχοντα στοιχεία που χρησιμοποιεί ο γράφος BBR (κόμβοι, σημεία μετάβασης, διασυνδέσεις) είναι επαρκή για την περιγραφή απλών συνδέσεων για την αξιοποίηση ποικίλων πληροφοριών, θα χρειαστεί να ενσωματώνει επιπλέον στρατηγικές και επίπεδα διαχείρισης δεδομένων που σχετίζονται με

Κεφάλαιο 9. Επίλογος

γεωγραφικά, τεχνικά, κοινωνικά, οικονομικά και άλλα χρονικώς μεταβαλλόμενα δεδομένα. Η εφαρμογή τεχνολογιών οντολογιών αποτελεί μία συνήθης πρακτική για την κατηγοριοποίηση διαφορετικών πληροφοριών, την ανάπτυξη βάσεων δεδομένων και την υποστήριξη δυνατοτήτων καταχώρησης, αναζήτησης, και σύνδεσης δεδομένων.

Οι δυνατότητες του προτεινόμενου γράφου είναι αναγκαίο να επεκταθούν, ώστε να ενσωματώνει περισσότερες επιλογές αποθήκευσης πληροφοριών και να συνδυαστεί με τεχνολογίες οντολογίας για τη κατασκευή δυναμικών BBR (σε ψηφιακή μορφή), που εξυπηρετούν τις ειδικές ανάγκες του χρήστη. Ακόμα και με τη χρήση απλών τεχνικών «has input/has output», κάθε χρήστης μπορεί να αναπτύξει τα δικά του δίκτυα (π.χ. αλυσίδες προϊόντων) ή/και να τα συνδυάσει με δίκτυα άλλων χρηστών και δεδομένα βιβλιοθηκών για να ελέγξει πιθανά σενάρια και αποδόσεις από την ανάπτυξη συνεργιών με άλλους χρήστες.

Τεχνολογίες ολοκλήρωσης διεργασιών

Η συνδυαστική μεθοδολογία σύνθεσης και ολοκλήρωσης διεργασιών προσφέρει επιλογές ανταλλαγής ροών χημικών και ενέργειας στοχεύοντας στην μείωση του ενεργειακού κόστους, το οποίο πολλές φορές είναι αποτρεπτικό και δεν μπορεί να υποστηρίξει τις επιλεγμένες χημείες. Ωστόσο, πέραν των ενεργειακών ζητημάτων, η βιομηχανία οφείλει να εξοικονομεί για οικονομικούς και περιβαλλοντικούς λόγους και άλλους πόρους ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία της, όπως το νερό διεργασίας.

Πέραν της ενεργειακής ολοκλήρωσης, τα μοντέλα ICT/CIT μπορούν να συνδυαστούν με τεχνολογίες ολοκλήρωσης νερού διεργασίας. Η τεχνολογία χρησιμοποιεί παρόμοιες τεχνικές μεταφόρτωσης χρησιμοποιημένου νερού μεταξύ πηγών και καταβοθρών για την εύρεση στόχων στην εξοικονόμηση φρέσκου νερού, κατά αντιστοιχία της εξοικονόμησης φρέσκων παροχών θέρμανσης/ψύξης. Η ολοκλήρωση νερού προτείνεται να συνδυαστεί με τη σύνθεση συστημάτων χημικού/φυσικού καθαρισμού μολυσμένου νερού για σκοπούς ανακύκλωσης, οι οποίες θα υποστηρίζουν τόσο μεμονωμένες διεργασίες, όσο και πολλές διασυνδεδεμένες διεργασίες που επικοινωνούν μέσω των συστημάτων ανακύκλωσης. Οι καταρράκτες ενέργειας και νερού μπορούν να συνδυαστούν κατάλληλα, ενώ παράλληλα ο γράφος θα υποστηρίζει ποικίλους βαθμούς ελευθερίας που αφορούν υφιστάμενες/υποψήφιες ανταγωνιστικές διεργασίες, συστήματα ανακύκλωσης νερού και διαχείρισης (υγρών αστικών) λυμάτων, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και στρατηγικές κατανεμημένων

Κεφάλαιο 9. Επίλογος

βιοδιυλιστηρίων που ολοκληρώνονται με τις κατά τόπους ανάγκες της βιομηχανίας, του γεωργικού και κτηνοτροφικού τομέα και της κοινωνίας.

Μία ακόμα σημαντική επέκταση των μοντέλων ICT/CIT αφορά τη σύνδεση της ολοκλήρωσης Συνολικής Μονάδας με το σχεδιασμό του δικτύου εναλλακτών που εξυπηρετούν τόσο τις επιμέρους διεργασίες, όσο και τις ανάγκες της Συνολικής Μονάδας. Ο σχεδιασμός δικτύων εναλλακτών αποτελεί μία ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία, πόσο μάλλον όταν αφορά υποψήφιας διεργασίες και συνδυάζεται με τις ανάγκες της συμπαραγωγής και το κόστος εναλλακτών σε επίπεδο Συνολικής Μονάδας.

Τέτοια προβλήματα έχουν μελετηθεί αρκετά στη βιβλιογραφία για τη σύνθεση δικτύων διεργασιών, ωστόσο δεν έχει αντιμετωπιστεί συστηματικά, όταν οι διεργασίες αποτελούν βαθμούς ελευθερίας και τμήματα Συνολικών Μονάδων. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος μεγαλώνει όταν συνδυάζεται με τη βελτιστοποίηση της συμπαραγωγής και των επιπέδων ατμού. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.5.6., τα μοντέλα ICT/CIT περιλαμβάνουν βαθμούς ελευθερίας για την εφαρμογή εναλλακτών και την εξαγωγή σημαντικών πληροφοριών που θα υποστηρίξουν τα απαιτητικά στάδια σχεδιασμού των δικτύων. Ωστόσο, στην ενότητα 5.5.6., η βελτιστοποίηση του αριθμού εναλλακτών (ή της συνολικής επιφάνειας εναλλαγής) εφαρμόστηκε ως δευτερογενές στάδιο ανάλυσης μετά την επιλογή χαρτοφυλακίων. Οι σχεδιαστικές προκλήσεις αφορούν (α) τη συστηματική κατασκευή σκαριφημάτων δικτύων για κάθε υποψήφια Συνολική Μονάδα (αλυσίδες προϊόντων) ή τουλάχιστον τη στόχευση του κόστους εναλλακτών, (β) παράλληλα με τη βελτιστοποίηση των παροχών θέρμανσης και ψύξης, και (γ) σε συνδυασμό με τη σχετική χαλάρωση των βέλτιστων βοηθητικών παροχών για σκοπούς μείωσης του αριθμού και του κόστους των εναλλακτών.

Μία ακόμα πρόκληση που συχνά αντιμετωπίζεται κατά την ολοκλήρωση Συνολικών Μονάδων είναι η χρήση διαφορετικών ΔT_{min} ανά διεργασία. Το πρόβλημα έχει μελετηθεί στη βιβλιογραφία με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων για δεδομένες διεργασίες και δεδομένες τιμές ΔT_{min} . Ωστόσο, τίθενται επιπλέον ερωτήματα, όταν το πρόβλημα αφορά υποψήφιας διεργασίες ή ακόμα και περιπτώσεις βελτιστοποίησης του ΔT_{min} ως συνεχής μεταβλητή. Η επίλυση τέτοιων προβλημάτων δεν είναι προφανής και σε ορισμένες συνθήκες δεν είναι εφικτή η χρήση γραμμικού προγραμματισμού. Ωστόσο, οι αναπαραστάσεις ICT και CIT προσφέρουν έναν νέο τρόπο σκέψης ταυτόχρονης ολοκλήρωσης σε διαφορετικά ΔT_{min} , ο οποίος μπορεί να συνεισφέρει στην έρευνα τέτοιων προβλημάτων.

Και τα δύο μοντέλα, εφαρμόζουν άμεση ολοκλήρωση (κατά $\Delta T_{min}^{process}$ κατά μήκος των καταρρακτών), ενώ περιφερειακές ροές εισάγουν-εξάγουν θερμότητα μεταξύ διαφορετικών ενδιάμεσων για σκοπούς

Κεφάλαιο 9. Επίλογος

έμμεσης ολοκλήρωσης (κατά ΔT_{min}^{site}). Ανεξάρτητα από το γεγονός αν τα ρεύματα ανήκουν στην ίδια ή διαφορετικές διεργασίες, αυτή η τεχνική δημιουργεί τις βάσεις για ολοκλήρωση ρευμάτων σε διαφορετικά επίπεδα ΔT_{min} μέσω διασταυρούμενων ενδιάμεσων. Σε αυτό το πλαίσιο, αξίζει να διερευνηθούν συστήματα διασταυρούμενων καταρρακτών ή καταρράκτες διασταυρούμενων ενδιάμεσων που υποστηρίζουν διαφορετικά ΔT_{min} , ή ακόμα και η αντιμετώπιση των θερμοκρασιακών ενδιάμεσων ως επιπλέον βαθμούς ελευθερίας με χρήση λογικών περιορισμών και δυαδικών μεταβλητών.

Μία ακόμα επέκταση του προβλήματος σύνθεσης και ολοκλήρωσης αφορά την εκτίμηση της συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όταν η λειτουργία της Συνολικής Μονάδας υπόκειται σε εποχικότητα, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται μη-γραμμικές συσχετίσεις της πραγματικής (εποχικής) ροής ατμού με τη χωρητικότητα και τη μέγιστη ισχύ της τουρμπίνας.

Τέλος, όσον αφορά το εργαλείο ολοκληρωμένου σχεδιασμού αποστακτικών στηλών, προτείνεται η ενσωμάτωση και ο συνδυασμός του γράφου DMR με άλλες υπερδομές σύνθεσης και σχεδιασμού TCDS, συστοιχιών απόσταξης πολυσυστατικών μιγμάτων και αντίδρασης-απόσταξης για την ενίσχυση των αποδόσεων ενεργειακής ολοκλήρωσης.

Με κίνητρα τις προκλήσεις που εμφανίζονται κατά την εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας, το παρόν έργο κατέληξε στην ανάπτυξη γενικευμένων μεθοδολογιών και υπολογιστικών εργαλείων σχεδιασμού που αντικαθιστούν επιτυχώς τις κλασσικές γραφικές μεθόδους της βιβλιογραφίας. Ο γράφος BBR και τα αναβαθμισμένα μοντέλα μεταφόρτωσης ICT και CIT εντάσσουν τις διαδικασίες ολοκλήρωσης σε νέο πλαίσιο εφαρμογής της και μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για την αντιμετώπιση μεγάλων και πολύπλοκων προβλημάτων σχεδιασμού. Τα εργαλεία προορίζονται για τη διερεύνηση συνεργειών μεταξύ διαφορετικών φορέων, γεγονός το οποίο αποτελεί βασική προϋπόθεση για αειφόρο ανάπτυξη.

Βιβλιογραφία

1. BIOCORE, a biorefinery concept, 2014. www.biocore-europe.org (accessed 17 January 2020).
2. D-factory, THE MICRO ALGAE BIOREFINERY, 2017. <https://algaebiorefineryconference.eu/d-factory/> (accessed 21 March 2020)
3. CIMV, The biorefinery concept. <http://www.cimv.fr/> (accessed 17 January 2020)
4. Pyrgakis, K.A., de Vrije, T., Budde, M.A.W., Kyriakou, K., López-Contreras, A.M., Kokossis, A.C., 2016. A process integration approach for the production of biological iso-propanol, butanol and ethanol using gas stripping and adsorption as recovery methods. *Biochemical Engineering Journal* 116, 176-194

Παράρτημα Α

Μαθηματικά μοντέλα βελτιστοποίησης

Στο Παράρτημα Α συνοψίζονται οι εξισώσεις των μοντέλων βελτιστοποίησης που παρουσιάζονται στο παρόν έργο. Οι εξισώσεις αφορούν τη σύνθεση χαρτοφυλακίων διεργασιών (A1), τις τεχνικές ενεργειακής ολοκλήρωσης Συνολικών Μονάδων (A2), τα μοντέλα εκτίμησης της συμπαραγωγής (A3) και το σχεδιασμό ενεργειακά ολοκληρωμένων συστημάτων απόσταξης (A4). Τα επιμέρους πακέτα εξισώσεων και οι αντικειμενικές συναρτήσεις του Παραρτήματος Α συνδυάζονται κατάλληλα σύμφωνα με τις ειδικές συνθήκες και τις ανάγκες κάθε προβλήματος βελτιστοποίησης και ακολουθώντας τις αναλυτικές οδηγίες των Κεφαλαίων 4, 5, 6, 7 και 8.

A.1. Εξισώσεις γράφων σύνθεσης διεργασιών

Οι εξισώσεις των γράφων BBR και aBBR συνθέτουν σενάρια χαρτοφυλακίων τροφοδοσιών, διεργασιών και προϊόντων και συνδυάζονται κατάλληλα με τα μοντέλα ενεργειακής ολοκλήρωσης (ICT/CIT) για την αξιολόγηση των χαρτοφυλακίων.

A.1.1. Biomass Bipartite graph Representation (BBR)

Το BBR χρησιμοποιείται για τη χαρτογράφηση (Σχήμα 4.1) των επιλογών σύνθεσης υποψήφιων ή/και υφιστάμενων καταναμημένων διεργασιών. Οι ακόλουθες εξισώσεις χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των ισοζυγίων μάζας του BBR.

$$A_t \cdot F_t = A_{t'} \cdot F_{t'} \quad \forall p \in P, t \in T_p^{in}, t' \in T_p^{out} \quad Eq. 4.1$$

$$\sum_{t \in T_{pr}^{in}} F_t = \sum_{t \in T_{pr}^{out}} F_t + F_{pr} \quad \forall pr \in PR \quad Eq. 4.2$$

$$F_t \geq y_t \cdot F_t^{LB} \cdot \bar{F}_t \quad \forall t \in T \quad Eq. 4.3$$

Παράρτημα Α

$$F_t \leq y_t \cdot \bar{F}_t \quad \forall t \in T \quad \text{Eq. 4.4}$$

A.1.2. advanced Biomass Bipartite graph Representation (aBBR)

Εναλλακτική διατύπωση των ισοζυγίων μάζας του BBR, όταν το πρόβλημα εξαρτάται από την εποχική διαθεσιμότητα των τροφοδοσιών βιομάζας. Οι εξισώσεις του aBBR βασίζονται στη γενική αναπαράσταση του Σχήματος 6.7.

$$\sum_{tu \in T_{pr}^s} f_{tu,b,se-1} + \sum_{tu \in T_{pr}^{in}} f_{tu,b,se} = \sum_{tu \in T_{pr}^{out}} f_{tu,b,se} + [f_{b,se}^w]_{pr=pr1} \quad \forall pr \in PR_{upper}, b \in B, se \in SE \quad \text{Eq. 6.6}$$

$$f_{tu,b,se} \cdot R_p = f_{tu',b,se} \quad \forall pr \in P_{upper}, b \in B, tu \in T_p^{in}, tu' \in T_p^{out}, se \in SE \quad \text{Eq. 6.7}$$

$$\sum_{tl \in T_{pr}^s} f_{tl,se-1} + \sum_{\substack{tu \in T_{pr}^{in} \\ b \in B}} f_{tu,b,se} = \sum_{tl \in T_{pr}^{out}} f_{tl,se} \quad \forall pr \in I, se \in SE \quad \text{Eq. 6.8}$$

$$f_{tu,b,se} \cdot R_{pr,b}^{fra} = f_{tl,se} \quad \forall p = p10, b \in B, pr \in I, tu \in T_p^{in}, tl \in T_{pr}^{in}, se \in SE \quad \text{Eq. 6.9}$$

$$\sum_{tl \in T_{pr}^s} f_{tl,se-1} + \sum_{tl \in T_{pr}^{in}} f_{tl,se} = \sum_{tl \in T_{pr}^{out}} f_{tl,se} + f_{pr,se}^{PR} \quad \forall pr \in PR_{lower}, se \in SE \quad \text{Eq. 6.10}$$

$$f_{tl,se} \cdot R_p = f_{tl',se} \quad \forall P_{lower}, tl \in T_p^{in}, tl' \in T_p^{out}, se \in SE \quad \text{Eq. 6.11}$$

$$IC_p \leq y_p \cdot UB_t^f \quad \forall p \in P \quad \text{Eq. 6.12}$$

$$IC_p \geq y_p \cdot LB_t^f \quad \forall p \geq p10 \quad \text{Eq. 6.13}$$

$$(1 - D_p) \cdot IC_p \leq \sum_{b \in B} f_{tu,b,se} \quad \forall p = p10, tu \in T_p^{in}, se \in SE \quad \text{Eq. 6.14}$$

$$IC_p \geq \sum_{b \in B} f_{tu,b,se} \quad \forall p \in P, tu \in T_p^{in}, se \in SE \quad \text{Eq. 6.15}$$

$$(1 - D_p) \cdot IC_p \leq f_{tl,se} \quad \forall p \in P, tl \in T_p^{in}, se \in SE \quad \text{Eq. 6.16}$$

$$IC_p \geq f_{tl,se} \quad \forall p \in P, tl \in T_p^{in}, se \in SE \quad \text{Eq. 6.17}$$

Παράρτημα Α

$$\sum_{t \in T_{pr}^S} f_{tu,b,se1-1} = \sum_{t \in T_{pr}^S} f_{tu,b,se4} \quad \forall pr \in (PR_{upper} \cup I), b \in B \quad Eq. 6.18$$

$$\sum_{t \in T_{pr}^S} f_{tl,se1-1} = \sum_{t \in T_{pr}^S} f_{tl,se4} \quad \forall pr \in PR_{lower} \quad Eq. 6.19$$

όπου $PR_{upper} = [pr1, \dots, pr6]$, $P_{upper} = [p1, \dots, p9]$, $PR_{lower} = [pr10, \dots, PRN]$, $I = [pr7, \dots, pr9]$, $P_{lower} = [p11, \dots, PN]$

A.2. Μοντέλα ενεργειακής μεταφόρτωσης

A.2.1. Inter-Cascade Transshipment (ICT)

Χρησιμοποιείται για την περιγραφή των ισοζυγίων ενέργειας της γενικευμένης αναπαράστασης του Σχήματος 5.2 και εφαρμόζεται σε συστήματα ολοκλήρωσης πολλαπλών-καταρρακτών.

$$Min \quad E^{TS} = \sum_{m \in S} c_m \cdot Q_m^{TS} + \sum_{n \in W} c_n \cdot Q_n^{TS} \quad Eq. 5.13$$

s. t.

$$R_{p,k-1} + \sum_{m \in S_k} Q_{pm}^S + \sum_{\substack{i \in HS_{pk} \\ t \in T_p^{in}}} Q_{ik}^H \cdot A_t \cdot f_t = R_{pk} + \sum_{n \in W_k} Q_{pn}^W + \sum_{\substack{j \in CS_{pk} \\ t \in T_p^{in}}} Q_{jk}^C \cdot A_t \cdot f_t, \quad \forall p \in P, k \in K \quad Eq. 5.1$$

$$R_{n-1}^W + \sum_{p \in P} Q_{pn}^W = \sum_{m \in S_n} Q_{mn} + Q_n^{TS} + R_n^W, \quad \forall n \in W \quad Eq. 5.2$$

$$Q_m^{TS} + \sum_{n \in W_m} Q_{mn} = \sum_{p \in P} Q_{pm}^S, \quad \forall m \in S \quad Eq. 5.3$$

$$R_{p,0} = R_{p,NK} = 0, \quad R_0^W = R_{NW}^W = 0 \quad Eq. 5.4$$

$$Q_{p,m}^S \leq y_m \cdot UB_m^S, \quad p \in P, m \in S \quad Eq. 5.5$$

$$Q_{p,n}^W \leq y_n \cdot UB_n^W, \quad p \in P, n \in W \quad Eq. 5.6$$

Παράρτημα Α

$$Q_m^{TS} \leq y_m \cdot UB_m^S, \quad m \in S \quad Eq. 5.7$$

$$Q_n^{TS} \leq y_n \cdot UB_n^W, \quad n \in W \quad Eq. 5.8$$

$$Q_{p,m}^S \leq UB_m^S \cdot \sum_{t \in T_p^{in}} y_t, \quad p \in P, m \in S \quad Eq. 5.9$$

$$Q_{mn} \leq y_n \cdot UB_n^W, \quad m \in S, n \in W_m \quad Eq. 5.10$$

$$y_m = y_n, \quad m \in S, n \in W_m \quad Eq. 5.11$$

$$\sum_{m \in S} y_m \leq N^H \quad and/or \quad \sum_{n \in W} y_n \leq N^C \quad and/or \quad \sum_{m \in S} y_m + \sum_{n \in W} y_n \leq N^U \quad Eq. 5.12$$

A.2.2. Cross-Interval Transshipment (CIT)

Χρησιμοποιείται για την περιγραφή των ισοζυγίων ενέργειας της γενικευμένης αναπαράστασης του Σχήματος 5.5 και εφαρμόζεται για το σύστημα ολοκλήρωσης TSC.

$$Min \quad E^{TS} = \sum_{m \in S} c_m \cdot Q_m^{TS} + \sum_{n \in W} c_n \cdot Q_n^{TS} \quad Eq. 5.27$$

s.t.

$$R_{i,k-1} + Q_{ik}^H \cdot \sum_{p \in P_i} \sum_{t \in T_p^{in}} A_t \cdot f_t = R_{ik} + \sum_{j \in CS_k} Q_{ijk} + \sum_{n \in W_k} Q_{ink}, \quad \forall k \in K, i \in HS'_k \quad Eq. 5.14$$

$$R_{m,k-1} + \sum_{m' \in S_k} Q_{m'} = R_{mk} + \sum_{j \in CS_k} Q_{mjk}, \quad \forall k \in K, m \in S'_k \quad Eq. 5.15$$

$$\sum_{i \in HS'_k} Q_{ijk} + \sum_{m \in S'_k} Q_{mjk} = Q_{jk}^C \cdot \sum_{p \in P_j} \sum_{t \in T_p^{in}} A_t \cdot f_t, \quad \forall k \in K, j \in CS_k \quad Eq. 5.16$$

$$R_{n-1}^W + \sum_{i \in HS'_k} Q_{ink} = R_n^W + Q_n^{TS} + \sum_{m \in S_n} Q_{mn}, \quad \forall k \in K, n \in W_k \quad Eq. 5.17$$

$$Q_m^{TS} + \sum_{n \in W_m} Q_{mn} = Q_m, \quad \forall m \in S \quad Eq. 5.18$$

$$R_{i,0} = R_{i,NK} = 0; \quad R_{m,0} = R_{m,NK} = 0; \quad R_0^W = R_{NW}^W = 0; \quad Q_{ijk} = 0, \quad \forall (i,j) \in HCS, k \in K \quad Eq. 5.19$$

Παράρτημα Α

$$Q_m \leq y_m \cdot UB_m^S, \quad \forall m \in S \quad Eq. 5.20$$

$$\sum_{i \in H'_k} Q_{ink} \leq y_n \cdot UB_n^W, \quad \forall k \in K, n \in W_k \quad Eq. 5.21$$

$$Q_m^{TS} \leq y_m \cdot UB_m^S, \quad \forall m \in S \quad Eq. 5.22$$

$$Q_n^{TS} \leq y_n \cdot UB_n^W, \quad \forall n \in W \quad Eq. 5.23$$

$$Q_{mn} \leq y_n \cdot UB_n^W, \quad \forall m \in S, n \in W_m \quad Eq. 5.24$$

$$y_m = y_n, \quad \forall m \in S, n \in W_m \quad Eq. 5.25$$

$$\sum_{m \in S} y_m \leq N^H \text{ and/or } \sum_{n \in W} y_n \leq N^C \text{ and/or } \sum_{m \in S} y_m + \sum_{n \in W} y_n \leq N^U \quad Eq. 5.26$$

A.2.3: Υπολογισμός αριθμού εναλλακτών ενέργειας της Συνολικής μονάδας

Το πακέτο εξισώσεων Eq.5.30 προστίθεται στους περιορισμούς του μοντέλου CIT στην περίπτωση όπου στόχος του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση του αριθμού εναλλακτών. Επίσης, η αντικειμενική συνάρτηση Eq.5.27 αντικαθίσταται από την εξίσωση υπολογισμού του αριθμού των εναλλακτών.

$$MIN \ HE = \sum_{\substack{i \in HS \\ j \in CS}} y_{ij}^{HC} + \sum_{\substack{i \in HS \\ n \in W}} y_{in}^{HU} + \sum_{\substack{m \in S \\ j \in CS}} y_{mj}^{CU} \quad Eq. 5.31$$

s.t.

Eq.5.14 - Eq.5.26 (CIT)

and

$$\sum_{k \in K_p^{UP}} Q_{ijk} \leq y_{ij}^{HC_{UP}} \cdot U_{ij}^{UP} \quad \forall i \in HS, j \in CS, p \in P \quad Eq. 5.30.1$$

$$\sum_{k \in K_p^{UP}} Q_{ink} \leq y_{in}^{HU_{UP}} \cdot U_{in}^{UP} \quad \forall i \in HS, n \in W \quad Eq. 5.30.2$$

$$\sum_{k \in K_p^{UP}} Q_{mjk} \leq y_{mj}^{CU_{UP}} \cdot U_{mj}^{UP} \quad \forall m \in S, j \in CS \quad Eq. 5.30.3$$

Παράρτημα Α

$$\sum_{k \in K_p^{DO}} Q_{ijk} \leq y_{ij}^{HC_DO} \cdot U_{ij}^{DO} \quad \forall i \in HS, j \in CS, p \in P \quad Eq. 5.30.4$$

$$\sum_{k \in K_p^{DO}} Q_{ink} \leq y_{in}^{HU_DO} \cdot U_{in}^{DO} \quad \forall i \in HS, n \in W \quad Eq. 5.30.5$$

$$\sum_{k \in K_p^{DO}} Q_{mjk} \leq y_{mj}^{CU_DO} \cdot U_{mj}^{DO} \quad \forall m \in S, j \in CS \quad Eq. 5.30.6$$

A.2.4. Εναλλακτικοί τύποι αντικειμενικών συναρτήσεων

Η συνάρτηση Eq.5.28 αντικαθιστά τις Eq.5.13/Eq.5.27, όταν στόχος του προβλήματος είναι η μεγιστοποίηση της κερδοφορίας και υπόκειται στους περιορισμούς του BRR (A.1.1.) και του ICT (A.2.1.) ή του CIT (A.2.2.).

$$Max \quad Z = (profits - capex - opex - energy - transport - feed) \cdot 50\% \quad Eq. 5.28$$

- $profits \left[\frac{M\epsilon}{yr} \right] = \sum_{pr \in PR} F_{pr} \cdot price_{pr}$
- $capex \left[\frac{M\epsilon}{yr} \right] = \sum_{p \in P} \sum_{t \in T_p^{in}} F_t \cdot CAPEX_p$
- $opex \left[\frac{M\epsilon}{yr} \right] = \sum_{p \in P} \sum_{t \in T_p^{in}} F_t \cdot OPEX_p$
- $energy \left[\frac{M\epsilon}{yr} \right] = \sum_{m \in S} c_m \cdot Q_m^{TS} + \sum_{n \in W} c_n \cdot Q_n^{TS}$
- $transport \left[\frac{M\epsilon}{yr} \right] = 200 \cdot 2 \cdot 0.625 \cdot \frac{F_{n_1}}{50,000} \cdot \frac{8,000}{1,000,000}$
- $feed \left[\frac{M\epsilon}{yr} \right] = F_{n_1} \cdot price_{n_1}$
- $taxes = Z \cdot 50\%$

Οι συναρτήσεις Eq.6.20 ή Eq.6.21 αντικαθιστούν τις Eq.5.13/Eq.5.27, όταν στόχος του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση του ετήσιου κόστους ενέργειας (Eq.6.20) ή η μεγιστοποίηση της ετήσιας κερδοφορίας (Eq.6.21) της Συνολικής Μονάδας, σε συνθήκες όπου το πρόβλημα εξαρτάται από την εποχική διαθεσιμότητα των τροφοδοσιών βιομάζας. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις Eq.6.20 ή Eq.6.21 υπόκεινται στους περιορισμούς του aBRR (A.1.2.) και του ICT (A.2.1.) ή του CIT (A.2.2.).

$$E^{TS} = \frac{\sum_{se} E_{se}^{TS}}{4} = \frac{\sum_{m \in S} c_m \cdot Q_{m,se}^{TS} + \sum_{n \in W} c_n \cdot Q_{n,se}^{TS}}{4} \quad Eq. 6.20$$

Παράρτημα Α

ή

$$\text{Max } Z = \left(\frac{\text{profits}}{4} - \text{capex} - \frac{\text{opex}}{4} - \frac{\text{energy}}{4} - \frac{\text{transport}}{4} - \frac{\text{feed}}{4} \right) \cdot 50\% \quad \text{Eq. 6.21}$$

- $\text{profits} \left[\frac{\text{M€}}{\text{yr}} \right] = \sum_{pr \in PR} f_{pr,se}^{PR} \cdot \text{price}_{pr} \quad \forall se \in SE$
- $\text{capex} = \sum_{p \in P} (IC_p \cdot CAPEX_p)$
- $\text{opex} \left[\frac{\text{M€}}{\text{yr}} \right] = \sum_{p \in P} \left[\left(\sum_{b \in B} \sum_{tu \in T_p^{\text{out}}} f_{tu,b,se} + \sum_{tl \in T_p^{\text{out}}} f_{tl,se} \right) \cdot OPEX_p \right] \quad \forall se \in SE$
- $\text{energy} \left[\frac{\text{M€}}{\text{yr}} \right] = \sum_{m \in S} c_m * Q_{m,se}^{TS} + \sum_{n \in W} c_n * Q_{n,se}^{TS} \quad \forall se \in SE$
- $\text{transport} \left[\frac{\text{M€}}{\text{yr}} \right] = \frac{40}{10^6} \left[\frac{\text{M€} \cdot \text{hr}}{\text{kg} \cdot \text{yr}} \right] \cdot \sum_{b \in B} f_{t1,b,se}$
- $\text{feed} \left[\frac{\text{M€}}{\text{yr}} \right] = \sum_{b \in B} f_{t1,b,se} \cdot \text{bioprice}_b$
- $\text{taxes} = Z \cdot 50\%$

A.3: Μοντέλα εκτίμησης της συμπαραγωγής ισχύος με χρήση τουρμπίνων

Στα πλαίσια του παρόντος έργου παρουσιάζονται δύο εναλλακτικές εκδόσεις του μοντέλου εκτίμησης της συμπαραγωγής, οι οποίες παρουσιάζουν διαφορετικές απαιτήσεις στην προετοιμασία κάθε μοντέλου και ποσοστά ακρίβειας υπολογισμού της ισχύος. Και οι δύο εκδόσεις συνδυάζονται με τα μοντέλα ICT (A.2.1.) ή CIT (A.2.2.), και προαιρετικά με το μοντέλο BBR (A.1.1.) όταν το πρόβλημα απαιτεί τη σύνθεση διεργασιών.

A.3.1. THM.v1: Απλουστευμένο μοντέλο εκτίμησης της συμπαραγωγής

$$\text{Min } Z = \sum_{m \in S} Q_m^{TS} \cdot c_m + \sum_{n \in W'} Q_n^{TS} \cdot c_n - \sum_{\substack{m \in S \\ n \in W_m}} E_n^{\text{max}} \cdot c_e \quad \text{Eq. 7.20}$$

s.t.

$$E_n^{\text{max}} = \frac{1}{B_n} \left(\Delta H_{is_n} \cdot \frac{R_n^W}{q_n^{\text{in}}} - A_n \right) \quad \text{Eq. 7.11}$$

and

Eq.5.1 - Eq.5.12 (ICT) or Eq.5.14 - Eq.5.26 (CIT)

Παράρτημα Α

όπου:

$$\bullet \quad \overline{\Delta H}_{is_n} = \frac{\Delta T_n^{sat}}{1854 - 1931 \cdot q_n^{in}} \quad Eq. 7.14$$

$$\bullet \quad q_n^{out} = q_n^{in} + c_p \cdot \Delta T_n^{sat} - \frac{1}{B_n} \cdot \overline{\Delta H}_{is_n} \quad \forall n \in W_m, m \in S \quad Eq. 7.24$$

$$\bullet \quad \text{για } E^{max} < E^b$$

$$- \quad A = a_0 + a_1 \cdot T_{in}^{sat} + a_2 \cdot \Delta T^{sat} + a_3 \cdot q^{in}$$

$$- \quad B = a_4 + a_5 \cdot T_{in}^{sat} + a_6 \cdot \Delta T^{sat} + a_7 \cdot q^{in} \quad Eq. 7.25$$

$$\bullet \quad \text{για } E^{max} > E^b$$

$$- \quad A = a_0 + a_1 \cdot T_{in}^{sat} + a_2 \cdot \Delta T^{sat} + a_3 \cdot q^{in}$$

$$- \quad B = a_4 + a_5 \cdot T_{in}^{sat} + a_6 \cdot \Delta T^{sat} + a_7 \cdot q^{in} \quad Eq. 7.26$$

A.3.2. THM.v2: Αναλυτικό μοντέλο εκτίμησης της συμπαράγωγής

$$Min \quad Z = \sum_{m \in S} Q_m^{TS} \cdot c_m + \sum_{n \in W'} Q_n^{TS} \cdot c_n - E_{cogen} \cdot c_{cogen} \quad Eq. 7.20$$

s.t.

$$E_{n',n''}^1 \leq \frac{1}{B_{n',n''}^1} \cdot \left(\overline{\Delta H}_{is_{n',n''}} \cdot \frac{R_{n'}}{q_{n',n''}^{in}} - A_{n',n''}^1 \right) + (1 - y_{n',n''}) \cdot U \quad Eq. 7.34.1$$

$$E_{n',n''}^1 \geq \frac{1}{B_{n',n''}^1} \cdot \left(\overline{\Delta H}_{is_{n',n''}} \cdot \frac{R_{n'}}{q_{n',n''}^{in}} - A_{n',n''}^1 \right) + (y_{n',n''} - 1) \cdot U \quad Eq. 7.34.2$$

$$E_{n',n''}^1 \leq y_{n',n''} \cdot U \quad Eq. 7.34.3$$

$$E_{n',n''}^1 \geq -y_{n',n''} \cdot U \quad Eq. 7.34.4$$

$$\forall n', n'' \in W_m: T_{n'} > T_{n''}$$

$$E_{n',n''}^2 \leq \frac{1}{B_{n',n''}^2} \cdot \left(\overline{\Delta H}_{is_{n',n''}} \cdot \frac{R_{n'}}{q_{n',n''}^{in}} - A_{n',n''}^2 \right) + (1 - y_{n',n''}) \cdot U \quad Eq. 7.35.1$$

$$E_{n',n''}^2 \geq \frac{1}{B_{n',n''}^2} \cdot \left(\overline{\Delta H}_{is_{n',n''}} \cdot \frac{R_{n'}}{q_{n',n''}^{in}} - A_{n',n''}^2 \right) + (y_{n',n''} - 1) \cdot U \quad Eq. 7.35.2$$

$$E_{n',n''}^2 \leq y_{n',n''} \cdot U \quad Eq. 7.35.3$$

Παράρτημα Α

$$E_{n',n''}^2 \geq -y_{n',n''} \cdot U \quad \text{Eq. 7.35.4}$$

$$\forall n', n'' \in W_m: T_{n'} > T_{n''}$$

$$\frac{E_{n',n''}^1 + E_{n',n''}^2}{2} \leq y_{n',n''}^C \cdot E^b + (1 - y_{n',n''}^C) \cdot U \quad \forall n', n'' \in W_m: T_{n'} > T_{n''} \quad \text{Eq. 7.36.1}$$

$$\frac{E_{n',n''}^1 + E_{n',n''}^2}{2} \geq (1 - y_{n',n''}^C) \cdot E^b \quad \forall n', n'' \in W_m: T_{n'} > T_{n''} \quad \text{Eq. 7.36.2}$$

$$\overline{E_{n',n''}^1} \leq E_{n',n''}^1 + (1 - y_{n',n''}^C) \cdot U \quad \text{Eq. 7.38.1}$$

$$\overline{E_{n',n''}^1} \geq E_{n',n''}^1 + (y_{n',n''}^C - 1) \cdot U \quad \text{Eq. 7.38.2}$$

$$\overline{E_{n',n''}^1} \leq y_{n',n''}^C \quad \text{Eq. 7.38.3}$$

$$\overline{E_{n',n''}^1} \geq -y_{n',n''}^C \quad \text{Eq. 7.38.4}$$

$$\overline{E_{n',n''}^2} \leq E_{n',n''}^2 + y_{n',n''}^C \cdot U \quad \text{Eq. 7.38.5}$$

$$\overline{E_{n',n''}^2} \geq E_{n',n''}^2 - y_{n',n''}^C \cdot U \quad \text{Eq. 7.38.6}$$

$$\overline{E_{n',n''}^2} \leq (1 - y_{n',n''}^C) \cdot U \quad \text{Eq. 7.38.7}$$

$$\overline{E_{n',n''}^2} \geq (y_{n',n''}^C - 1) \cdot U \quad \text{Eq. 7.38.8}$$

$$\forall n', n'' \in W_m: (T_{n'} > T_{n''})$$

$$E_{n',n''} = \overline{E_{n',n''}^1} + \overline{E_{n',n''}^2} \quad \text{Eq. 7.37}$$

$$E_{cogen} = \sum_{\forall n', n'' \in W_m: T_{n'} > T_{n''}} E_{n',n''} \quad \text{Eq. 7.39}$$

Προαιρετικές εξισώσεις σύνθεσης παράλληλου συστήματος βοηθητικών παροχών (Σχήμα 7.13):

$$2 \cdot y_{n',n''} \leq y_{n'} + y_{n''} \quad \forall n', n'' \in W_m: T_{n'}^{sat} > T_{n''}^{sat} \quad \text{Eq. 7.28}$$

$$\sum_{n'' \in W: T_{n'} > T_{n''}} y_{n',n''} \leq 1 \quad \forall n' \in W_m \quad \text{Eq. 7.29}$$

$$\sum_{n' \in W: T_{n'} > T_{n''}} y_{n',n''} \leq 1 \quad \forall n'' \in W_m \quad \text{Eq. 7.30}$$

$$\sum_{n \in W_m} y_n - 1 = \sum_{n', n'' \in W_m: T_{n'}^{sat} > T_{n''}^{sat}} y_{n',n''} \quad \text{Eq. 7.31}$$

Παράρτημα Α

$$y_{n'} + y_{n''} \leq 1 \quad \forall n', n'' \in W_m: (T_{n'} - T_{n''} \leq \Delta T^{LB}) \quad Eq. 7.32$$

όπου:

- για $E^{max} < E^b$
 - $A^1 = a_0 + a_1 \cdot T_{in}^{sat} + a_2 \cdot \Delta T^{sat} + a_3 \cdot q^{in}$
 - $B^1 = a_4 + a_5 \cdot T_{in}^{sat} + a_6 \cdot \Delta T^{sat} + a_7 \cdot q^{in}$

Eq. 7.25

- για $E^{max} > E^b$
 - $A^2 = a_0 + a_1 \cdot T_{in}^{sat} + a_2 \cdot \Delta T^{sat} + a_3 \cdot q^{in}$
 - $B^2 = a_4 + a_5 \cdot T_{in}^{sat} + a_6 \cdot \Delta T^{sat} + a_7 \cdot q^{in}$

Eq. 7.26

A.4. DMR: Σχεδιασμός ενεργειακά ολοκληρωμένων συστημάτων απόσταξης

$$MIN \quad TAC = \left(\sum_{m \in S} c_m \cdot Q_m^S + \sum_{n \in W} c_n \cdot Q_n^W \right) + \frac{1}{a_f} \cdot \left(\sum_{d \in D} \sum_{i \in H_d^{EF}} a_i \cdot Y_i^H + y_i \cdot b_i \right) \quad Eq. 8.24$$

or

$$MIN \quad TCP = w_1 \cdot \left(\sum_{m \in S} c_m \cdot Q_m^S + \sum_{n \in W} c_n \cdot Q_n^W \right) + w_2 \cdot \left(\sum_{d \in D} \sum_{i \in H_d^{EF}} a_i \cdot Y_i^H + y_i \cdot b_i \right) \quad Eq. 8.25$$

s.t.

$$Y_i^H = Y_j^C, \quad \forall (i, j) \in HC \quad Eq. 8.13$$

$$\sum_{i \in H_d^{EF}} Y_i^H = 1, \quad \forall d \in D \quad Eq. 8.14$$

$$Y_i^H \geq y_i \cdot Y^{LB}, \quad \forall d \in D, i \in H_d^{EF} \quad Eq. 8.15$$

$$Y_i^H \leq y_i, \quad \forall d \in D, i \in H_d^{EF} \quad Eq. 8.16$$

$$Y_i^H = Y_{i'}^H, \quad \forall d \in D, i \in H_d^{EF}, i' \in H_i^{HE} \text{ και } Y_j^C = Y_{j'}^C, \quad \forall d \in D, j \in C_d^{EF}, j' \in C_j^{HE} \quad Eq. 8.17$$

$$0 \leq Y_i^H \leq 1, \quad \forall d \in D, i \in H_d^{EF} \text{ και } 0 \leq Y_j^C \leq 1, \quad \forall d \in D, j \in C_d^{EF} \quad Eq. 8.18$$

Παράρτημα Α

$$Y_i^H = 1, \quad \forall i \in H^{PR} \quad \text{και} \quad Y_j^C = 1, \quad \forall j \in C^{PR} \quad \text{Eq. 8.19}$$

$$R_{k-1} + \sum_{m \in S_k} Q_m^S + \sum_{i \in H_k} Y_i^H \cdot Q_{ik}^H = R_k + \sum_{n \in W_k} Q_n^W + \sum_{j \in C_k} Y_j^C \cdot Q_{jk}^C, \quad \forall k \in K \quad \text{Eq. 8.20}$$

$$Q_m^S \leq y_m \cdot UB_m^S, \quad \forall m \in S \quad \text{Eq. 8.21}$$

$$Q_n^W \leq y_n \cdot UB_n^W, \quad \forall n \in W \quad \text{Eq. 8.22}$$

$$\sum_{m \in S} y_m \leq N^H \quad \text{και/ή} \quad \sum_{n \in W} y_n \leq N^C \quad \text{και/ή} \quad \sum_{m \in S} y_m + \sum_{n \in W} y_n \leq N^T \quad \text{Eq. 8.23}$$

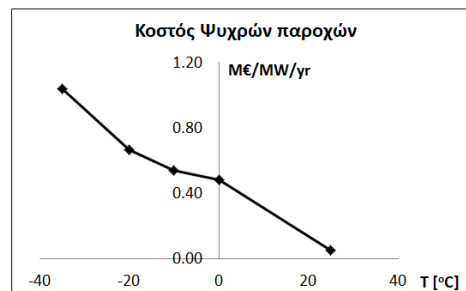
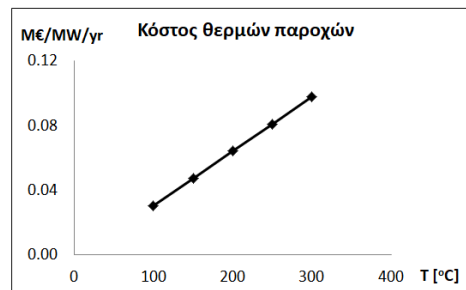
όπου $w_1 = (Cost_{max}^{OPEX} - Cost_{min}^{OPEX})^{-1}$, $w_2 = (Cost_{max}^{CAPEX} - Cost_{min}^{CAPEX})^{-1}$, $UB_m^S = \sum_{j \in C, k \in K} Q_{jk}^C$ και $UB_n^W = \sum_{i \in H, k \in K} Q_{ik}^H$

Παράρτημα Β

Στο Παράρτημα Β συνοψίζονται τα ενεργειακά και τεχνο-οικονομικά δεδομένα των διεργασιών που μελετήθηκαν στα παραδείγματα των Κεφαλαίων 5, 6, 7 και 8. Τα δεδομένα αφορούν τα μοναδιαία κόστη των βοηθητικών παροχών θέρμανσης και ψύξης (B1), τα ενεργειακά δεδομένα των ρευμάτων των διεργασιών (B2), τις παραμέτρους υπολογισμού του κόστους επένδυσης και λειτουργίας των διεργασιών και τις τιμές των προϊόντων (B3) και τις παραμέτρους υπολογισμού του κόστους επένδυσης των αποστακτικών στηλών (B4).

Β.1. Δεδομένα επιπέδων βοηθητικών παροχών

Επίπεδα Θερμών παροχών	
T [°C]	Μ€/MW/yr
300	0.0977
250	0.0808
200	0.0639
150	0.0470
100	0.0301
Επίπεδα Ψυχρών παροχών	
T [°C]	Μ€/MW/yr
25	0.0481
0	0.4791
-10	0.5414
-20	0.6660
-35	1.0398



Β.2. Θερμικά δεδομένα διεργασιών

T _{IN} [°C]	T _{OUT} [°C]	Q [MW]	T _{IN} [°C]	T _{OUT} [°C]	Q [MW]	T _{IN} [°C]	T _{OUT} [°C]	Q [MW]	T _{IN} [°C]	T _{OUT} [°C]	Q [MW]
1G-2G Biorefinery			South Pars– NG Refinery			South Pars– NG Refinery			Κλασμάτωση βιομάζας		
Τροφοδοσία: 55000 kg/hr			Τροφοδοσία: 1800000 kg/hr			Τροφοδοσία: 1800000 kg/hr			Τροφοδοσία: 18750 kg/hr		
90.00	38.00	4.50	60.00	55.80	0.77	-87.30	16.84	28.07	105.00	25.00	7.96
190.00	80.00	0.60	155.47	58.00	21.62	-37.10	-11.90	3.29	105.00	25.00	20.01
144.00	140.00	2.00	62.50	60.00	11.49	-4.30	-2.60	1.72	90.00	60.00	1.18
99.00	94.00	0.30	65.20	60.00	7.11	12.60	18.50	1.15	73.00	105.00	10.96
100.00	55.00	2.00	130.70	60.00	1.24	19.30	19.90	1.78	85.00	85.01	2.49
35.00	30.00	0.00	60.92	40.00	0.39	73.60	95.00	3.20	102.40	102.41	2.00
110.00	80.00	7.30	69.70	60.00	4.37	98.30	108.70	9.04	66.65	90.00	2.90
100.00	89.00	18.40	73.64	60.00	8.31	2.40	3.90	5.09	61.00	90.00	0.99
72.00	48.00	1.90	111.70	60.00	24.06	7.70	43.20	0.77	21.94	73.00	1.09
72.00	47.00	3.70	1009.00	250.00	10.57	128.50	138.20	10.76	19.88	85.00	2.12
47.00	35.00	0.10	325.00	175.00	1.59	120.70	130.20	5.29	26.28	85.00	2.35
81.00	45.00	5.20	229.00	130.00	0.90	175.00	205.00	0.25	85.00	109.00	2.50
63.00	60.00	28.40	319.40	175.00	4.17	64.80	116.40	33.51	85.00	99.80	0.35
60.00	45.00	0.70	60.00	45.00	5.91	127.00	127.40	39.76	80.30	99.60	4.62
90.00	45.00	0.30	60.00	45.00	9.05	131.00	131.30	4.70	15.00	151.90	1.18
84.00	45.00	1.00	127.40	74.80	33.51	131.00	131.30	4.70	79.78	99.50	0.32
47.00	46.00	6.60	60.00	45.00	1.36	-4.20	50.00	11.02	99.99	100.00	0.01
10.00	45.00	0.60	141.00	135.00	0.39	49.90	85.70	4.30	59.00	60.00	0.02
31.00	32.00	0.10	131.40	60.00	3.32	53.20	170.00	17.34	75.78	102.90	3.28
34.00	100.00	18.20	127.40	95.00	3.97	41.80	50.00	0.15	102.90	105.00	11.54
47.00	72.00	0.20	131.40	60.00	3.32	39.00	310.00	1.32	76.75	76.76	3.30
80.00	129.00	10.70	127.40	95.00	3.97	33.00	310.00	1.11	73.20	73.21	3.30
129.00	133.00	16.70	132.70	7.60	11.02	37.00	310.00	1.04	70.21	70.22	3.30
97.00	190.00	5.80	149.20	98.10	4.30	66.76	113.33	6.82	82.42	82.43	4.50
60.00	94.00	2.90	82.60	60.00	17.68	125.70	126.30	10.30	80.31	80.32	4.50
38.00	60.00	1.80	55.00	40.00	0.26	37.51	250.00	1.13	142.93	142.94	17.00
109.00	110.00	20.50	289.95	63.00	1.02	-39.60	-38.50	1.30	126.80	126.81	17.00
83.00	84.00	11.40	290.00	63.00	0.83	-13.84	-13.76	1.93	33.95	60.00	0.50
Sugar Industry			62.00	40.00	0.81	19.20	19.23	1.12	Ξυλίτση (bio)		
Τροφοδοσία: 166667 kg/hr			63.00	40.00	0.09	-39.60	-38.50	3.47	Τροφοδοσία: 4481 kg/hr		
118.00	103.00	46.75	63.00	40.00	0.07	19.20	19.23	0.63	37.60	30.00	0.35
103.00	84.00	21.82	290.00	63.00	0.78	-10.20	-10.10	0.99	103.00	-20.00	0.81
84.00	53.00	11.17	63.00	40.00	0.07	-29.10	-28.00	2.48	15.00	4.00	0.02
118.00	104.00	2.72	280.00	60.00	2.24	Κλασμάτωση βιομάζας			105.00	99.93	0.16
104.00	85.00	2.95	114.30	58.00	6.38	Τροφοδοσία: 18750 kg/hr			99.38	30.00	2.42
85.00	54.00	3.51	79.90	60.00	2.84	105.01	105.00	4.20	-20.00	-20.05	0.00
30.00	65.00	18.18	62.80	40.00	0.98	105.00	103.00	8.05	8.00	1.00	0.34
65.00	85.00	9.70	126.29	79.82	6.82	90.53	85.00	3.85	97.91	97.90	8.27
85.00	105.00	9.00	62.23	40.00	0.28	101.80	100.40	2.08	94.91	94.90	8.27
95.00	110.00	6.26	80.00	40.00	1.50	41.13	31.50	1.05	91.51	91.50	8.27
110.00	118.00	2.42	80.00	40.00	1.50	80.00	61.10	0.41	88.11	88.10	2.58
South Pars– NG Refinery			88.20	60.00	19.82	61.00	25.00	1.35	85.11	85.10	2.58
Τροφοδοσία: 1800000 kg/hr			-10.70	-34.20	1.30	105.00	85.00	8.10	-20.05	8.00	0.17
109.10	60.00	8.48	22.23	-10.76	1.93	85.00	75.88	0.22	1.50	30.00	0.19
132.18	56.12	25.05	40.00	22.23	1.12	67.49	59.00	0.25	1.50	105.00	0.30
56.00	40.00	4.95	7.60	-16.00	3.47	71.00	15.00	0.98	30.00	30.01	0.16
48.55	45.00	1.22	40.00	22.30	0.63	85.01	85.00	0.00	30.00	30.01	2.65
120.20	73.40	5.43	22.20	-7.00	0.99	99.80	82.11	0.41	30.00	100.12	3.71
132.50	60.00	1.44	-4.90	-24.70	2.48	102.00	100.00	0.01	30.78	60.00	0.35
131.60	81.00	1.58	-3.70	25.00	19.90	137.60	85.00	0.06	60.00	60.01	0.00
70.40	59.80	0.19	35.76	111.05	25.05	110.50	71.00	0.89	60.00	89.20	0.37
102.00	18.20	11.10	131.40	132.10	23.03	102.90	80.00	1.05	100.29	100.30	8.27
133.80	110.80	2.97	0.30	50.00	11.10	102.90	100.00	0.09	97.39	97.40	8.27
190.00	142.70	6.10	50.40	73.00	2.97	74.22	74.21	3.30	94.39	94.40	8.27
278.00	60.00	6.18	157.30	189.90	10.03	71.23	71.22	3.30	89.79	89.80	2.58
46.80	35.30	4.12	112.70	133.40	6.10	69.26	69.25	3.30	87.59	87.60	2.58
35.30	22.00	4.76	16.80	33.80	4.12	80.83	80.82	4.50	Ξυλίτση (κατ)		
-35.00	-84.50	11.72	19.30	19.40	4.76	79.86	79.85	4.50	Τροφοδοσία: 4481 kg/hr		
27.70	-35.00	24.27	22.70	28.10	1.96	127.64	127.63	17.00	105.00	-20.00	0.85
9.90	7.70	5.09	22.20	280.00	6.43	113.51	113.50	17.00	15.00	4.00	0.02

Παράρτημα Β

T _{IN} [°C]	T _{OUT} [°C]	Q [MW]	T _{IN} [°C]	T _{OUT} [°C]	Q [MW]	T _{IN} [°C]	T _{OUT} [°C]	Q [MW]	T _{IN} [°C]	T _{OUT} [°C]	Q [MW]
Ευλιτόλη (κατ)			C5 Αιθανόλη			Ιτακονικό οξύ			Ισοπροπανόλη-Βουτανόλη		
Τροφοδοσία: 4481 kg/hr			Τροφοδοσία: 4481 kg/hr			Τροφοδοσία: 6729 kg/hr			Τροφοδοσία: 6729 kg/hr		
105.00	100.00	0.09	30.78	60.00	0.74	86.19	86.20	3.44	92.20	92.10	0.33
100.01	100.00	0.18	60.00	60.01	0.01	82.49	82.50	3.00	99.60	15.00	0.10
-20.00	-20.30	0.00	60.00	89.20	0.79	79.79	79.80	3.00	141.80	79.60	0.13
8.00	7.90	0.00	C6 Αιθανόλη			78.29	78.30	3.00	155.20	15.00	0.03
103.21	103.20	2.12	Τροφοδοσία: 6729 kg/hr			Γλουκαρικό οξύ			117.40	15.00	0.10
99.61	99.60	2.12	60.00	33.00	0.86	Τροφοδοσία: 6729 kg/hr			99.60	15.00	0.11
88.09	87.99	2.61	33.01	33.00	0.10	200.00	30.00	0.03	15.00	37.00	3.11
85.09	84.99	2.61	33.01	33.00	2.64	62.00	30.00	0.20	37.00	70.00	4.67
82.46	85.00	0.02	90.00	60.00	0.98	29.99	25.00	0.13	15.00	205.00	2.41
15.00	86.95	0.01	60.01	60.00	1.71	200.00	25.00	0.29	15.00	205.00	1.55
57.30	95.00	1.11	83.71	83.70	2.21	198.00	25.00	2.02	99.60	99.70	1.03
15.00	95.00	0.00	80.31	80.30	3.60	62.00	25.00	0.07	90.70	90.80	0.11
15.00	95.00	0.01	78.81	78.80	3.60	62.00	25.00	1.09	99.60	99.70	2.71
89.79	99.95	3.29	76.71	76.70	3.60	62.00	25.00	0.30	155.10	155.20	1.50
-20.30	8.00	0.17	105.20	105.21	2.21	24.60	20.00	0.00	117.40	117.50	1.34
6.78	85.00	0.55	25.00	33.00	0.01	15.00	30.00	0.01	99.60	99.70	0.33
6.78	105.00	0.24	60.00	82.30	0.75	25.00	200.00	2.83	79.60	150.40	0.14
99.95	100.00	0.62	82.49	82.50	3.60	Σορβιτόλη			HMF		
85.00	103.66	0.31	79.79	79.80	3.60	Τροφοδοσία: 6729 kg/hr			Τροφοδοσία: 6729 kg/hr		
30.78	60.00	0.35	78.29	78.30	3.60	198.17	25.00	0.44	154.08	120.00	0.04
60.00	60.01	0.00	Ιτακονικό οξύ			333.32	25.00	0.83	343.30	120.00	0.01
60.00	89.20	0.38	Τροφοδοσία: 6729 kg/hr			418.56	25.00	1.02	120.00	78.37	8.64
104.89	104.90	2.12	100.92	70.00	0.78	199.17	198.17	0.57	76.15	66.14	1.86
102.69	102.70	2.12	60.00	37.00	0.61	334.32	333.32	0.84	343.30	120.00	0.01
89.79	89.89	2.61	25.00	10.00	0.10	344.72	345.72	2.54	259.10	20.00	0.59
87.59	87.69	2.61	37.01	37.00	1.76	417.56	418.56	0.94	205.91	25.00	0.01
Φουρφουράλη			37.01	37.00	6.01	20.00	190.00	1.25	89.96	25.00	0.33
Τροφοδοσία: 4481 kg/hr			100.01	80.00	0.61	105.00	190.00	0.34	78.25	77.25	8.19
180.00	25.00	92.67	100.57	70.00	0.65	20.00	190.00	0.07	260.10	259.10	0.65
310.85	25.00	0.03	25.00	10.00	0.04	25.00	50.00	0.13	77.16	76.16	8.95
92.98	25.00	0.01	103.00	100.02	0.24	Αιθυλενογλυκόλη			77.15	76.15	377.98
156.14	20.00	0.21	10.01	10.00	0.05	Τροφοδοσία: 6729 kg/hr			67.13	66.13	366.46
120.38	119.38	4.51	70.00	10.00	1.41	151.83	150.83	1.06	155.08	154.08	0.43
94.00	93.00	0.13	10.01	10.00	0.04	150.83	25.00	0.24	258.44	259.44	8.65
25.00	180.00	0.57	70.00	10.00	1.19	116.06	115.06	1.82	342.30	343.30	0.65
25.00	180.00	74.00	90.00	60.00	0.81	101.54	100.54	0.91	153.74	154.74	9.01
25.00	171.62	24.00	60.01	60.00	1.42	110.09	109.09	0.31	80.06	81.06	378.03
309.85	310.85	1.44	97.61	97.60	4.08	100.54	25.00	0.52	88.81	89.81	366.49
155.18	156.18	0.17	94.91	94.90	4.08	175.66	25.00	0.48	204.91	205.91	0.43
Βουτανετριόλη			91.91	91.90	4.08	109.09	25.00	0.06	60.00	120.00	1.74
Τροφοδοσία: 4481 kg/hr			88.31	88.30	3.44	372.84	25.00	1.02	15.00	120.00	0.00
217.37	216.37	0.88	86.71	86.70	3.44	20.14	245.00	1.93	15.00	120.00	0.00
84.96	83.96	0.00	85.01	85.00	3.44	81.24	245.00	1.77	66.13	76.16	1.81
84.88	83.88	0.00	80.31	80.30	3.00	371.84	372.84	0.55	81.06	120.00	5.39
271.84	20.00	0.00	78.81	78.80	3.00	190.00	245.00	3.47	Φαινολικά ολιγομερή		
21.77	25.00	0.20	76.71	76.70	3.00	245.00	246.00	2.40	Τροφοδοσία: 3048.75 kg/hr		
289.25	290.25	185.52	10.17	37.00	0.57	222.63	223.63	2.58	500.00	400.00	0.38
375.46	376.46	0.74	34.70	37.00	0.07	253.07	254.07	1.49	400.00	150.00	0.99
C5 Αιθανόλη			9.99	80.00	1.13	174.66	175.66	1.52	98.90	25.00	0.04
Τροφοδοσία: 4481 kg/hr			10.17	80.00	0.08	Ισοπροπανόλη-Βουτανόλη			152.85	25.00	0.08
58.19	33.00	0.67	9.99	103.00	0.34	Τροφοδοσία: 6729 kg/hr			192.00	25.00	0.01
33.01	33.00	0.04	80.00	80.01	0.06	37.00	23.00	1.37	364.93	25.00	0.15
33.01	33.00	0.79	37.00	100.41	3.49	70.00	23.00	6.34	147.98	147.88	5.13
91.35	91.34	2.86	80.00	89.80	0.47	205.00	15.00	1.33	99.90	98.90	3.74
113.74	113.75	2.86	60.00	82.30	0.62	205.00	15.00	2.32	153.85	152.85	2.95
89.79	89.80	5.48	100.49	100.50	4.08	90.40	90.30	1.02	160.74	160.84	5.11
88.09	88.10	5.48	97.09	97.10	4.08	80.20	80.10	0.11	363.92	364.92	3.83
87.59	87.60	5.48	94.39	94.40	4.08	79.60	79.50	2.71	191.01	192.01	2.93
85.09	85.10	5.48	89.79	89.80	3.44	150.40	150.30	1.50	25.00	350.00	0.28
25.12	33.00	0.05	87.79	87.80	3.44	92.20	92.10	1.30	80.01	500.00	1.93

Παράρτημα Β

T _{IN} [°C]	T _{OUT} [°C]	Q [MW]	T _{IN} [°C]	T _{OUT} [°C]	Q [MW]	T _{IN} [°C]	T _{OUT} [°C]	Q [MW]	T _{IN} [°C]	T _{OUT} [°C]	Q [MW]
PF-ρητίνες			Ισοσorbitίδιο			Νάιλον			Αεριοποίηση		
Τροφοδοσία: 3049 kg/hr			Τροφοδοσία: 3494.51 kg/hr			Τροφοδοσία: 2279 kg/hr			Τροφοδοσία: 750 kg/hr		
90.01	90.00	12.11	401.82	170.00	0.07	15.00	150.00	0.04	1026.85	226.85	8.91
90.00	25.00	4.22	158.77	25.00	0.50	15.00	150.00	0.01	340.00	339.00	0.17
30.43	90.00	15.84	158.77	25.00	0.08	PEIF			340.00	30.00	3.27
Πολυουρεθάνες			159.77	158.77	2.93	Τροφοδοσία: 2397 kg/hr			623.54	1026.85	6.02
Τροφοδοσία: 3049 kg/hr			400.82	401.82	2.98	280.00	25.00	0.66	24.85	249.85	1.72
78.00	23.00	0.12	25.00	170.00	0.30	280.00	279.00	0.98	24.85	623.54	2.27
23.87	23.00	0.00	2,5 FDCA			279.00	25.00	0.27	15.11	340.00	3.20
25.01	25.00	0.00	Τροφοδοσία: 4061.94 kg/hr			25.00	260.00	1.16	33.48	40.00	0.01
25.01	25.00	0.02	117.48	22.00	154.62	260.00	261.00	0.31	25.00	40.00	0.43
-4.00	25.00	0.02	100.52	50.00	5.58	260.00	280.00	0.10	39.72	40.00	0.01
25.00	99.89	0.09	50.00	25.00	0.02	PEF			100.05	101.05	1.85
25.00	70.00	0.15	81.46	25.00	7.48	Τροφοδοσία: 2397 kg/hr			Υδροθερμική υγροποίηση		
23.00	25.00	0.11	143.29	25.00	0.43	99.11	20.00	0.20	Τροφοδοσία: 3555 kg/hr		
Φουραμίνη			221.88	25.00	0.07	220.00	208.86	0.91	400.00	40.00	0.36
Τροφοδοσία: 3158 kg/hr			229.65	228.65	1.57	55.65	25.00	0.93	800.00	45.00	1.21
75.00	20.00	0.00	99.52	100.52	93.00	192.02	25.00	0.17	346.40	250.00	3.38
101.90	20.00	0.06	299.74	300.74	61.00	100.11	99.11	0.99	-18.50	-19.50	2.30
136.33	20.00	0.16	279.91	280.91	1.40	145.05	146.05	0.89	60.15	30.00	0.20
137.33	136.33	0.63	99.71	99.91	0.01	191.02	192.02	0.64	120.00	25.00	4.51
25.00	75.00	0.02	15.00	99.91	8.00	20.00	110.00	0.55	110.17	25.00	0.13
75.00	77.09	0.00	15.00	99.91	0.01	146.05	220.00	0.72	25.00	270.00	0.26
100.90	101.90	0.61	15.00	99.91	0.18	Κevlar			270.00	400.00	0.15
Τρινιτρική Βουτανετρίλη			15.00	99.91	0.10	Τροφοδοσία: 2397 kg/hr			40.00	390.00	0.14
Τροφοδοσία: 3563 kg/hr			15.00	50.00	0.02	478.54	220.00	0.00	25.00	400.00	0.61
98.04	20.00	0.19	Διισκουανικό			99.65	25.00	0.08	40.00	400.00	0.08
271.84	20.00	0.04	Τροφοδοσία: 3192 kg/hr			478.53	25.00	1.06	400.00	800.00	0.26
98.04	25.00	0.16	93.33	92.33	0.80	100.65	99.65	0.60	400.00	800.00	0.17
201.33	25.00	0.27	92.33	25.00	5.58	477.54	478.54	0.69	25.00	800.00	0.16
99.04	98.04	21.54	337.55	25.00	0.57	15.00	220.00	1.00	20.00	350.00	4.47
202.33	201.33	0.36	336.55	337.55	7.45	15.00	220.00	0.69	59.15	60.15	3.26
201.00	202.00	1.95	EDC			PVC			30.00	120.00	4.53
270.84	271.84	0.37	Τροφοδοσία: 2890 kg/hr			Τροφοδοσία: 9586 kg/hr			Πυρόλυση		
Αιθυλένιο			59.98	55.00	2.63	207.70	37.86	0.73	Τροφοδοσία: 1000 kg/hr		
Τροφοδοσία: 4817 kg/hr			59.98	10.00	0.58	-1.59	-1.69	5.93	400.00	40.00	0.10
121.00	120.11	0.08	305.00	230.00	2.40	35.82	35.72	9.93	800.00	45.00	0.34
120.11	112.61	0.44	230.00	44.20	1.06	3.06	2.96	1.28	700.00	25.00	0.71
112.61	-16.00	0.79	22.61	2.61	0.58	42.36	42.26	1.01	25.00	270.00	0.07
25.00	122.60	0.43	30.00	-5.00	0.82	154.44	75.00	0.91	270.00	400.00	0.04
121.96	470.00	1.16	199.87	199.77	3.15	61.15	530.00	1.32	40.00	390.00	0.04
114.36	120.21	1.23	199.87	25.59	0.71	129.05	129.15	6.66	25.00	400.00	0.17
Αντικικό οξύ			167.24	151.52	0.30	164.71	164.81	9.77	40.00	400.00	0.02
Τροφοδοσία: 3453 kg/hr			25.45	25.35	0.41	106.53	106.63	0.52	400.00	800.00	0.07
99.65	25.00	0.10	85.73	85.63	21.74	42.36	56.50	0.22	400.00	800.00	0.05
117.58	20.00	0.11	22.37	30.00	0.04	25.00	58.38	0.71	25.00	800.00	0.05
-3.07	-4.07	1.69	11.52	85.05	0.25	39.22	60.00	0.21	25.00	700.00	0.74
100.65	99.65	7.11	240.54	240.64	4.13	Αναερόβια χώνευση					
118.58	117.58	0.97	88.86	88.96	0.11	Τροφοδοσία: 890 kg/hr					
118.58	117.58	0.49	108.76	108.86	21.73	180.00	60.00	0.03			
240.01	241.01	2.87	Νάιλον			120.00	40.00	0.37			
121.64	122.64	6.20	Τροφοδοσία: 2279 kg/hr			98.00	60.00	0.05			
351.95	352.95	1.29	150.00	25.00	0.36	55.00	25.00	0.32			
20.00	150.00	0.01	73.70	25.00	0.03	4.00	25.00	0.03			
20.00	150.00	0.07	78.89	25.00	0.01	55.00	120.00	0.44			
20.00	150.00	0.00	83.26	25.00	0.00	50.00	55.00	0.06			
-4.07	150.00	0.04	20.00	240.00	0.28	25.00	55.00	0.32			
117.58	150.00	0.10	20.00	240.00	0.27						

Β.3. Τεχνο-οικονομικά δεδομένα διεργασιών

Διεργασία/Προϊόν	Τροφοδοσία [kg/hr]	Βαθμός μετατροπής [kg _{out} /kg _{in}]	Τιμή προϊόντος [€/kg]	Κόστος επένδυσης [Μ€]	Κόστος λειτουργίας (εκτός ενέργειας) [Μ€/yr]
Κλασμάτωση βιομάζας	1000	17% (C5 σάκχαρα) 37% (C6 σάκχαρα) 26% (λιγνίνη)	-	2.37	1.19
Ξυλιτόλη (βιο)	1000	76%	3.00	3.02	0.34
Ξυλιτόλη (κατ)	1000	93%	3.00	2.41	0.94
Φουρφουράλη	1000	70%	1.81	2.80	1.42
Βουτανετριόλη	1000	80%	3.50	84.57	1.19
C5-Αιθανόλη	1000	39%	0.60	0.81	0.44
C6-Αιθανόλη	1000	46%	0.60	1.65	1.28
Ιτακονικό οξύ	1000	33%	3.00	0.49	0.14
Γλουκαρικό οξύ	1000	51%	1.50	0.73	0.25
Σορβιτόλη	1000	52%	1.37	1.13	0.41
Αιθυλενογλυκόλη	1000	37%	2.02	4.10	0.66
Ισοπροπανόλη-Βουτανόλη	1000	24%	1.44	1.45	1.60
HMF	1000	60%	2.56	1.50	0.43
Φαινολικά ολιγομερή	1000	72%	1.80	3.94	1.18
PF-ρητίνες	1000	656%	1.10	0.88	11.90
Πολύουρεθάνες	1000	172%	2.14	1.71	0.67
Φουραμίνη	1000	101%	1.92	8.42	7.34
Τρινιτρική Βουτανετριόλη	1000	216%	3.50	4.59	1.90
Αιθυλένιο	1000	60%	3.87	1.28	0.58
Αντιτικό οξύ	1000	66%	2.29	0.98	0.31
Ισοσορβίδιο	1000	41%	3.47	11.34	3.38
2,5 FDCA	1000	59%	5.00	2.97	0.94
Διισκουανικό	1000	116%	2.80	33.07	5.24
EDC	1000	332%	1.56	1.95	0.83
Νάιλον	1000	155%	1.62	1.83	8.54
PEIF	1000	148%	4.66	1.94	7.95
PEF	1000	114%	6.04	1.55	16.86
Kevlar	1000	146%	5.84	4.96	1.76
PVC	1000	60%	2.74	0.23	0.04
Αναερόβια χώνευση/ Μεθάνιο	1000	23%	0.45	0.25	0.42
Αεριοποίηση/ Υγρά καύσιμα	1000	19%	0.60	0.73	0.20
Υδροθερμική υγροποίηση/ Υγρά καύσιμα	1000	18%	0.60	0.20	0.36
Πυρόλυση/ Υγρά καύσιμα	1000	18%	0.60	0.67	0.32
Σύσταση και κόστος ποικιλιών βιομάζας					
	Σιτάρι	Ρύζι	Κριθάρι	Μίσχανθος	Σημύδα
C5 Σάκχαρα	17.0%	14.7%	17.0%	14.6%	17.5%
C6 Σάκχαρα	37.3%	39.6%	38.0%	36.2%	39.6%
Λιγνίνη	26.0%	22.0%	25.0%	27.7%	18.0%
€/tn	42	42	47	88	68

B.4. Παράμετροι κόστους επένδυσης αποστακτικών στηλών

Απόσταξη οργανικών διαλυτών								
Pressure [bar]	T ^{REB} [°C]	T ^{COND} [°C]	Q [MW]	T _{IN} [°C]	T _{OUT} [°C]	Q [MW]	$\frac{M\epsilon}{a_i}$ [kg/hr]	b _i [M€]
1.95	133.44	119.74	37.67	102.99	124.56	0.92	0.3036	0.9034
2.04	135.04	121.14	37.90	102.99	127.55	1.06	0.3194	0.8791
2.14	136.59	122.49	38.13	102.99	130.31	1.19	0.3414	0.8431
2.23	138.09	123.81	38.36	102.99	132.87	1.32	0.3573	0.8206
2.32	139.54	125.08	38.59	102.99	135.26	1.45	0.3732	0.7989
2.41	140.95	126.31	38.83	102.99	137.50	1.58	0.3829	0.7892
2.51	142.32	127.51	39.07	102.99	139.60	1.70	0.3989	0.7685
2.60	143.66	128.68	39.32	102.99	141.59	1.82	0.4150	0.7486
2.69	144.96	129.82	39.57	102.99	143.47	1.94	0.4186	0.7503
2.78	146.22	130.93	39.83	102.99	145.26	2.06	0.4285	0.7415
2.88	147.46	132.01	40.09	102.99	146.96	2.17	0.4446	0.7226
2.97	148.66	133.06	40.35	102.99	148.58	2.28	0.4607	0.7045
3.06	149.84	134.09	40.62	102.99	150.14	2.39	0.4646	0.7062
3.16	150.99	135.10	40.89	102.99	151.62	2.50	0.4746	0.6983
3.25	152.12	136.08	41.16	102.99	153.05	2.60	0.4906	0.6812
3.34	153.23	137.04	41.44	102.99	154.42	2.70	0.4948	0.6830
3.43	154.31	137.99	41.73	102.99	155.74	2.80	0.5107	0.6666
3.53	155.37	138.91	42.01	102.99	157.02	2.90	0.5150	0.6684
3.62	156.40	139.82	42.30	102.99	158.25	3.00	0.5251	0.6613
3.71	157.42	140.71	42.60	102.99	159.43	3.09	0.5297	0.6631
3.80	158.42	141.58	42.90	102.99	160.58	3.18	0.5454	0.6478
3.90	159.41	142.44	43.20	102.99	161.70	3.27	0.5501	0.6496
3.99	160.37	143.28	43.50	102.99	162.78	3.35	0.5655	0.6350
4.08	161.32	144.11	43.81	102.99	163.83	3.44	0.5703	0.6368
4.18	162.25	144.93	44.13	102.99	164.84	3.52	0.5804	0.6307
4.27	163.17	145.73	44.45	102.99	165.83	3.60	0.5855	0.6325
4.36	164.08	146.51	44.77	102.99	166.80	3.68	0.5906	0.6343
4.45	164.96	147.29	45.10	102.99	167.73	3.75	0.6056	0.6207
4.55	165.84	148.05	45.43	102.99	168.65	3.82	0.6109	0.6226
4.64	166.70	148.80	45.76	102.99	169.54	3.89	0.6163	0.6244
4.73	167.55	149.55	46.10	102.99	170.40	3.96	0.6334	0.6109
4.82	168.39	150.27	46.44	102.99	171.25	4.02	0.6406	0.6123
4.92	169.21	150.99	46.79	102.99	172.08	4.09	0.6479	0.6137
5.01	170.03	151.70	47.14	102.99	172.89	4.15	0.6618	0.6074
5.10	170.83	152.40	47.49	102.99	173.68	4.20	0.6692	0.6089
5.20	171.62	153.09	47.85	102.99	174.45	4.26	0.6768	0.6103
5.29	172.40	153.77	48.21	102.99	175.21	4.31	0.6844	0.6118
5.38	173.17	154.45	48.57	102.99	175.95	4.36	0.7042	0.5984
5.47	173.94	155.11	48.94	102.99	176.68	4.41	0.7125	0.5999
5.57	174.69	155.76	49.32	102.99	177.39	4.46	0.7210	0.6014
5.66	175.43	156.41	49.70	102.99	178.09	4.50	0.7416	0.5887
5.75	176.16	157.05	50.08	102.99	178.77	4.54	0.7501	0.5903
5.84	176.89	157.68	50.46	102.99	179.44	4.58	0.7587	0.5919
5.94	177.61	158.30	50.85	102.99	180.10	4.62	0.7673	0.5935
6.03	178.31	158.92	51.24	102.99	180.75	4.66	0.7761	0.5950
6.12	179.01	159.53	51.64	102.99	181.38	4.69	0.7900	0.5899
6.22	179.71	160.13	52.04	102.99	182.01	4.72	0.7989	0.5915
6.31	180.39	160.73	52.45	102.99	182.62	4.75	0.8080	0.5931
6.40	181.07	161.32	52.86	102.99	183.22	4.77	0.8171	0.5947
6.49	181.74	161.90	53.27	102.99	183.82	4.79	0.8263	0.5964

Παράρτημα Β

Απόσταση αιθανόλης								
Pressure [bar]	T ^{REB} [°C]	T ^{COND} [°C]	Q [MW]	T _{IN} [°C]	T _{OUT} [°C]	Q [MW]	Mε a ₁ [kg/hr]	b ₁ [Με]
0.02	5.00	-7.87	9.12	92.36	1.66	4.82	2.7093	0.1534
0.04	25.99	11.11	9.04	92.36	23.38	3.67	1.4794	0.2705
0.06	36.61	20.72	8.97	92.36	33.73	3.12	1.1842	0.2924
0.09	43.78	27.20	8.90	92.36	40.59	2.75	1.0241	0.2972
0.11	49.19	32.10	8.84	92.36	45.73	2.48	0.9452	0.3031
0.14	53.55	36.04	8.78	92.36	49.85	2.26	0.8771	0.3034
0.16	57.19	39.34	8.72	92.36	53.28	2.08	0.8370	0.3108
0.18	60.32	42.17	8.67	92.36	56.21	1.93	0.7935	0.3134
0.21	63.07	44.65	8.63	92.36	58.79	1.79	0.7683	0.3209
0.23	65.51	46.86	8.59	92.36	61.07	1.67	0.7374	0.3234
0.26	67.71	48.86	8.55	92.36	63.13	1.56	0.7106	0.3261
0.28	69.72	50.67	8.51	92.36	65.00	1.46	0.6947	0.3338
0.31	71.56	52.33	8.48	92.36	66.72	1.37	0.6728	0.3366
0.33	73.26	53.87	8.45	92.36	68.31	1.28	0.6597	0.3445
0.35	74.84	55.30	8.43	92.36	69.78	1.21	0.6409	0.3475
0.38	76.31	56.63	8.40	92.36	71.15	1.13	0.6302	0.3555
0.40	77.69	57.89	8.38	92.36	72.44	1.07	0.6131	0.3588
0.43	79.00	59.06	8.37	92.36	73.65	1.00	0.6025	0.3672
0.45	80.23	60.18	8.35	92.36	74.80	0.94	0.5862	0.3708
0.47	81.39	61.23	8.34	92.36	75.88	0.88	0.5721	0.3827
0.50	82.50	62.23	8.33	92.36	76.91	0.83	0.5530	0.3896
0.52	83.56	63.19	8.32	92.36	77.89	0.78	0.5362	0.4037
0.55	84.57	64.10	8.32	92.36	78.83	0.73	0.5165	0.4112
0.57	85.53	64.97	8.31	92.36	79.73	0.68	0.4979	0.4265
0.60	86.46	65.81	8.31	92.36	80.59	0.63	0.4775	0.4346
0.62	87.34	66.61	8.31	92.36	81.41	0.59	0.4574	0.4511
0.64	88.20	67.39	8.31	92.36	82.20	0.55	0.4356	0.4603
0.67	89.02	68.13	8.31	92.36	82.97	0.51	0.4124	0.4809
0.69	89.81	68.85	8.31	92.36	83.70	0.47	0.3884	0.4925
0.72	90.58	69.54	8.32	92.36	84.42	0.43	0.3617	0.5147
0.74	91.32	70.21	8.32	92.36	85.10	0.39	0.3351	0.5273
0.76	92.04	70.86	8.33	92.36	85.77	0.36	0.3073	0.5514
0.79	92.73	71.49	8.34	92.36	86.41	0.32	0.2826	0.5649
0.81	93.41	72.10	8.34	92.36	87.04	0.29	0.2536	0.5907
0.84	94.06	72.69	8.35	92.36	87.64	0.26	0.2248	0.6055
0.86	94.69	73.26	8.36	92.36	88.23	0.23	0.2063	0.6289
0.89	95.31	73.82	8.36	92.36	88.81	0.20	0.1885	0.6403
0.91	95.91	74.36	8.37	92.36	89.36	0.17	0.1673	0.6643
0.93	96.50	74.89	8.38	92.36	89.91	0.14	0.1432	0.6759
0.96	97.07	75.41	8.38	92.36	90.44	0.11	0.1105	0.7005
0.98	97.62	75.91	8.39	92.36	90.95	0.08	0.0535	0.7103
1.01	98.17	76.40	8.40	92.36	91.45	0.06	0.0455	0.6995
1.03	98.70	76.88	8.40	92.36	91.95	0.03	0.0503	0.7098
1.05	99.21	77.35	8.40	92.36	92.43	0.01	0.0595	0.7308
1.08	99.72	77.81	8.41	92.36	92.89	0.01	0.0644	0.7417
1.10	100.21	78.25	8.41	92.36	93.35	0.03	0.0740	0.7639
1.13	100.70	78.69	8.41	92.36	93.80	0.06	0.0791	0.7755
1.15	101.17	79.12	8.41	92.36	94.24	0.08	0.0890	0.7989
1.18	101.64	79.54	8.40	92.36	94.67	0.10	0.0943	0.8111
1.20	102.09	79.95	8.40	92.36	95.09	0.13	0.1047	0.8357

