

Κεφάλαιο 4 Κλασματική Απόσταξη

Σύνοψη

Η κλασματική απόσταξη ή απλά απόσταξη αποτελεί τη διεργασία διαχωρισμού ενός πτητικού συστατικού από ένα λιγότερο πτητικό ή, γενικότερα, ενός μίγματος συστατικών που εμφανίζουν διαφορετική πτητικότητα και εφαρμόζεται σε ευρύτατο φάσμα βιομηχανιών, που εκτείνονται από τη διύλιση του πετρελαίου και την πετροχημική βιομηχανία (παραγωγή καυσίμων, οργανικών διαλυτών και αντιδραστηρίων) μέχρι τις βιομηχανίες τροφίμων (παραγωγή αλκοολούχων ποτών και χυμών φρούτων) και την προστασία του περιβάλλοντος (ανάκτηση διαλυτών). Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται η κλασματική απόσταξη δυαδικών μιγμάτων σε «κλασική» αποστακτική στήλη με δίσκους (μία τροφοδοσία, δύο προϊόντα - απόσταγμα και υπόλειμμα - με ολικό συμπυκνωτήρα και μερικό αναβραστήρα).

- Ειδικότερα στα επόμενα εξετάζονται:
- Περιγραφή της διεργασίας
- Υδραυλική αποστακτικής στήλης
- Μαθηματικό πρότυπο κλασματικής απόσταξης δυαδικών μιγμάτων. Μέθοδος Fenske - Underwood-Gilliland
- Παράδειγμα εφαρμογής κλασματικής απόσταξης δυαδικού μίγματος (μέθοδος Fenske-Underwood-Gilliland)
- Μέθοδος Lewis
- Παράδειγμα εφαρμογής κλασματικής απόσταξης με τη μέθοδο Lewis
- Μέθοδος Sorel
- Παράδειγμα εφαρμογής κλασματικής απόσταξης με τη μέθοδο Sorel

4.1 Περιγραφή της Διεργασίας

Ο διαχωρισμός ενός μίγματος στα συστατικά του κατά την κλασματική απόσταξη, λόγω της διαφορετικής πτητικότητας που παρουσιάζουν υπό τις συνθήκες της διεργασίας, πραγματοποιείται συνήθως εντός στηλών που φέρουν στο εσωτερικό τους δίσκους με οπές, βαλβίδες ή κάψες ή πληρωτικό υλικό. Στο εσωτερικό της στήλης, υγρό μίγμα ρέει από την κορυφή προς τον πυθμένα και έρχεται σε επαφή με ατμούς που ανέρχονται κατ' αντιστροφή, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται εναλλαγή θερμότητας και μάζας μεταξύ των δύο φάσεων, που οδηγεί σε συνεχή εξάτμιση και συμπύκνωση συστατικών καθ' όλο το ύψος της στήλης. Οι ατμοί (κορεσμένοι) καθώς ανέρχονται ψύχονται και μερικώς συμπυκνώνονται. Έτσι κάθε φυσαλίδα διαχωρίζεται σε μία μάζα ατμού εμπλουτισμένη στο πτητικότερο (χαμηλότερου σημείου ζέσης) συστατικό και μία μάζα υγρού εμπλουτισμένη στο λιγότερο πτητικό συστατικό, όπως εύκολα μπορεί να δειχθεί σε ένα διάγραμμα θερμοκρασίας - σύστασης του συστήματος. Αντίστοιχα, το υγρό (κορεσμένο) που κατέρχεται θερμαίνεται και μερικώς ατμοποιείται με αποτέλεσμα από κάθε στοιχειώδη μάζα του να σχηματίζεται ατμός εμπλουτισμένος στο πτητικότερο συστατικό και υγρό μικρότερης περιεκτικότητας από την αρχική στο συστατικό αυτό. Η διαδικασία αυτή οδηγεί στον εμπλουτισμό της φάσης των ατμών με τα πτητικότερα συστατικά, καθώς ανέρχεται στη στήλη. Μπορεί να θεωρηθεί ότι οι δύο φάσεις διέρχονται από μία σειρά καταστάσεων ισορροπίας, κατά την οποία το υγρό που κατέρχεται από κάποιο δίσκο ή μονάδα μεταφοράς βρίσκεται σε ισορροπία με τους ατμούς που ανέρχονται από αυτή. Στην γενική περίπτωση, η τροφοδοσία εισέρχεται σε κάποιο ενδιάμεσο σημείο της στήλης και λαμβάνονται δύο προϊόντα: το απόσταγμα, από την κορυφή, το οποίο περιέχει, κύρια, το(α) πτητικότερο(α) συστατικό(α), και το υπόλειμμα, από τον πυθμένα, που είναι εμπλουτισμένο στο(α) λιγότερο πτητικό(ά) συστατικό(ά). Το τμήμα της στήλης πάνω από την τροφοδοσία ονομάζεται τμήμα εμπλουτισμού, λόγω αύξησης της περιεκτικότητας της φάσης των ατμών στο πτητικότερο συστατικό. Το τμήμα κάτω από την τροφοδοσία ονομάζεται τμήμα απογύμνωσης ή εξάντλησης λόγω ελάττωσης της συγκέντρωσης του πτητικότερου συστατικού στην υγρή φάση. Στην κορυφή της στήλης υπάρχει ο συμπυκνωτήρας, ο οποίος συμπυκνώνει ποσότητα ατμών που εξέρχονται από τη στήλη και εξασφαλίζει την απαραίτητη, για τη λειτουργία, ροή υγρής φάσης. Μπορεί να είναι ολικός συμπυκνωτήρας,

όπως συνήθως συμβαίνει, οπότε λαμβάνει χώρα συμπύκνωση του συνόλου των ατμών ή μερικός συμπυκνωτήρας, οπότε συμπυκνώνεται μέρος των ατμών και λειτουργεί, ουσιαστικά, ως μία θεωρητική βαθμίδα ισορροπίας. Στο πυθμένα υπάρχει ο αναβραστήρας, ο οποίος ατμοποιεί ποσότητα υγρού που προσέρχεται από την κατώτερη βαθμίδα της στήλης και εξασφαλίζει την απαραίτητη παροχή ατμών. Υπάρχουν περιπτώσεις κλασματικής απόσταξης στις οποίες μπορεί να λείπει κάποιο από τα δύο τμήματα της στήλης, μαζί με το συμπυκνωτήρα ή τον αναβραστήρα, αντίστοιχα, καθώς και περιπτώσεις όπου η τροφοδοσία είναι πολλαπλή, τα προϊόντα που λαμβάνονται είναι περισσότερα των δύο, με λήψη προϊόντων και από ενδιάμεσες θέσεις (βαθμίδες) της στήλης ή χρησιμοποιούνται πολλαπλοί αναβραστήρες ή/και συμπυκνωτήρες σε ενδιάμεσα σημεία της στήλης, παρέχοντας τη δυνατότητα ευκολότερης ρύθμισης των ροών καθ' ύψος αυτής και χρήσης βοηθητικών παροχών θέρμανσης/ψύξης σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Οι αποστακτικές στήλες διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις στήλες με δίσκους, όπου η επαφή των δύο φάσεων πραγματοποιείται σε διακριτό αριθμό σταδίων (βαθμίδων), και τις στήλες με πληρωτικό υλικό, όπου η επαφή είναι συνεχής (διαφορική). Επίσης οι στήλες απόσταξης διακρίνονται σε συνεχούς λειτουργίας, στις οποίες υπάρχει συνεχής εισαγωγή νέας τροφοδοσίας και απομάκρυνση προϊόντων και ασυνεχούς λειτουργίας (διαφορική απόσταξη), στις οποίες μία δεδομένη ποσότητα μίγματος προς διαχωρισμό, που φέρεται εξ' αρχής στη στήλη, αποστάζεται προς το επιθυμητό προϊόν (Σαραβάκος, 1985).

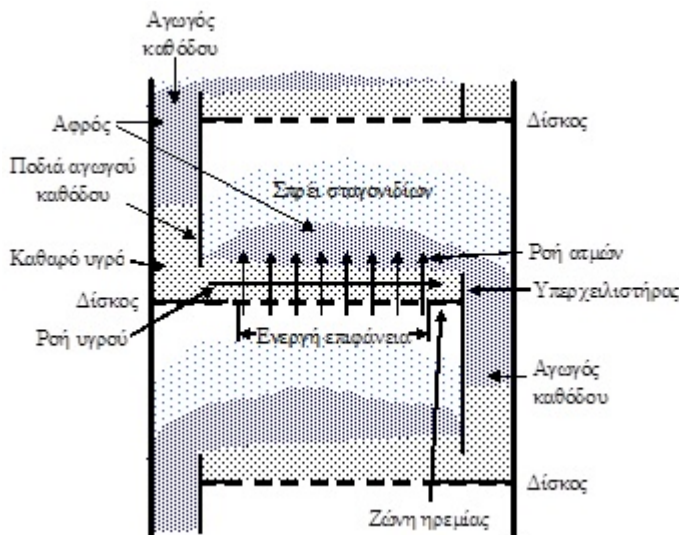
Στη λειτουργία της αποστακτικής στήλης, σημαντικότατο ρόλο παίζει ο λόγος αναρροής, που αποτελεί το λόγο της παροχής υγρού που επιστρέφει στη στήλη ως αναρροή προς την παροχή που λαμβάνεται ως απόσταγμα (προϊόν κορυφής). Ο λόγος αναρροής καθορίζει (σε μεγάλο βαθμό) τον αριθμό των βαθμίδων που απαιτούνται για συγκεκριμένο διαχωρισμό, ενώ η αύξησή του οδηγεί σε μείωση των θεωρητικών και πραγματικών βαθμίδων, αλλά σε παράλληλη αύξηση των παροχών των φάσεων στο εσωτερικό της στήλης και, κατ' επέκταση, σε απαίτηση για αυξημένη διάμετρο της στήλης και κατανάλωση βοηθητικών παροχών (θερμαντικού ρευστού στον αναβραστήρα και ψυκτικού στο συμπυκνωτήρα).

Η πίεση λειτουργίας είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας. Η ελάττωσή της αυξάνει, γενικά, την ευκολία διαχωρισμού, λόγω αύξησης της σχετικής πτητικότητας, όμως μειώνει τις θερμοκρασίες έναρξης βρασμού και υγροποίησης του μίγματος, με αποτέλεσμα αν αυτές καταστούν πολύ χαμηλές για το απόσταγμα, να απαιτείται η συμπύκνωσή του με ψυκτικό κύκλωμα, αντί νερό, γεγονός που επιβαρύνει σημαντικά το κόστος αλλά και την πολυπλοκότητα λειτουργίας της στήλης. Κατά τον αρχικό σχεδιασμό, η πίεση μπορεί να θεωρείται σταθερή σε όλο το ύψος της στήλης, επιτρέποντας τη χρήση δεδομένων ισορροπίας ατμών - υγρού που αναφέρονται σε σταθερή πίεση. Στην πράξη, η πτώση πίεσης, λόγω διέλευσης των ατμών από τις σπές (ή κάψες ή βαλβίδες) των δίσκων, είναι της τάξης των 0,01 bar ανά δίσκο, και στην περίπτωση στηλών με πολλές βαθμίδες πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Συχνά επιλέγεται η λειτουργία της αποστακτικής στήλης σε πίεση λίγο μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής, ώστε να μην απαιτείται η χρήση συστήματος δημιουργίας κενού και στην περίπτωση διαρροής αυτή να κατευθύνεται προς τα έξω.

Η θερμική κατάσταση της τροφοδοσίας είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας, δεδομένου ότι επηρεάζει άμεσα τις ροές στο εσωτερικό της στήλης και, κατ' επέκταση, το θερμικό φορτίο του συμπυκνωτήρα και αναβραστήρα. Η τροφοδοσία μπορεί να είναι υπόψυκτο ή κορεσμένο υγρό, υπέρθερμος ή κορεσμένος ατμός ή μίγμα ατμών - υγρού. Η επιθυμητή κατάσταση μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη, πριν την αποστακτική στήλη, κατάλληλου εξοπλισμού, π.χ. προθέρμανση της ψυχρής παροχής σε εναλλάκτη θερμότητας πριν την εισαγωγή της στην στήλη.

4.2 Υδραυλική Αποστακτικής Στήλης

Η βασική λειτουργία των βαθμίδων μιας στήλης απόσταξης (αλλά και απορρόφησης, εκχύλισης και γενικότερα στήλης διαχωρισμού) είναι να φέρουν στην καλύτερη δυνατή επαφή τις φάσεις των, προς διαχωρισμό, συστατικών, δηλαδή του υγρού και των ατμών στην περίπτωση της απόσταξης. Έτσι, στο εσωτερικό της στήλης βρίσκεται τοποθετημένος ορισμένος αριθμός δίσκων πάνω στους οποίους ρέει εγκάρσια η υγρή φάση, ενώ η φάση των ατμών διέρχεται μέσω ανοιγμάτων του δίσκου και διαμέσω του υπερκείμενου υγρού. Μία απλοποιημένη παράσταση της ροής σε ένα δίσκο παριστάνεται στο Σχήμα 4.1. Παρατηρείται ότι ο δίσκος δεν καταλαμβάνει ολόκληρη τη διατομή της στήλης, αλλά μεταξύ κάθε ζεύγους δίσκων περιλαμβάνεται ένας κατακόρυφος αγωγός, που ονομάζεται αγωγός καθόδου, και μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η ροή του υγρού από τον ένα δίσκο στον αμέσως κατώτερο. Στα όρια του δίσκου με τον αγωγό καθόδου υπάρχει ένας υπερχειλιστήρας που αποσκοπεί στη συγκράτηση υγρού πάνω στο δίσκο.



Σχήμα 4.1 Ροή ατμών - υγρού στο εσωτερικό αποστακτικής στήλης.

Οι δίσκοι, ανάλογα με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους και τον τρόπο επίτευξης της επαφής ατμών - υγρού, διακρίνονται σε:

Δίσκοι με οπές (διάτρητοι). Αποτελούν την απλούστερη μορφή δίσκων και υπάρχει εκτενής βιβλιογραφία για το σχεδιασμό τους. Σημαντικότερο μειονέκτημα τους είναι η απότομη μείωση της απόδοσης όταν ο ρυθμός ροής των ατμών ελαττώνεται σε σχέση με την τιμή σχεδιασμού του (ιδιαίτερα όταν μειωθεί περαιτέρω του 60%), καθώς υγρό αρχίζει να περνά μέσα από τις οπές (δάκρυσμα του δίσκου).

Δίσκοι με κάψες. Σε αυτούς, κάθε οπή περιβάλλεται από ένα αγωγό μικρού ύψους που φέρει στο πάνω μέρος μία κάψα με οπές ή χαραγές ή έχει οδοντωτά άκρα μέσω των οποίων διέρχονται οι ατμοί. Οι αγωγοί εξασφαλίζουν την παρουσία υγρού στο δίσκο ανεξάρτητα της ροής ατμών. Αποτελούν τον παλαιότερο τύπο δίσκων και χαρακτηριστικό τους είναι ότι για την ομαλή λειτουργία απαιτούν μεγαλύτερη απόσταση δίσκων σε σχέση με τους διάτρητους δίσκους. Εμφανίζουν υψηλότερη απόδοση σε σχέση με τους διάτρητους λόγω του γεγονότος ότι αναγκάζουν τους ατμούς να κινηθούν αρχικά παράλληλα προς τη ροή του υγρού ώστε να εξέλθουν μέσα από την κάψα και στη συνέχεια κάθετα στη ροή για ανέλθουν στην επόμενη βαθμίδα. Αυτή η κίνηση συντελεί στην καλύτερη ανάμιξη των δύο φάσεων και στη ταχύτερη μεταφορά θερμότητας και μάζας, αλλά συνοδεύεται από σημαντική πτώση πίεσης. Στους δίσκους με οπές μόνο η κατακόρυφη κίνηση είναι δυνατή (Wankat, 1988).

Δίσκοι με βαλβίδες. Αποτελούν τον πλέον εξελιγμένο τύπο εξοπλισμού επαφής ατμών - υγρού καθώς συνδυάζουν πλεονεκτήματα των δύο αναφερθέντων τύπων και αποτελούνται από ένα διάτρητο δίσκο, με οπές, γενικά μεγαλύτερες σε σχέση με τους απλούς διάτρητους δίσκους, οι οποίες καλύπτονται από βαλβίδες, δηλαδή καπάκια που μπορούν να ανεβοκατεβαίνουν με τη βοήθεια κατάλληλων οδηγών, ανάλογα με την πίεση των ατμών και του υγρού. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλεται η επιφάνεια του διάκενου μεταξύ δίσκου και καπακιού της βαλβίδας, από το οποίο διέρχονται οι ατμοί, ανάλογα με την παροχή τους και η ταχύτητά τους διατηρείται περίπου σταθερή. Κατ' επέκταση και η απόδοση του δίσκου, που επηρεάζεται από το ρυθμό ροής των ατμών διατηρείται περίπου σταθερή σε σχετικά ευρέα όρια. Οι δίσκοι αυτοί συμπεριφέρονται πολύ καλά σε μειωμένη παροχή ατμών, ενώ το κλείσιμο των βαλβίδων αποτρέπει το δάκρυμά τους. Στην περίπτωση χρήσης κοινών βαλβίδων, κατά τη λειτουργία της στήλης, αυτές είναι σταθερές σε πλήρως ανοικτή ή κλειστή θέση. Αυτό σημαίνει ότι κάποιες βαλβίδες είναι ανοικτές και κάποιες κλειστές ανάλογα με την πίεση (παροχή) των ανερχόμενων ατμών. Για τη μείωση της πτώσης πίεσης το χείλος της οπής «βλέπει» προς τα πάνω (φαινόμενο Venturi). Υπάρχει μεγάλη ποικιλία βαλβίδων που περιγράφονται αναλυτικά στα φυλλάδια των εταιριών που τις κατασκευάζουν. Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται τμήμα δίσκου με βαλβίδες τελευταίας γενιάς (VARIOFLEX VV 16/L της Koch-Glitsch), οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να ρυθμίζονται ως προς το ποσοστό που παραμένουν ανοικτές ανάλογα με τη ροή των ατμών, επιτυγχάνοντας υψηλό και σταθερό βαθμό απόδοσης, καθώς η διοχέτευση των ατμών πάνω στο δίσκο πραγματοποιείται σε ολόκληρη την επιφάνειά του, ακόμη και για μεγάλες μεταβολές της παροχής, η οποία μπορεί να φθάσει το λόγο 1:12. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται ορισμένα χαρακτηριστικά των αναφερθέντων δίσκων και η σχετική

ταξινόμησή τους (+++ σημαίνει ότι ο συγκεκριμένος δίσκος εμφανίζει την αντίστοιχη ιδιότητα στη μεγαλύτερη τιμή).



Εικόνα 4.1 Τμήμα δίσκου με βαλβίδες.

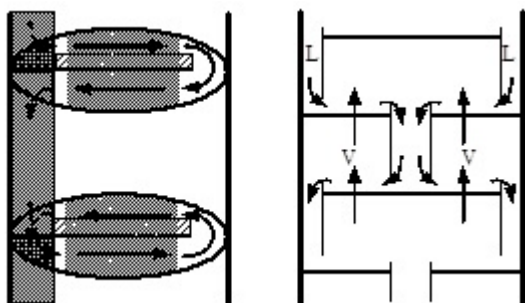
	Διάτρητοι δίσκοι	Δίσκοι με κάψες	Δίσκοι με βαλβίδες
Ευκολία κατασκευής	+++	++	++
Εύρος περιοχής λειτουργίας	+	+++	+++
Εξάρτηση της απόδοσης από το ρυθμό ροής	+++	++	+
Επίδραση από αποθέσεις	+	++	++
Λειτουργικότητα παρουσία στερεών	+++	+	+
Ευκολία καθαρισμού	+++	+	+
Απόδοση	++	+	+++
Πτώση πίεσης	+	+++	++
Δυναμικότητα*	+++	+	++
Κόστος	+	+++	++

* Οι διαφορές είναι πολύ μικρές

Πίνακας 4.1 Αξιολόγηση χαρακτηριστικών των δίσκων.

Εκτός από τους αναφερθέντες βασικούς τύπους δίσκων υπάρχει σειρά εξειδικευμένων τύπων που μπορούν να χειριστούν υλικά με ειδική μορφή, όπως λάσπες.

Ανάλογα με το ρυθμό ροής του υγρού και τη διάμετρο της στήλης εφαρμόζονται διάφορα προφίλ ροής του. Το συνηθέστερο είναι εκείνο της εγκάρσιας ροής (απλού περάσματος) που εικονίζεται στο Σχήμα 4.1. Άλλη διαμόρφωση περιλαμβάνει την τοποθέτηση των αγωγών καθόδου προς την ίδια πλευρά και για τα δύο ρεύματα (εισόδου και εξόδου του υγρού στο δίσκο), ενώ συχνή είναι η διαίρεση της ροής σε περισσότερους αγωγούς καθόδου, σε στήλες μεγάλης διαμέτρου και υψηλής ροής υγρού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2.

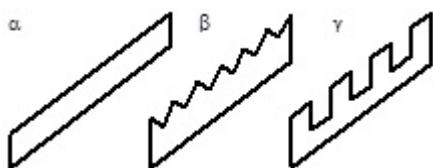


Σχήμα 4.2 Προφίλ ροής υγρής φάσης σε αποστακτική στήλη.

Οι αγωγοί καθόδου πρέπει να έχουν κατάλληλες διαστάσεις ώστε να εξασφαλίζεται η απομάκρυνση των ατμών από το υγρό που κατέρχεται, για αύξηση της απόδοσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή κατάλληλου χρόνου παραμονής του υγρού εντός του αγωγού που ξεκινά από τα 3 s για υγρά με μικρή τάση σχηματισμού αφρού (π.χ. υδρογονάνθρακες μικρού μοριακού βάρους και αλκοόλες) και ανέρχεται μέχρι τα 7 s όταν η τάση αφρισμού είναι πολύ μεγάλη (π.χ. γλυκόλες, αμίνες). Χρόνοι παραμονής της τάξης των 5 s θεωρούνται ικανοποιητικοί για ενδιάμεσες περιπτώσεις.

Εξάλλου σε πολύ μικρές στήλες (κύρια πιλοτικές), ο αγωγός καθόδου μπορεί να είναι ένας απλός κυλινδρικός σωλήνας, ενδεχόμενα υπερυψωμένος, ως προς την επιφάνεια του δίσκου, ώστε να συγκρατείται το υγρό. Υπάρχουν και στήλες χωρίς αγωγό καθόδου, στις οποίες το υγρό περνά από τις οπές με κάποιο επιλεγμένο ρυθμό. Κατασκευάζονται για συγκεκριμένες εφαρμογές και τα όρια λειτουργίας τους είναι πολύ στενά.

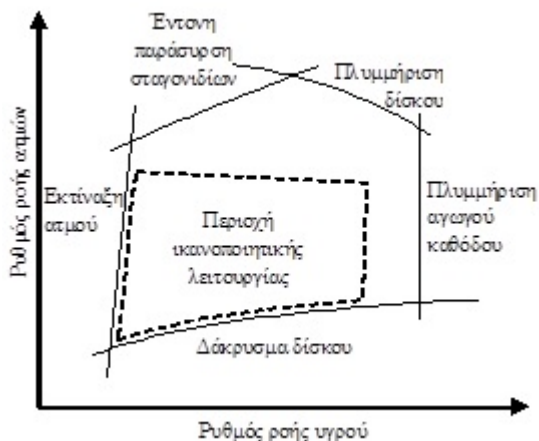
Ο υπερχειλιστήρας είναι πολύ σημαντικός δεδομένου ότι από τις διαστάσεις του καθορίζεται η ποσότητα του υγρού που παραμένει στο δίσκο σε συνθήκες λειτουργίας, αλλά και η κατανομή και ροή του υγρού. Οι οριζόντιοι υπερχειλιστήρες είναι εύκολοι στην κατασκευή και φθινοί, αλλά για λειτουργία σε διαφορετικούς ρυθμούς ροής υγρού μεγαλύτερη ευελιξία παρουσιάζουν οι υπερχειλιστήρες με προιονωτό ή τεθλασμένο προφίλ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3 Είδη υπερχειλιστήρων αποστακτικής στήλης (α οριζόντιος, β προιονωτός, γ τεθλασμένος).

Τόσο ο αγωγός τροφοδοσίας όσο και εκείνος εισόδου της αναρροής θα πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένος, ώστε το ρευστό που εισέρχεται στο δίσκο να μην προκαλεί υπερβολική παράσυρση ή δάκρυσμα, και ενδεχόμενα να υπάρχει ανακλαστήρας (ιδιαίτερα στην περίπτωση τροφοδοσίας που περιέχει μεγάλη ποσότητα ατμών) ώστε να αποφεύγεται η εκτόξευση του ρευστού εγκάρσια στο δίσκο. Εναλλακτικά η τροφοδοσία μπορεί να γίνει στον αγωγό καθόδου που οδηγεί στο δίσκο τροφοδοσίας. Στην περίπτωση στηλών μεγάλης διαμέτρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατανομέας ροής για ομοιόμορφη εισαγωγή της τροφοδοσίας, ενώ όταν η ποσότητα ατμών στην τροφοδοσία είναι σημαντική θα πρέπει η βαθμίδα τροφοδοσίας να έχει μεγαλύτερη απόσταση από την αμέσως πιο πάνω ώστε να εξασφαλίζεται η ύπαρξη ικανοποιητικού χώρου για το διαχωρισμό των σταγονιδίων από το ρεύμα ατμού.

Στο Σχήμα 4.4 παριστάνεται διαγραμματικά η λειτουργία ενός δίσκου με οπές συναρτήσεως του ρυθμού ροής υγρού και ατμών. Παρατηρείται ότι οι ρυθμοί ροής έχουν ιδιαίτερη σημασία, δεδομένου ότι ο δίσκος λειτουργεί με ικανοποιητική απόδοση μόνο μέσα σε συγκεκριμένα όρια τιμών των ρυθμών αυτών. Συγκεκριμένα, η μείωση του ρυθμού ροής ατμών οδηγεί τελικά στη διέλευση υγρού μέσα από τις οπές και στην αδυναμία του δίσκου να συγκρατήσει πάνω του επαρκή ποσότητα υγρού. Στην περίπτωση ύπαρξης κοινών βαλβίδων ελάχιστες παραμένουν ανοικτές και σε ένα μικρό μόνο ποσοστό της επιφάνειας του δίσκου γίνεται ανάμιξη φυσαλίδων με υγρό. Εξάλλου, η αύξηση της ροής ατμών προκαλεί τελικά έντονη παράσυρση σταγονιδίων προς την ανώτερη βαθμίδα. Η αύξηση της ροής υγρού οδηγεί στην πλημμύριση των αγωγών καθόδου και στην αύξηση της στάθμης του υγρού στον δίσκο, ενώ όταν η ροή του υγρού γίνεται πολύ μικρή, οι ατμοί εκτινάσσονται μέσω των οπών, χωρίς να υπάρχει ικανοποιητική ανάμιξή τους με το υγρό για την επίτευξη μεταφοράς μάζας (Benitez, 2009).



Σχήμα 4.4 Καταστάσεις λειτουργίας διάτρητου δίσκου.

4.3 Μαθηματικό Πρότυπο Κλασματικής Απόσταξης Δυαδικών Μιγμάτων. Μέθοδος Fenske - Underwood - Gilliland

Θεωρούμε δυαδικό μίγμα, μοριακής περιεκτικότητας x_F ως προς το πτητικότερο συστατικό, το οποίο τροφοδοτείται με μοριακή παροχή F και θερμοκρασία T_F σε αποστακτική στήλη συνεχούς λειτουργίας με δίσκους που λειτουργεί σε σταθερή πίεση P , μέσω μίας τροφοδοσίας. Το ρεύμα τροφοδοσίας, αρχικής θερμοκρασίας T_{f0} , λαμβάνει θερμότητα Q_H κατά τη διέλευσή του από εναλλάκτη θερμότητας μέχρι να φτάσει τη θερμοκρασία εισόδου του στην στήλη. Λαμβάνονται δύο ρεύματα:

- το απόσταγμα από την κορυφή, μοριακής παροχής D και μοριακής σύστασης (κλάσμα) x_D , το οποίο αποτελεί μέρος των ατμών της ανώτερης βαθμίδας που συμπυκνώνονται σε ολικό συμπυκνωτήρα, αποβάλλοντας θερμότητα Q_D , προς κορεσμένο υγρό θερμοκρασίας T_D , το οποίο στη συνέχεια ψύχεται σε θερμοκρασία T_{D0} σε ψυκτήρα, παρέχοντας θερμότητα Q_{DC} , και

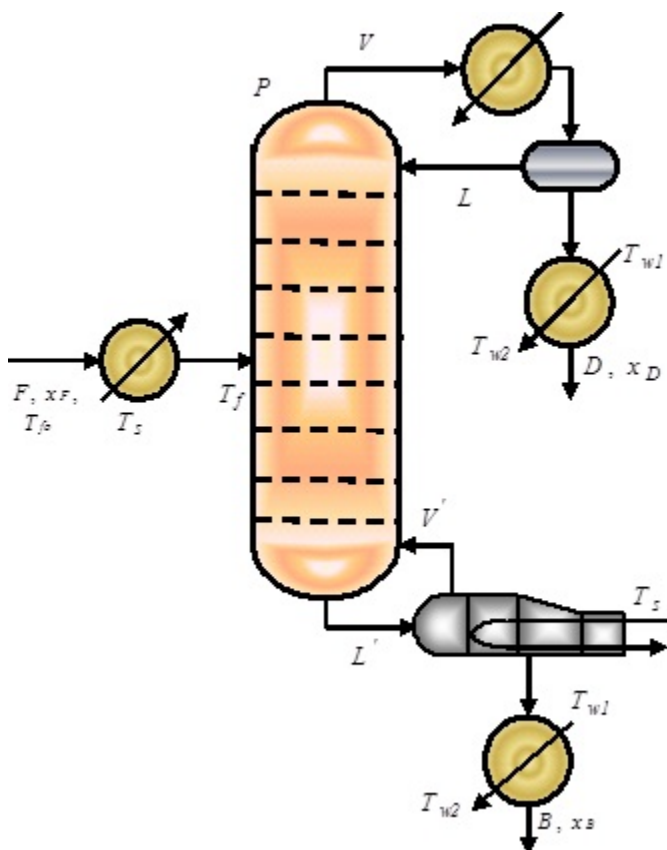
- το υπόλειμμα από τον πυθμένα, μοριακής παροχής B και μοριακής σύστασης (κλάσμα) x_B , ως κορεσμένο υγρό θερμοκρασίας T_B , το οποίο ψύχεται σε ψυκτήρα σε τελική θερμοκρασία T_{B0} , παρέχοντας θερμότητα Q_{BC} . Μέρος του υγρού που εξέρχεται από την τελευταία βαθμίδα της στήλης ατμοποιείται στον μερικό αναβραστήρα, λαμβάνοντας θερμότητα Q_B , και επιστρέφει στον τελευταίο δίσκο της στήλης.

Η θερμοκρασία T_D αποτελεί τη θερμοκρασία έναρξης βρασμού του προϊόντος κορυφής (απόσταγμα), ενώ η θερμοκρασία T_B αποτελεί τη θερμοκρασία έναρξης βρασμού του προϊόντος πυθμένα (υπόλειμμα).

Η αποστακτική στήλη λειτουργεί με λόγο αναρροής R . Ο λόγος αναρροής ορίζεται ως η μοριακή παροχή του υγρού που επιστρέφει από το συμπυκνωτήρα στη στήλη προς τη μοριακή παροχή του λαμβανομένου αποστάγματος. Ο αριθμός των βαθμίδων (πραγματικών δίσκων) που περιλαμβάνει η στήλη είναι N_{act} και αντιστοιχούν σε N θεωρητικές βαθμίδες ισορροπίας με συνολικό βαθμό απόδοσης E_o . Η ταχύτητα πλημμύρισης, που αποτελεί τη μέγιστη ταχύτητα ροής των ατμών στο εσωτερικό της στήλης, ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική παράσυρση είναι u_f , ενώ η πραγματική ταχύτητα ροής τους είναι u . Η καθαρή διατομή της στήλης, κάθετα της οποίας γίνεται η ροή των ατμών, είναι A_n και η συνολική διατομή είναι A_{act} . Η διάμετρος της στήλης είναι D_c και μπορεί να έχει ενιαία τιμή καθ' όλο το ύψος της ή να λαμβάνει διαφορετικές τιμές στα τμήματα εμπλουτισμού και εξάντλησης. Η απόσταση μεταξύ των πραγματικών δίσκων είναι H_l , ενώ το ύψος της στήλης πάνω από την ανώτερη βαθμίδα και κάτω από την κατώτερη είναι H_o για κάθε άκρο. Το διάγραμμα ροής της αποστακτικής στήλης που περιγράφηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5.

Το μαθηματικό πρότυπο της κλασματικής απόσταξης δυαδικού μίγματος παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.3. Η επίλυση του προτύπου ακολουθεί την μέθοδο Fenske - Underwood - Gilliland, η οποία είναι μία προσεγγιστική μέθοδος υπολογισμού του αριθμού των βαθμίδων για μίγματα που εμφανίζουν περίπου σταθερή σχετική πτητικότητα και η αποστακτική στήλη φέρει μία είσοδο (τροφοδοσία) και δύο εξόδους μίγματος (απόσταγμα - υπόλειμμα). Η μέθοδος αυτή είναι απλή και χρήσιμη για ένα προκαταρκτικό σχεδιασμό μιας αποστακτικής στήλης. Πρέπει να τονίσουμε ότι από το μαθηματικό πρότυπο του Πίνακα 4.3 μόνο οι Εξισώσεις 4.2 έως 4.6 αναφέρονται στην εξεταζόμενη μέθοδο. Όλες οι υπόλοιπες εξισώσεις αφορούν

συνολικά στο περιγραφόμενο αποστακτικό σύστημα και εφαρμόζονται, κατά περίπτωση, και όταν ο υπολογισμός των βαθμίδων γίνεται με κάποια άλλη μέθοδο (Maroulis & Saravacos, 2003).



Σχήμα 4.5 Διάγραμμα ροής αποστακτικής στήλης.

Η Εξίσωση 4.1 υπολογίζει τη θερμική κατάσταση της τροφοδοσίας. Ανάλογα με το αν η τροφοδοσία είναι μίγμα ατμών - υγρού, υπόψυκτο υγρό ή υπέρθερμος ατμός, χρησιμοποιείται η μορφή α , β ή γ της εξίσωσης 4.1, αντίστοιχα. Για δεδομένη πίεση και σύσταση μίγματος, η φυσική κατάσταση του ρεύματος τροφοδοσίας καθορίζεται από τη θερμοκρασία του, σε σχέση με τις θερμοκρασίες έναρξης βρασμού και υγροποίησης. Η Εξίσωση 4.2 δίνει τον παράγοντα διαχωρισμού, που καθορίζεται από τις προδιαγραφές σύστασης των δύο παραγομένων ρευμάτων (απόσταγμα και υπόλειμμα). Η Εξίσωση 4.3 υπολογίζει τον ελάχιστο αριθμό θεωρητικών βαθμίδων για το επιθυμητό διαχωρισμό και αποτελεί την εξίσωση Fenske. Το φυσικό της νόημα είναι ο αριθμός βαθμίδων, απόδοσης 100%, όταν η στήλη λειτουργεί σε συνθήκες ολικής αναρροής, οπότε δε λαμβάνονται προϊόντα, αλλά επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός. Η Εξισώσεις 4.4 και 4.5 είναι γνωστές ως εξισώσεις Underwood, και υπολογίζουν τον ελάχιστο λόγο αναρροής για την επίτευξη του διαχωρισμού. Στις συνθήκες αυτές ο αριθμός των βαθμίδων καθίσταται άπειρος. Η στήλη δε μπορεί να επιτύχει τον ζητούμενο διαχωρισμό, όταν λειτουργεί με τον ελάχιστο λόγο αναρροής, και το φυσικό νόημα του ελάχιστου λόγου αναρροής είναι ότι αποτελεί το κάτω όριο του λόγου αυτού για τη λειτουργία της στήλης. Σημειώνουμε ότι, ενώ η λειτουργία της στήλης δεν είναι δυνατή υπό συνθήκες ελάχιστου λόγου αναρροής, αφού η έννοια των άπειρων βαθμίδων δε μπορεί να υλοποιηθεί κατασκευαστικά, εν τούτοις είναι δυνατή η λειτουργία της σε συνθήκες ολικής αναρροής και τούτο εφαρμόζεται κατά την εκκίνηση της λειτουργίας της στήλης για τη σταθεροποίηση των συνθηκών, στην περίπτωση που θέλουμε να σταματήσουμε τη ροή των προϊόντων χωρίς όμως να σταματήσει η λειτουργία της στήλης (π.χ. εμφάνιση προβλήματος σε κάποιο επόμενο στάδιο) ή προκειμένου να ληφθούν μετρήσεις απόδοσης. Η τιμή της παραμέτρου θ κυμαίνεται πάντα μεταξύ 1 και α (τιμή σχετικής πτητικότητας) για δυαδικά μίγματα. Η Εξίσωση 4.6 δίνει τον αριθμό των απαιτούμενων θεωρητικών βαθμίδων για κάποιο λόγο αναρροής μεγαλύτερο του ελάχιστου και αποτελεί τη μαθηματική έκφραση του διαγράμματος Gilliland. Η Εξίσωση 4.7 υπολογίζει το συνολικό βαθμό απόδοσης της στήλης, είναι γνωστή ως σχέση O' Connell και προκύπτει από την αναλυτικότερη έκφραση:

$$E_o = \frac{0,4983}{(\alpha \mu_F)^{0,252}} \quad (4.7')$$

όπου μ_F το ιξώδες του μίγματος τροφοδοσίας.

Η Εξίσωση 4.7, αποτελεί μια εύχρηστη, αλλά όχι πολύ ακριβή σχέση και ισχύει με την παραδοχή ότι το μίγμα τροφοδοσίας εισέρχεται στη στήλη ως κορεσμένο υγρό και το ιξώδες του είναι περίπου 0,3 cP, στο κανονικό σημείο ζέσης του, όπως συμβαίνει με τα περισσότερα υγρά. Επιπλέον η μελέτη του O' Connell οδηγεί σε αποδόσεις που ταιριάζουν περισσότερο σε δίσκους με κάψες, ενώ είναι συντηρητικές για τους υπόλοιπους τύπους. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση Kessler και Wankat (Wankat, 2012):

$$E_o = 0,52782 - 0,27511g(\alpha \mu) + 0,044923 [\lg(\alpha \mu)]^2 \quad (4.7'')$$

όπου η σχετική πτητικότητα α και το ιξώδες μ του διαλύματος υπολογίζονται στη μέση θερμοκρασία και πίεση λειτουργίας της στήλης. Σημειώνουμε ότι η αύξηση της σχετικής πτητικότητας ελαττώνει την απόδοση καθώς αυξάνεται η μάζα που πρέπει να μεταφερθεί, προκειμένου να επιτευχθεί ισορροπία, ενώ η αύξηση του ιξώδους (που στην παραπάνω εξίσωση εκφράζεται σε cP), επίσης, ελαττώνει την απόδοση καθώς μειώνονται οι ρυθμοί μεταφοράς μάζας.

Η Εξίσωση 4.8 υπολογίζει τον πραγματικό αριθμό βαθμίδων, ο οποίος εκφράζεται πάντα ως ακέραιος αριθμός (στρογγυλοποιημένος προς τα πάνω), σε αντίθεση με τον αριθμό θεωρητικών βαθμίδων που μπορεί να εκφράζεται και ως δεκαδικός. Ο πρώτος όρος του αθροίσματος αναφέρεται στους δίσκους που περιλαμβάνονται στη στήλη και ο δεύτερος στον μερικό αναβραστήρα που θεωρείται ως ιδανική βαθμίδα (απόδοσης 100%). Οι Εξισώσεις 4.9 έως 4.14 αποτελούν την έκφραση των ισοζυγίων μάζας στη στήλη. Στην πραγματικότητα προέρχονται από την ανάλυση της απόσταξης με τη μέθοδο Lewis (ή την ισοδύναμη McCabe - Thiele) που δέχεται ως αρχή τη διατήρηση σταθερών μοριακών ροών σε κάθε τμήμα της στήλης, χωρίς αυτό να είναι στη γενική περίπτωση απολύτως ορθό. Οι Εξισώσεις 4.9 και 4.10 είναι το ολικό και το ισοζύγιο μάζας του πτητικού συστατικού σε ολόκληρη τη στήλη, και η Εξίσωση 4.11 αποτελεί τη μαθηματική έκφραση του λόγου αναρροής, συνδέοντάς τον με την παροχή του αποστάγματος και της υγρής φάσης που επιστρέφει στη στήλη και ρέει στο εσωτερικό της, στο τμήμα εμπλουτισμού. Η Εξίσωση 4.12 δίνει την παροχή της φάσης ατμών στο τμήμα εμπλουτισμού. Οι Εξισώσεις 4.13 και 4.14 υπολογίζουν την παροχή των φάσεων υγρού και ατμών, στο εσωτερικό της στήλης, στο τμήμα εξάντλησης, καθώς η παροχή των φάσεων, στα δύο τμήματα, διαφοροποιείται λόγω εισόδου της τροφοδοσίας στο κοινό όριό τους. Η Εξίσωση 4.15 εκφράζει το συνολικό ύψος της αποστακτικής στήλης συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των βαθμίδων και κάποιου χώρου που πρέπει να υπάρχει, αφ' ενός πάνω από την πρώτη βαθμίδα, ώστε να καθίσταται δυνατός ο διαχωρισμός των σταγονιδίων από τη φάση των ατμών πριν την υγροποίησή τους, και εφ' ετέρου κάτω από τον τελευταίο δίσκο προκειμένου να εξασφαλίζεται η παρουσία υγρού μίγματος μέσα στη στήλη. Εμπειρικά το πρόσθετο ύψος, σε κάθε πλευρά, λαμβάνεται ίσο προς 1,5 ως 3 m. Ειδικότερα για τον πυθμένα της στήλης, μπορεί να γίνει λεπτομερής υπολογισμός του απαιτούμενου ύψους, ώστε να εξασφαλίζεται η τροφοδοσία της επόμενης μονάδας (π.χ. εναλλάκτη) για περίπου 5 min σε περίπτωση διαταραχής της λειτουργίας της στήλης. Προσεγγιστικά, στην περίπτωση μεγάλων στηλών, το επιπλέον συνολικά απαιτούμενο ύψος μπορεί να ληφθεί ίσο με το 15% του ύψους που καταλαμβάνουν οι δίσκοι.

Προκειμένου να υπολογιστεί με ασφάλεια η διάμετρος της αποστακτικής στήλης και δεδομένου ότι οι ρυθμοί ροής και οι φυσικές ιδιότητες του αποσταζόμενου μίγματος μεταβάλλονται, λόγω μεταβολής της σύστασης και της θερμοκρασίας (ενδεχόμενα και της πίεσης), θα πρέπει να γίνουν υπολογισμοί της σε διάφορα σημεία καθ' ύψος της στήλης. Χαρακτηριστικά σημεία είναι τα δύο άκρα και οι περιοχές τροφοδοσία ή απομάκρυνσης μίγματος (π.χ. ως πλάγιο προϊόν). Ως διάμετρος σχεδιασμού λαμβάνεται είτε η μεγαλύτερη από τις υπολογιζόμενες (ως ενιαία) ή τα επιμέρους τμήματα κατασκευάζονται με διαφορετικές διαμέτρους. Η δεύτερη επιλογή συνεπάγεται αυξημένο κόστος και εφαρμόζεται μόνο σε περιπτώσεις σημαντικών διαφορών των διαμέτρων που αντιστοιχούν σε κάθε τμήμα. Σε απλές στήλες ο υπολογισμός της διαμέτρου πάνω και κάτω από την τροφοδοσία θεωρείται ικανοποιητικός. Στον Πίνακα 4.3 ακολουθείται ο υπολογισμός της διαμέτρου με βάση τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία, κορυφή, πυθμένας και θέσεις άνω και κάτω της τροφοδοσίας. Οι Εξισώσεις 4.16 - 4.19 και 4.20 - 4.23 υπολογίζουν τις μαζικές ροές υγρού και

ατμών στις εξεταζόμενες χαρακτηριστικές θέσεις της στήλης και οι Εξισώσεις 4.24 - 4.27 και 4.28 - 4.31 δίνουν το συντελεστή ροής υγρού - ατμών και τον παράγοντα δυναμικότητας στις θέσεις αυτές. Ο παράγοντας δυναμικότητας προσδιορίστηκε από τους Fair και Matthews και μοντελοποιήθηκε από τους Kessler και Wankat ως συνάρτηση της απόστασης μεταξύ των δίσκων. Στον Πίνακα 4.2 δίνονται οι τιμές των σταθερών των Εξισώσεων 4.28 - 4.31.

Απόσταση δίσκων (cm)	a_d	b_d	c_d
15	-1,1977	-0,53143	-0,18790
23	-1,1622	-0,56014	-0,18168
30	-1,0674	-0,55780	-0,17919
46	-1,0262	-0,63513	-0,20097
61	-0,94506	-0,70234	-0,22618
91	-0,85984	-0,73980	-0,23735

Πίνακας 4.2 Συντελεστές υπολογισμού του παράγοντα δυναμικότητας συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των δίσκων.

Οι Εξισώσεις 4.32 - 4.35 εκφράζουν το συντελεστή της ταχύτητας πλημμύρισης και οι Εξισώσεις 4.36 - 4.39 υπολογίζουν την ταχύτητα πλημμύρισης, λόγω υπερβολικής παράσυρσης σταγονιδίων από τον ανερχόμενο ατμό, στις εξεταζόμενες θέσεις. Η τελευταία εξίσωση πρέπει να χρησιμοποιείται με επιφύλαξη όταν εμφανίζεται κάποια από τις ακόλουθες συνθήκες:

- οι οπές των δίσκων είναι σχετικά μεγάλες ($> 6,5$ mm),
- το διάλυμα παρουσιάζει έντονο αφρισμό
- το ύψος του υπερχειλιστήρα ξεπερνά το 15% της απόστασης των δίσκων
- η διατομή του συνόλου των ενεργών οπών, A_h^J , είναι μικρότερη του 10% της ενεργού διατομής του δίσκου, A_a^J (ενεργός διατομή = ολική διατομή - 2 * διατομή αγωγού καθόδου, για δίσκους μονού περάσματος)

Στην τελευταία περίπτωση εφαρμόζεται η εξίσωση:

$$u_f^J = 0,3048 K_d^J \left(5 \frac{A_h^J}{A_a^J} + 0,5 \right) \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v}} \quad (4.36' - 4.39')$$

Οι Εξισώσεις 4.40 - 4.43 υπολογίζουν την φαινόμενη ταχύτητα των ατμών (βασισμένη στην καθαρή διατομή της στήλης) ως κλάσμα της ταχύτητας πλημμύρισης. Οι Coulson, Richardson και Sinnott προτείνουν ταχύτητα ατμών, κατά τη λειτουργία της στήλης, ίση προς 0,70 ως 0,90 της ταχύτητας πλημμύρισης, και κατά το σχεδιασμό, ίση προς 0,80 - 0,85. Ο Wankat προτείνει ταχύτητα λειτουργίας στην περιοχή 0,65 - 0,90 και οι Jones και Mellbom συνιστούν την τιμή 0,75. Οι Εξισώσεις 4.44 - 4.47 δίνουν την καθαρή διατομή, που αποτελεί την επιφάνεια του δίσκου κάθετα στην οποία ρέουν οι ατμοί. Ισούται με την ολική διατομή ελαττωμένη κατά τη διατομή του αγωγού καθόδου. Ως αρχική εκτίμηση προτείνεται (Coulson κ.ά., 1996) η διατομή του αγωγού καθόδου να λαμβάνεται ίση προς το 12% της ολικής. Οι Εξισώσεις 4.48 - 4.51 εκφράζουν την ολική διατομή και οι Εξισώσεις 4.52 - 4.55 υπολογίζουν τη διάμετρο της αποστακτικής στήλης σε κάθε εξεταζόμενη θέση.

Οι Εξισώσεις 4.56 (που αναφέρεται και ως εξίσωση Kirkbride) και 4.57 προσδιορίζουν την άριστη βαθμίδα εισαγωγής της τροφοδοσίας, υπολογίζοντας τον αριθμό δίσκων που δομούν καθένα από τα δύο τμήματα της στήλης.

Οι Εξισώσεις 4.58 έως 4.74 σχετίζονται με τη θερμική ανάλυση της αποστακτικής στήλης. Πρόκειται, ουσιαστικά, για εξισώσεις υπολογισμού επιφανειών μεταφοράς θερμότητας και βοηθητικών παροχών. Πρέπει να τονιστεί ότι η ακριβής δομή του συστήματος εναλλαγής θερμότητας μίας αποστακτικής στήλης και κατ' επέκταση το μαθηματικό πρότυπο που το περιγράφει, εξαρτώνται τόσο από τις προδιαγραφές σχεδιασμού που ισχύουν σε κάθε περίπτωση, όσο και από τις μεθόδους ενεργειακής ολοκλήρωσης που εφαρμόζονται. Στο μαθηματικό πρότυπο που αναπτύσσεται στην παρούσα παράγραφο γίνεται η παραδοχή ότι το μίγμα προς

απόσταξη και τα τελικά προϊόντα βρίσκονται σε υγρή φάση. Αυτό δεν είναι απόλυτο. Ενδέχεται το τροφοδοτούμενο μίγμα να προέρχεται από αντιδραστήρα που επεξεργάζεται αέρια μίγματα, οπότε ο θερμοαντήρας μπορεί να αντικατασταθεί από ένα αρχικό συμπυκνωτήρα ή, ακόμη πιθανότερο, το αέριο ρεύμα να οδηγείται κατ' ευθείαν στη στήλη. Αντίστοιχα, ένα τουλάχιστον από τα προϊόντα, ενδέχεται να οδηγείται σε επόμενη στήλη ή προς επεξεργασία σε αέρια φάση, οπότε δε θα υπάρχει τελικός ψυκτήρας, αλλά θα πρέπει να εξεταστεί η εγκατάσταση μερικού συμπυκνωτήρα ή ολικού αναβραστήρα. Επιπλέον, η θερμική ολοκλήρωση οδηγεί σε εναλλαγή θερμότητας μεταξύ ρευμάτων περιορίζοντας τη χρήση βοηθητικών παροχών, ενώ η εφαρμογή αντλιών θερμότητας επιτρέπει τη μεταφορά θερμικών φορτίων από χαμηλές σε υψηλότερες θερμοκρασίες και καθιστά επιλογή προς εξέταση τη θέρμανση του αναβραστήρα με θερμότητα που θα μεταφέρεται από το συμπυκνωτήρα (ιδιαίτερα στην περίπτωση κοντινών θερμοκρασιών έναρξης βρασμού του αποστάγματος και υπολείμματος). Η δομή του συστήματος εναλλαγής θερμότητας του Σχήματος 4.5 είναι μάλλον απίθανη, αλλά δίνεται επειδή αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση και μία αρχική εκτίμηση του συνολικού κόστους της διεργασίας, και θα αριστοποιηθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Σε κάθε περίπτωση το μαθηματικό πρότυπο θα πρέπει να τροποποιείται κατάλληλα, ώστε να περιγράφει το συγκεκριμένο σύστημα.

Οι Εξισώσεις 4.58 και 4.59 υπολογίζουν το μοριακό κλάσμα του πτητικού συστατικού στις δύο φάσεις. Κάθε εξίσωση λαμβάνει τρεις μορφές, ανάλογα με τη φυσική κατάσταση της τροφοδοσίας, και στην περίπτωση μίγματος ατμών - υγρού εκφράζουν, ουσιαστικά, ένα υπολογισμό απόσταξης ισορροπίας. Η Εξίσωση 4.60 προσδιορίζει το θερμικό φορτίο του θερμοαντήρα, ανάλογα τη φυσική κατάσταση εξόδου της τροφοδοσίας από αυτόν, και με την προϋπόθεση ότι το αρχικό μίγμα είναι υγρό. Οι Εξισώσεις 4.61 έως 4.64 δίνουν τα θερμικά φορτία του συμπυκνωτήρα, αναβραστήρα, ψυκτήρα αποστάγματος και ψυκτήρα υπολείμματος αντίστοιχα, θεωρώντας ότι το απόσταγμα και το υπόλειμμα απομακρύνονται από τη στήλη ως κορεσμένα υγρά και η τελική τους κατάσταση είναι υπόψυκτα υγρά. Οι Εξισώσεις 4.65 έως 4.69 εκφράζουν τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων σε κάθε εναλλάκτη (θερμοαντήρα, συμπυκνωτήρα, αναβραστήρα, ψυκτήρα αποστάγματος και ψυκτήρα υπολείμματος, αντίστοιχα), μέσω του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και της λογαριθμικής μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς. Σημειώνουμε ότι στον αναβραστήρα η μεταφορά θερμότητας γίνεται ισοθερμοκρασιακά και για τα δύο ρεύματα διεργασίας (υπόλειμμα - ατμός θέρμανσης). Οι Εξισώσεις 4.70 έως 4.74 συνδέουν το ποσό θερμότητας που εναλλάσσεται σε κάθε εναλλάκτη με τις καταναλώσεις των βοηθητικών παροχών που τροφοδοτούν τον καθένα.

Οι Εξισώσεις 4.75 - 4.104 χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των θερμοκρασιών έναρξης βρασμού και υγροποίησης σε τρία χαρακτηριστικά σημεία της στήλης, στην τροφοδοσία ($J = F$), ώστε να γνωρίζουμε τη φυσική κατάσταση του μίγματος που τροφοδοτείται, στην κορυφή της στήλης ($J = D$), που αποτελεί το ψυχρότερο σημείο της, και απαιτείται ο προσδιορισμός του είδους και της θερμοκρασιακής περιοχής λειτουργίας του ψυκτικού συστήματος για τη συμπύκνωση των ατμών του αποστάγματος, και στον πυθμένα της στήλης ($J = B$), που αποτελεί τη θερμότερη περιοχή της, και απαιτείται ο προσδιορισμός του είδους και της θερμοκρασιακής περιοχής λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης του αναβραστήρα. Αναλυτικότερα, οι Εξισώσεις 4.75 - 4.80 υπολογίζουν την τάση ατμών των δύο συστατικών, στις τρεις χαρακτηριστικές θέσεις, στη θερμοκρασία έναρξης βρασμού του μίγματός τους, ενώ οι Εξισώσεις 4.81 - 4.86 δίνουν τους αντίστοιχους υπολογισμούς για τη θερμοκρασία έναρξης υγροποίησης. Η τάση ατμών διαφέρει σε κάθε θέση, για το ίδιο συστατικό, λόγω της διαφορετικής θερμοκρασίας της εκάστοτε θέσης. Οι δώδεκα αυτές εξισώσεις αποτελούν εκφράσεις της εξίσωσης Antoine. Οι Εξισώσεις 4.87 - 4.92 παρέχουν το συντελεστή κατανομής των δύο συστατικών, στις χαρακτηριστικές θέσεις, στη θερμοκρασία έναρξης βρασμού του μίγματός τους, για την πίεση της στήλης, και οι Εξισώσεις 4.93 - 4.98 δίνουν το συντελεστή κατανομής για τις θερμοκρασίες έναρξης υγροποίησης και την ίδια πίεση. Η σύγκλιση των Εξισώσεων 4.99 - 4.101 εξασφαλίζει τον προσδιορισμό των τριών ζητούμενων θερμοκρασιών έναρξης βρασμού και η σύγκλιση των Εξισώσεων 4.102 - 4.104 τον προσδιορισμό των αντίστοιχων θερμοκρασιών έναρξης υγροποίησης, για τη σύσταση των ρευμάτων και την πίεση στις εξεταζόμενες θέσεις. Οι έξι αυτές εξισώσεις ουσιαστικά εκφράζουν την ισότητα το αθροίσματος των μοριακών κλασμάτων των συστατικών, σε κάθε φάση και θέση, με τη μονάδα. Σημειώνουμε ότι, στην περίπτωση που λαμβάνεται απόσταγμα και/ή υπόλειμμα με υψηλή καθαρότητα (> 98%), οι θερμοκρασίες έναρξης βρασμού και υγροποίησης του σχεδόν καθαρού ρεύματος έχουν παραπλήσιες τιμές και ο υπολογισμός της μίας εκ των δύο είναι αρκετός για πρακτικούς υπολογισμούς. Οι Εξισώσεις 4.105 - 4.107 υπολογίζουν τη σχετική πτητικότητα του πτητικότερου συστατικού ως προς το λιγότερο πτητικό, συναρτήσει του συντελεστή κατανομής, στην τροφοδοσία, το απόσταγμα και το υπόλειμμα, και η Εξίσωση 4.108 δίνει την ελάχιστη τιμή της, η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του αριθμού

των βαθμίδων με την εξεταζόμενη μέθοδο. σχετική πτητικότητα Συχνά χρησιμοποιείται η μέση τιμή της σχετικής πτητικότητας, που υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$\bar{a} = \sqrt{a^D a^B} \quad (4.108') \text{ ή}$$

$$\bar{a} = (a^D a^F a^B)^{1/3} \quad (4.108'')$$

Στην περίπτωση απόσταξης συστατικών με κοντινά σημεία ζέσης, οι τιμές της σχετικής πτητικότητας δε μεταβάλλονται σημαντικά καθ' ύψος της στήλης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή (συνήθως στην περιοχή 1 έως 2) που προκύπτει από τις ανωτέρω σχέσεις. Στην περίπτωση εμφάνισης σημαντικής διαφοράς στα σημεία ζέσης των αποσταζόμενων συστατικών, που συνοδεύεται, γενικά, από σημαντική διαφορά της σχετικής πτητικότητας μεταξύ κορυφής και πυθμένα, προτείνεται η χρησιμοποίηση της μικρότερης τιμής της για τον αρχικό υπολογισμό του αριθμού των βαθμίδων.

Οι Εξισώσεις 4.109 - 4.120 δίνουν τη θερμοχωρητικότητα της υγρής φάσης για κάθε συστατικό στη θερμοκρασία που επικρατεί στις θέσεις F , D και B της στήλης, καθώς και στις θέσεις πριν τον θερμαντήρα ($J = H$), μετά τον ψυκτήρα του αποστάγματος ($J = DC$) και μετά τον ψυκτήρα του υπολείμματος ($J = BC$). Η χρήση αυτών των εξισώσεων μπορεί να αποφευχθεί με την επιλογή μέσης τιμής θερμοχωρητικότητας για κάθε συστατικό στην εξεταζόμενη θερμοκρασιακή περιοχή. Οι Εξισώσεις 4.121 και 4.122 υπολογίζουν τη θερμοχωρητικότητα της αέρια φάσης των δύο συστατικών στη θερμοκρασία αποστάγματος (μόνο σε αυτή τη περιοχή υπάρχει μεταβολή της αισθητής θερμότητας των ατμών). Οι Εξισώσεις 4.123 - 4.128 δίνουν την ενθαλπία εξάτμισης των δύο συστατικών στις θερμοκρασίες έναρξης βρασμού των χαρακτηριστικών θέσεων της στήλης, και μπορούν να αντικατασταθούν από μέση τιμή για κάθε συστατικό. Οι Εξισώσεις 4.129 - 4.134 υπολογίζουν την μοριακή πυκνότητα της υγρής φάσης κάθε συστατικού στις χαρακτηριστικές θέσεις της στήλης και μπορούν να αντικατασταθούν από μέση τιμή για κάθε συστατικό στην εξεταζόμενη θερμοκρασιακή περιοχή, ενώ οι Εξισώσεις 4.135 - 4.137 υπολογίζουν την μοριακή πυκνότητα της αέριας φάσης, για την πίεση που επικρατεί στη στήλη, στις θέσεις F , D και B , με την παραδοχή ότι συμπεριφέρεται ως ιδανικό αέριο.

Πρέπει να τονίσουμε ότι η μορφή των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό φυσικών ιδιοτήτων ποικίλει ανάλογα με τη βιβλιογραφική πηγή, από την οποία προέρχονται, και το εξεταζόμενο συστατικό. Οι συγκεκριμένες εξισώσεις που περιλαμβάνονται στον Πίνακα 4.3 αφορούν στις ιδιότητες των συστατικών που αναφέρονται στο παράδειγμα της παραγράφου 4.4.

Οι Εξισώσεις 4.138 - 4.153 χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων των μιγμάτων στις χαρακτηριστικές θέσεις του συστήματος. Έτσι, οι Εξισώσεις 4.138 - 4.143 υπολογίζουν τη θερμοχωρητικότητα υγρής φάσης των ρευμάτων στις θέσεις αυτές, η Εξίσωση 4.144 δίνει τη θερμοχωρητικότητα των ατμών του αποστάγματος, οι Εξισώσεις 4.145 - 4.147 εκφράζουν την ενθαλπία εξάτμισης στις χαρακτηριστικές θέσεις της στήλης (F , D και B), οι Εξισώσεις 4.148 - 4.150 δίνουν τη μοριακή πυκνότητα υγρής φάσης και οι Εξισώσεις 4.151 - 4.153 υπολογίζουν την επιφανειακή τάση των ρευμάτων στις θέσεις αυτές. Παρατηρείται ότι η ιδιότητα του μίγματος έχει εκφραστεί ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των αντίστοιχων ιδιοτήτων των επιμέρους καθαρών συστατικών, εκτός από την περίπτωση της επιφανειακής τάσης, δεδομένου ότι, στα μίγματα, η σύσταση της επιφάνειας δεν είναι ίδια με εκείνη του κυρίου όγκου τους (Reed et al., 1977).

Σχετικά με τις εξισώσεις υπολογισμού της επιφανειακής τάσης, στο πρότυπο του Πίνακα 4.3 χρησιμοποιείται η έννοια του παράγωρου, που αποτελεί μία ανεξάρτητη της θερμοκρασίας παράμετρο, που προτάθηκε από τον Sugden και προσδιορίζεται από δομή των μορίων των εξεταζόμενων ουσιών. Οι Εξισώσεις 4.151 - 4.153 προέρχονται από τη γενικότερη σχέση:

$$\sigma_m^{1/4} = \sum_{i=1}^n [P_i] (\rho_{im} x_i - \rho_{vm} y_i) / 1000 \quad (4.151-4.153)$$

όπου ο δείκτης m αναφέρεται στις ιδιότητες του μίγματος και x_i, y_i είναι τα μοριακά κλάσματα του i -συστατικού στις φάσεις υγρού και ατμών, αντίστοιχα. Ο όρος που αναφέρεται στη φάση των ατμών μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος, λόγω της πολύ μικρής πυκνότητάς τους σε σχέση με την πυκνότητα του υγρού.

Οι Εξισώσεις 4.154 - 4.160 εφαρμόζονται για τον προσδιορισμό της θερμικής κατάστασης της τροφοδοσίας. Οι Εξισώσεις 4.154 και 4.155 δίνουν την τάση ατμών των καθαρών συστατικών στη θερμοκρασία τροφοδοσίας, ενώ οι Εξισώσεις 4.156 και 4.157 υπολογίζουν τους αντίστοιχους συντελεστές κατανομής. Ο υπολογισμός τους απαιτείται μόνο στην περίπτωση τροφοδοσίας μίγματος ατμών - υγρού, προκειμένου να εφαρμοστεί η Εξίσωση 4.1α. Οι Εξισώσεις 4.158 και 4.159 υπολογίζουν τη θερμοχωρητικότητα αέριας φάσης των συστατικών, στη θερμοκρασία τροφοδοσίας, και η Εξίσωση 4.160 δίνει την αντίστοιχη τιμή του μίγματος. Οι τρεις αυτές σχέσεις εφαρμόζονται μόνο στην περίπτωση που το μίγμα εισέρχεται στη στήλη ως υπέρθερμος ατμός.

Σημειώνουμε ότι οι θερμοχωρητικότητες και οι ενθαλπίες εξάτμισης των συστατικών απαιτούνται για τη θερμική ανάλυση της διεργασίας, ενώ οι πυκνότητες και οι επιφανειακές τάσεις για τον υπολογισμό της διαμέτρου της στήλης, καθώς και ότι η αντικατάσταση εξισώσεων με μέσες τιμές περιορίζει την ακρίβεια της λύσης και τη διερεύνηση της κατά την μεταβολή της πίεσης.

Τέλος, η Εξίσωση 4.161 δίνει τη ενθαλία εξάτμισης του νερού συναρτήσει της θερμοκρασίας και οι Εξισώσεις 4.162 - 4.164 δίνουν το μέσο μοριακό βάρος του μίγματος στις χαρακτηριστικές θέσεις της στήλης (στην περίπτωση απόσταξης μίγματος ισομερών ενώσεων το μοριακό βάρος του παραμένει σταθερό σε κάθε θέση).

Οι εξισώσεις που αναφέρονται στον Πίνακα 4.3 έχουν χωριστεί σε επιμέρους ομάδες ανάλογα με το λόγο εφαρμογής τους. Πρέπει να τονιστεί ότι δεν είναι απαραίτητη η επίλυση όλων των εξισώσεων για κάθε πρόβλημα απόσταξης. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι, ο υπολογισμός των βαθμίδων ισορροπίας ή των διαστάσεων της στήλης είναι ανεξάρτητος της θερμικής ανάλυσής της, ενώ ο υπολογισμός της διαμέτρου δεν προϋποθέτει εκείνον των βαθμίδων.

Θερμική κατάσταση τροφοδοσίας	
$\left[\begin{array}{l} \frac{x_F}{(1-q)+(K_1^F-1)^{-1}} + \frac{1-x_F}{(1-q)+(K_2^F-1)^{-1}} = 0 \quad T_{bp}^F \leq T_f \leq T_{dp}^F \\ q = 1 + \frac{C_{p_l}^F (T_{bp}^F - T_f)}{\Delta H^F} \quad T_f < T_{bp}^F \\ q = -\frac{C_{p_v}^F (T_f - T_{dp}^F)}{\Delta H^F} \quad T_f > T_{dp}^F \end{array} \right. \quad (4.1)$	
Μέθοδος Fenske - Underwood - Gilliland (FUG)	
$SF = \frac{x_D}{1-x_D} \frac{1-x_B}{x_B} \quad (4.2)$	
$N_{\min} = \frac{\ln SF}{\ln a} \quad (4.3)$	
$\frac{ax_F}{a-\theta} + \frac{1-x_F}{1-\theta} = 1-q \quad (4.4)$	
$R_{\min} = \frac{ax_D}{a-\theta} + \frac{1-x_D}{1-\theta} - 1 \quad (4.5)$	
$\frac{N - N_{\min}}{N + 1} = 0,75 \left[1 - \left(\frac{R - R_{\min}}{R + 1} \right)^{0,57} \right] \quad (4.6)$	
Πραγματικές βαθμίδες	

$E_o = \frac{0,50}{(0,30a)^{0,25}}$	(4.7)
$N_{act} = \frac{N-1}{E_o} + 1$	(4.8)
Ισοζύγια μάζας	
$F = B + D$	(4.9)
$Fx_F = Bx_B + Dx_D$	(4.10)
$R = \frac{L}{D}$	(4.11)
$V = L + D$	(4.12)
$q = \frac{L' - L}{F}$	(4.13)
$L' = B + V'$	(4.14)
Διαστάσεις στήλης	
$H = 2H_o + (N_{act} - 2)H_1$	(4.15)
$W_L^J = 3,6L^J(MW)^J$	(4.16-4.19) ³
$W_V^J = 3,6V^J(MW)^J$	(4.20-4.23) ³
$F_{lv}^J = \frac{W_L^J}{W_V^J} \sqrt{\frac{\rho_v^J}{\rho_l^J}}$	(4.24-4.27) ³
$\lg C_{sb}^J = \left[a_d + b_d \lg F_{lv}^J + c_d (\lg F_{lv}^J)^2 \right]$	(4.28-4.31) ³
$K_d^J = C_{sb}^J \left(\frac{\sigma^J}{20} \right)^{0,2}$	(4.32-4.35) ³
$u_f^J = 0,3048 K_d^J \sqrt{\frac{\rho_l^J - \rho_v^J}{\rho_v^J}}$	(4.36-4.39) ³
$u^J = (fr)u_f^J$	(4.40-4.43) ³
$A_n^J = \frac{V^J}{\rho_v^J u^J}$	(4.44-4.47) ³
$A_{act}^J = \frac{A_n^J}{n}$	(4.48-4.51) ³
$A_{act}^J = \frac{\pi}{4} D_c^{J^2}$	(4.52-4.55) ³
Βαθμίδα τροφοδοσίας	
$\frac{N_D}{N_B} = \left[\frac{B}{D} \frac{1-x_F}{x_F} \left(\frac{x_B}{1-x_D} \right)^2 \right]^{0,206}$	(4.56)
$N_{act} = N_D + N_B$	(4.57)
Θερμική ανάλυση	
$\left[\begin{array}{l} x_{f_i} = \frac{x_F}{(1-q)(K_1^F - 1) + 1} \quad T_{bp}^F \leq T_f \leq T_{dp}^F \\ x_{f_i} = 1 \quad T_f \leq T_{bp}^F \\ x_{f_i} = 0 \quad T_f \geq T_{dp}^F \end{array} \right]$	(4.58)

$\left[\begin{array}{l} x_{f_v} = K_1^F x_{f_i} \\ x_{f_v} = 0 \\ x_{f_v} = 1 \end{array} \right. \quad \left. \begin{array}{l} T_{bp}^F \leq T_f \leq T_{dp}^F \\ T_f \leq T_{bp}^F \\ T_f \geq T_{dp}^F \end{array} \right]$	(4.59)
$\left[\begin{array}{l} Q_H = F(C_{p_i}^F T_f - C_{p_i}^H T_{fo}) + \\ + (1-q)F(x_{f_v} \Delta H_1^F + (1-x_{f_v}) \Delta H_2^F) \\ Q_H = F(C_{p_i}^F T_f - C_{p_i}^H T_{fo}) \\ Q_H = F(C_{p_i}^F T_f - C_{p_i}^H T_{fo} + \Delta H_{T_f}^F) \end{array} \right. \quad \left. \begin{array}{l} T_{bp}^F \leq T_f \leq T_{dp}^F \\ T_f \leq T_{bp}^F \\ T_f \geq T_{dp}^F \end{array} \right]$	(4.60)
$Q_C = V(\Delta H^D - C_{p_i}^D T_{bp}^D + C_{p_v}^D T_{dp}^D)$	(4.61)
$Q_R = V' \Delta H^B$	(4.62)
$Q_{DC} = D(C_{p_i}^D T_{bp}^D - C_{p_i}^{DC} T_o^D)$	(4.63)
$Q_{BC} = B(C_{p_i}^B T_{bp}^B - C_{p_i}^{BC} T_o^B)$	(4.64)
$Q_H = U_H A_H \frac{T_f - T_{fo}}{\ln \frac{T_s - T_{fo}}{T_s - T_f}}$	(4.65)
$Q_C = U_C A_C \frac{(T_{bp}^D - T_{w_1}) - (T_{dp}^D - T_{w_2})}{\ln \frac{T_{bp}^D - T_{w_1}}{T_{dp}^D - T_{w_2}}}$	(4.66)
$Q_R = U_R A_R (T_s - T_{bp}^B)$	(4.67)
$Q_{DC} = U_{DC} A_{DC} \frac{(T_{bp}^D - T_{w_2}) - (T_o^D - T_{w_1})}{\ln \frac{T_{bp}^D - T_{w_2}}{T_o^D - T_{w_1}}}$	(4.68)
$Q_{BC} = U_{BC} A_{BC} \frac{(T_{bp}^B - T_{w_2}) - (T_o^B - T_{w_1})}{\ln \frac{T_{bp}^B - T_{w_2}}{T_o^B - T_{w_1}}}$	(4.69)
$Q_H = m_s^H \Delta H_{T_s}$	(4.70)
$Q_C = m_w^C C_{p_w} (T_{w_2} - T_{w_1})$	(4.71)
$Q_R = m_s^R \Delta H_{T_s}$	(4.72)
$Q_{DC} = m_w^{DC} C_{p_w} (T_{w_2} - T_{w_1})$	(4.73)
$Q_{BC} = m_w^{BC} C_{p_w} (T_{w_2} - T_{w_1})$	(4.74)
Θερμοκρασίες έναρξης βρασμού και υγροποίησης - Σχετική πτητικότητα	
$P_i^{\omega J(bp)} = \frac{1}{760} \exp \left(A_i - \frac{B_i}{C_i + (T_{bp}^J + 273,15)} \right)$	(4.75-4.80) ¹
$P_i^{\omega J(dp)} = \frac{1}{760} \exp \left(A_i - \frac{B_i}{C_i + (T_{dp}^J + 273,15)} \right)$	(4.81-4.86) ¹

$K_i^{J(bp)} = \frac{P_i^{\circ J(bp)}}{P}$	(4.87-4.92) ¹
$K_i^{J(dp)} = \frac{P_i^{\circ J(dp)}}{P}$	(4.93-4.98) ¹
$x_J K_1^{J(bp)} + (1-x_J) K_2^{J(bp)} = 1$	(4.99-4.101) ¹
$x_J / K_1^{J(dp)} + (1-x_J) / K_2^{J(dp)} = 1$	(4.102-4.104) ¹
$a^F = \frac{K_1^F}{K_2^F}$	(4.105)
$a^D = \frac{K_1^{D(bp)}}{K_2^{D(bp)}}$	(4.106)
$a^B = \frac{K_1^{B(bp)}}{K_2^{B(bp)}}$	(4.107)
$a = \min(a^F, a^D, a^B)$	(4.108)
Θερμοφυσικές ιδιότητες	
$C_{p,i}^J = (C_{1i} + C_{2i}(T^J) + C_{3i}(T^J)^2 + C_{4i}(T^J)^3) / 1000$	(4.109-4.120) ²
$C_{p,i}^D = \left\{ C_{5i} + C_{6i} \left[\frac{C_{7i}/T_{bp}^D}{\sinh(C_{7i}/T_{bp}^D)} \right]^2 + C_{8i} \left[\frac{C_{9i}/T_{bp}^D}{\cosh(C_{9i}/T_{bp}^D)} \right]^2 \right\} / 1000$	(4.121-4.122)
$\Delta H_i^J = \frac{C_{10i}}{1000} \left(1 - \frac{T^J + 273,15}{T_{c_i}} \right)^{C_{11i}}$	(4.123-4.128) ¹
$\rho_{li}^J = \frac{C_{12i}}{C_{13i} \left[1 + (1 - T^J / C_{14i})^{C_{15i}} \right]}$	(4.129-4.134) ¹
$\rho_v^J = \frac{P}{RT^J}$	(4.135-4.137) ¹
$C_{p,i}^J = x_J C_{p,i,1}^J + (1-x_J) C_{p,i,2}^J$	(4.138-4.143) ²
$C_{p,i}^D = x_D C_{p,i,1}^D + (1-x_D) C_{p,i,2}^D$	(4.144)
$\Delta H^J = x_J \Delta H_1^J + (1-x_J) \Delta H_2^J$	(4.145-4.147) ¹
$\rho_i^J = x_J \rho_{i1}^J + (1-x_J) \rho_{i2}^J$	(4.148-4.150) ¹
$\sigma^J = \left\{ \frac{\rho_i^J}{1000} (x_J [P_1] + (1-x_J) [P_2]) \right\}^4$	(4.151-4.153) ¹
$P_i^{\circ F} = \frac{1}{760} \exp \left(A_i - \frac{B_i}{C_i + (T_f + 273,15)} \right)$	(4.154-4.155)
$K_i^F = \frac{P_i^{\circ F}}{P}$	(4.156-4.157)
$C_{p,i}^F = \left\{ C_{5i} + C_{6i} \left[\frac{C_{7i}/T_f}{\sinh(C_{7i}/T_f)} \right]^2 + C_{8i} \left[\frac{C_{9i}/T_f}{\cosh(C_{9i}/T_f)} \right]^2 \right\} / 1000$	(4.158-4.159)
$C_{p,i}^F = x_F C_{p,i,1}^F + (1-x_F) C_{p,i,2}^F$	(4.160)

$\Delta H_{T_s} = 2491,5 - 2,048T_s - 0,0032T_s^2$	(4.161)
$(MW)^J = x_J(MW)_1 + (1-x_J)(MW)_2$	(4.162-4.164) ¹

¹ $J = D$ (κορυφή στήλης), B (πυθμένας στήλης), F (θέση τροφοδοσίας)

² $J = H$ (είσοδος θερμαντήρα τροφοδοσίας), D (έξοδος συμπυκνωτήρα), B (έξοδος αναβραστήρα), F (θέση τροφοδοσίας), DC (έξοδος ψυκτήρα αποστάγματος), BC (έξοδος ψυκτήρα υπολείμματος)

³ $J = D$ (κορυφή στήλης), B (πυθμένας στήλης) και F^+ (πάνω από την τροφοδοσία), F^- (κάτω από την τροφοδοσία). $L^J = L$, $V^J = V$ για $J = D, F^+$. $L^J = L'$, $V^J = V'$ για $J = B, F^-$.

* $i = 1, 2$

** $T^H \equiv T_{fo}$, $T^F \equiv T_f$, $T^D \equiv T_{bp}^D$, $T^B \equiv T_{bp}^B$, $T^{DC} \equiv T_o^D$, $T^{BC} \equiv T_o^B$

Πίνακας 4.3 Εξισώσεις κλασματικής απόσταξης. Μέθοδος FUG.

Στον Πίνακα 4.4 συνοψίζονται οι μεταβλητές των παραπάνω εξισώσεων και αναγράφονται αναλυτικά οι μονάδες τους. Στον Πίνακα 4.5 δίνονται τα τεχνικά δεδομένα του μαθηματικού προτύπου και στον Πίνακα 4.6 αναφέρονται οι προδιαγραφές σχεδιασμού, δηλαδή οι μεταβλητές εκείνες, οι τιμές των οποίων θεωρούνται εξαρχής καθορισμένες, για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

a	Ελάχιστη σχετική πτητικότητα σε ολόκληρη τη στήλη, (-)
A_{act}^B	Ολική διατομή στήλης στον πυθμένα, (m ²)
A_{act}^D	Ολική διατομή στήλης στην κορυφή, (m ²)
$A_{act}^{F^+}$	Ολική διατομή στήλης πάνω από την τροφοδοσία, (m ²)
$A_{act}^{F^-}$	Ολική διατομή στήλης κάτω από την τροφοδοσία, (m ²)
a_B	Σχετική πτητικότητα υπολείμματος, (-)
A_{BC}	Επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας ψυκτήρα υπολείμματος, (m ²)
A_C	Επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας συμπυκνωτήρα, (m ²)
a_D	Σχετική πτητικότητα αποστάγματος, (-)
A_{DC}	Επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας ψυκτήρα αποστάγματος, (m ²)
a_F	Σχετική πτητικότητα μίγματος τροφοδοσίας στην είσοδο της στήλης, (-)
A_H	Επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας θερμαντήρα, (m ²)
A_n^B	Καθαρή διατομή στήλης στον πυθμένα, (m ²)
A_n^D	Καθαρή διατομή στήλης στην κορυφή, (m ²)
$A_n^{F^+}$	Καθαρή διατομή στήλης πάνω από την τροφοδοσία, (m ²)
$A_n^{F^-}$	Καθαρή διατομή στήλης κάτω από την τροφοδοσία, (m ²)
A_R	Επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας αναβραστήρα, (m ²)
B	Μοριακός ρυθμός ροής υπολείμματος, (kmol/s)
$C_{p_i}^B$	ΘX υπολείμματος στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_{bp}^B , (kJ/kmol/°C)
$C_{p_i}^{BC}$	ΘX υπολείμματος στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_o^B , (kJ/kmol/°C)
$C_{p_i}^D$	ΘX αποστάγματος στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_{bp}^D , (kJ/kmol/°C)
$C_{p_i}^{DC}$	ΘX αποστάγματος στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_o^D , (kJ/kmol/°C)
$C_{p_i}^F$	ΘX μίγματος τροφοδοσίας στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_f , (kJ/kmol/°C)
$C_{p_i}^H$	ΘX μίγματος τροφοδοσίας στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_{fo} , (kJ/kmol/°C)
$C_{p_i1}^B$	ΘX συστατικού 1 στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_{bp}^B , (kJ/kmol/°C)

C_{p1}^{BC}	ΘΧ συστατικού 1 στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_o^B , (kJ/kmol/°C)
C_{p1}^D	ΘΧ συστατικού 1 στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_{bp}^D , (kJ/kmol/°C)
C_{p1}^{DC}	ΘΧ συστατικού 1 στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_o^D , (kJ/kmol/°C)
C_{p1}^F	ΘΧ συστατικού 1 στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_f , (kJ/kmol/°C)
C_{p1}^H	ΘΧ συστατικού 1 στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_{fo} , (kJ/kmol/°C)
C_{p2}^B	ΘΧ συστατικού 2 στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_{bp}^B , (kJ/kmol/°C)
C_{p2}^{BC}	ΘΧ συστατικού 2 στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_o^B , (kJ/kmol/°C)
C_{p2}^D	ΘΧ συστατικού 2 στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_{bp}^D , (kJ/kmol/°C)
C_{p2}^{DC}	ΘΧ συστατικού 2 στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_o^D , (kJ/kmol/°C)
C_{p2}^F	ΘΧ συστατικού 2 στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_f , (kJ/kmol/°C)
C_{p2}^H	ΘΧ συστατικού 2 στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_{fo} , (kJ/kmol/°C)
C_{pv}^D	ΘΧ αέριας φάσης αποστάγματος σε θερμοκρασία T_{bp}^D , (kJ/kmol/°C)
C_{pv}^F	ΘΧ μίγματος τροφοδοσίας στην αέρια φάση σε θερμοκρασία T_f , (kJ/kmol/°C)
C_{pv1}^D	ΘΧ συστατικού 1 στην αέρια φάση σε θερμοκρασία T_{bp}^D , (kJ/kmol/°C)
C_{pv1}^F	ΘΧ συστατικού 1 στην αέρια φάση σε θερμοκρασία T_f , (kJ/kmol/°C)
C_{pv2}^D	ΘΧ συστατικού 2 στην αέρια φάση σε θερμοκρασία T_{bp}^D , (kJ/kmol/°C)
C_{pv2}^F	ΘΧ συστατικού 2 στην αέρια φάση σε θερμοκρασία T_f , (kJ/kmol/°C)
C_{sb}^B	Παράγοντας δυναμικότητας στην τελευταία βαθμίδα, (-)
C_{sb}^D	Παράγοντας δυναμικότητας στην πρώτη βαθμίδα, (-)
C_{sb}^{F+}	Παράγοντας δυναμικότητας στη βαθμίδα άνω της τροφοδοσίας, (-)
C_{sb}^{F-}	Παράγοντας δυναμικότητας στη βαθμίδα κάτω της τροφοδοσίας, (-)
D	Μοριακός ρυθμός ροής αποστάγματος, (kmol/s)
D_c^B	Διάμετρος στήλης στον πυθμένα, (m)
D_c^D	Διάμετρος στήλης στην κορυφή, (m)
D_c^{F+}	Διάμετρος στήλης πάνω από την τροφοδοσία, (m)
D_c^{F-}	Διάμετρος στήλης κάτω από την τροφοδοσία, (m)
E_o	Συνολικός βαθμός απόδοσης στήλης, (-)
F	Μοριακή παροχή (ροή) τροφοδοσίας, (kmol/s)
F_{lv}^B	Συντελεστής ροής στην τελευταία βαθμίδα, (-)
F_{lv}^D	Συντελεστής ροής στην πρώτη βαθμίδα, (-)
F_{lv}^{F+}	Συντελεστής ροής στη βαθμίδα άνω της τροφοδοσίας, (-)
F_{lv}^{F-}	Συντελεστής ροής στη βαθμίδα κάτω της τροφοδοσίας, (-)
(fr)	Κλάσμα φαινόμενης ταχύτητας ατμών προς την ταχύτητα πλημμύρισης, (-)
H	Ύψος αποστακτικής στήλης, (m)
H_1	Απόσταση μεταξύ πραγματικών δίσκων, (m)
H_o	Ύψος χώρου μεταξύ πρώτου δίσκου και κορυφής, καθώς και μεταξύ τελευταίου δίσκου

	και πυθμένα της στήλης, (m)
$K_1^{B(bp)}$	Συντελεστής κατανομής συστατικού 1 σε θερμοκρασία T_{bp}^B , (-)
$K_1^{B(dp)}$	Συντελεστής κατανομής συστατικού 1 σε θερμοκρασία T_{dp}^B , (-)
$K_1^{D(bp)}$	Συντελεστής κατανομής συστατικού 1 σε θερμοκρασία T_{bp}^D , (-)
$K_1^{D(dp)}$	Συντελεστής κατανομής συστατικού 1 σε θερμοκρασία T_{dp}^D , (-)
K_1^F	Συντελεστής κατανομής συστατικού 1 σε θερμοκρασία T_f , (-)
$K_1^{F(bp)}$	Συντελεστής κατανομής συστατικού 1 σε θερμοκρασία T_{bp}^F , (-)
$K_1^{F(dp)}$	Συντελεστής κατανομής συστατικού 1 σε θερμοκρασία T_{dp}^F , (-)
$K_2^{B(bp)}$	Συντελεστής κατανομής συστατικού 2 σε θερμοκρασία T_{bp}^B , (-)
$K_2^{B(dp)}$	Συντελεστής κατανομής συστατικού 2 σε θερμοκρασία T_{dp}^B , (-)
$K_2^{D(bp)}$	Συντελεστής κατανομής συστατικού 2 σε θερμοκρασία T_{bp}^D , (-)
$K_2^{D(dp)}$	Συντελεστής κατανομής συστατικού 2 σε θερμοκρασία T_{dp}^D , (-)
K_2^F	Συντελεστής κατανομής συστατικού 2 σε θερμοκρασία T_f , (-)
$K_2^{F(bp)}$	Συντελεστής κατανομής συστατικού 2 σε θερμοκρασία T_{bp}^F , (-)
$K_2^{F(dp)}$	Συντελεστής κατανομής συστατικού 2 σε θερμοκρασία T_{dp}^F , (-)
K_d^B	Σταθερά ταχύτητας πλημμύρισης στην τελευταία βαθμίδα, (-)
K_d^D	Σταθερά ταχύτητας πλημμύρισης στην πρώτη βαθμίδα, (-)
K_d^{F+}	Σταθερά ταχύτητας πλημμύρισης στη βαθμίδα άνω της τροφοδοσίας, (-)
K_d^{F-}	Σταθερά ταχύτητας πλημμύρισης στη βαθμίδα κάτω της τροφοδοσίας, (-)
L	Μοριακός ρυθμός ροής υγρού στο τμήμα εμπλουτισμού, (kmol/s)
L'	Μοριακός ρυθμός ροής υγρού στο τμήμα εξάντλησης, (kmol/s)
m_s^H	Ρυθμός ροής ατμού θέρμανσης στον θερμομαντήρα, (kg/s)
m_s^R	Ρυθμός ροής ατμού θέρμανσης στον αναβραστήρα, (kg/s)
m_w^{BC}	Ρυθμός ροής νερού ψύξης στον ψυκτήρα υπολείμματος, (kg/s)
m_w^C	Ρυθμός ροής νερού ψύξης στον συμπυκνωτήρα, (kg/s)
m_w^{DC}	Ρυθμός ροής νερού ψύξης στον ψυκτήρα αποστάγματος, (kg/s)
$(MW)^B$	Μοριακό βάρος υπολείμματος, (kg/kmol)
$(MW)^D$	Μοριακό βάρος αποστάγματος, (kg/kmol)
$(MW)^F$	Μοριακό βάρος μίγματος τροφοδοσίας, (kg/kmol)
n	Λόγος καθαρής διατομής προς ολική διατομή, (-)
N	Αριθμός θεωρητικών βαθμίδων, (-)
N_{act}	Αριθμός πραγματικών βαθμίδων, (-)
N_B	Αριθμός πραγματικών βαθμίδων στο τμήμα εξάντλησης, (-)
N_D	Αριθμός πραγματικών βαθμίδων στο τμήμα εμπλουτισμού, (-)
N_{min}	Ελάχιστος αριθμός θεωρητικών βαθμίδων, (-)
P	Πίεση λειτουργίας της στήλης, (atm)
$P_1^{oB(bp)}$	Τάση ατμών συστατικού 1 σε θερμοκρασία T_{bp}^B , (atm)

$P_1^{oB(dp)}$	Τάση ατμών συστατικού 1 σε θερμοκρασία T_{dp}^B , (atm)
$P_1^{oD(bp)}$	Τάση ατμών συστατικού 1 σε θερμοκρασία T_{bp}^D , (atm)
$P_1^{oD(dp)}$	Τάση ατμών συστατικού 1 σε θερμοκρασία T_{dp}^D , (atm)
P_1^{oF}	Τάση ατμών συστατικού 1 σε θερμοκρασία T_f , (atm)
$P_1^{oF(bp)}$	Τάση ατμών συστατικού 1 σε θερμοκρασία T_{bp}^F , (atm)
$P_1^{oF(dp)}$	Τάση ατμών συστατικού 1 σε θερμοκρασία T_{dp}^F , (atm)
$P_2^{oB(bp)}$	Τάση ατμών συστατικού 2 σε θερμοκρασία T_{bp}^B , (atm)
$P_2^{oB(dp)}$	Τάση ατμών συστατικού 2 σε θερμοκρασία T_{dp}^B , (atm)
$P_2^{oD(bp)}$	Τάση ατμών συστατικού 2 σε θερμοκρασία T_{bp}^D , (atm)
$P_2^{oD(dp)}$	Τάση ατμών συστατικού 2 σε θερμοκρασία T_{dp}^D , (atm)
P_2^{oF}	Τάση ατμών συστατικού 2 σε θερμοκρασία T_f , (atm)
$P_2^{oF(bp)}$	Τάση ατμών συστατικού 2 σε θερμοκρασία T_{bp}^F , (atm)
$P_2^{oF(dp)}$	Τάση ατμών συστατικού 2 σε θερμοκρασία T_{dp}^F , (atm)
q	Θερμική κατάσταση τροφοδοσίας, (-)
Q_{BC}	Θερμικό φορτίο ψυκτήρα υπολείμματος, (kW)
Q_C	Θερμικό φορτίο συμπυκνωτήρα, (kW)
Q_{DC}	Θερμικό φορτίο ψυκτήρα αποστάγματος, (kW)
Q_H	Θερμικό φορτίο θερμαντήρα, (kW)
Q_R	Θερμικό φορτίο αναβραστήρα, (kW)
R	Λόγος αναρρόης, (-)
R_{\min}	Ελάχιστος λόγος αναρρόης, (-)
SF	Παράγοντας διαχωρισμού, (-)
T_{bp}^B	Θερμοκρασία έναρξης βρασμού υπολείμματος, (°C)
T_{bp}^D	Θερμοκρασία έναρξης βρασμού αποστάγματος, (°C)
T_{bp}^F	Θερμοκρασία έναρξης βρασμού μίγματος τροφοδοσίας, (°C)
T_{dp}^B	Θερμοκρασία έναρξης υγροποίησης αποστάγματος, (°C)
T_{dp}^D	Θερμοκρασία έναρξης υγροποίησης αποστάγματος, (°C)
T_{dp}^F	Θερμοκρασία έναρξης υγροποίησης μίγματος τροφοδοσίας, (°C)
T_f	Θερμοκρασία μίγματος τροφοδοσίας στην είσοδο της στήλης, (°C)
T_{f0}	Αρχική θερμοκρασία μίγματος τροφοδοσίας, (°C)
T_o^B	Τελική θερμοκρασία υπολείμματος, (°C)
T_o^D	Τελική θερμοκρασία αποστάγματος, (°C)
T_s	Θερμοκρασία (συμπύκνωσης) ατμού θέρμανσης, (°C)
T_{w1}	Αρχική θερμοκρασία ψυκτικού μέσου, (°C)
T_{w2}	Τελική θερμοκρασία ψυκτικού μέσου, (°C)
u^B	Φαινόμενη ταχύτητα ατμών στην τελευταία βαθμίδα, (m/s)
u^D	Φαινόμενη ταχύτητα ατμών στην πρώτη βαθμίδα, (m/s)

u^{F+}	Φαινόμενη ταχύτητα ατμών στη βαθμίδα άνω της τροφοδοσίας, (m/s)
u^{F-}	Φαινόμενη ταχύτητα ατμών στη βαθμίδα κάτω της τροφοδοσίας, (m/s)
u_f^B	Ταχύτητα πλημμύρισης στην τελευταία βαθμίδα, (m/s)
u_f^D	Ταχύτητα πλημμύρισης στην πρώτη βαθμίδα, (m/s)
u_f^{F+}	Ταχύτητα πλημμύρισης στη βαθμίδα άνω της τροφοδοσίας, (m/s)
u_f^{F-}	Ταχύτητα πλημμύρισης στη βαθμίδα κάτω της τροφοδοσίας, (m/s)
V	Μοριακός ρυθμός ροής ατμών στο τμήμα εμπλουτισμού, (kmol/s)
V'	Μοριακός ρυθμός ροής ατμών στο τμήμα εξάντλησης, (kmol/s)
W_L^B	Μαζικός ρυθμός ροής υγρού στην τελευταία βαθμίδα, (tn/h)
W_L^D	Μαζικός ρυθμός ροής υγρού στην πρώτη βαθμίδα, (tn/h)
W_L^{F+}	Μαζικός ρυθμός ροής υγρού στη βαθμίδα άνω της τροφοδοσίας, (tn/h)
W_L^{F-}	Μαζικός ρυθμός ροής υγρού στη βαθμίδα κάτω της τροφοδοσίας, (tn/h)
W_V^B	Μαζικός ρυθμός ροής ατμών στην τελευταία βαθμίδα, (tn/h)
W_V^D	Μαζικός ρυθμός ροής ατμών στην πρώτη βαθμίδα, (tn/h)
W_V^{F+}	Μαζικός ρυθμός ροής ατμών στη βαθμίδα άνω της τροφοδοσίας, (tn/h)
W_V^{F-}	Μαζικός ρυθμός ροής ατμών στη βαθμίδα κάτω της τροφοδοσίας, (tn/h)
x_B	Μοριακό κλάσμα συστατικού 1 στο υπόλειμμα, (kmol/kmol)
x_D	Μοριακό κλάσμα συστατικού 1 στο απόσταγμα, (kmol/kmol)
x_F	Μοριακό κλάσμα συστατικού 1 στην τροφοδοσία, (kmol/kmol)
x_{f_l}	Μοριακό κλάσμα συστατικού 1 στην υγρή φάση της τροφοδοσίας, (kmol/kmol)
x_{f_v}	Μοριακό κλάσμα συστατικού 1 στη φάση ατμών της τροφοδοσίας, (kmol/kmol)
ΔH^B	ΕΕ υπολείμματος σε θερμοκρασία T_{bp}^B , (kJ/kmol)
ΔH^D	ΕΕ αποστάγματος σε θερμοκρασία T_{bp}^D , (kJ/kmol)
ΔH^F	ΕΕ μίγματος τροφοδοσίας σε θερμοκρασία T_f , (kJ/kmol)
ΔH_1^B	ΕΕ συστατικού 1 σε θερμοκρασία T_{bp}^B , (kJ/kmol)
ΔH_1^D	ΕΕ συστατικού 1 σε θερμοκρασία T_{bp}^D , (kJ/kmol)
ΔH_1^F	ΕΕ συστατικού 1 σε θερμοκρασία T_f , (kJ/kmol)
ΔH_2^B	ΕΕ συστατικού 2 σε θερμοκρασία T_{bp}^B , (kJ/kmol)
ΔH_2^D	ΕΕ συστατικού 2 σε θερμοκρασία T_{bp}^D , (kJ/kmol)
ΔH_2^F	ΕΕ συστατικού 2 σε θερμοκρασία T_f , (kJ/kmol)
ΔH_{T_s}	ΕΕ ατμού θέρμανσης στη θερμοκρασία συμπύκνωσής του, (kJ/kmol)
θ	Ρίζα της εξίσωσης Underwood, (-)
ρ_{l1}^B	Πυκνότητα συστατικού 1 στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_{bp}^B , (kmol/m ³)
ρ_{l1}^D	Πυκνότητα συστατικού 1 στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_{bp}^D , (kmol/m ³)
ρ_{l1}^F	Πυκνότητα συστατικού 1 στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_f , (kmol/m ³)

ρ_{l2}^B	Πυκνότητα συστατικού 2 στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_{bp}^B , (kmol/m ³)
ρ_{l2}^D	Πυκνότητα συστατικού 2 στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_{bp}^D , (kmol/m ³)
ρ_{l2}^F	Πυκνότητα συστατικού 2 στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_f , (kmol/m ³)
ρ_l^B	Πυκνότητα υπολείμματος στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_{bp}^B , (kmol/m ³)
ρ_l^D	Πυκνότητα αποστάγματος στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_{bp}^D , (kmol/m ³)
ρ_l^F	Πυκνότητα μίγματος τροφοδοσίας στην υγρή φάση σε θερμοκρασία T_f , (kmol/m ³)
ρ_v^B	Πυκνότητα φάσης ατμών υπολείμματος σε θερμοκρασία T_{bp}^B , (kmol/m ³)
ρ_v^D	Πυκνότητα φάσης ατμών αποστάγματος σε θερμοκρασία T_{bp}^D , (kmol/m ³)
ρ_v^F	Πυκνότητα φάσης ατμών μίγματος τροφοδοσίας σε θερμοκρασία T_f , (kmol/m ³)
σ^B	Επιφανειακή τάση υπολείμματος σε θερμοκρασία T_{bp}^B , (dyn/cm)
σ^D	Επιφανειακή τάση αποστάγματος σε θερμοκρασία T_{bp}^D , (dyn/cm)
σ^F	Επιφανειακή τάση μίγματος τροφοδοσίας σε θερμοκρασία T_f , (dyn/cm)

*ως συστατικό 1 αναφέρεται το πτητικότερο και ως συστατικό 2 το λιγότερο πτητικό

** $\Theta X \equiv$ Θερμοχωρητικότητα

*** $EE \equiv$ Ενθαλπία εξάτμισης

Πίνακας 4.4 Μεταβλητές κλασματικής απόσταξης. Μέθοδος FUG.

α_d	Σταθερά του παράγοντα δυναμικότητας, (-)
A_i	Σταθερά Antoine του i-συστατικού, (-)
b_d	Σταθερά του παράγοντα δυναμικότητας, (-)
B_i	Σταθερά Antoine του i-συστατικού, (-)
C_{1i}	Σταθερά της ΘX υγρής φάσης του i-συστατικού, (-)
C_{2i}	Σταθερά της ΘX υγρής φάσης του i-συστατικού, (-)
C_{3i}	Σταθερά της ΘX υγρής φάσης του i-συστατικού, (-)
C_{4i}	Σταθερά της ΘX υγρής φάσης του i-συστατικού, (-)
C_{5i}	Σταθερά της ΘX φάσης ατμών του i-συστατικού, (-)
C_{6i}	Σταθερά της ΘX φάσης ατμών του i-συστατικού, (-)
C_{7i}	Σταθερά της ΘX φάσης ατμών του i-συστατικού, (-)
C_{8i}	Σταθερά της ΘX φάσης ατμών του i-συστατικού, (-)
C_{9i}	Σταθερά της ΘX φάσης ατμών του i-συστατικού, (-)
C_{10i}	Σταθερά της ενθαλπίας εξάτμισης του i-συστατικού, (-)
C_{11i}	Σταθερά της ενθαλπίας εξάτμισης του i-συστατικού, (-)
C_{12i}	Σταθερά της πυκνότητας υγρής φάσης του i-συστατικού, (-)
C_{13i}	Σταθερά της πυκνότητας υγρής φάσης του i-συστατικού, (-)
C_{14i}	Σταθερά της πυκνότητας υγρής φάσης του i-συστατικού, (-)
C_{15i}	Σταθερά της πυκνότητας υγρής φάσης του i-συστατικού, (-)
c_d	Σταθερά του παράγοντα δυναμικότητας, (-)
C_i	Σταθερά Antoine του i-συστατικού, (-)
C_{p_w}	ΘX νερού ψύξης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, (°C)
$(MW)_i$	Μοριακό βάρος του i-συστατικού, (kg/kmol)

$[P_i]$	Παράχωρος του i-συστατικού, (-)
R	Παγκόσμια σταθερά των ιδανικών αερίων, ($\text{m}^3\text{atm}/\text{kmol}/^\circ\text{C}$)
T_{c_i}	Κρίσιμη θερμοκρασία του i-συστατικού, ($^\circ\text{C}$)
U_{BC}	ΣΣΜΘ* στον ψυκτήρα υπολείμματος, ($\text{kW}/\text{m}^2/^\circ\text{C}$)
U_C	ΣΣΜΘ στο συμπυκνωτήρα, ($\text{kW}/\text{m}^2/^\circ\text{C}$)
U_{DC}	ΣΣΜΘ στον ψυκτήρα αποστάγματος, ($\text{kW}/\text{m}^2/^\circ\text{C}$)
U_H	ΣΣΜΘ στον θερμαντήρα, ($\text{kW}/\text{m}^2/^\circ\text{C}$)
U_R	ΣΣΜΘ στον αναβραστήρα, ($\text{kW}/\text{m}^2/^\circ\text{C}$)

*ΣΣΜΘ \equiv Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

Πίνακας 4.5 Τεχνικά δεδομένα κλασματικής απόσταξης.

F	Μοριακή παροχή (ροή) τροφοδοσίας, (kmol/s)
H_o	Ύψος χώρου μεταξύ πρώτου δίσκου και κορυφής, καθώς και μεταξύ τελευταίου δίσκου και πυθμένα της στήλης, (m)
T_{f_0}	Αρχική θερμοκρασία μίγματος τροφοδοσίας, ($^\circ\text{C}$)
T_o^B	Τελική θερμοκρασία υπολείμματος, ($^\circ\text{C}$)
T_o^D	Τελική θερμοκρασία αποστάγματος, ($^\circ\text{C}$)
T_s	Θερμοκρασία (συμπύκνωσης) ατμού θέρμανσης, ($^\circ\text{C}$)
T_{w_1}	Αρχική θερμοκρασία ψυκτικού μέσου, ($^\circ\text{C}$)
T_{w_2}	Τελική θερμοκρασία ψυκτικού μέσου, ($^\circ\text{C}$)
x_B	Μοριακό κλάσμα συστατικού 1 στο υπόλειμμα, (kmol/kmol)
x_D	Μοριακό κλάσμα συστατικού 1 στο απόσταγμα, (kmol/kmol)
x_F	Μοριακό κλάσμα συστατικού 1 στην τροφοδοσία, (kmol/kmol)

Πίνακας 4.6 Προδιαγραφές σχεδιασμού κλασματικής απόσταξης.

Στον Πίνακα 4.7 δίνεται η ανάλυση των βαθμών ελευθερίας του μαθηματικού προτύπου. Οι ελεύθερες μεταβλητές χαρακτηρίζουν το συγκεκριμένο μαθηματικό πρότυπο, ενώ οι μεταβλητές σχεδιασμού το συγκεκριμένο πρόβλημα. Ένας αλγόριθμος επίλυσης του μαθηματικού προτύπου που περιγράφηκε δίνεται στον Πίνακα 4.8.

Μεταβλητές	181
Εξισώσεις	164
Ελεύθερες Μεταβλητές	17
Ελεύθερες Μεταβλητές	17
Προδιαγραφές Σχεδιασμού	11
Μεταβλητές Σχεδιασμού	6

Πίνακας 4.7 Ανάλυση βαθμών ελευθερίας κλασματικής απόσταξης. Μέθοδος FUG.

Μεταβλητές δεδομένα	(11)	$F, H_o, T_{f_0}, T_o^B, T_o^D, T_s, T_{w_1}, T_{w_2}, x_B, x_D, x_F$
Μεταβλητές σχεδιασμού	(6)	$P, T_f, R, H_1, (fr), n$
Μεταβλητές δοκιμής	(6)	$T_{bp}^J, T_{dp}^J, J=B, D, F$
Μεταβλητές επίλυσης	(164)	Πρόκειται για τις μεταβλητές που υπολογίζονται από τον αλγόριθμο που ακολουθεί

Αλγόριθμος	Υπολογισμός θερμοκρασιών έναρξης βρασμού και υγροποίησης και σχετικής πτητικότητας	
	(4.75 - 4.80)	$\rightarrow P_i^{\alpha J(bp)}$
	(4.81 - 4.86)	$\rightarrow P_i^{\alpha J(dp)}$
	(4.87 - 4.92)	$\rightarrow K_i^{J(bp)}$
	(4.93 - 4.98)	$\rightarrow K_i^{J(dp)}$
Ελέγχεται η σύγκλιση των εξισώσεων (4.99 - 4.101) ως προς τις τιμές T_{bp}^J (υπολογισμός θερμοκρασιών έναρξης βρασμού) και η σύγκλιση των εξισώσεων (4.102 - 4.104) ως προς τις τιμές T_{dp}^J (υπολογισμός θερμοκρασιών έναρξης υγροποίησης) και οι τιμές των μεταβλητών δοκιμής είναι εκείνες που ικανοποιούν τις αναφερθείσες σχέσεις		
	(4.105)	$\rightarrow a^F$
	(4.106)	$\rightarrow a^D$
	(4.107)	$\rightarrow a^B$
	(4.108)	$\rightarrow a$
Υπολογισμός θερμοφυσικών ιδιοτήτων		
	(4.109 - 4.120)	$\rightarrow C_{p,i}^J$
	(4.121 - 4.122)	$\rightarrow C_{p_v,i}^D$
	(4.123 - 4.128)	$\rightarrow \Delta H_i^J$
	(4.129 - 4.134)	$\rightarrow \rho_{l,i}^J$
	(4.135 - 4.137)	$\rightarrow \rho_v^J$
	(4.138 - 4.143)	$\rightarrow C_{p_l}^J$
	(4.144)	$\rightarrow C_{p_v}^J$
	(4.145 - 4.147)	$\rightarrow \Delta H^J$
	(4.148 - 4.150)	$\rightarrow \rho_l^J$
	(4.151 - 4.153)	$\rightarrow \sigma^J$
	(4.154 - 4.155)	$\rightarrow P_i^{\alpha F}$
	(4.156 - 4.157)	$\rightarrow K_i^F$
	(4.158 - 4.159)	$\rightarrow C_{p_v,i}^F$
	(4.160)	$\rightarrow C_{p_v}^F$
	(4.161)	$\rightarrow \Delta H_{T_s}$
	(4.162 - 4.164)	$\rightarrow (MW)^J$
Υπολογισμός θερμικής κατάστασης τροφοδοσίας		
	(4.1)	$\rightarrow q$
Υπολογισμός αριθμού θεωρητικών βαθμίδων με τη μέθοδο Fenske-Underwood-Gilliland		
	(4.2)	$\rightarrow SF$
	(4.3)	$\rightarrow N_{\min}$
	(4.4)	$\rightarrow \theta$
	(4.5)	$\rightarrow R_{\min}$
	(4.6)	$\rightarrow N$

	Υπολογισμός πραγματικών βαθμίδων
(4.7)	$\rightarrow E_o$
(4.8)	$\rightarrow N_{act}$
	Υπολογισμός μοριακών ροών
(4.9) & (4.10)	$\rightarrow B, D$
(4.11)	$\rightarrow L$
(4.12)	$\rightarrow V$
(4.13)	$\rightarrow L'$
(4.14)	$\rightarrow V'$
	Υπολογισμός διαστάσεων στήλης
(4.15)	$\rightarrow H$
(4.16 - 4.19)	$\rightarrow W_L^J$
(4.20 - 4.23)	$\rightarrow W_V^J$
(4.24 - 4.27)	$\rightarrow F_{lv}^J$
(4.28 - 4.31)	$\rightarrow C_{sb}^J$
(4.32 - 4.35)	$\rightarrow K_d^J$
(4.36 - 4.39)	$\rightarrow u_f^J$
(4.40 - 4.43)	$\rightarrow u^J$
(4.44 - 4.47)	$\rightarrow A_n^J$
(4.48 - 4.51)	$\rightarrow A_{act}^J$
(4.52 - 4.55)	$\rightarrow D_c^J$
	Βαθμίδα τροφοδοσίας
(4.56) & (4.57)	$\rightarrow N_D, N_B$
	Θερμική ανάλυση
(4.58)	$\rightarrow x_{f_i}$
(4.59)	$\rightarrow x_{f_v}$
(4.60)	$\rightarrow Q_H$
(4.61)	$\rightarrow Q_C$
(4.62)	$\rightarrow Q_R$
(4.63)	$\rightarrow Q_{DC}$
(4.64)	$\rightarrow Q_{BC}$
(4.65)	$\rightarrow A_H$
(4.66)	$\rightarrow A_C$
(4.67)	$\rightarrow A_R$
(4.68)	$\rightarrow A_{DC}$
(4.69)	$\rightarrow A_{BC}$
(4.70)	$\rightarrow m_s^H$
(4.71)	$\rightarrow m_w^C$
(4.72)	$\rightarrow m_s^R$
(4.73)	$\rightarrow m_w^{DC}$

	(4.74)	$\rightarrow m_w^{BC}$
--	--------	------------------------

Πίνακας 4.8 Αλγόριθμος επίλυσης κλασματικής απόσταξης. Μέθοδο FUG.

Στον Πίνακα 4.9 παρουσιάζεται η οικονομική ανάλυση της διεργασίας. Ως αντικειμενική συνάρτηση αριστοποίησης λαμβάνεται το συνολικό ετήσιο κόστος, που υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.165. Η Εξίσωση 4.166 εκφράζει τον παράγοντα ανάκτησης κεφαλαίου. Οι Εξισώσεις 4.167 έως 4.173 υπολογίζουν το κόστος των στοιχείων εξοπλισμού. Αναλυτικότερα, η Εξίσωση 4.167 δίνει το κόστος του αναβραστήρα, οι Εξισώσεις 4.168 ως 4.171 το κόστος των υπολοίπων εναλλακτών και οι Εξισώσεις 4.172 και 4.173 το κόστος του κελύφους και των δίσκων της στήλης, αντίστοιχα. Οι δύο τελευταίες εξισώσεις έχουν προταθεί από τον Guthrie. Εναλλακτικά, το κόστος του κελύφους μπορεί να υπολογιστεί μέσω του βάρους του, για δεδομένο υλικό κατασκευής, ενώ το κόστος κάθε δίσκου μέσω της διαμέτρου του, για δεδομένο σύστημα επαφής των δύο φάσεων (οπές, βαλβίδες, κάψες). Η Εξίσωση 4.174 υπολογίζει το συνολικό κόστος εξοπλισμού. Οι Εξισώσεις 4.175 και 4.176 δίνουν το ετήσιο κόστος του ατμού θέρμανσης και του νερού ψύξης, το άθροισμα των οποίων αποτελεί το ετήσιο λειτουργικό κόστος που εκφράζεται από την Εξίσωση 4.177. Οι Εξισώσεις 4.178 και 4.179 υπολογίζουν τους συντελεστές διόρθωσης που εκφράζουν την επίδραση των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας στο κόστος εξοπλισμού (Μαρούλης κ.ά., 2003). Ως θερμοκρασία υπολογισμού λαμβάνεται η ΘΕΒ του υπολείμματος, που αποτελεί την υψηλότερη θερμοκρασία του ρεύματος διεργασίας. Η Εξίσωση 4.180 παρέχει το ολικό συντελεστή διόρθωσης. Στον Πίνακα 4.10 αναγράφονται τα απαιτούμενα οικονομικά δεδομένα της διεργασίας.

Συνολικό Ετήσιο Κόστος		
$TAC = eC_{eq} + C_{op}$		(4.165)
$e = CRF(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1}$		(4.166)
Κόστος Εξοπλισμού		
Αναβραστήρας	$C_R = c_R A_R^{n_R}$	(4.167)
Εναλλάκτης θερμότητας*	$C_E = c_{exch} A_E^{n_{exch}}$	(4.168 – 4.171)
Κέλυφος αποστακτικής στήλης	$C_{Col} = f c_{col} D_C H^{n_{col}}$	(4.172)
Δίσκοι αποστακτικής στήλης	$C_{Tr} = f c_{tr} D_C^{n_{tr}} H$	(4.173)
Συνολικό κόστος εξοπλισμού	$C_{eq} = C_R + \sum_{i=1}^4 C_E + C_{Col} + C_{Tr}$	(4.174)
Κόστος Βοηθητικών Παροχών		
Ατμός θέρμανσης	$C_s = c_s (Q_H + Q_R) t_y$	(4.175)
Νερό ψύξης	$C_w = c_w (Q_C + Q_{DC} + Q_{BC}) t_y$	(4.176)
Ετήσιο λειτουργικό κόστος	$C_{op} = C_s + C_w$	(4.177)
Συντελεστές διόρθωσης		
$f_T = 0,85 \exp\left(\frac{T_{bp}^B + 273,15}{1000}\right)$		(4.178)
$f_P = 0,98 \exp\left(\frac{P}{50}\right)$		(4.179)
$f = f_T f_P$		(4.180)

*E= H (θερμαντήρας), C (συμπυκνωτήρας), DC (ψυκτήρας αποστάγματος), BC (ψυκτήρας υπολείμματος)

Πίνακας 4.9 Οικονομική ανάλυση κλασματικής απόσταξης.

c_{col}	Μοναδιαίο κόστος κελύφους αποστακτικής στήλης, (€)
c_{exch}	Μοναδιαίο κόστος εναλλάκτη θερμότητας, (€/m ²)
c_R	Μοναδιαίο κόστος αναβραστήρα, (€/m ²)
c_s	Μοναδιαίο κόστος ατμού θέρμανσης, (€/kWh)
c_{tr}	Μοναδιαίο κόστος δίσκων αποστακτικής στήλης, (€)
c_w	Μοναδιαίο κόστος νερού ψύξης (€/kWh)
n_{col}	Δείκτης οικονομίας κλίμακας κελύφους αποστακτικής στήλης (-)
n_{exch}	Δείκτης οικονομίας κλίμακας εναλλάκτη θερμότητας (-)
n_R	Δείκτης οικονομίας κλίμακας αναβραστήρα (-)
n_{tr}	Δείκτης οικονομίας κλίμακας δίσκων αποστακτικής στήλης (-)
t_y	Ετήσιος χρόνος λειτουργίας (h/yr)
i	Ετήσιο επιτόκιο δανείου (-)
N	Χρονική περίοδος δανείου (yr)

Πίνακας 4.10 Οικονομικά δεδομένα κλασματικής απόσταξης.

Για διευκόλυνση εφαρμογής του μαθηματικού προτύπου αναφέρουμε ορισμένες παράγωγες σχέσεις (εκφρασμένες ως προς τη μεταβλητή επίλυσης) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Οι εξισώσεις 4.9 και 4.10 μπορούν να αντικατασταθούν από τις:

$$D = \frac{x_F - x_B}{x_D - x_B} F \quad (4.9')$$

$$B = F - D = \frac{x_D - x_F}{x_D - x_B} F \quad (4.10')$$

Η εξίσωση 4.6 μπορεί να γραφεί ως:

$$N = \frac{N_{\min} + fR}{1 - fR} \quad (4.6')$$

όπου

$$fR = 0,75 \left[1 - \left(\frac{R - R_{\min}}{R + 1} \right)^{0,57} \right] \quad (4.6'')$$

Ο υπολογισμός των βαθμίδων του τμήματος εξάντλησης γίνεται από τη σχέση:

$$N_B = \frac{N_{act}}{1 + ffs} \quad (4.56')$$

όπου

$$ffs = \left[\frac{B}{D} \frac{1-x_F}{x_F} \left(\frac{x_B}{1-x_D} \right)^2 \right]^{0,206} \quad (4.56'')$$

Τέλος, το ολικό ισοζύγιο ενθαλπίας, που περιγράφεται από την Εξίσωση (4.181), αποτελεί μία χρήσιμη σχέση και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην αποστακτική στήλη καθ' αυτή, οπότε ως ενθαλπίες ρευμάτων λαμβάνονται εκείνες του εισερχόμενου, στη στήλη, μίγματος και των προϊόντων που λαμβάνονται αμέσως μετά το συμπυκνωτήρα και τον αναβραστήρα (θέσεις F , D , B σύμφωνα με την αναφερθείσα ανάλυση), ή να περιλάβει και εξοπλισμό μεταφοράς θερμότητας πριν ή μετά τη στήλη, οπότε λαμβάνονται οι ενθαλπίες των ρευμάτων στην αρχική και τελική τους κατάσταση (θέσεις H , DC , BC).

$$Fh_F + Q_R = Dh_D + Bh_B + Q_C \quad (4.181)$$

4.4 Παράδειγμα Εφαρμογής Κλασματικής Απόσταξης. Μέθοδος FUG

Μελετάται ο διαχωρισμός 208,8 kmol/hr μίγματος 2,2,4- τριμεθυλοπεντανίου (2,2,4-TMP) και κανονικού-οκτανίου (n-C8) μοριακής περιεκτικότητας 30% ως προς το πρώτο, προς απόσταγμα με μοριακή περιεκτικότητα σε 2,2,4-TMP 99% και υπόλειμμα περιεκτικότητας 2% στο εν λόγω συστατικό. Η αρχική θερμοκρασία του μίγματος είναι 20°C ενώ τα προϊόντα πρέπει να ψυχθούν, τουλάχιστον, μέχρι τους 50°C. Ατμός θέρμανσης διατίθεται σε θερμοκρασία 150°C και νερό ψύξης, το οποίο μπορεί να θερμανθεί μέχρι τους 50°C, είναι διαθέσιμο στους 30°C. Να υπολογιστεί ο αριθμός των πραγματικών βαθμίδων της αποστακτικής στήλης και το συνολικό ετήσιο κόστος λειτουργίας της.

Με βάση το μαθηματικό πρότυπο του Πίνακα 4.3, τον αλγόριθμο επίλυσης του Πίνακα 4.8 και τις οικονομικές εξισώσεις του Πίνακα 4.9 προκύπτουν τα αποτελέσματα σχεδιασμού της αποστακτικής στήλης που παρουσιάζονται του Πίνακα 4.11.

Προδιαγραφές σχεδιασμού				
Παροχή ρεύματος διεργασίας	F (kmol/s)	0,058	F (tn/h)	23,85
Μοριακό κλάσμα συστατικού 1 στην τροφοδοσία	x_F (kmol/kmol)	0,30		
Μοριακό κλάσμα συστατικού 1 στο απόσταγμα	x_D (kmol/kmol)	0,99		
Μοριακό κλάσμα συστατικού 1 στο υπόλειμμα	x_B (kmol/kmol)	0,02		
Αρχική θερμοκρασία ρεύματος διεργασίας	T_{f0} (°C)	20,0		
Τελική θερμοκρασία αποστάγματος	T_{oD} (°C)	50,0		
Τελική θερμοκρασία υπολείμματος	T_{oB} (°C)	50,0		
Θερμοκρασία εισόδου νερού ψύξης	T_{w1} (°C)	30,0		
Θερμοκρασία εξόδου νερού ψύξης	T_{w2} (°C)	50,0		
Θερμοκρασία ατμού θέρμανσης	T_s (°C)	150,0		
Ύψος στήλης πάνω και κάτω από τους δίσκους	H_o (m)	3,00		
Τεχνικά δεδομένα				
		Συστατικό 1	Συστατικό 2	
Συντελεστής Antoine i-συστατικού	A_i	15,685	15,9426	
Συντελεστής Antoine i-συστατικού	B_i	2896,28	3120,29	
Συντελεστής Antoine i-συστατικού	C_i	-52,41	-63,63	
Συντελεστής θερμοχωρητικότητας υγρού i-συστατικού	C_{li}	95275	224830	
Συντελεστής θερμοχωρητικότητας υγρού i-συστατικού	C_{2i}	696,7	-186,63	
Συντελεστής θερμοχωρητικότητας υγρού i-συστατικού	C_{3i}	-1,3765	0,95891	
Συντελεστής θερμοχωρητικότητας υγρού i-συστατικού	C_{4i}	0,002173	0	

Συντελεστής θερμοχωρητικότητας αερίου i-συστατικού	C_{5i}	113900	135540	
Συντελεστής θερμοχωρητικότητας αερίου i-συστατικού	C_{6i}	528600	443100	
Συντελεστής θερμοχωρητικότητας αερίου i-συστατικού	C_{7i}	1594	1635,6	
Συντελεστής θερμοχωρητικότητας αερίου i-συστατικού	C_{8i}	335100	305400	
Συντελεστής θερμοχωρητικότητας αερίου i-συστατικού	C_{9i}	677,94	746,4	
Συντελεστής ενθαλπίας εξάτμισης i-συστατικού	C_{10i}	47721000	55180000	
Συντελεστής ενθαλπίας εξάτμισης i-συστατικού	C_{11i}	0,37992	0,38467	
Συντελεστής πυκνότητας υγρού i-συστατικού	C_{12i}	0,53731	0,5886	
Συντελεστής πυκνότητας υγρού i-συστατικού	C_{13i}	0,26115	0,27373	
Συντελεστής πυκνότητας υγρού i-συστατικού	C_{14i}	568,7	543,96	
Συντελεστής πυκνότητας υγρού i-συστατικού	C_{15i}	0,28034	0,2846	
Κρίσιμη θερμοκρασία i-συστατικού	T_{ci} (K)	543,96	568,7	
Παράχωρος i-συστατικού	[Pa]	343,3	351,0	
Μοριακό βάρος i-συστατικού	$(MW)_i$ (kg/kmol)	114,231	114,231	
Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας θερμαντήρα	U_H (kW/m ² /°C)	0,50		
Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας συμπτυκνωτήρα	U_C (kW/m ² /°C)	0,70		
Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αναβραστήρα	U_R (kW/m ² /°C)	0,90		
Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ψυκτήρα αποστάγματος	U_{DC} (kW/m ² /°C)	0,25		
Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ψυκτήρα υπολειμματος	U_{BC} (kW/m ² /°C)	0,25		
Μέση θερμοχωρητικότητα νερού	C_{plw} (kJ/kg/°C)	4,18		
Σταθερά παράγοντα δυναμικότητας	a_d	-0,94506		
Σταθερά παράγοντα δυναμικότητας	b_d	-0,70234		
Σταθερά παράγοντα δυναμικότητας	c_d	-0,22618		
Παγκόσμια σταθερά ιδανικών αερίων	R (m ³ atm/kmol/°C)	0,082053		
Σταθερά π	π	3,142		
Οικονομικά δεδομένα				
Μοναδιαίο κόστος κελύφους στήλης	c_{col} (k€/m ²)	10000		
Μοναδιαίο κόστος δίσκων	c_{tr} (k€/m ²)	1000		
Μοναδιαίο κόστος αναβραστήρα	c_{reb} (k€/m ²)	20000		
Μοναδιαίο κόστος εναλλάκτη θερμότητας	c_{exch} (k€/m ²)	5000		
Δείκτης οικονομίας κλίμακας κελύφους στήλης	n_{col}	0,80		
Δείκτης οικονομίας κλίμακας δίσκων	n_{tr}	1,50		
Δείκτης οικονομίας κλίμακας αναβραστήρα	n_{reb}	0,3		
Δείκτης οικονομίας κλίμακας εναλλάκτη	n_{exch}	0,65		
Μοναδιαίο κόστος θερμικής ενέργειας	c_s (€/kWh)	0,040		
Μοναδιαίο κόστος ψυκτικής ενέργειας	c_w (€/kWh)	0,004		
Ετήσιος χρόνος λειτουργίας	t_y (h/yr)	5000		
Ετήσιο επιτόκιο	i	0,05		
Χρόνος αποπληρωμής	N (yr)	8		
Μεταβλητές δοκιμής				
Θερμοκρασία έναρξης υγροποίησης	T_{bp} (°C)	121,69		
Θερμοκρασία έναρξης βρασμού	T_{dp} (°C)	117,86		
Μεταβλητές σχεδιασμού				
Πίεση λειτουργίας αποστακτικής στήλης	P (atm)	1,05		
Θερμοκρασία εισόδου στη στήλη	T_f (°C)	117,0		
Απόσταση μεταξύ δίσκων	H_I (m)	0,61		
Λόγος αναρροής	R	3,37		

Λόγος ταχύτητας ατμών προς ταχύτητα πλημμύρισης	f_r	0,85		
Λόγος καθαρής διατομής προς ολική διατομή	n	0,88		
Επίλυση μαθηματικού προτύπου				
		F	D	B
Τάση ατμών συστατικού 1 στη ΘΕΒ	$P_{o1}(bp)$ (atm)	1,639	1,056	2,046
Τάση ατμών συστατικού 2 στη ΘΕΒ	$P_{o2}(bp)$ (atm)	0,798	0,480	1,030
Τάση ατμών συστατικού 1 στη ΘΕΥ	$P_{o1}(dp)$ (atm)	1,804	1,063	2,063
Τάση ατμών συστατικού 2 στη ΘΕΥ	$P_{o2}(dp)$ (atm)	0,891	0,484	1,040
Συντελεστής κατανομής συστατικού 1 στη ΘΕΒ	$K_1(bp)$	1,561	1,005	1,949
Συντελεστής κατανομής συστατικού 2 στη ΘΕΒ	$K_2(bp)$	0,760	0,457	0,981
Συντελεστής κατανομής συστατικού 1 στη ΘΕΥ	$K_1(dp)$	1,718	1,012	1,965
Συντελεστής κατανομής συστατικού 2 στη ΘΕΥ	$K_2(dp)$	0,848	0,460	0,990
Σχετική πτητικότητα στη ΘΕΒ	a	2,06	2,20	1,99
Ενθαλπία εξάτμισης συστατικού 1	ΔH_1 (kJ/kmol)	29542,9	30652,4	28808,8
Ενθαλπία εξάτμισης συστατικού 2	ΔH_2 (kJ/kmol)	35349,7	36512,7	34585,8
Θερμοχωρητικότητα υγρού συστατικού 1	C_{p1l} (kJ/kmol/°C)	286,6	277,3	292,8
Θερμοχωρητικότητα υγρού συστατικού 2	C_{p12} (kJ/kmol/°C)	298,0	289,4	303,6
		H	DC	BC
Θερμοχωρητικότητα υγρού συστατικού 1	C_{p1l} (kJ/kmol/°C)	235,97	250,01	250,01
Θερμοχωρητικότητα υγρού συστατικού 2	C_{p12} (kJ/kmol/°C)	252,53	264,66	264,66
		F	D	B
Θερμοχωρητικότητα αέριου συστατικού 1	C_{pv1} (kJ/kmol/°C)	241,75	233,24	
Θερμοχωρητικότητα αέριου συστατικού 2	C_{pv2} (kJ/kmol/°C)	235,98	227,82	
Πυκνότητα υγρού συστατικού 1	ρ_{l1} (kmol/m ³)	5,43	5,56	5,35
Πυκνότητα υγρού συστατικού 2	ρ_{l2} (kmol/m ³)	5,31	5,45	5,22
Μοριακό βάρος μίγματος	(MW) (kg/kmol)	114,23	114,23	114,23
Ενθαλπία εξάτμισης μίγματος	ΔH (kJ/kmol)	33607,6	30711,0	34470,2
Θερμοχωρητικότητα υγρού μίγματος	C_{pl} (kJ/kmol/°C)	294,58	277,39	303,40
		H	DC	BC
Θερμοχωρητικότητα υγρού μίγματος	C_{pl} (kJ/kmol/°C)	247,56	250,16	264,36
		F	D	B
Θερμοχωρητικότητα αέριου μίγματος	C_{pv} (kJ/kmol/°C)	237,71	233,18	
Πυκνότητα υγρού μίγματος	ρ_l (kmol/m ³)	5,347	5,556	5,225
Πυκνότητα αέριου μίγματος	ρ_v (kmol/m ³)	0,0328	0,0342	0,0320
Επιφανειακή τάση μίγματος	σ (dyn/cm)	12,09	13,24	11,30
		Συστατικό 1	Συστατικό 2	
Τάση ατμών i-συστατικού στη θερμοκρασία τροφοδοσίας	P_i^F (atm)	1,604	0,778	
Συντελεστής κατανομής i-συστατικού στη θερμοκρασία τροφοδοσίας	K_i^F	1,527	0,741	
Σχετική πτητικότητα στη θερμοκρασία τροφοδοσίας	a	2,06		
Θερμική κατάσταση τροφοδοσίας	q	1,008		
Μοριακό κλάσμα συστατικού 1 στην υγρή φάση τροφοδοσίας	x_{f1} (kmol/kmol)	0,300		
Μοριακό κλάσμα συστατικού 1 στη φάση ατμών τροφοδοσίας	x_{fv} (kmol/kmol)	0,000		
Ελάχιστη σχετική πτητικότητα	a_{min}	1,99		
Παράγοντας διαχωρισμού	SF	4851		
Ελάχιστος αριθμός θεωρητικών βαθμίδων	N_{min}	12,36		
Ρίζα εξίσωσης Underwood	θ	1,532		
Ελάχιστος λόγος αναρροής	R_{min}	3,30		
Αριθμός θεωρητικών βαθμίδων	N	40,62		
Συνολικός βαθμός απόδοσης στήλης	E_o	0,57		
Αριθμός πραγματικών βαθμίδων	N_{act}	71		
Αριθμός βαθμίδων στο τμήμα εμπλουτισμού	N_D	46		
Αριθμός βαθμίδων στο τμήμα εξάντλησης	N_B	25		

Ύψος αποστακτικής στήλης	H (m)	48,70		
Ρυθμός ροής αποστάγματος	D (kmol/s)	0,017	D (tn/h)	6,88
Ρυθμός ροής υπολείμματος	B (kmol/s)	0,041	B (tn/h)	16,97
Ρυθμός ροής υγρού στο τμήμα εμπλουτισμού	L (kmol/s)	0,056	WL (tn/h)1	23,20
Ρυθμός ροής ατμών στο τμήμα εμπλουτισμού	V (kmol/s)	0,073	WV (tn/h)2	30,09
Ρυθμός ροής υγρού στο τμήμα εξάντλησης	L' (kmol/s)	0,115	WL' (tn/h)3	47,23
Ρυθμός ροής ατμών στο τμήμα εξάντλησης	V' (kmol/s)	0,074	WV' (tn/h)4	30,27
		D	B	F+
Μαζικός ρυθμός ροής υγρού	W_L (tn/h)	23,20	47,23	23,20
Μαζικός ρυθμός ροής ατμών	W_V (tn/h)	30,09	30,27	30,09
Συντελεστής ροής	F_{lv}	0,0605	0,1221	0,0604
Παράγοντας δυναμικότητας	C_{sb}	0,3758	0,3219	0,3758
Σταθερά ταχύτητας πλημμύρησης	K	0,3460	0,2871	0,3398
Ταχύτητα πλημμύρησης	u_f (m/s)	1,34	1,12	1,32
Φαινόμενη ταχύτητα ατμών	u (m/s)	1,14	0,95	1,12
Καθαρή διατομή στήλης	A_{net} (m ²)	1,88	2,43	1,99
Ολική διατομή στήλης	A_c (m ²)	2,14	2,76	2,26
Διάμετρος στήλης	D_c (m)	1,65	1,87	1,70
Ειδική ενθαλπία ατμού θερμανσης	ΔH_{Ts} (kJ/kg)	2112		
Αρχική ενθαλπία τροφοδοσίας	H_{Fo} (kJ)	287,2		
Ενθαλπία τροφοδοσίας στην είσοδο της στήλης	H_F (kJ)	1999,0		
Θερμικό φορτίο θερμαντήρα	Q_H (kW)	1711,8		
Θερμικό φορτίο συμπυκνωτήρα	Q_C (kW)	2250,9		
Θερμικό φορτίο αναβραστήρα	Q_R (kW)	2537,0		
Θερμικό φορτίο ψυκτήρα αποστάγματος	Q_{DC} (kW)	261,1		
Θερμικό φορτίο ψυκτήρα υπολείμματος	Q_{BC} (kW)	1042,7		
ΛΜΘΔ* θερμαντήρα	ΔT_{LH} (°C)	70,8		
ΛΜΘΔ* συμπυκνωτήρα	ΔT_{LC} (°C)	60,9		
ΛΜΘΔ* ψυκτήρα αποστάγματος	ΔT_{LDC} (°C)	33,2		
ΛΜΘΔ* ψυκτήρα υπολείμματος	ΔT_{LBC} (°C)	42,2		
Επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας θερμαντήρα	A_H (m ²)	48,4		
Επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας συμπυκνωτήρα	A_C (m ²)	52,8		
Επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας αναβραστήρα	A_R (m ²)	121,9		
Επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας ψυκτήρα αποστάγματος	A_{DC} (m ²)	31,4		
Επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας ψυκτήρα υπολείμματος	A_{BC} (m ²)	98,7		
Μαζικός ρυθμός ροής ατμού θερμαντήρα	m_s^H (kg/s)	0,81		
Μαζικός ρυθμός ροής ατμού αναβραστήρα	m_s^R (kg/s)	1,20		
Μαζικός ρυθμός ροής νερού συμπυκνωτήρα	m_w^C (kg/s)	26,92		
Μαζικός ρυθμός ροής νερού ψυκτήρα αποστάγματος	m_w^{DC} (kg/s)	3,12		
Μαζικός ρυθμός ροής νερού ψυκτήρα υπολείμματος	m_w^{BC} (kg/s)	12,47		
Οικονομική αξιολόγηση				
Παράγοντας ανάκτησης κεφαλαίου	e	0,155		
Συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας	f_T	1,268		
Συντελεστής διόρθωσης πίεσης	f_P	1,001		
Ολικός συντελεστής διόρθωσης	f	1,403		
Κόστος κελύφους στήλης	C_{col} (κ€)	594,5		
Κόστος δίσκων	C_r (κ€)	177,5		
Κόστος θερμαντήρα	C_H (κ€)	62,2		
Κόστος συμπυκνωτήρα	C_C (κ€)	65,9		
Κόστος αναβραστήρα	C_R (κ€)	84,5		
Κόστος ψυκτήρα αποστάγματος	C_{DC} (κ€)	47,0		
Κόστος ψυκτήρα υπολείμματος	C_{BC} (κ€)	98,9		
Ετήσιο κόστος εξοπλισμού	C_{eq} (κ€/yr)	174,9		
Ετήσιο κόστος ατμού θέρμανσης	C_s (κ€/yr)	849,8		

Ετήσιο κόστος νερού ψύξης	C_w (κ€/yr)	71,1		
Ετήσιο λειτουργικό κόστος	C_{op} (κ€/yr)	920,9		
Συνολικό ετήσιο κόστος	TAC (κ€/yr)	1095,8		

¹Στον πρώτο δίσκο, 2στο συμπυκνωτήρα, 3στον τελευταίο δίσκο, 4από τον αναβραστήρα

*ΛΜΘΔ: λογαριθμική μέση θερμοκρασιακή διαφορά

Ως συστατικό 1 λαμβάνεται το πτητικότερο. Στο εξεταζόμενο παράδειγμα συστατικό 1: 2,2,4 τριμεθυλοπεντάνιο (2,2,4-TMP), συστατικό 2: κανονικό οκτάνιο (n-C8)

Πίνακας 4.11 Αποτελέσματα σχεδιασμού αποστακτικής στήλης. Μέθοδος FUG.

Δύο χαρακτηριστικά μεγέθη της κλασματικής απόσταξης είναι το πηλίκο του λόγου αναρροής προς τον ελάχιστο λόγο αναρροής, που για το παράδειγμα είναι ίσος προς:

$$R/R_{\min} = 1,021$$

και η ανάκτηση, που για το πτητικό συστατικό δίνεται από τη σχέση:

$$Dx_D / (Fx_F) = 0,9525 \text{ ή } 95,25\%$$

Ορισμένες ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις σχετικά με τις τιμές των μεταβλητών που υπολογίστηκαν είναι οι ακόλουθες:

- Οι θερμοκρασίες έναρξης βρασμού και υγροποίησης του αποστάγματος και υπολείμματος είναι σχεδόν ίσες, όπως αναμένεται για σχεδόν καθαρά προϊόντα.
- Η πυκνότητα υγρού μίγματος και ατμών και η επιφανειακή τάση μεταβάλλονται πολύ λίγο καθ' ύψος της στήλης και η χρησιμοποίηση μιας μέσης τιμής θα ήταν απόλυτα ικανοποιητική. Αυτό είναι αναμενόμενο για μίγμα συστατικών με κοντινά σημεία ζέσης και σχεδόν ιδανική συμπεριφορά ($T_{b2,2,4-TMP} = 99,2^\circ\text{C}$, $T_{bn-C8} = 125,6^\circ\text{C}$). Μεγαλύτερες μεταβολές εμφανίζει η ενθαλπία εξάτμισης που αυξάνεται κατά ~11% από την κορυφή προς τον πυθμένα και η θερμοχωρητικότητα υγρής φάσης που κυμαίνεται σε ένα εύρος της τάξης του 18,5% περίπου. Σημειώνουμε ότι η τελευταία ιδιότητα υπολογίζεται και σε σημεία εκτός της στήλης (π.χ. πριν το θερμαντήρα) και εκεί οφείλεται αυτή η μεγάλη διαφορά, η οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη ενεργειακή ολοκλήρωση της στήλης.
- Σχετικά με τον υπολογισμό της διαμέτρου παρατηρείται ότι η τιμή της μεταβάλλεται ελάχιστα σε κάθε τμήμα, επομένως ο υπολογισμός σε μία μόνο θέση του θα ήταν αρκετός. Εντούτοις, στην περίπτωση απόσταξης συστατικών με μεγάλη διαφορά στα σημεία ζέσης τους (σημαντική μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων καθ' ύψος της στήλης) και λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβολές των ροών σε κάθε βαθμίδα, η τιμή της διαμέτρου καθ' ύψος κάθε τμήματος, μπορεί να μεταβάλλεται αισθητά.
- Από τον αριθμό των βαθμίδων προκύπτει ότι πρόκειται για μία μέτριοι μεγέθους στήλη. Από τεχνική άποψη, στήλες της τάξης των 175 βαθμίδων είναι δυνατό να κατασκευαστούν. Αν απαιτούνται περισσότερες βαθμίδες, όπως π.χ. για το διαχωρισμό ενώσεων του τύπου προπάνιο - προπένιο, κατασκευάζονται δύο στήλες σε σειρά και ο διαχωρισμός συνεχίζεται στη δεύτερη στήλη, ενώ τα προϊόντα λαμβάνονται από τον πυθμένα της πρώτης και την κορυφή της δεύτερης.

Σχετικά με τις τιμές των προδιαγραφών και των μεταβλητών σχεδιασμού μπορούμε να αναφέρουμε ότι η θερμοκρασία εισόδου του νερού ψύξης έχει ληφθεί αρκετά υψηλή, ώστε να καλύπτει τη λειτουργία και κατά τους ζεστούς καλοκαιρινούς μήνες. Οι συνολικοί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας έχουν ληφθεί πλησίον των κατώτερων τιμών τους για ασφαλή υπολογισμό των επιφανειών εναλλαγής θερμότητας. Η απόσταση μεταξύ των δίσκων έχει ληφθεί με κριτήριο τη δυνατότητα τοποθέτησης ανθρωποθυρίδων, ώστε να μπορούν να γίνουν εργασίες στο εσωτερικό της στήλης, δεδομένου ότι πρόκειται για μία αρκετά μεγάλη στήλη. Ο λόγος αναρροής έχει ληφθεί οριακά μικρός και είναι εκείνη η τιμή του που ελαχιστοποιεί το κόστος για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Στην πράξη, η επιλογή ενός τόσο χαμηλού λόγου αναρροής μπορεί να μην εξασφαλίζει ικανοποιητικές λειτουργικές συνθήκες. Ρεαλιστικότερη θα ήταν, ίσως, μία τιμή της τάξης του

1,10 - 1,15 R_{min} , αλλά αυτό μπορεί να αποφασιστεί μόνο όταν τεθεί σε λειτουργία η αποστακτική στήλη. Ο υπολογισμός της αναρροής στηρίχτηκε σε δύο παραδοχές, που, εξ αρχής, γνωρίζουμε ότι δεν ισχύουν πλήρως. Η μία αναφέρεται στη σταθερή γραμμομοριακή ροή υγρού και ατμών στο εσωτερικό της στήλης. Αυτό ισχύει, θεωρητικά, μόνο όταν τα δύο συστατικά έχουν ίσες ενθαλπίες εξάτμισης στις συνθήκες λειτουργίας της. Στην περίπτωση που εξετάζουμε είναι $\Delta H_{2,2,4-TMP} = 29543$ kJ/kmol και $\Delta H_{n-C8} = 35350$ kJ/kmol, για τις συνθήκες τροφοδοσίας, υπάρχει, δηλαδή, διαφορά της τάξης του 16%. Αυτή η διαφορά δεν είναι υπερβολικά μεγάλη, ώστε να αναστέλλει την παραδοχή των σταθερών μοριακών ροών, είναι, εν τούτοις, σημαντική για να οδηγήσει στην κριτική των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Μία δεύτερη παραδοχή είναι η θεώρηση του μίγματος ως ιδανικό με σταθερή σχετική πτητικότητα. Αποκλείσεις από την ιδανικότητα εμφανίζονται ακόμη και σε μίγματα συστατικών με μεγάλη χημική συγγένεια, όπως είναι οι υδρογονάνθρακες. Η θερμοκρασία τροφοδοσίας στη στήλη αντιστοιχεί σε κορεσμένο υγρό ($T_f = 117^\circ\text{C}$ έναντι $\Theta_{EB} = 117,86^\circ\text{C}$, $q = 1,008$), και η πίεση λειτουργίας είναι 1,05 atm (πρακτικά ατμοσφαιρική). Ως τιμές του λόγου ταχύτητας ατμών προς την ταχύτητα πλημμύρισης και του λόγου καθαρής προς ολική διατομή ελήφθησαν τυπικές τιμές που ενδεχόμενα να χρειάζονται διόρθωση μετά τον υπολογισμό των αγωγών καθόδου και του χρόνου παραμονής του υγρού σε αυτούς.

Ας υπολογίσουμε το ολικό ισοζύγιο ενθαλπίας για το εξεταζόμενο παράδειγμα από την Εξίσωση 4.181, με όγκο ελέγχου που περιλαμβάνει τη στήλη, (χωρίς το θερμαντήρα και τους ψυκτήρες). Είναι:

$$Fh_F + Q_R = Dh_D + Bh_B + Q_C \Rightarrow 0,058*(294,6*117)+2537-0,017*(277,4*101,5)-0,041*(303,4*127,2)-2250,9 = 224,3 \text{ kW}$$

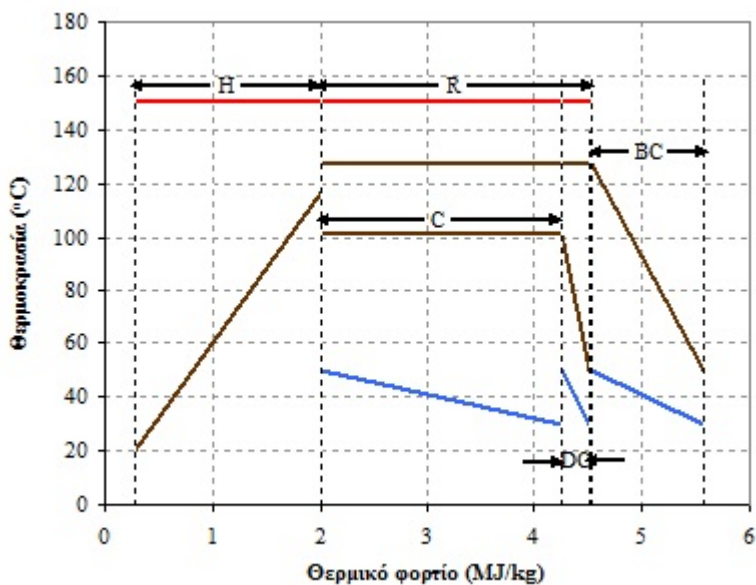
Παρατηρείται ότι το ολικό ισοζύγιο δεν επαληθεύεται. Από είναι μία ακόμη συνέπεια της θεώρησης σταθερών γραμμομοριακών ροών, με βάση την οποία υπολογίστηκε η ποσότητα των ατμών που συμπυκνώνονται στην κορυφή και του υγρού που ατμοποιείται στον πυθμένα, απ' όπου υπολογίζονται τα θερμικά φορτία συμπυκνωτήρα και αναβραστήρα της παραπάνω σχέσης.

Στο Σχήμα 4.6 παριστάνεται το διάγραμμα θερμικού φορτίου - θερμοκρασίας του συστήματος και έχουν σημειωθεί τα πέντε στοιχεία μεταφοράς θερμότητάς του. Παρατηρείται:

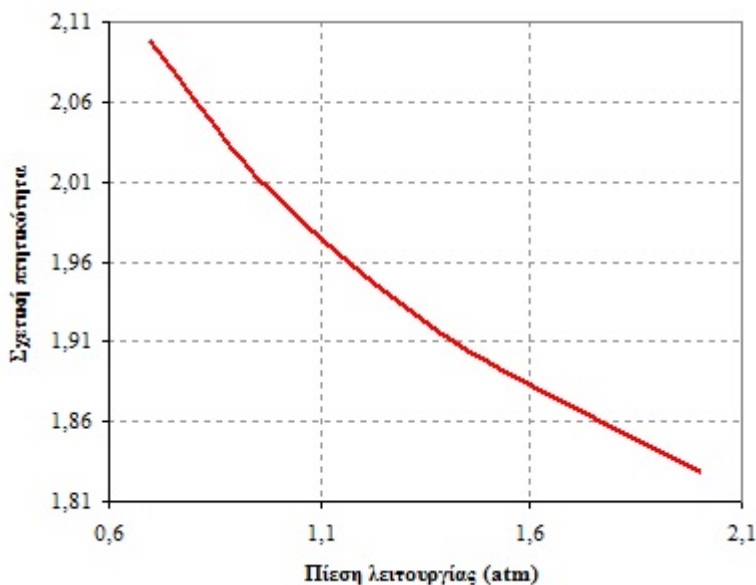
- η υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας του αναβραστήρα σε σχέση με του συμπυκνωτήρα, αφού σε αυτόν θερμαίνεται, σχεδόν καθαρό, το λιγότερο πτητικό συστατικό, και
- το σημαντικά μικρότερο φορτίο του ψυκτήρα αποστάγματος ως προς εκείνον του υπολείμματος, λόγω της χαμηλότερης περιεκτικότητας του πτητικού συστατικού στο τροφοδοτούμενο μίγμα.

Στο Σχήμα 4.7 δίνεται η μεταβολή της σχετικής πτητικότητας του μίγματος συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας, απ' όπου παρατηρείται η αντίστροφη σχέση μεταξύ τους. Η χαμηλή πίεση ευνοεί το διαχωρισμό, εντούτοις μείωση της πίεσης κατά 65% (από τις 2 atm στις 0,7 atm) προκαλεί αύξηση της σχετικής πτητικότητας μόλις κατά 12,8%. Σημειώνουμε ότι η ελαττωμένη πίεση οδηγεί σε πολύ χαμηλή πυκνότητα ατμών με αποτέλεσμα την απαίτηση, σε πολλές περιπτώσεις, μεγαλύτερης απόστασης μεταξύ των δίσκων (κατασκευή υψηλότερης στήλης). Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας λειτουργίας συμπυκνωτήρα και αναβραστήρα συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας. Η πίεση επιδρά άμεσα στις θερμοκρασίες έναρξης βρασμού και υγροποίησης του μίγματος στα δύο αυτά στοιχεία. Το διάγραμμα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό γιατί καθορίζει τις βοηθητικές παροχές πρόσδοσης και απαγωγής θερμότητας. Έτσι, για πιέσεις ανώτερες των 1,5 atm απαιτείται ατμός θερμοκρασίας άνω των 150°C , ενώ αντίστοιχα για πίεση μικρότερη από 1 atm χάνεται η δυνατότητα παραγωγής ζεστού νερού ($\sim 90^\circ\text{C}$) που χρησιμοποιείται συχνά ως πηγή ήπιας θέρμανσης. Στο Σχήμα 4.9 απεικονίζεται ο απαιτούμενος αριθμός πραγματικών βαθμίδων (δίσκων + μερικός αναβραστήρας) συναρτήσει του λόγου R/R_{min} , για πίεση λειτουργίας 1,05 atm. Η αύξηση του λόγου αναρροής ελαττώνει τους απαιτούμενους δίσκους, λόγω της μακρύτερης, χρονικά, διάρκειας κατά την οποία το υγρό και οι ατμοί παραμένουν σε επαφή μέσα στη στήλη. Για το εξεταζόμενο σύστημα, αύξηση του λόγου αναρροής από 1,021 σε 1,3 της ελάχιστης τιμής του, ελαττώνει τους απαιτούμενους δίσκους κατά $\sim 40\%$. Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται η επίδραση τόσο του λόγου R/R_{min} όσο και της πίεσης λειτουργίας στον απαιτούμενο αριθμό πραγματικών βαθμίδων. Η αύξηση της πίεσης αυξάνει τους απαιτούμενους δίσκους αφού δυσκολεύει το διαχωρισμό (μείωση της σχετικής πτητικότητας). Το Σχήμα 4.11 παρουσιάζει την επίδραση του λόγου R/R_{min} και της πίεσης λειτουργίας στην ταχύτητα πλημμύρισης, απ' όπου προκύπτει ότι η ελάττωση της πίεσης αυξάνει αισθητά την εν λόγω ταχύτητα, ιδιαίτερα για πιέσεις κατώτερες της ατμοσφαιρικής, καθώς η πυκνότητα των ατμών καθίσταται πολύ μικρή, ενώ αντίθετα ο λόγος

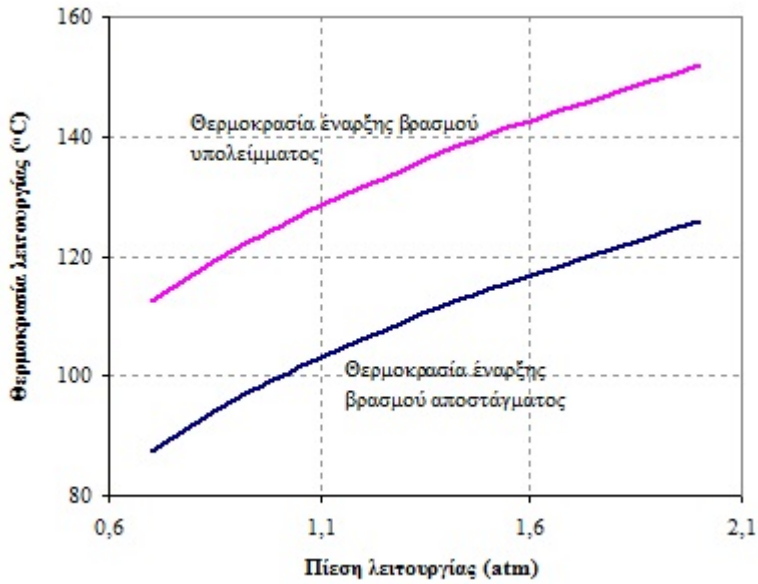
αναρροής έχει αμελητέα επίδραση. Στο Σχήμα 4.12 δίνεται η μεταβολή του συνολικού ετήσιου κόστους της στήλης συναρτήσει του λόγου R/R_{min} και της πίεσης λειτουργίας, για τροφοδοσία ως κορεσμένο υγρό, λαμβάνοντας υπόψη μόνο το συμπυκνωτήρα και τον αναβραστήρα όσον αφορά τα στοιχεία μεταφοράς θερμότητας (ο θερμοαντήρας και οι ψυκτήρες δεν αποτελούν συστατικά στοιχεία της στήλης, αλλά μόνο βοηθητικά, και μπορεί να λείπουν ανάλογα με την περίπτωση). Η αύξηση της πίεσης δυσκολεύει το διαχωρισμό, αυξάνει το συντελεστή διόρθωσης της πίεσης (ανθεκτικότερη κατασκευή του εξοπλισμού) και απαιτεί, ενδεχόμενα, θερμαντικό μέσο υψηλότερης θερμοκρασίας από το άμεσα διαθέσιμο, επομένως οδηγεί σε αύξηση του κόστους.



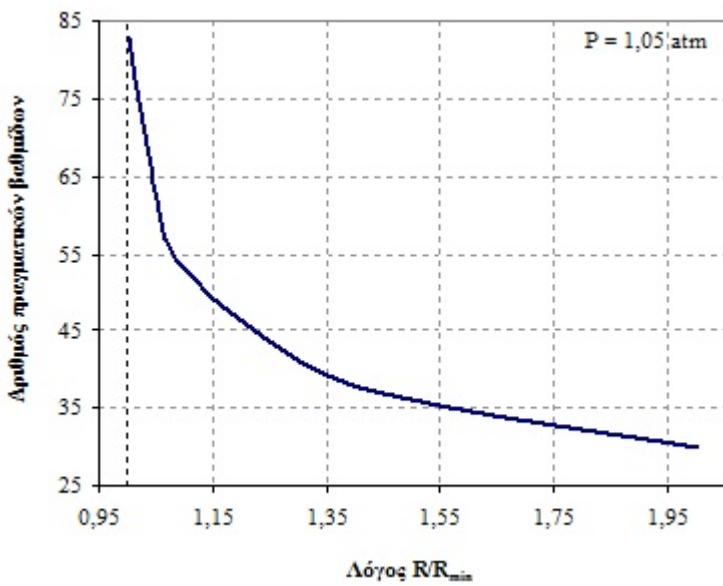
Σχήμα 4.6 Διάγραμμα θερμοκού φορτίου - θερμοκρασίας αποστακτικής στήλης.



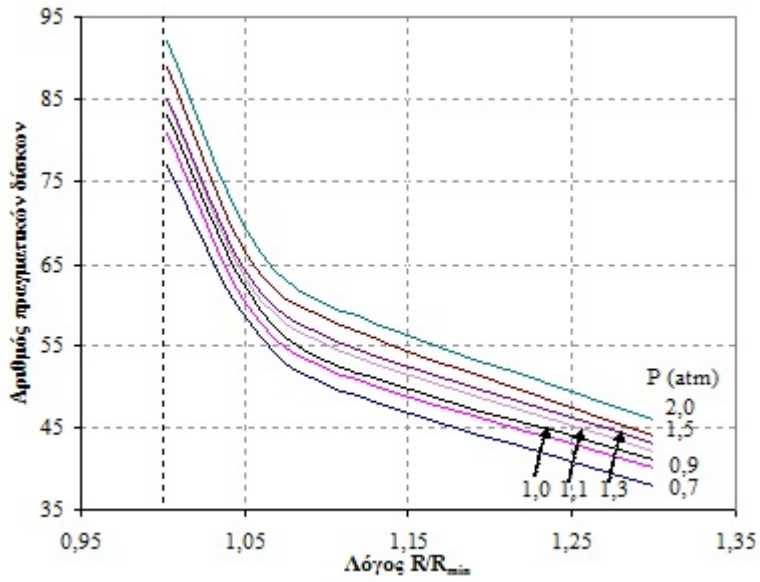
Σχήμα 4.7 Μεταβολή της σχετικής πτητικότητας του μίγματος συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας.



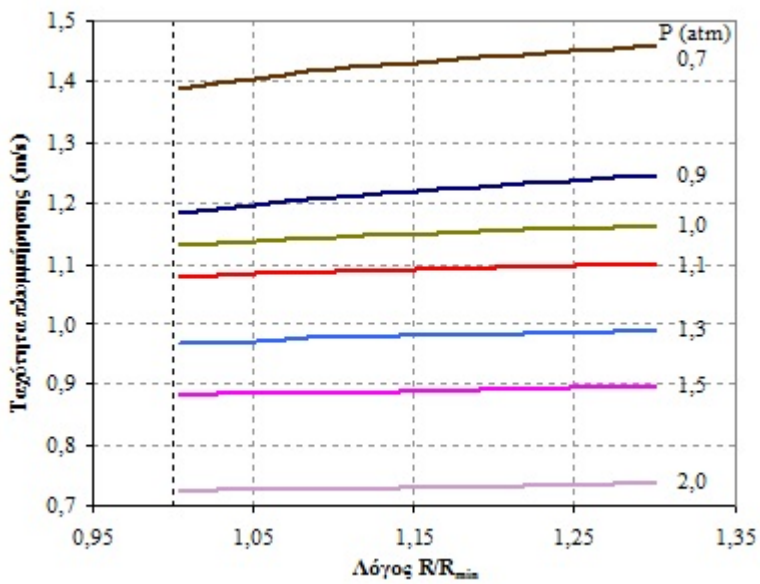
Σχήμα 4.8 Μεταβολή της θερμοκρασίας λειτουργίας συμπυκνωτήρα και αναβραστήρα συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας.



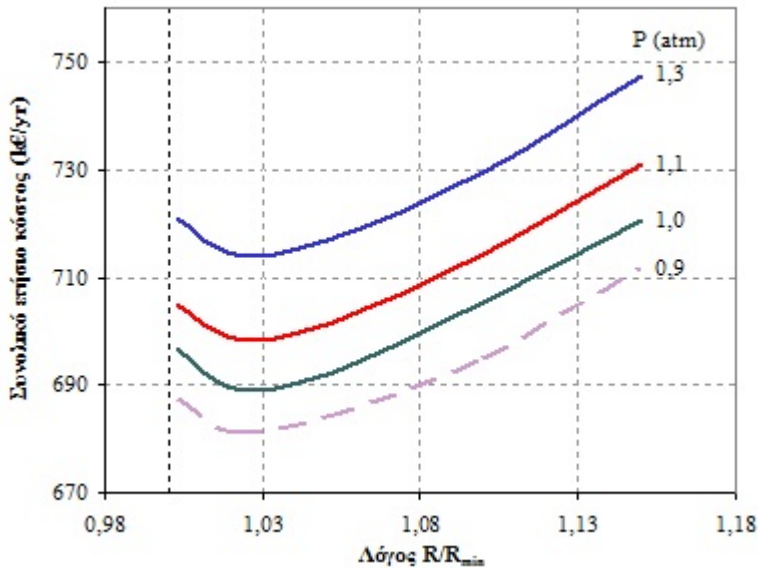
Σχήμα 4.9 Απαιτούμενος αριθμός πραγματικών βαθμίδων συναρτήσει του λόγου R/R_{min} , για πίεση λειτουργίας 1,05 atm.



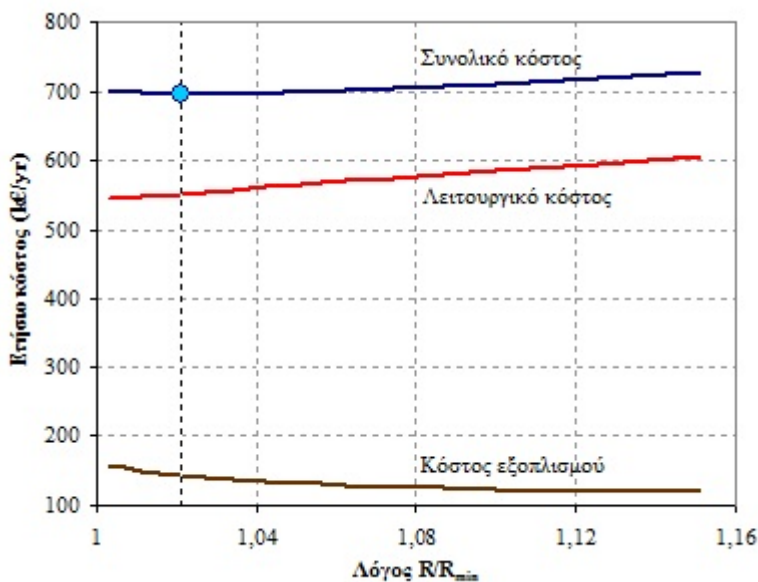
Σχήμα 4.10 Απαιτούμενος αριθμός πραγματικών βαθμίδων συναρτήσει του λόγου R/R_{min} και της πίεσης λειτουργίας.



Σχήμα 4.11 Μεταβολή της ταχύτητας πλημμύρισης συναρτήσει του λόγου R/R_{min} και της πίεσης λειτουργίας.



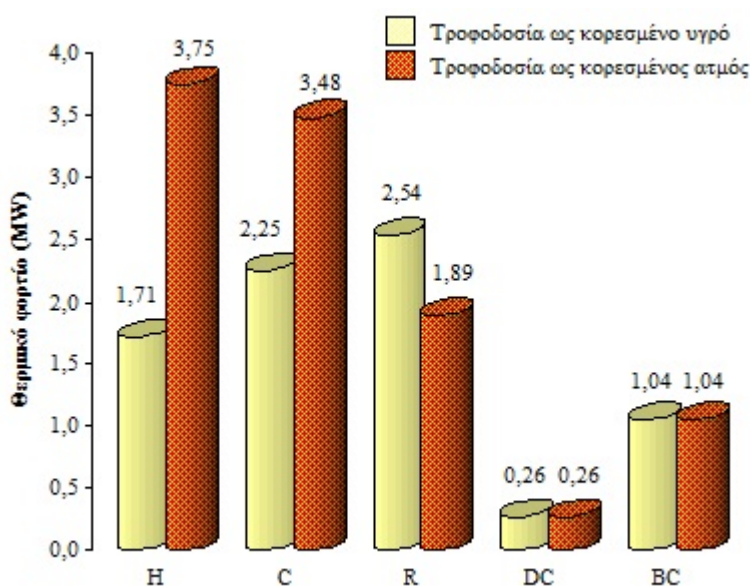
Σχήμα 4.12 Μεταβολή του συνολικού ετήσιου κόστους της στήλης συναρτήσει του λόγου R/R_{min} και της πίεσης λειτουργίας.



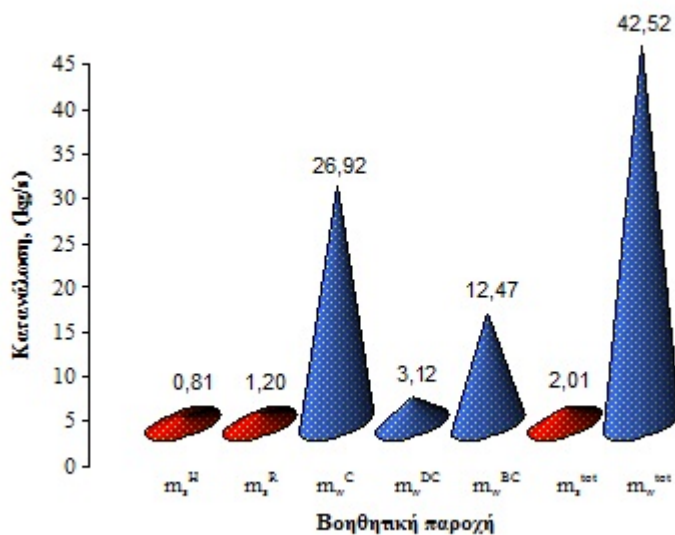
Σχήμα 4.13 Ανάλυση του ετήσιου κόστους της στήλης συναρτήσει του λόγου R/R_{min} για πίεση λειτουργίας 1,05 atm.

Η καμπύλη που αντιστοιχεί σε πίεση χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής είναι ενδεικτική γιατί δεν έχει ληφθεί υπόψη το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος δημιουργίας κενού που απαιτείται. Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται η ανάλυση του συνολικού ετήσιου κόστους της στήλης (όπως ορίστηκε στο Σχήμα 4.12) στα συστατικά του στοιχεία, το κόστος εξοπλισμού και το λειτουργικό κόστος, συναρτήσει του λόγου R/R_{min} για πίεση λειτουργίας 1,05 atm. Το κόστος εγκατάστασης ελαττώνεται με αύξηση του λόγου αναρροής λόγω απαίτησης κοντύτερης στήλης, ενώ το λειτουργικό κόστος αυξάνεται λόγω αυξημένης χρήσης βοηθητικών παροχών. Γενικά, το λειτουργικό κόστος συμμετέχει με μεγαλύτερο ποσοστό στη διαμόρφωση του συνολικού (εκτός αν ο ετήσιος χρόνος λειτουργίας είναι πολύ μικρός) και συνεπώς ο περιορισμός του με μείωση του λόγου αναρροής διαμορφώνει το ελάχιστο ετήσιο συνολικό κόστος. Στο Σχήμα 4.14 δίνεται το θερμικό φορτίο των στοιχείων εναλλαγής θερμότητας της στήλης, όταν η τροφοδοσία εισέρχεται ως κορεσμένο υγρό ή κορεσμένος ατμός. Είναι χαρακτηριστική η αύξηση του θερμικού φορτίου του θερμαντήρα κατά ~120% όταν απαιτείται η εξάτμιση της τροφοδοσίας, ενώ οι ψυκτήρες αποστάγματος και υπολείμματος δεν επηρεάζονται από την κατάσταση της τροφοδοσίας, για δεδομένη πίεση λειτουργίας και τελικές

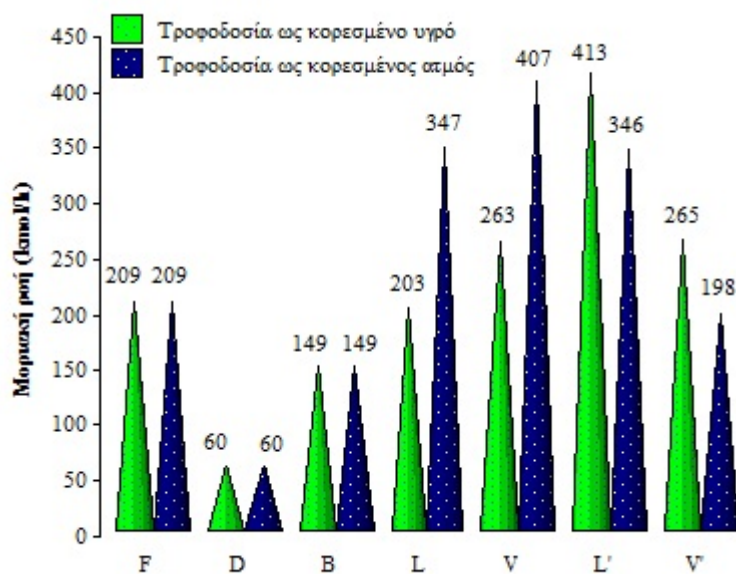
θερμοκρασίες των προϊόντων, αφού θεωρείται ότι απομακρύνονται από τη στήλη ως κορεσμένα υγρά. Όταν η τροφοδοσία είναι κορεσμένο υγρό εξοικονομείται μέγεθος από το συμπυκνωτήρα, αλλά επιβαρύνεται ο αναβραστήρας. Στο Σχήμα 4.15 παριστάνεται η κατανάλωση βοηθητικών παροχών σε κάθε στοιχείο μεταφοράς θερμότητας, καθώς και οι ολικές καταναλώσεις ατμού θέρμανσης και νερού ψύξης. Διαπιστώνεται ότι η μάζα ατμού που καταναλώνεται είναι περίπου 22 μικρότερη εκείνης του νερού, αν και το φορτίο που προσφέρεται για θέρμανση είναι ~20% μεγαλύτερο εκείνου για ψύξη. Αυτό οφείλεται αφ' ενός στη λανθάνουσα θερμότητα που προσφέρει ο ατμός έναντι της αισθητής που λαμβάνει το νερό και αφ' ετέρου στη μικρή θερμοκρασιακή μεταβολή του νερού που θεωρούμε επιτρεπτή (λειτουργία πύργων ψύξης). Βεβαίως το μοναδιαίο κόστος του ατμού είναι πολλαπλάσιο εκείνου του νερού. Τέλος, στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζεται η μοριακή ροή των εξωτερικών και εσωτερικών ρευμάτων για τροφοδοσία ως κορεσμένο υγρό ή ατμό. Παρατηρείται ότι οι εξωτερικές ροές (τροφοδοσία, απόσταγμα, υπόλειμμα) παραμένουν αμετάβλητες και στις δύο περιπτώσεις. Η κατάσταση της τροφοδοσίας επιδρά μόνο στις εσωτερικές ροές (υγρού και ατμών) σε κάθε τμήμα της στήλης. Η τροφοδοσία ως κορεσμένο υγρό αυξάνει τις ροές στο τμήμα εξάντλησης και αντίστοιχα ως κορεσμένος ατμός επιβαρύνει το τμήμα εμπλουτισμού. Είναι αξιοσημείωτο ότι η απόλυτη διαφορά των ροών υγρού και ατμών παραμένει, σε κάθε τμήμα, σταθερή, ανεξάρτητα της κατάστασης της τροφοδοσίας (με την παραδοχή σταθερών γραμμομοριακών ροών σε κάθε τμήμα).



Σχήμα 4.14 Θερμικό φορτίο στοιχείων εναλλαγής θερμότητας της αποστακτικής στήλης για τροφοδοσία ως κορεσμένο υγρό ή ατμό.



Σχήμα 4.15 Κατανάλωση βοηθητικής παροχής στοιχείων εναλλαγής θερμότητας και ολική της αποστακτικής στήλης.



Σχήμα 4.16 Μοριακή ροή εξωτερικών και εσωτερικών ρευμάτων για τροφοδοσία ως κορεσμένο υγρό ή ατμό.

4.5 Μέθοδος Lewis

Η μέθοδος Lewis αποτελεί την αναλυτική έκφραση της γραφικής μεθόδου McCabe - Thiele (Σαραβάκος, 1985' Coulson κ.α., 1996' Perry κ.α., 1997' McCabe κ.α, 2003) και μπορεί να θεωρηθεί η βασικότερη μέθοδος σχεδιασμού και ανάλυσης μιας αποστακτικής στήλης, δεδομένου ότι προσφέρει μία καλή προσέγγιση της διεργασίας σε επίπεδο που ενδιαφέρει ένα μηχανικό και δεν απαιτεί θερμοδυναμικά δεδομένα που είναι δύσκολο να βρεθούν στη βιβλιογραφία. Πλεονέκτημά της σε σχέση με τη μέθοδο Fenske - Underwood - Gilliland, που αναπτύχθηκε, είναι ότι, καταρχάς, στηρίζεται σε δεδομένα ισορροπίας ατμών - υγρού για κάθε συγκεκριμένο σύστημα που εξετάζεται, και όχι απλά σε κάποια μέση (ή ελάχιστη) τιμή σχετικής πητικότητας, ενώ λαμβάνει υπόψη στον υπολογισμό των θεωρητικών βαθμίδων στοιχεία όπως η ανώμαλη μορφή μιας καμπύλης ισορροπίας ή η μεγάλη μεταβολή της σχετικής πητικότητας συναρτήσει του μοριακού κλάσματος (για το σύστημα αιθανόλη - νερό κυμαίνεται από 1 έως ~10,5, ενώ για εκείνο της

ακετόνης με το νερό από ~2 έως σχεδόν 50). Επιπλέον μπορεί να δώσει την κατανομή μοριακών κλασμάτων των συστατικών και θερμοκρασίας καθ' ύψος της στήλης, καθώς και να καταστήσει δυνατή τη διερεύνηση τροφοδοτήσής της σε βαθμίδα διαφορετική από την άριστη. Γενικότερα, η μέθοδος Lewis επιτρέπει την ανάλυση περισσότερο πολύπλοκων αποστακτικών στηλών, όπως εκείνες με πολλαπλές τροφοδοσίες ή εξαγωγές προϊόντων, με πολλαπλούς αναβραστήρες ή συμπυκνωτήρες, κλπ. Απαιτεί περισσότερους υπολογισμούς σε σχέση με τη μέθοδο FUG, αν και η χρήση των Η/Υ έχει καταστήσει τη μέθοδο πολύ πιο εύχρηστη (και ανταγωνιστική) απ' ό,τι σε προγενέστερες εποχές. Στηρίζεται στη διαδοχική επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας και γραμμής λειτουργίας σε κάθε τμήμα της στήλης που παρεμβάλλεται μεταξύ οποιασδήποτε τροφοδοσίας ή εξαγωγής προϊόντος. Η βασική παραδοχή για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η ύπαρξη σταθερής γραμμομοριακής ροής υγρού και ατμών σε κάθε τμήμα της στήλης (παρότι η ροή της κάθε φάσης είναι γενικά διαφορετική από τμήμα σε τμήμα). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι για κάθε γραμμομόριο ατμών που συμπυκνώνεται, ένα γραμμομόριο υγρού εξατμίζεται και η συνθήκη αυτή πληρείται όταν η στήλη λειτουργεί αδιαβατικά (αμελητέες απώλειες θερμότητας), η θερμότητα ανάμιξης είναι αμελητέα, η μεταβολή της θερμοχωρητικότητας είναι αμελητέα ως προς τη μεταβολή της λανθάνουσας θερμότητας και η μοριακή λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης κάθε συστατικού είναι ανεξάρτητη της συγκέντρωσης και σταθερή ως προς τη θερμοκρασία, στην θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας της στήλης. Γενικά, οι όροι αυτοί πληρούνται στην περίπτωση των σχεδόν ιδανικών μιγμάτων, τα διαγράμματα ενθαλπίας - σύστασης των οποίων, εμφανίζουν τις γραμμές ενθαλπίας κορεσμένου υγρού και κορεσμένων ατμών, πρακτικά, παράλληλες μεταξύ τους. Εν τούτοις, ακόμη και στην περίπτωση διαφοράς μεταξύ των μοριακών θερμοτήτων εξάτμισης των συστατικών, η μέθοδος υπολογίζει τον αριθμό των βαθμίδων με ικανοποιητική ακρίβεια, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα εφαρμογής της τροποποιημένης μεθόδου McCabe - Thiele (Σαραβάκος, 1985· Wankat, 1988).

Σύμφωνα με τη μέθοδο Lewis μπορεί να οριστεί για κάθε τμήμα της στήλης μία γραμμή λειτουργίας, η οποία είναι ευθεία, λόγω παραδοχής σταθερών γραμμομοριακών ροών, εκφράζει τα ισοζύγια μάζας στο εν λόγω τμήμα και αποτελεί το γεωμετρικό τόπο των τιμών μοριακών κλασμάτων του πτητικού συστατικού στις δύο φάσεις στην περιοχή μεταξύ δύο διαδοχικών βαθμίδων του τμήματος. Η αντίστοιχη σύσταση των φάσεων που εξέρχονται από οποιαδήποτε βαθμίδα εκφράζεται από την εξίσωση της καμπύλης ισορροπίας (για ιδανικές βαθμίδες) ή ψευδοϊσορροπίας (αν θεωρηθεί κάποιος βαθμός απόδοσης των βαθμίδων). Στον Πίνακα 4.12 περιγράφονται οι εξισώσεις υπολογισμού των μοριακών κλασμάτων του πτητικού συστατικού στις δύο φάσεις σε κάθε βαθμίδα ισορροπίας (θεωρητική) της αποστακτικής στήλης, καθώς και του αριθμού των βαθμίδων με τη μέθοδο Lewis. Οι Εξισώσεις 4.182 και 4.183 αποτελούν εκφράσεις των ισοζυγίων μάζας (ολικό και πτητικού συστατικού), θεωρώντας ως όγκο ελέγχου ολόκληρο το αποστακτικό σύστημα, ενώ η Εξίσωση 4.184 δίνει το ολικό ισοζύγιο μάζας για όγκο ελέγχου που περιλαμβάνει το συμπυκνωτήρα και το άνω της βαθμίδας τροφοδοσίας τμήμα της στήλης, συνδέοντας τις εξωτερικές (τροφοδοσία, απόσταγμα, υπόλειμμα) με τις εσωτερικές ροές (υγρό που κατέρχεται και ατμοί που ανέρχονται στο εσωτερικό της στήλης). Η Εξίσωση 4.185 εκφράζει τον ορισμό της κατάστασης τροφοδοσίας και συνδέει τις εσωτερικές ροές της υγρής φάσης στα δύο τμήματα της στήλης. Η Εξίσωση 4.186 είναι αντίστοιχη της προηγούμενης, αλλά αναφέρεται στη φάση των ατμών και η Εξίσωση 4.187 προκύπτει από την ύπαρξη του ολικού συμπυκνωτήρα και δηλώνει ότι η σύσταση των ατμών της πρώτης (ανώτερης) βαθμίδας είναι ίδια με εκείνη του αποστάγματος, αλλά και του ρεύματος αναρροής. Η Εξίσωση 4.188 αποτελεί τη σχέση ισορροπίας ατμών - υγρού του αποσταζόμενου δυαδικού μίγματος, η Εξίσωση 4.189 παριστάνει τη γραμμή λειτουργίας του τμήματος εμπλουτισμού της στήλης και η Εξίσωση 4.190 ορίζει την αντίστοιχη γραμμή του τμήματος εξάντλησης. Τέλος, η Εξίσωση 4.191 υπολογίζει το λόγο αναρροής της αποστακτικής στήλης.

$D = \frac{x_F - x_B}{x_D - x_B} F$	(4.182)
$B = \frac{x_D - x_F}{x_D - x_B} F$	(4.183)
$V = L + D$	(4.184)
$q = \frac{L' - L}{F}$	(4.185)
$V' = V - (1 - q)F$	(4.186)

$y_1 = x_D$	(4.187)
$y_i = y(x_i)$	(4.188)
$y_{i+1} = \frac{L}{V} x_i + \left(1 - \frac{L}{V}\right) x_D$	(4.189)
$y_{i+1} = \frac{L'}{V'} x_i + \left(1 - \frac{L'}{V'}\right) x_B$	(4.190)
$R = \frac{L}{D}$	(4.191)

Πίνακας 4.12 Εξισώσεις κλασματικής απόσταξης με τη μέθοδο Lewis.

Μεταβλητές δεδομένα	(5)	$F, x_F, x_D, x_B, y = f(x)$
Μεταβλητές σχεδιασμού	(2)	q, L
Μεταβλητές δοκιμής	(0)	
Μεταβλητές επίλυσης Πρόκειται για τις μεταβλητές που υπολογίζονται από τον αλγόριθμο που ακολουθεί (N είναι ο αριθμός των θεωρητικών βαθμίδων)	(7+2N)	
Αλγόριθμος	(4.182)	$\rightarrow D$
	(4.183)	$\rightarrow B$
	(4.184)	$\rightarrow V$
	(4.185)	$\rightarrow L'$
	(4.186)	$\rightarrow V'$
	(4.187)	$\rightarrow y_1$
	Για $x_{1,2} \leq x_i \leq x_D$	
	(4.188)	$\rightarrow x_i$
	(4.189)	$\rightarrow y_{i+1}$
Οι Εξισώσεις (4.188) και (4.189) λύνονται διαδοχικά όσο η παραπάνω ανισοτική σχέση εξακολουθεί να ισχύει και κάθε ζεύγος ορίζει μία θεωρητική βαθμίδα του τμήματος εμπλουτισμού.		
	Για $x_B \leq x_i \leq x_{1,2}$	
Αλγόριθμος	(4.188)	$\rightarrow x_i$
Αλγόριθμος	(4.190)	$\rightarrow y_{i+1}$
Οι Εξισώσεις (4.188) και (4.190) λύνονται διαδοχικά όσο η παραπάνω ανισοτική σχέση εξακολουθεί να ισχύει και κάθε ζεύγος ορίζει μία θεωρητική βαθμίδα του τμήματος εξάντλησης.		
	(4.191)	$\rightarrow R$
	$x_{1,2} = \frac{\left(1 - \frac{L'}{V'}\right) x_B - \left(1 - \frac{L}{V}\right) x_D}{\frac{L}{V} - \frac{L'}{V'}}$	
και x_i, y_i, y_{i+1} τα μοριακά κλάσματα του συστατικού 1 στην υγρή φάση της i-βαθμίδας, στην φάση ατμών της i-βαθμίδας και στη φάση ατμών της i+1-βαθμίδας, αντίστοιχα.		

Πίνακας 4.13 Αλγόριθμος επίλυσης κλασματικής απόσταξης με τη μέθοδο Lewis.

Ο παραπάνω αλγόριθμος ισχύει στην περίπτωση τροφοδοσίας στην άριστη βαθμίδα.

Οι Εξισώσεις του Πίνακα 4.12 μπορούν να συνδυαστούν με εκείνες με εκείνες του Πίνακα 4.3 με τις ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Τα ισοζύγια μάζας (εξισώσεις 4.9 - 4.14) είναι ουσιαστικά ίδια με εκείνα του Πίνακα 4.12, αλλά επιλύονται με διαφορετική σειρά, σύμφωνα με τον αλγόριθμο του Πίνακα 4.13.
- Οι Εξισώσεις 4.2 - 4.6, που περιγράφουν τη μέθοδο FUG, αντικαθίστανται από την επαναληπτική επίλυση των Εξισώσεων 4.188 - 4.189 και 4.188 - 4.190, που περιγράφουν τη μέθοδο Lewis.
- Οι υπόλοιπες εξισώσεις εξακολουθούν να ισχύουν (υπολογισμός σχετικής πτητικότητας και διαμέτρου, θερμική ανάλυση, κλπ).

Σχετικά με τις μεταβλητές σχεδιασμού σημειώνουμε ότι οι H_I , (f_r) και n εκφράζουν κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά της στήλης και ισχύουν ανεξάρτητα της μεθόδου υπολογισμού των θεωρητικών βαθμίδων. Η πίεση δεν αναφέρεται στον Πίνακα 4.12, αλλά εξακολουθεί να αποτελεί μεταβλητή σχεδιασμού, δεδομένου ότι έχει ληφθεί υπόψη για τον υπολογισμό της έκφρασης της καμπύλης ισορροπίας (καθορίζει τις τιμές των πειραματικών δεδομένων ισορροπίας), ενώ η θερμοκρασία εισόδου της τροφοδοσίας στη στήλη, T_f , έχει αντικατασταθεί, ως μεταβλητή σχεδιασμού, από τη θερμική κατάσταση της τροφοδοσίας q . Τα δύο αυτά μεγέθη συνδέονται με την Εξίσωση 4.1 και η επιλογή τους ως μεταβλητές σχεδιασμού ή επίλυσης είναι απόλυτα ισοδύναμη.

Το σημείο $x_{1,2}$ αντιστοιχεί στην τομή των γραμμών λειτουργίας των τμημάτων εμπλουτισμού και εξάντλησης. Η επιλογή της μοριακής ροής L θα πρέπει να πληροί τη σχέση:

$$f(x) > \frac{L}{V}x + \left(1 - \frac{L}{V}\right)x_D \quad \text{για } x_{1,2} \leq x \leq x_D, \text{ και}$$

$$f(x) > \frac{L'}{V'}x + \left(1 - \frac{L'}{V'}\right)x_B \quad \text{για } x_B \leq x \leq x_{1,2}$$

δηλαδή, οι γραμμές λειτουργίας δεν πρέπει να τέμνονται με την καμπύλη ισορροπίας στην περιοχή ισχύος τους (θεωρούμε, πάντα, ότι οι υπολογισμοί γίνονται με βάση τα μοριακά κλάσματα του πτητικού συστατικού, γιατί διαφορετικά οι γραμμές λειτουργίας βρίσκονται πάνω από την καμπύλη ισορροπίας, όπως στην περίπτωση της απορρόφησης).

Συνηθέστερη, εντούτοις, είναι η εφαρμογή της μεθόδου Lewis αν ληφθεί ως μεταβλητή σχεδιασμού ο λόγος αναρροής R , αντί του ρυθμού ροής υγρής φάσης L , δεδομένου ότι ο ελάχιστος λόγος αναρροής, R_{min} , μπορεί να υπολογιστεί εύκολα και ο λόγος R/R_{min} είναι πάντα λίγο μεγαλύτερος της μονάδας σε πρακτικές εφαρμογές. Θεωρητικά, ο λόγος αναρροής κυμαίνεται από την τιμή R_{min} έως άπειρο, όποτε απαιτείται ο ελάχιστος αριθμός βαθμίδων για το διαχωρισμό και ουσιαστικά η στήλη λειτουργεί χωρίς ροή προϊόντων, και χωρίς τροφοδοσία σε μόνιμη κατάσταση. Από αριστοποίηση της λειτουργίας πραγματικών αποστακτικών στηλών έχει βρεθεί ότι $R = (1,05 - 1,5) R_{min}$. Αυτός ο εναλλακτικός τρόπος παρουσιάζεται στο λογικό διάγραμμα του Σχήματος 4.18, από το οποίο προκύπτει ότι ο υπολογισμός του αριθμού των βαθμίδων ισορροπίας και των μοριακών κλασμάτων των συστατικών σε αυτές μπορεί να γίνει χωρίς τον, εξ' αρχής, υπολογισμό των μοριακών ρυθμών ροής (εσωτερικών και εξωτερικών) και χωρίς να απαιτείται ο ρυθμός τροφοδοσία F της στήλης. Διαπιστώνεται έτσι ότι ο αριθμός των βαθμίδων N , καθώς και το ύψος της στήλης είναι ανεξάρτητα του μοριακού (ή μαζικού) ρυθμού τροφοδοσίας, ο οποίος όμως καθορίζει το μέγεθος των υπολοίπων ροών και, κατ' επέκταση, τη διατομή της στήλης και τις επιφάνειες των στοιχείων εξοπλισμού που συνδέονται με τη μεταφορά θερμότητας.

Οι Εξισώσεις 4.189 και 4.190 μπορούν να γραφούν:

$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_D}{R+1} \quad (4.189')$$

$$y = \frac{RD + qF}{(R+1)D + (q-1)F}x + \left[1 - \frac{RD + qF}{(R+1)D + (q-1)F}\right]x_B$$

(4.190')

Η πρώτη από τις σχέσεις αυτές είναι απαλλαγμένη από τους ρυθμούς ροής, όχι όμως και η δεύτερη. Η εφαρμογή της μεθόδου διευκολύνεται με την εισαγωγή μιας επιπλέον γραμμής, της γραμμής τροφοδοσίας ή γραμμή- q , η οποία είναι, επίσης, απαλλαγμένη από τους ρυθμούς ροής και δίνεται από την Εξίσωση 4.192:

$$y = \frac{q}{q-1}x + \frac{x_F}{1-q} \quad (4.192)$$

Η σχετική θέση της γραμμής τροφοδοσίας, σε διάγραμμα x - y , παριστάνεται στο Σχήμα 4.17.

Στην περίπτωση ομαλών καμπυλών ισορροπίας, χωρίς σημείο(α) καμπής, αποδεικνύεται ότι οι γραμμές λειτουργίας και η γραμμή τροφοδοσίας τέμνονται πάνω στην καμπύλη ισορροπίας (Σαραβάκος, 1985; McCabe κ.ά, 2003). Τότε η τιμή του ελάχιστου λόγου αναρροής, R_{min} , θα ικανοποιεί τη σχέση:

$$\frac{R_{min}x_{q,eq}}{R_{min}+1} + \frac{x_D}{R_{min}+1} - y_{q,eq} = 0 \quad (4.193)$$

όπου $x_{q,eq}$ είναι η ρίζα της εξίσωσης

$$f(x_{q,eq}) + \frac{q}{1-q}x_{q,eq} - \frac{x_F}{1-q} = 0 \quad (4.194)$$

και

$$y_{q,eq} = \frac{q}{q-1}x_{q,eq} + \frac{x_F}{1-q} \quad (4.195)$$

Η σχέση $y_{eq} = f(x_{eq})$ εκφράζει την καμπύλη ισορροπίας οποιουδήποτε δυαδικού συστήματος.

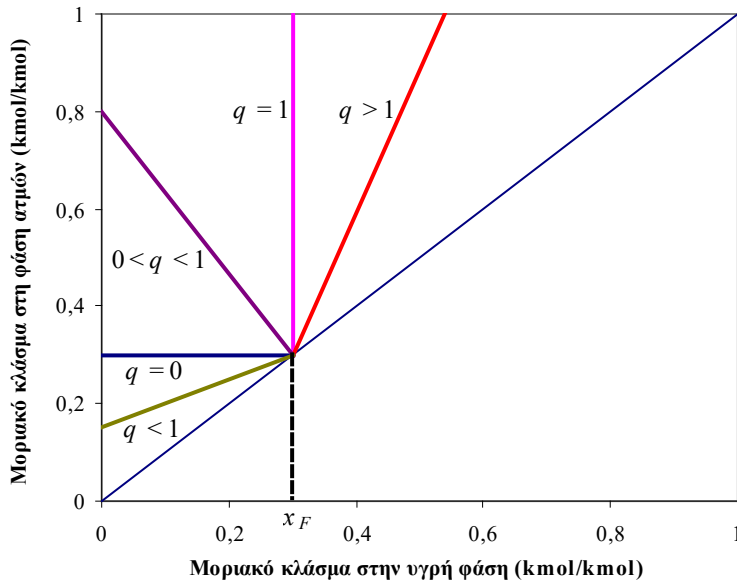
Στην περίπτωση ιδανικών μιγμάτων η ισορροπία ατμών - υγρού περιγράφεται από τη σχέση:

$$y_{eq} = \frac{ax_{eq}}{1+(a-1)x_{eq}} \quad (4.196)$$

και ο ελάχιστος λόγος αναρροής, R_{min} , δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{R_{min}\bar{u} + (R_{min} + q)x_D}{(R_{min} + q)(R_{min} + 1)} - \frac{a\bar{u}}{R_{min} + q + (a-1)\bar{u}} = 0 \quad (4.197)$$

όπου $\bar{u} = (R_{min} + 1)x_F - (1 - q)x_D$



Σχήμα 4.17 Σχετική θέση καμπύλης τροφοδοσίας σε διάγραμμα σύστασης υγρού – ατμών.

Το μεγάλο κέρδος από την παραπάνω ανάλυση είναι ότι κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός του σημείου τομής των γραμμών λειτουργίας μέσω της γραμμής τροφοδοσίας, αντί της γραμμής λειτουργίας του τμήματος εξάντλησης και η εφαρμογή της μεθόδου Lewis μπορεί, πλέον, να γίνει χωρίς υπολογισμό των μοριακών ροών. Η γραμμή λειτουργίας του τμήματος εξάντλησης υπολογίζεται με τη βοήθεια της αναλυτικής γεωμετρίας, μέσω μιας εξίσωσης ευθείας που διέρχεται από δύο δοσμένα σημεία, το σημείο τομής της γραμμής λειτουργίας εμπλουτισμού με τη γραμμή τροφοδοσίας και το σημείο τομής των ευθειών $y = x$ και $x = x_B$. Το σύστημα των εξισώσεων που δομούν το λογικό διάγραμμα του Σχήματος 4.18 δεν αποτελεί ένα αμιγώς μαθηματικό πρότυπο της διεργασίας, αλλά ένα μίγμα ισοζυγίων μάζας, σχέσεων ισορροπίας και γεωμετρικών εξισώσεων και μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μιμικό μοντέλο του γραφικού υπολογισμού των βαθμίδων ισορροπίας με τη μέθοδο McCabe - Thiele.

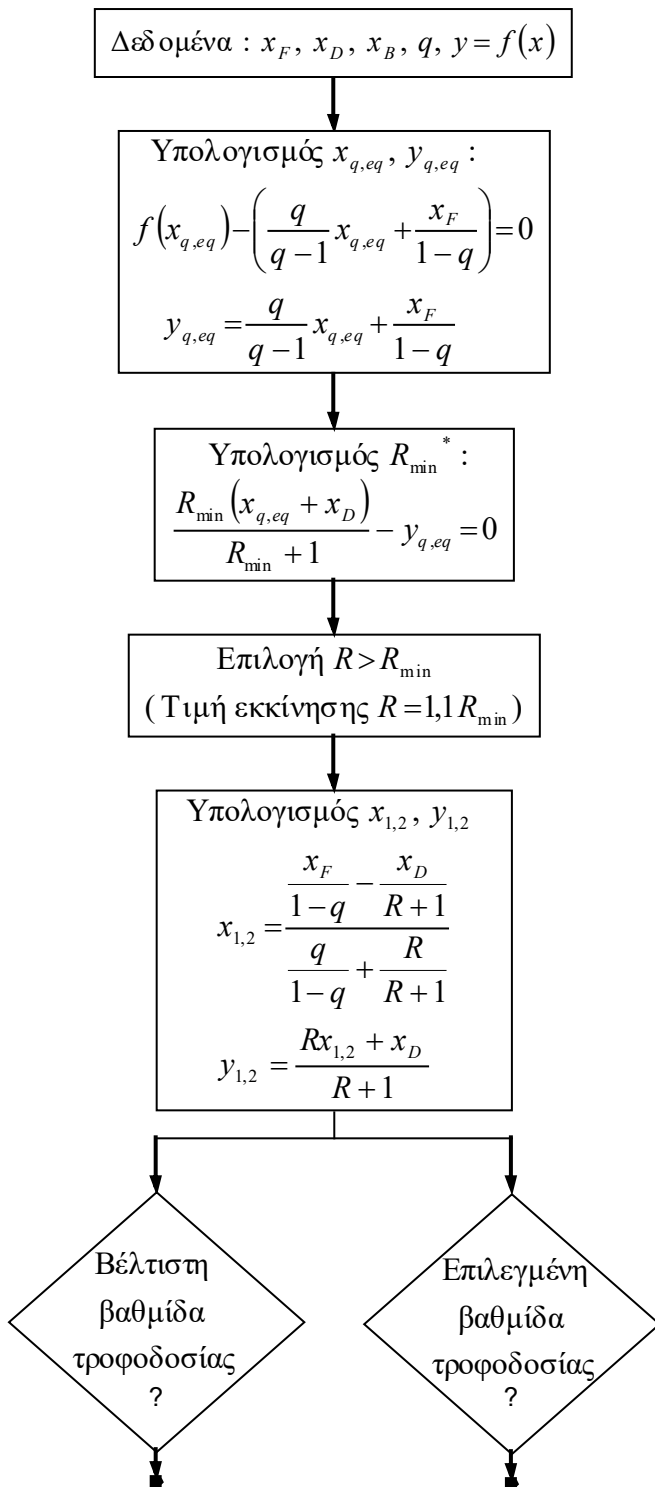
Στον Πίνακα 4.14 δίνονται τα χαρακτηριστικά σημεία, ο υπολογισμός των οποίων απαιτείται για την εφαρμογή της μεθόδου που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.18.

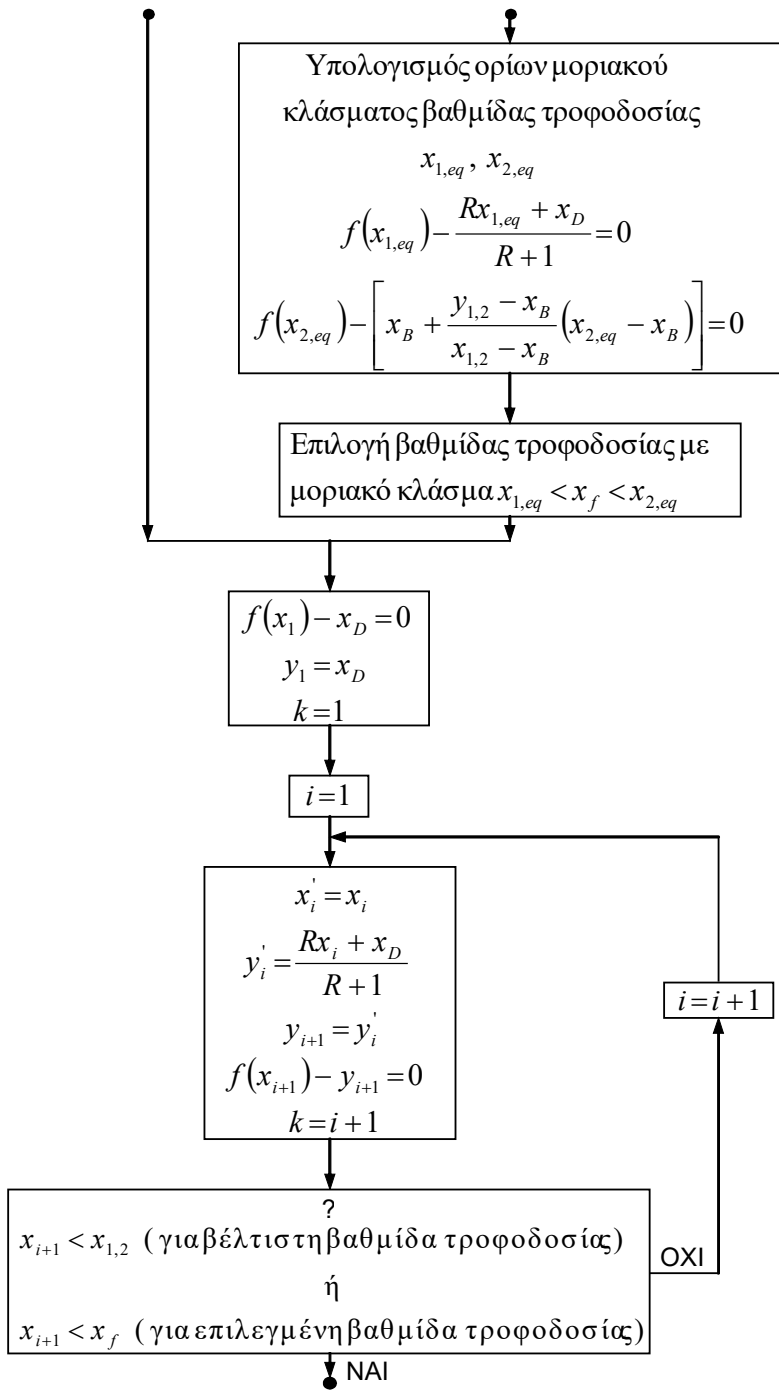
$x_{1,2}$	μοριακό κλάσμα συστατικού 1 υγρής φάσης στην τομή γραμμής λειτουργίας τμήματος εμπλουτισμού - γραμμής λειτουργίας τμήματος εξάντλησης
$y_{1,2}$	μοριακό κλάσμα συστατικού 1 φάσης ατμών στην τομή γραμμής λειτουργίας τμήματος εμπλουτισμού - γραμμής λειτουργίας τμήματος εξάντλησης
$x_{1,eq}$	μοριακό κλάσμα συστατικού 1 υγρής φάσης στην τομή γραμμής λειτουργίας τμήματος εμπλουτισμού - γραμμής ισορροπίας
$x_{2,eq}$	μοριακό κλάσμα συστατικού 1 υγρής φάσης στην τομή γραμμής λειτουργίας τμήματος εξάντλησης - γραμμής ισορροπίας
$x_{q,eq}$	μοριακό κλάσμα συστατικού 1 υγρής φάσης στην τομή γραμμής τροφοδοσίας - γραμμής ισορροπίας
$y_{q,eq}$	μοριακό κλάσμα συστατικού 1 φάσης ατμών στην τομή γραμμής τροφοδοσίας - γραμμής ισορροπίας

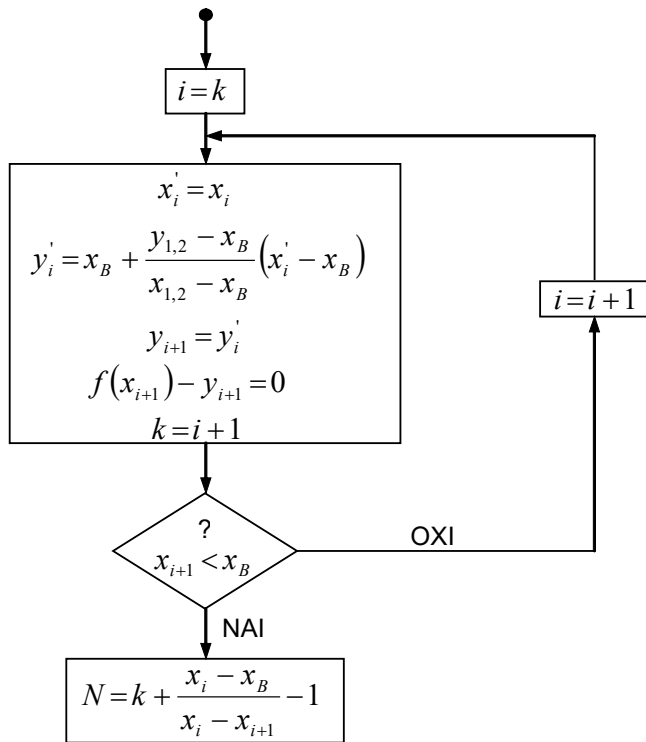
Πίνακας 4.14 Ονοματολογία χαρακτηριστικών σημείων του λογικού διαγράμματος του Σχήματος 4.18.

Τα μεγέθη $x_{1,eq}$ και $x_{2,eq}$ απαιτούνται μόνο στην περίπτωση επιλογής βαθμίδας τροφοδοσίας διαφορετική της άριστης. Αυτό είναι συχνό στην περίπτωση που εξετάζεται, για το διαχωρισμό δοσμένου μίγματος, η χρησιμοποίηση υπάρχουσας στήλης στην οποία οι αγωγοί εισόδου και κατανομής της τροφοδοσίας είναι ήδη κατασκευασμένοι ή όταν η στήλη χρησιμοποιείται για φάσμα κλασμάτων τροφοδοσίας. Πρέπει να τονιστεί ότι ο υπολογισμός της ελάχιστου λόγου αναρροής με τον τρόπο που περιγράφεται στο Σχήμα 4.18

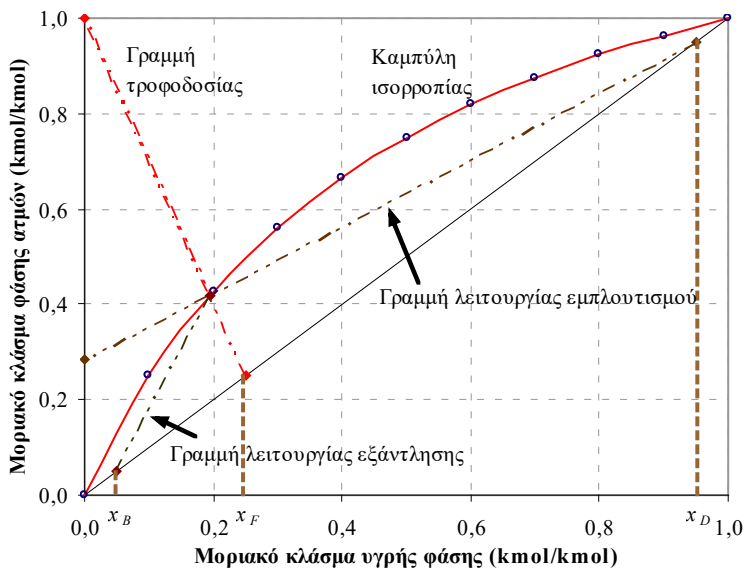
εφαρμόζεται μόνο στην περίπτωση συστημάτων με ομαλή καμπύλη ισορροπίας που δεν παρουσιάζει σημεία καμψής. Σε αυτά, που περιλαμβάνουν και την περίπτωση των (σχεδόν) ιδανικών μιγμάτων, η ευθεία λειτουργίας του τμήματος εμπλουτισμού διέρχεται από το σημείο τομής της ευθείας τροφοδοσίας και της καμπύλης ισορροπίας, στην περίπτωση λειτουργίας σε συνθήκες ελάχιστης αναρροής. Ο αριθμός των θεωρητικών βαθμίδων καθίσταται άπειρος και η στήλη δε μπορεί να δώσει τον απαιτούμενο διαχωρισμό, εν τούτοις ο προσδιορισμός των ροών και απαιτήσεων σε βοηθητικές παροχές στις συνθήκες αυτές είναι σημαντικός καθώς λαμβάνουν τις ελάχιστες τιμές τους. Στο Σχήμα 4.19 παριστάνεται η θέση των γραμμών λειτουργίας και τροφοδοσίας συστήματος με ομαλή καμπύλη ισορροπίας, σε συνθήκες ελάχιστης αναρροής. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις που η καμπύλη ισορροπίας εμφανίζει σημείο καμψής, όπως για το σύστημα αιθανόλη - νερό, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.20. Ο ελάχιστος λόγος αναρροής καθορίζεται από το σημείο επαφής της ευθείας λειτουργίας του τμήματος εμπλουτισμού με την καμπύλη ισορροπίας, δεδομένου ότι δεν πρέπει να υπάρχει τομή μεταξύ τους. Η παρακολούθηση της επίλυσης σε διάγραμμα, όπως του Σχήματος 4.20, βοηθά στην επιλογή του κατάλληλου λόγου αναρροής. Αν υπάρχει τομή των γραμμών λειτουργίας και ισορροπίας, ο υπολογισμός θα καταλήξει σε σειρά βαθμίδων των οποίων, τα μοριακά κλάσματα των συστατικών των δύο φάσεων θα αντιστοιχούν στο σημείο τομής (θεωρητικά άπειρες βαθμίδες, πρακτικά τόσες όσες επιτρέπει κάποιο κριτήριο ελέγχου του αριθμού των επαναλήψεων στον αλγόριθμο που θα χρησιμοποιηθεί). Η ύπαρξη τομής μπορεί να διαπιστωθεί με επίλυση του συστήματος των εξισώσεων ισορροπίας και γραμμής λειτουργίας για κάθε Δx ίσο, έστω, με 0,01 για το διάστημα από 0 έως 1 (διάστημα μεταβολής του μοριακού κλάσματος x). Αν δεν υπάρχει τομή δε θα υπάρχει λύση στο εξεταζόμενο διάστημα (σημειώνουμε ότι η ύπαρξη λύσης οδηγεί σε διαφορά των δύο εξισώσεων της τάξης του 10^{-7} ή λιγότερο).



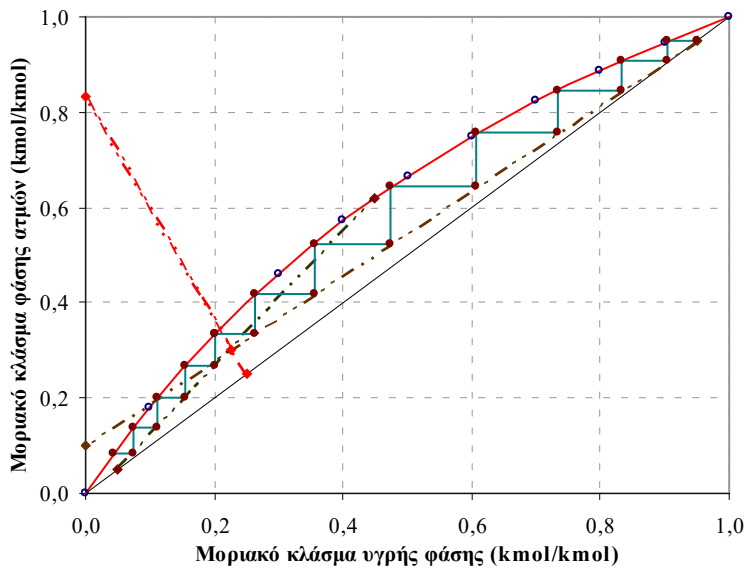




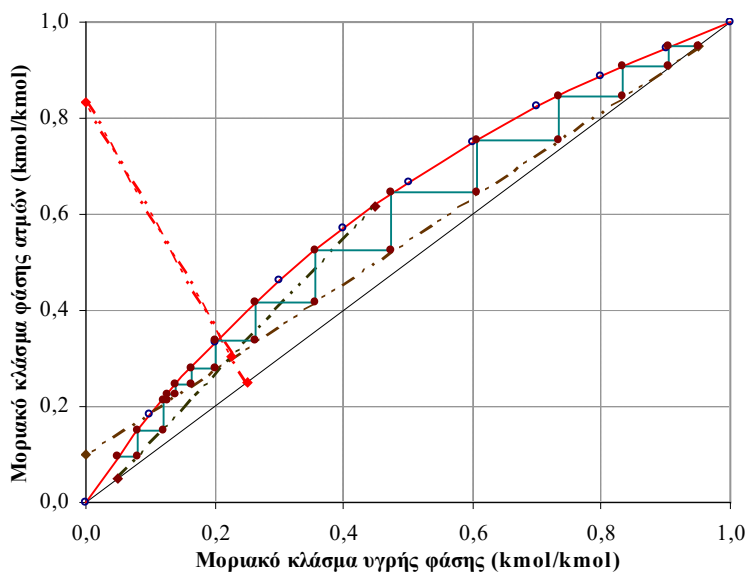
Σχήμα 4.18 Λογικό διάγραμμα υπολογισμού βαθμίδων αποστακτικής στήλης με τη μέθοδο Lewis (*ισχύει μόνο για ομαλές καμπύλες ισορροπίας ατμών - υγρού).



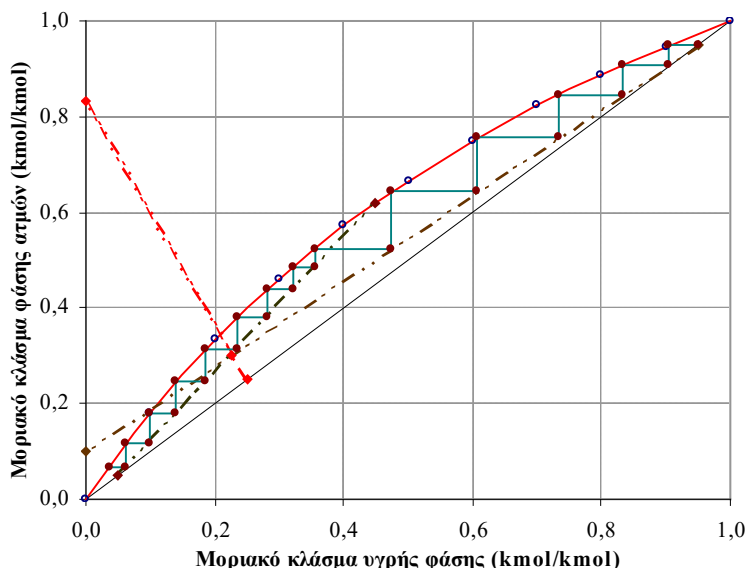
Σχήμα 4.19 Προσδιορισμός ελάχιστου λόγου αναρροής στην περίπτωση συστήματος με ομαλή καμπύλη ισορροπίας.



Σχήμα 4.21 Υπολογισμός θεωρητικών βαθμίδων με βάση την άριστη βαθμίδα τροφοδοσίας (τροφοδοτείται η 8η από 11,79).



Σχήμα 4.22 Υπολογισμός θεωρητικών βαθμίδων με βάση την τροφοδοσία στην κατώτερη δυνατή βαθμίδα (τροφοδοτείται η 12^η από 13,99).



Σχήμα 4.23 Υπολογισμός θεωρητικών βαθμίδων με βάση την τροφοδοσία στην ανώτερη δυνατή βαθμίδα (τροφοδοτείται η 6^η από 13,47).

Παρατηρείται ότι ο αριθμός των βαθμίδων, N , δεν υπεισέρχεται σε καμία εξίσωση του μαθηματικού προτύπου της μεθόδου Lewis, αλλά προσδιορίζεται από τον αριθμό των επαναλήψεων που απαιτούνται για τη μείωση της τιμής του μοριακού κλάσματος x_i από τη τιμή του αποστάγματος σε εκείνη του υπολείμματος. Ο υπολογισμός των βαθμίδων μπορεί βέβαια να γίνει και με επίλυση του προτύπου από τον αναβραστήρα προς το συμπυκνωτήρα. Υπενθυμίζουμε ότι στη μέθοδο FUG ο αριθμός των θεωρητικών βαθμίδων δίνεται από την Εξίσωση 4.6.

Θεωρώντας ότι η υγρή φάση σε κάθε βαθμίδα, θεωρητική ή πραγματική, βρίσκεται στη θερμοκρασία έναρξης βρασμού της, για τη δεδομένη σύσταση και πίεση της συγκεκριμένης βαθμίδας, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της κατανομής θερμοκρασίας καθ' ύψος της στήλης, εφαρμόζοντας το σύστημα των Εξισώσεων 4.198 - 4.202 σε κάθε βαθμίδα (ο δείκτης n εκφράζει τον αριθμό της βαθμίδας και $i = 1, 2$). Οι εξισώσεις αυτές είναι αντίστοιχες των 4.75 - 4.80, 4.87 - 4.92 και 4.99 - 4.101 και επιλύονται με δοκιμή και σφάλμα, για κάθε βαθμίδα χωριστά, θεωρώντας μεταβλητή δοκιμής τη ΘΕΒ της και εξασφαλίζοντας τη σύγκλιση της Εξίσωσης 4.202.

$$P_i^{on} = \frac{1}{760} \exp \left(A_i - \frac{B_i}{C_i + (T_{bp}^n + 273,15)} \right) \quad (4.198-4.199)$$

$$K_i^n = \frac{P_i^{on}}{P} \quad (4.200-4.201)$$

$$x_i K_1^n + (1 - x_i) K_2^n = 1 \quad (4.202)$$

Ένα κρίσιμο σημείο για την εφαρμογή της μεθόδου Lewis είναι η διαθεσιμότητα δεδομένων ισορροπίας ατμών - υγρού από τα οποία να είναι δυνατός ο υπολογισμός της αντίστοιχης μαθηματικής έκφρασης, που χρησιμοποιείται στον αλγόριθμο επίλυσης. Η επιτυχία προσαρμογής κάποιας εξίσωσης στα δεδομένα καθορίζει την ακρίβεια με την οποία θα υπολογιστεί ο αριθμός των βαθμίδων και η κατανομή των μοριακών κλασμάτων, ιδιαίτερα στην περίπτωση λειτουργίας με χαμηλούς λόγους αναρροής, οπότε οι γραμμές

λειτουργίας βρίσκονται πλησίον της καμπύλης ισορροπίας. Η χρήση πειραματικών δεδομένων για την προσομοίωση, για όποια συστήματα υπάρχουν διαθέσιμα, αποτελεί την καλύτερη πηγή. Στους Πίνακες 4.15 και 4.16 δίνονται οι σταθερές των εξισώσεων 4.203 και 4.204, αντίστοιχα, για ορισμένα ευρέως χρησιμοποιούμενα δυαδικά συστήματα, σε ατμοσφαιρική πίεση.

$$y_{eq} = \frac{a + bx_{eq} + cx_{eq}^n}{d + ex_{eq}^m} \quad (4.203)$$

$$x_{eq} = \frac{a' + b'y_{eq} + c'y_{eq}^{n'}}{d' + e'y_{eq}^{m'}} \quad (4.204)$$

Δυαδικό σύστημα	a	b	c	d	e	n	m
Αιθανόλη - νερό	-2,116	0,206	2,059	0,114	0,037	-0,053	-1,05
Νερό - οξικό οξύ	-9,6E-05	0,439	0,770	1,118	0,091	0,615	1,36
Ακετόνη - νερό	-1,381	0,040	1,406	0,063	4,1E-03	-0,014	-0,952
Νερό - γλυκερίνη	1,543	-0,014	-7,4E-03	3,014	-0,527	-0,862	-0,017
Ακετόνη - χλωροφόρμιο	1,5E-05	1,696	0,621	0,520	1,798	5,824	0,412
κ-Εξάνιο - αιθανόλη	-0,027	71,02	31,00	5,543	96,80	52,53	0,995
Νερό - φορμικό οξύ	2,4E-04	0,609	3,590	1,032	3,171	3,000	3,087

Πίνακας 4.15 Σταθερές της Εξίσωσης 4.203 για ορισμένα δυαδικά συστήματα.

Δυαδικό σύστημα	a'	b'	c'	d'	e'	n'	m'
Αιθανόλη - νερό	-2,3E-04	0,012	6,250	0,068	6,186	9,74	8,83
Νερό - οξικό οξύ	1,397	1,294	0,115	1,001	1,802	6,02	-1,37
Ακετόνη - νερό	14,21	-32,09	-1,7E-03	-17,90	-5,4E-03	-38,66	-42,35
Νερό - γλυκερίνη	138,2	-183,1	-84,63	-30,14	-98,77	736,3	-46,56
Ακετόνη - χλωροφόρμιο	-1,2E-03	0,562	3,385	0,887	3,063	2,829	2,712
κ-Εξάνιο - αιθανόλη	7,030	1,720	3,2E-06	8,677	6,0E-06	-30,90	-33,10
Νερό - φορμικό οξύ	2,794	6,700	2,459	11,22	0,740	8,070	-1,193

Πίνακας 4.16 Σταθερές της Εξίσωσης 4.204 για ορισμένα δυαδικά συστήματα.

4.6 Παράδειγμα Εφαρμογής Κλασματικής Απόσταξης Με Τη Μεθοδο Lewis

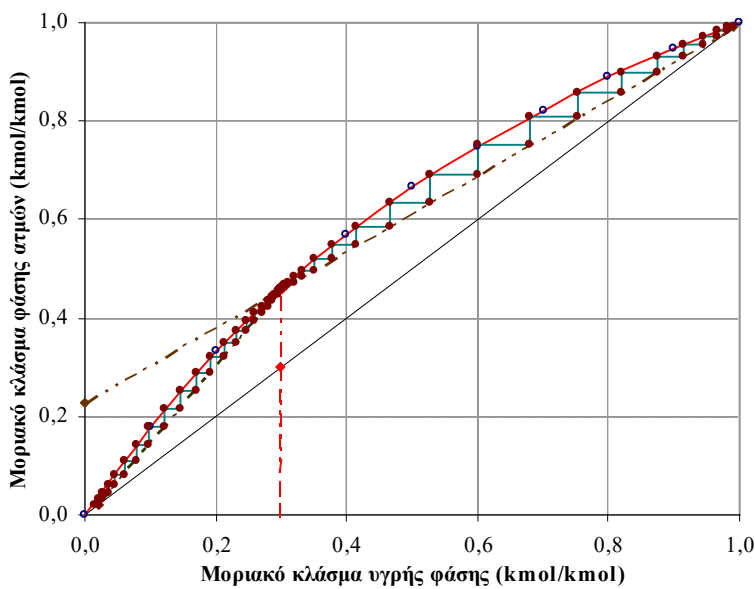
Για το παράδειγμα της Παραγράφου 4.4 να προσδιοριστεί η κατανομή μοριακών κλασμάτων των συστατικών και θερμοκρασίας στο εσωτερικό της αποστακτικής στήλης (Seader κ.ά., 2011).

Για τον υπολογισμό της μεταβολής των μοριακών κλασμάτων συναρτήσει της θέσης των βαθμίδων θα εφαρμόσουμε τους υπολογισμούς που περιγράφονται στο λογικό διάγραμμα του Σχήματος 4.18. Θα εξετάσουμε την περίπτωση τροφοδοσίας στην άριστη βαθμίδα. Στο Σχήμα 4.24 παριστάνονται, σε διάγραμμα ισορροπίας ατμών - υγρού, οι θεωρητικές βαθμίδες για το σύστημα 2,2,4-TMP - n-C₈, για λόγο $R/R_{min} = 1,021$. Πρόκειται για ένα διάγραμμα McCabe - Thiele, που αποτελεί τη γραφική παράσταση των υπολογισμών του αλγόριθμου αυτού. Παρατηρείται ότι η τομή των γραμμών λειτουργίας ($x = 0,301$, $y = 0,459$) και η καμπύλη ισορροπίας ($x = 0,301$, $y = 0,461$) βρίσκονται πολύ κοντά. Η λειτουργία στις συνθήκες αυτές απαιτεί απόλυτη ακρίβεια ισχύος των σχέσεων και παραδοχών που χρησιμοποιήθηκαν, και η ανάλυση έχει ήδη δοθεί στην παράγραφο 4.4. Στο Σχήμα 4.25 δίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα για τις πραγματικές βαθμίδες. Ο μεγάλος αριθμός τους (70) καθιστά δυσανάγνωστο το διάγραμμα στο μέγεθος που εικονίζεται. Το Σχήμα 4.26 δίνει το διάγραμμα πραγματικών βαθμίδων του συστήματος για λόγο $R/R_{min} = 1,14$. Ο αριθμός των βαθμίδων είναι 49. Στα Σχήματα 4.25 και 4.26 ο σχεδιασμός των βαθμίδων γίνεται μεταξύ των γραμμών λειτουργίας και μίας καμπύλης, που ονομάζεται καμπύλη ψευδοϊσορροπίας, και εκφράζει την πραγματική μεταβολή του μοριακού κλάσματος του πτητικού συστατικού στους ατμούς που διέρχονται από την n-

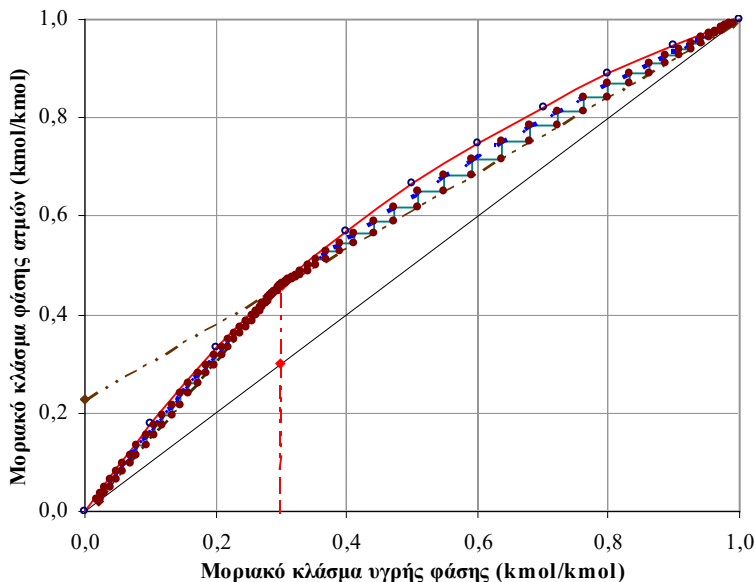
βαθμίδα ως προς εκείνη που θα υπήρχε αν η βαθμίδα λειτουργούσε ιδανικά. Ο λόγος αυτός αποτελεί το βαθμό απόδοσης Murphree, που ορίζεται για κάθε δίσκο ξεχωριστά, και εκφράζεται από τη σχέση:

$$E_{MV} = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}} \quad (4.205)$$

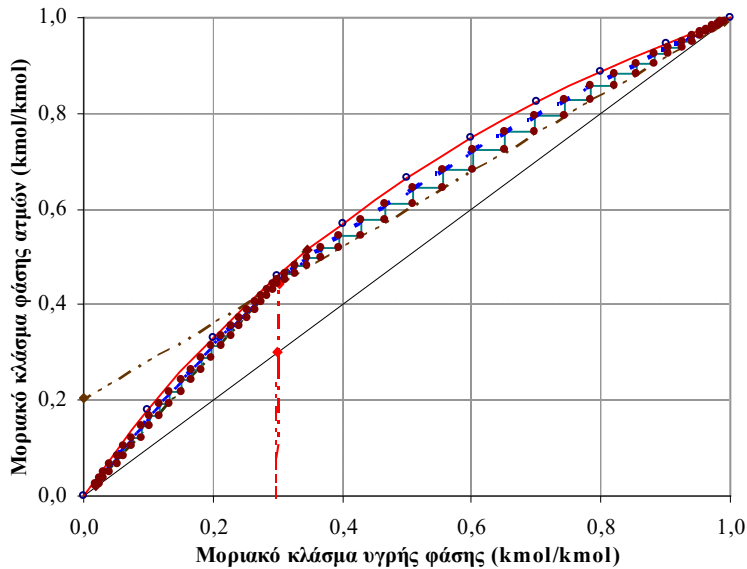
όπου y_n , y_{n+1} και y_n^* είναι, αντίστοιχα, το πραγματικό μοριακό κλάσμα του πτητικού συστατικού στη φάση ατμών, στις βαθμίδες n και $n+1$ και το κλάσμα ισορροπίας στην n -βαθμίδα, για τη σύσταση υγρού που υπάρχει σε αυτή. Στα διαγράμματα αυτά ο βαθμός απόδοσης έχει ληφθεί ενιαίος για όλες τις βαθμίδες και ίσος με το συνολικό βαθμό απόδοσης της στήλης που υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.7. Αναφέρεται στη φάση των ατμών, όπου εμφανίζεται η κύρια αντίσταση στη μεταφορά μάζας, αλλά μπορεί να οριστεί και για την υγρή φάση, όπου λαμβάνει, γενικά, διαφορετική τιμή ως προς τη φάση ατμών.



Σχήμα 4.24 Παράσταση θεωρητικών βαθμίδων του συστήματος 2,2,4-TMP - n -C₈, για λόγο $R/R_{min} = 1,021$.



Σχήμα 4.25 Παράσταση πραγματικών βαθμίδων του συστήματος 2,2,4-TMP - n-C₈, για λόγο R/R_{min} = 1,021.



Σχήμα 4.26 Παράσταση πραγματικών βαθμίδων του συστήματος 2,2,4-TMP - n-C₈, για λόγο R/R_{min} = 1,15.

Η εφαρμογή της μεθόδου Lewis επιτρέπει τον αναλυτικό υπολογισμό της κατανομής των μοριακών κλασμάτων, ακόμη και στις περιπτώσεις μιγμάτων με κοντινά σημεία ζέσης και χαμηλή σχετική πτητικότητα, όπως στο εξεταζόμενο σύστημα. Η κατανομή μοριακών κλασμάτων του 2,2,4-TMP στις δύο φάσεις, στις βαθμίδες (θεωρώντας αυτές ως ιδανικές - απόδοσης 100%), και στο χώρο μεταξύ των βαθμίδων, για τις τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού του Πίνακα 4.11, δίνεται στον Πίνακα 4.17. Με ένα αντίστοιχο αλγόριθμο, που λαμβάνει υπόψη την Εξίσωση 4.205, υπολογίζεται η κατανομή μοριακών κλασμάτων του πτητικού συστατικού στις πραγματικές βαθμίδες και στο χώρο μεταξύ τους, για τις ίδιες τιμές μεταβλητών σχεδιασμού, και δίνεται στον Πίνακα 4.18. Οι δύο αυτοί πίνακες καθιστούν δυνατή την ανάγνωση των μοριακών κλασμάτων στις βαθμίδες, η οποία είναι αδύνατη από τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.24 - 4.26. Παρατηρείται ότι $x_i = x_{i+1}$ και $y_i = y_i$.

n	x_i	y_i	x_i'	y_i'	n	x_i	y_i	x_i'	y_i'
1	0,980	0,990	0,990	0,990	22	0,295	0,454	0,298	0,454
2	0,966	0,982	0,980	0,982	23	0,291	0,449	0,295	0,449
3	0,945	0,971	0,966	0,971	24	0,286	0,443	0,291	0,443
4	0,915	0,955	0,945	0,955	25	0,279	0,435	0,286	0,435
5	0,874	0,932	0,915	0,932	26	0,271	0,424	0,279	0,424
6	0,820	0,900	0,874	0,900	27	0,260	0,411	0,271	0,411
7	0,754	0,859	0,820	0,859	28	0,247	0,395	0,260	0,395
8	0,679	0,808	0,754	0,808	29	0,232	0,375	0,247	0,375
9	0,602	0,750	0,679	0,750	30	0,213	0,350	0,232	0,350
10	0,529	0,690	0,602	0,690	31	0,193	0,322	0,213	0,322
11	0,466	0,634	0,529	0,634	32	0,170	0,289	0,193	0,289
12	0,416	0,586	0,466	0,586	33	0,146	0,254	0,170	0,254
13	0,378	0,547	0,416	0,547	34	0,122	0,216	0,146	0,216
14	0,352	0,518	0,378	0,518	35	0,099	0,179	0,122	0,179
15	0,333	0,498	0,352	0,498	36	0,078	0,143	0,099	0,143
16	0,320	0,483	0,333	0,483	37	0,060	0,110	0,078	0,110
17	0,312	0,474	0,320	0,474	38	0,046	0,083	0,060	0,083
18	0,306	0,467	0,312	0,467	39	0,035	0,061	0,046	0,061
19	0,303	0,463	0,306	0,463	40	0,027	0,044	0,035	0,044

20	0,300	0,460	0,303	0,460	41	0,021	0,031	0,027	0,031
21	0,298	0,457	0,300	0,457	42	0,017	0,022	0,021	0,022
x_i	μοριακό κλάσμα υγρού 2,2,4-TMP στην n-βαθμίδα								
y_i	μοριακό κλάσμα ατμών 2,2,4-TMP στην n-βαθμίδα								
x_i'	μοριακό κλάσμα υγρού 2,2,4-TMP που κατέρχεται προς την n-βαθμίδα								
y_i'	μοριακό κλάσμα ατμών 2,2,4-TMP που ανέρχονται από την n-βαθμίδα								

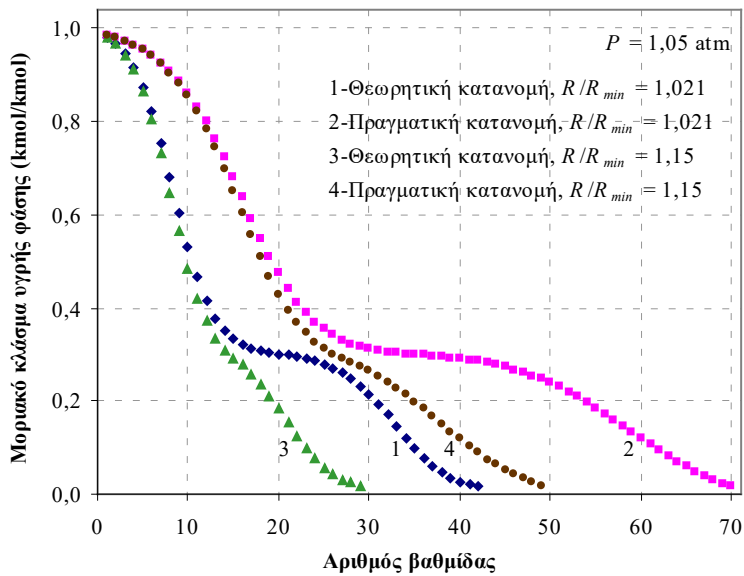
Πίνακας 4.17 Κατανομή μοριακών κλασμάτων υγρού και ατμών του 2,2,4-TMP στις θεωρητικές βαθμίδες και στο χώρο μεταξύ τους.

Στο Σχήμα 4.27 παριστάνεται η θεωρητική και πραγματική κατανομή, καθ' ύψος της στήλης, του πτητικού συστατικού στην υγρή φάση για λόγους $R/R_{min} = 1,021$ και 1,15. Παρατηρείται ότι για κοινό λόγο R/R_{min} η μορφή των καμπυλών είναι όμοια, ενώ εμφανίζεται ένα πλατό στην περιοχή της βαθμίδας ισορροπίας, ιδιαίτερα για χαμηλή αναρροή, λόγω της πολύ μικρής μεταβολής των συγκεντρώσεων στις βαθμίδες της περιοχής αυτής. Στο Σχήμα 4.28 δίνεται η κατανομή μοριακού κλάσματος του πτητικού συστατικού στις πραγματικές βαθμίδες, καθ' ύψος της στήλης, για τις δύο φάσεις, για λόγο $R/R_{min} = 1,021$. Η φάση των ατμών είναι, για κάθε βαθμίδα, περισσότερο εμπλουτισμένη στο συστατικό αυτό, ενώ η διαφορά συγκεντρώσεων των δύο φάσεων λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της περί το μέσο της στήλης, για συστάσεις στις οποίες εμφανίζεται, στο διάγραμμα x-y, η μέγιστη απόκλιση της καμπύλης ισορροπίας από τη διαγώνιο. Στο Σχήμα 4.29 παρουσιάζεται η κατανομή θερμοκρασίας στις πραγματικές βαθμίδες για λόγους $R/R_{min} = 1,021$ και 1,15. Η μέγιστη θερμοκρασία αντιστοιχεί στον αναβραστήρα (τελευταία βαθμίδα) και η ελάχιστη στο συμπυκνωτήρα, ενώ το θερμοκρασιακό εύρος είναι το ίδιο, ανεξάρτητα της αναρροής, δεδομένου ότι καθορίζεται από τη σύσταση των προϊόντων και την πίεση λειτουργίας. Η θερμοκρασία αναφέρεται στο υγρό κάθε βαθμίδας και υπολογίστηκε με εφαρμογή των Εξισώσεων 4.198 - 4.202, για κάθε βαθμίδα. Και στην περίπτωση αυτή η μείωση της αναρροής δημιουργεί ένα πλατό στην περιοχή τροφοδοσίας.

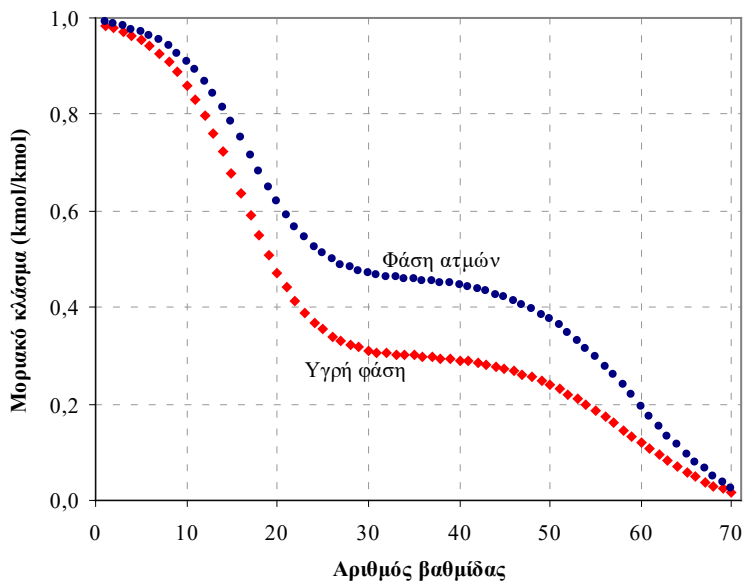
n	x_i	y_i	x_i'	y_i'	n	x_i	y_i	x_i'	y_i'
1	0,985	0,990	0,990	0,990	36	0,298	0,456	0,300	0,456
2	0,980	0,987	0,985	0,987	37	0,297	0,454	0,298	0,454
3	0,973	0,982	0,980	0,982	38	0,295	0,452	0,297	0,452
4	0,965	0,977	0,973	0,977	39	0,293	0,449	0,295	0,449
5	0,954	0,970	0,965	0,970	40	0,291	0,446	0,293	0,446
6	0,942	0,962	0,954	0,962	41	0,288	0,442	0,291	0,442
7	0,926	0,953	0,942	0,953	42	0,285	0,438	0,288	0,438
8	0,908	0,941	0,926	0,941	43	0,281	0,433	0,285	0,433
9	0,887	0,927	0,908	0,927	44	0,277	0,427	0,281	0,427
10	0,861	0,910	0,887	0,910	45	0,272	0,421	0,277	0,421
11	0,832	0,891	0,861	0,891	46	0,267	0,414	0,272	0,414
12	0,799	0,868	0,832	0,868	47	0,261	0,406	0,267	0,406
13	0,762	0,843	0,799	0,843	48	0,255	0,396	0,261	0,396
14	0,722	0,814	0,762	0,814	49	0,247	0,386	0,255	0,386
15	0,680	0,783	0,722	0,783	50	0,239	0,374	0,247	0,374
16	0,636	0,751	0,680	0,751	51	0,230	0,362	0,239	0,362
17	0,592	0,717	0,636	0,717	52	0,220	0,348	0,230	0,348
18	0,549	0,683	0,592	0,683	53	0,209	0,332	0,220	0,332
19	0,510	0,650	0,549	0,650	54	0,198	0,316	0,209	0,316
20	0,473	0,619	0,510	0,619	55	0,186	0,298	0,198	0,298
21	0,441	0,591	0,473	0,591	56	0,173	0,279	0,186	0,279
22	0,413	0,566	0,441	0,566	57	0,160	0,259	0,173	0,259
23	0,389	0,545	0,413	0,545	58	0,146	0,238	0,160	0,238
24	0,370	0,527	0,389	0,527	59	0,133	0,217	0,146	0,217
25	0,354	0,512	0,370	0,512	60	0,119	0,196	0,133	0,196
26	0,341	0,499	0,354	0,499	61	0,106	0,175	0,119	0,175
27	0,331	0,489	0,341	0,489	62	0,093	0,154	0,106	0,154
28	0,323	0,482	0,331	0,482	63	0,081	0,134	0,093	0,134
29	0,316	0,475	0,323	0,475	64	0,069	0,115	0,081	0,115

30	0,311	0,470	0,316	0,470	65	0,058	0,097	0,069	0,097
31	0,308	0,467	0,311	0,467	66	0,048	0,080	0,058	0,080
32	0,305	0,464	0,308	0,464	67	0,039	0,064	0,048	0,064
33	0,303	0,462	0,305	0,462	68	0,031	0,050	0,039	0,050
34	0,301	0,460	0,303	0,460	69	0,024	0,037	0,031	0,037
35	0,300	0,458	0,301	0,458	70	0,017	0,025	0,024	0,025

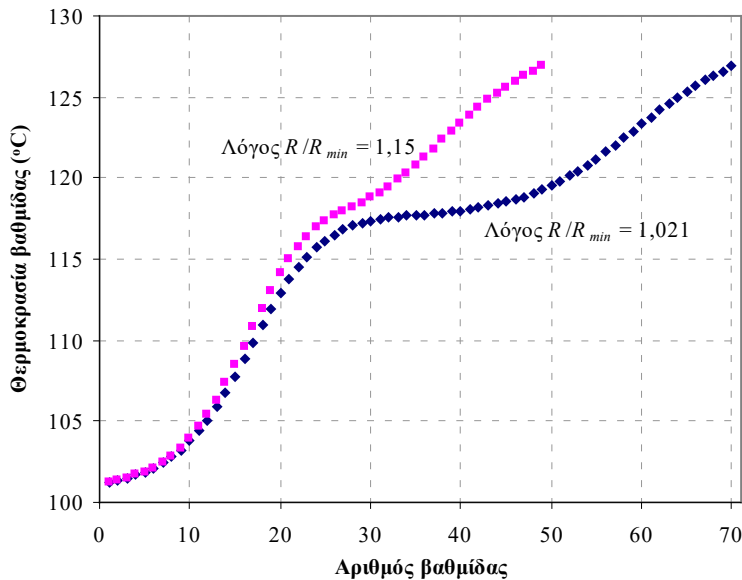
Πίνακας 4.18 Κατανομή μοριακών κλασμάτων υγρού και ατμών του 2,2,4-TMP στις πραγματικές βαθμίδες και στο χώρο μεταξύ τους.



Σχήμα 4.27 Θεωρητική και πραγματική κατανομή μοριακού κλάσματος του 2,2,4-TMP στην υγρή φάση για λόγο $R/R_{min} = 1,021$ και $1,15$.



Σχήμα 4.28 Πραγματική κατανομή μοριακού κλάσματος του 2,2,4-TMP στις δύο φάσεις για λόγο $R/R_{min}=1,021$.



Σχήμα 4.29 Κατανομή θερμοκρασίας στην αποστακτική στήλη για λόγο $R/R_{min} = 1,021$ και $1,15$.

Συγκρίνοντας τις μεθόδους FUG και Lewis, αναφορικά με το εξεταζόμενο παράδειγμα, διαπιστώνουμε ότι ο αριθμός θεωρητικών και πραγματικών βαθμίδων που δίνει η πρώτη, για $R/R_{min} = 1,021$, είναι 40,62 και 71, αντίστοιχα, ενώ η δεύτερη δίνει 41,25 και 70. Η προσέγγιση είναι πολύ καλή και αυτό είναι αναμενόμενο, αφού θεωρήσαμε ότι το μίγμα συμπεριφέρεται ιδανικά. Αντίθετα, η άριστη βαθμίδα τροφοδοσίας φαίνεται να διαφέρει σημαντικά στις δύο μεθόδους, αφού η πρώτη δίνει ως λύση την 46^η βαθμίδα ($= N_D$) και η δεύτερη δίνει την 35^η (εκεί που το μοριακό κλάσμα x_i δύο διαδοχικών βαθμίδων περιλαμβάνει την τιμή x_F).

Η μορφή των δεδομένων ισορροπίας, που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση κάποιου συστήματος, επηρεάζουν τόσο τον αριθμό των βαθμίδων, όσο και την κατανομή των μοριακών κλασμάτων. Για τη διερεύνηση αυτού θα θεωρήσουμε το σύστημα αιθανόλη - νερό, που χαρακτηρίζεται από ανώμαλη καμπύλη και σχηματισμό αζεοτρόπου, και θα υπολογίσουμε τα μεγέθη αυτά για τέσσερις χαρακτηριστικές περιπτώσεις:

1. με χρήση πειραματικών δεδομένων που προσομοιάζονται μέσω της σχέσης 4.203 και των σταθερών του Πίνακα 4.15
2. με χρήση της εξίσωσης ισορροπίας των ιδανικών μιγμάτων με σχετική πτητικότητα που δίνεται από τη σχέση 4.108''
3. με χρήση της εξίσωσης ισορροπίας των ιδανικών μιγμάτων με σχετική πτητικότητα που δίνεται από τη σχέση 4.108'
4. με χρήση της εξίσωσης ισορροπίας των ιδανικών μιγμάτων με σχετική πτητικότητα που δίνεται από τη σχέση 4.108 (ελάχιστη τιμή)

Στον Πίνακα 4.19 δίνονται τα μοριακά κλάσματα τροφοδοσία, αποστάγματος και υπολείμματος για την αιθανόλη, τα αντίστοιχα κλάσματα, που υπολογίζονται για τη φάση ατμών από την Εξίσωση 4.203, και η σχετική πτητικότητα κάθε ρεύματος, που δίνεται από τη σχέση:

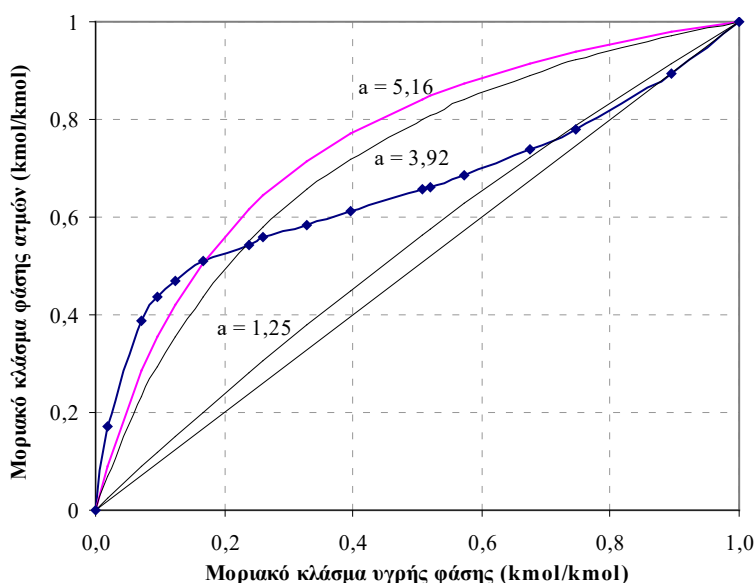
$$a = \frac{y_1(l - x_1)}{x_1(l - y_1)}$$

Θεωρείται ότι $q = 1$ και ο λόγος R/R_{min} είναι ίσος προς 1,15 σε όλες τις περιπτώσεις. Για κάθε έκφραση ισορροπίας αναγράφεται ο ελάχιστος λόγος αναρροής, ο λόγος που χρησιμοποιείται, και ο απαιτούμενος αριθμός θεωρητικών βαθμίδων.

	x		y	a
x_F	0,05	y_F^*	0,28	8,94
x_D	0,75	y_D^*	0,76	1,25
x_B	0,01	y_B^*	0,11	12,24
		R_{min}	R	N
Πειραματικά δεδομένα		1,60	1,84	15
a (Εξ. 2.108'')	5,16	3,28	3,77	11
a (Εξ. 2.108')	3,92	4,77	5,49	11
a (Εξ. 2.108)	1,25	58,90	67,74	74

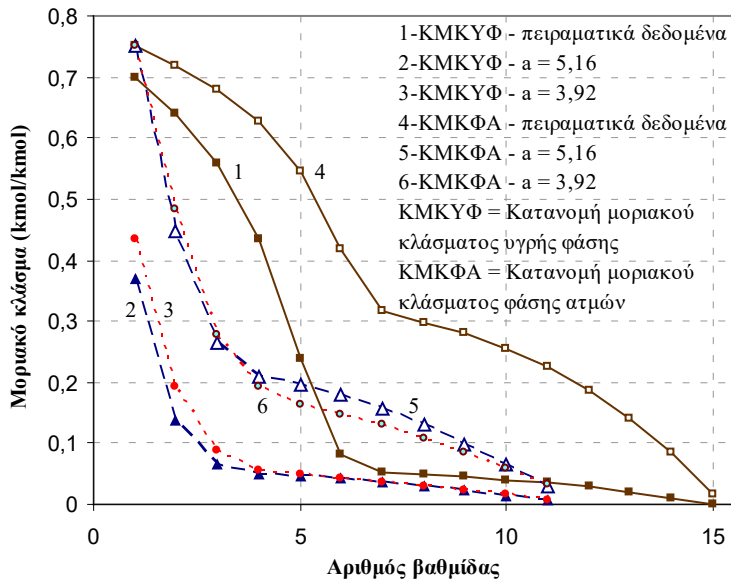
Πίνακας 4.19 Δεδομένα - αποτελέσματα σύγκρισης εκφράσεων ισορροπίας για το σύστημα αιθανόλη – νερό.

Στο Σχήμα 4.30 απεικονίζονται οι καμπύλες ισορροπίας για τις τέσσερις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Παρατηρείται ότι η προσομοίωση που επιτυγχάνει η Εξίσωση 4.203 είναι πολύ καλή και η γραφική της παράσταση διέρχεται «πάνω» από τα πειραματικά δεδομένα ισορροπίας (Perry κ.ά., 1997) που παριστάνονται με κουκίδες.



Σχήμα 4.30 Καμπύλες ισορροπίας για διάφορες τιμές σχετικής πτητικότητας και πειραματική για το σύστημα αιθανόλη – νερό.

Στο Σχήμα 4.31 δίνονται οι κατανομές των μοριακών κλασμάτων της αιθανόλης, στις δύο φάσεις, για τις τρεις πρώτες από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Παρατηρείται ότι η κατανομή που στηρίζεται στα πειραματικά δεδομένα είναι αρκετά «περίεργη», ως απόρροια της ανώμαλης καμπύλης ισορροπίας του συστήματος, ενώ η συγκέντρωση της αιθανόλης στις ανώτερες βαθμίδες είναι σημαντική, καθώς αυτές λειτουργούν κοντά στη σύσταση του αζεότροπου. Οι κατανομές που προκύπτουν από τις Εξισώσεις 4.108' και 4.108'' αντιστοιχούν σε αριθμό βαθμίδων μικρότερο του απαιτούμενου, ενώ εκείνη που προκύπτει για σχετική πτητικότητα ίση προς την ελάχιστη τιμή της οδηγεί σε πολύ υψηλό αριθμό βαθμίδων, γεγονός αναμενόμενο, για σύστημα που λειτουργεί κοντά στη θέση του αζεότροπου μίγματος και συγχρόνως εμφανίζει μεγάλη μεταβολή της σχετικής πτητικότητας ως προς τη σύσταση και αρκετά κοντινά σημεία ζέσης των συστατικών του.



Σχήμα 4.31 Κατανομή μοριακών κλασμάτων αιθανόλης στις δύο φάσεις για διάφορες καμπύλες ισορροπίας.

4.7 Μέθοδος Sorel

Αναπτύχθηκαν σε προηγούμενες παραγράφους η μέθοδος Fenske-Underwood-Gilliland, η οποία επιτρέπει τον γρήγορο αναλυτικό υπολογισμό μίας αποστακτικής στήλης, δεχόμενη μία σταθερή τιμή για τη σχετική πτητικότητα, και η μέθοδος Lewis, η οποία χειρίζεται αποτελεσματικά, μίγματα που παρουσιάζουν μεγάλη μεταβολή της σχετικής πτητικότητάς τους συναρτήσει της γραμμομοριακής περιεκτικότητας, και παρέχει, ουσιαστικά, τη δυνατότητα υπολογισμού των θεωρητικών βαθμίδων με βάση τα δεδομένα ισορροπίας κάθε συγκεκριμένου συστήματος, ενώ παράλληλα, επιτρέπει τον προσδιορισμό κατανομής των συγκεντρώσεων και θερμοκρασιών καθ' ύψος της στήλης. Εν τούτοις, η πρώτη από τις αναφερθείσες μεθόδους, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα υπολογισμού του αριθμού των βαθμίδων στην περίπτωση μεγάλης μεταβολής της σχετικής πτητικότητας (που μπορεί να ξεπεράσει το 100%), ενώ η δεύτερη περιορίζεται από το γεγονός ότι για την εφαρμογή της απαιτείται η ύπαρξη σταθερών γραμμομοριακών ροών στη στήλη. Έλεγχος ως προς την πλήρωση της προϋπόθεσης αυτής μπορεί να γίνει μέσω των λανθανουσών ενθαλιών εξάτμισης των δύο συστατικών, οι οποίες θα πρέπει να είναι, κατά το δυνατό, ίσες. Αν οι παραπάνω προϋποθέσεις δεν πληρούνται, δύο δυνατότητες υπάρχουν για την ανάλυση της διεργασίας: η τροποποιημένη μέθοδος McCabe - Thiele και η μέθοδος Sorel, η οποία σημειωτέως, αναπτύχθηκε πριν τις προαναφερθείσες (το 1893), και θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Μεταγενέστερα (1921-1922) αναπτύχθηκε η γραφική ανάλυση της μεθόδου Sorel, γνωστή ως μέθοδος Ponchon - Savarit ή μέθοδος ενθαλπίας-σύστασης. Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται η γνώση τόσο δεδομένων ισορροπία ατμών - υγρού, όσο και δεδομένων ενθαλπίας των δύο φάσεων συναρτήσει της συγκέντρωσής τους. Η μέθοδος Sorel υπολογίζει τις πραγματικές βαθμίδες αποστακτικής στήλης δυαδικού μίγματος με απόλυτη ακρίβεια και οι μόνοι περιορισμοί στην εφαρμογή της προκύπτουν από την ακρίβεια γνώσης πειραματικών δεδομένων ισορροπίας ατμών - υγρού και, κυρίως, ενθαλπίας - σύστασης, καθώς και πειραματικών τιμών βαθμού απόδοσης των πραγματικών δίσκων συναρτήσει των ιδιοτήτων του μίγματος και των συνθηκών λειτουργίας. Το μαθηματικό πρότυπο υπολογισμού του αριθμού των θεωρητικών βαθμίδων, και των μοριακών κλασμάτων και ρυθμών ροής των δύο φάσεων σε κάθε βαθμίδα, στην περίπτωση στήλης με ολικό συμπυκνωτήρα και μερικό αναβραστήρα, μία τροφοδοσία, ένα προϊόν κορυφής και ένα προϊόν πυθμένα, συνοψίζεται στον Πίνακα 4.20. Οι Εξισώσεις 4.206 και 4.207 αποτελούν εκφράσεις των ισοζυγίων μάζας (ολικό και πτητικού συστατικού) σε ολόκληρη τη στήλη, οι Εξισώσεις 4.208 έως 4.210 δίνουν την ενθαλπία της τροφοδοσίας και των προϊόντων σε κατάσταση κορεσμένου υγρού, η Εξίσωση 4.211 παρέχει την ενθαλπία της τροφοδοσίας, ως κορεσμένο ατμό, η Εξίσωση 4.212 εκφράζει τον ορισμό της θερμικής κατάστασης και την υπολογίζει, για το μίγμα τροφοδοσίας, με βάση την περιεχόμενη ενθαλπία του, και η Εξίσωση 4.213 αποτελεί το ολικό ισοζύγιο ενθαλπίας στη στήλη. Οι Εξισώσεις 4.214 ως 4.218 αναφέρονται στον ολικό συμπυκνωτήρα και εκφράζουν την ενθαλπία ατμών του αποστάγματος (Εξίσωση 4.214), την ισότητα των τιμών μοριακού κλάσματος στο απόσταγμα, το ρεύμα

αναρροής και τους ατμούς από την ανώτερη βαθμίδα προς συμπύκνωση (Εξίσωση 4.215 και 4.216), τη θερμότητα που παράγεται από το συμπυκνωτήρα (Εξίσωση 4.217) και το ολικό ισοζύγιο μάζας στο συμπυκνωτήρα (Εξίσωση 4.218). Οι Εξισώσεις 4.219 ως 4.224 αποτελούν ένα σύστημα που επιλύεται για κάθε βαθμίδα στο τμήμα εμπλουτισμού. Οι Εξισώσεις 4.219 ως 4.221 παριστάνουν το ολικό ισοζύγιο μάζας και το αντίστοιχο του πτητικού συστατικού, καθώς και το ισοζύγιο ενθαλπίας, αντίστοιχα, για όγκο ελέγχου που περιλαμβάνει το συμπυκνωτήρα και το άνω τμήμα της στήλης, μέχρι και την εξεταζόμενη βαθμίδα. Οι Εξισώσεις 4.222 και 4.223 υπολογίζουν την ενθαλπία του υγρού και των ατμών (σε κορεσμένη κατάσταση) που εξέρχονται από τη βαθμίδα αυτή και η Εξίσωση 4.224 αποτελεί τη σχέση ισορροπίας ατμών - υγρού. Το σύστημα εξισώσεων για τις βαθμίδες του τμήματος εμπλουτισμού επιλύεται τόσες φορές, όσες απαιτείται για να γίνει το μοριακό κλάσμα στην εξεταζόμενη βαθμίδα μικρότερο του αντίστοιχου στο ρεύμα τροφοδοσίας, με την παραδοχή τροφοδοσίας στην άριστη βαθμίδα. Οι Εξισώσεις 4.225 ως 4.229 αναφέρονται στον αναβραστήρα. Αναλυτικότερα, η Εξίσωση 4.225 αποτελεί το ολικό ισοζύγιο μάζας του αναβραστήρα και η Εξίσωση 4.226 δίνει το ποσό θερμότητας που παρέχεται στη στήλη μέσω αυτού. Η Εξίσωση 4.227 εκφράζει το ισοζύγιο ενθαλπίας του αναβραστήρα. Οι Εξισώσεις 4.228 και 4.229 υπολογίζουν την ειδική ενθαλπία των παραγόμενων ατμών και το μοριακό κλάσμα του πτητικού συστατικού στη φάση τους. Οι Εξισώσεις 4.230 ως 4.232 υπολογίζουν την ειδική ενθαλπία των δύο φάσεων (υγρής και ατμών) και το μοριακό κλάσμα του πτητικού συστατικού στους ατμούς στην κατώτερη βαθμίδα της στήλης (πάνω από το μερικό αναβραστήρα), αντίστοιχα. Η επίλυση των τριών αυτών εξισώσεων είναι απαραίτητη για την τροφοδότηση δεδομένων στις εξισώσεις περιγραφής του τμήματος εξάντλησης. Οι Εξισώσεις 4.233 ως 4.238 αποτελούν ένα σύστημα που επιλύεται για κάθε βαθμίδα του τμήματος εξάντλησης, τόσες φορές όσες απαιτείται για να γίνει το μοριακό κλάσμα της εξεταζόμενης βαθμίδας μεγαλύτερο του αντίστοιχου του ρεύματος τροφοδοσίας. Οι τρεις πρώτες εξισώσεις εκφράζουν το ολικό ισοζύγιο μάζας και το αντίστοιχο του πτητικού συστατικού, καθώς και ισοζύγιο ενθαλπίας, αντίστοιχα, για όγκο ελέγχου που περιλαμβάνει τον αναβραστήρα και το τμήμα της στήλης από την εξεταζόμενη βαθμίδα και κάτω. Οι Εξισώσεις 4.236 έως 4.238 υπολογίζουν την ειδική ενθαλπία του υγρού και των ατμών και την ισορροπία των δύο φάσεων στην αμέσως ανώτερη βαθμίδα και είναι αντίστοιχες των Εξισώσεων 4.230 - 4.232. Παρατηρείται ότι ο αριθμός των βαθμίδων δεν αποτελεί μεταβλητή, ούτε υπολογίζεται άμεσα. Στην μέθοδο αυτή (όπως και στη Lewis), ο αριθμός τους καθορίζεται από τον αντίστοιχο αριθμό επαναληπτικών επιλύσεων των συστημάτων που περιγράφουν τις βαθμίδες στα δύο τμήματα της στήλης. Πρέπει να δοθεί προσοχή ώστε να μην υπολογιστεί δύο φορές η βαθμίδα τροφοδοσίας (μετάβαση από το τμήμα εμπλουτισμού σε εκείνο της εξάντλησης).

Ανάλογα μαθηματικά πρότυπα προκύπτουν και στην περίπτωση περισσότερο πολύπλοκων στηλών (π.χ. με δεύτερη τροφοδοσία ή πλάγιο προϊόν), λαμβάνοντας κάθε φορά τον κατάλληλο όγκο ελέγχου για τη διατύπωση των ισοζυγίων.

Το μαθηματικό πρότυπο του Πίνακα 4.20 μπορεί να συνδυαστεί με εκείνο του Πίνακα 4.4, για το συνολικό σχεδιασμό της αποστακτικής στήλης, με τις ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Οι Εξισώσεις 4.2 - 4.6, που περιγράφουν τη μέθοδο FUG, και τα ισοζύγια μάζας (Εξισώσεις 4.9 - 4.14) αντικαθίστανται από το παρακάτω πρότυπο, αφού δε δεχόμαστε, πλέον, σταθερή γραμμομοριακή ροή σε κάθε τμήμα της στήλης, αλλά οι ρυθμοί ροής και τα μοριακά κλάσματα των συστατικών υπολογίζονται από το πρότυπο για κάθε βαθμίδα χωριστά.
- Τα θερμικά φορτία του συμπυκνωτήρα και αναβραστήρα υπολογίζονται για συγκεκριμένους ρυθμούς ροής των φάσεων που διέρχονται από τα στοιχεία αυτά και όχι για ρυθμούς που αναφέρονται σε ολόκληρο το τμήμα της στήλης από το οποίο τροφοδοτούνται.
- Οι υπόλοιπες εξισώσεις εξακολουθούν να ισχύουν (υπολογισμός σχετικής πτητικότητας και διαμέτρου, θερμική ανάλυση, κλπ.).

Γίνεται φανερό ότι ο υπολογιστικός φόρτος της μεθόδου Sorel είναι πολύ μεγαλύτερος από εκείνος της FUG, αλλά και της Lewis, λόγο, κυρίως, του υπολογισμού των μοριακών ρυθμών ροής των δύο φάσεων σε κάθε βαθμίδα χωριστά. Αυτό είναι το τίμημα που πληρώνουμε, προκειμένου να υπολογιστεί ο αριθμός των βαθμίδων και οι κατανομές μοριακών κλασμάτων και θερμοκρασίας στο εσωτερικό της στήλης με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια, ιδιαίτερα στην περίπτωση συστημάτων για τα οποία είναι διαθέσιμα δεδομένα ενθαλπίας - σύστασης. Η επίλυση του προτύπου του Πίνακα 4.20 με H/Y το καθιστά ανταγωνιστικό των υπολοίπων μεθόδων και, ουσιαστικά, δεν απαιτεί χρόνο περισσότερο από λίγα δευτερόλεπτα.

Στον Πίνακα 4.21 αναφέρονται οι μεταβλητές του προτύπου του Πίνακα 4.20, οι οποίες δεν έχουν περιληφθεί στον Πίνακα 4.4.

Στον Πίνακα 4.22 δίνεται ένας αλγόριθμος επίλυσης του προτύπου του Πίνακα 4.20. Ως μεταβλητή σχεδιασμού λαμβάνεται το θερμικό φορτίο του αναβραστήρα, Q_R , σε αντικατάσταση του λόγου αναρροής, R , που ελήφθη στον αλγόριθμο του Πίνακα 4.8. Τα μεγέθη αυτά συνδέονται μέσω του ολικού ισοζυγίου ενέργειας της στήλης και επομένως η επιλογή τους ως μεταβλητές σχεδιασμού ή επίλυσης είναι απολύτως εναλλάξιμη. Από τις υπόλοιπες 5 μεταβλητές σχεδιασμού του Πίνακα 4.8, οι μεταβλητές H_I , (f_I) και n εξακολουθούν να ισχύουν, αν απαιτείται ο σχεδιασμός ολόκληρης της στήλης (ύψος, διάμετρος, κλπ). Η θερμική κατάσταση της τροφοδοσίας, q , έχει θεωρηθεί ως διδόμενη μεταβλητή, ενώ η πίεση λειτουργίας, P , έχει ληφθεί υπόψη στον προσδιορισμό της εξίσωσης ισορροπίας ατμών - υγρού (το πρότυπο του Πίνακα 4.20 επικεντρώνεται στον υπολογισμό των μοριακών κλασμάτων και ρυθμών ροής σε κάθε βαθμίδα, καθώς και του φορτίου του συμπυκνωτήρα). Η επιλογή αυτή, συμβαδίζει με το γεγονός ότι η μέθοδος στηρίζεται στην αξιοποίηση δεδομένων ενθαλπίας - σύστασης, και τα εναλλασσόμενα θερμικά φορτία μπορούν εύκολα να συνδεθούν με μεταβολές κατάστασης των ρευμάτων, ενώ η γραφική της παράσταση απεικονίζεται σε διάγραμμα που έχει τα μεγέθη αυτά ως συντεταγμένες. Έχει όμως και μία ουσιαστικότερη σημασία, να καταδείξει το ρόλο του αναβραστήρα στη δημιουργία και την ποσοτική μεταβολή της αναρροής. Με δεδομένους τους ρυθμούς ροής τροφοδοσίας και αποστάγματος, σε μόνιμη κατάσταση, η μεταβολή της αναρροής συνεπάγεται αντίστοιχη μεταβολή των ατμών της ανώτερης βαθμίδας. Αυτή προκύπτει, τελικά, από τη μεταβολή των παραγόμενων, στον αναβραστήρα, ατμών (μέσω της ποσότητας θερμαντικού μέσου, συνήθως ατμού, που καταναλώνεται). Επομένως, ο αναβραστήρας αποτελεί το βασικότερο στοιχείο εξοπλισμού για τη ρύθμιση των ροών στο εσωτερικό της στήλης (σε πιο περίπλοκες στήλες οι εσωτερικές ροές μπορούν να ρυθμιστούν και με μεταβολή της θερμικής κατάστασης της τροφοδοσίας, π.χ. μέσω εναλλάκτη θερμότητας, καθώς και με ανακύκλωση ρευμάτων μέσω εξωτερικών παρακάμψεων - χρήση πλευρικού αναβραστήρα ή/και ψυκτήρα).

Ισοζύγια μάζας - ενέργειας σε ολόκληρη τη στήλη	
$D = \frac{x_F - x_B}{x_D - x_B} F$	(4.206)
$F = D + B$	(4.207)
$h_F = h(x_F)$	(4.208)
$h_D = h(x_D)$	(4.209)
$h_B = h(x_B)$	(4.210)
$H_F = H(x_F)$	(4.211)
$q = \frac{H_F - \bar{h}_F}{H_F - h_F}$	(4.212)
$F\bar{h}_F + Q_R = Dh_D + Bh_B + Q_C$	(4.213)
Ισοζύγια μάζας - ενέργειας στο συμπυκνωτήρα	
$H_D = H(x_D)$	(4.214)
$x_0 = x_D$	(4.215)
$y_1 = x_D$	(4.216)
$Q_C = V_1(H_D - h_D)$	(4.217)
$V_1 = L_0 + D$	(4.218)
Ισοζύγια μάζας - ενέργειας στο τμήμα εμπλουτισμού ($1 \leq j \leq f-1$)	
$V_{j+1} = L_j + D$	(4.219)
$V_{j+1}y_{j+1} = L_jx_j + Dx_D$	(4.220)
$V_{j+1}H_{j+1} = L_jh_j + Dh_D + Q_C$	(4.221)
$h_j = h(x_j)$	(4.222)

$H_{j+1} = H(y_{j+1})$	(4.223)
$y_j = y(x_j)$	(4.224)
Ισοζύγια μάζας - ενέργειας στο μερικό αναβραστήρα (βαθμίδα N+1)	
$L'_N = V'_{N+1} + B$	(4.225)
$Q_R = V'_{N+1}(H_{N+1} - h_B)$	(4.226)
$L'_N h_N + Q_R = V'_{N+1} H_{N+1} + B h_B$	(4.227)
$H_{N+1} = H(y_{N+1})$	(4.228)
$y_{N+1} = y(x_B)$	(4.229)
$h_N = h(x_N)$	(4.230)
$H_N = H(y_N)$	(4.231)
$y_N = y(x_N)$	(4.232)
Ισοζύγια μάζας - ενέργειας στο τμήμα εξάντλησης ($f \leq k \leq N$)	
$L'_{k-1} = V'_k + B$	(4.233)
$L'_{k-1} x_{k-1} = V'_k y_k + B x_B$	(4.234)
$L'_{k-1} h_{k-1} + Q_R = V'_k H_k + B h_B$	(4.235)
$h_{k-1} = h(x_{k-1})$	(4.236)
$H_{k-1} = H(y_{k-1})$	(4.237)
$y_{k-1} = y(x_{k-1})$	(4.238)

Πίνακας 4.20 Εξισώσεις κλασματικής απόσταξης με τη μέθοδο Sorel.

h_B	Ενθαλπία υπολείμματος σε κατάσταση κορεσμένου υγρού, (kJ/kmol)
H_D	Ενθαλπία αποστάγματος σε κατάσταση κορεσμένων ατμών, (kJ/kmol)
h_D	Ενθαλπία αποστάγματος σε κατάσταση κορεσμένου υγρού, (kJ/kmol)
H_F	Ενθαλπία τροφοδοσίας σε κατάσταση κορεσμένων ατμών, (kJ/kmol)
h_F	Ενθαλπία τροφοδοσίας σε κατάσταση κορεσμένου υγρού, (kJ/kmol)
\bar{h}_F	Ενθαλπία τροφοδοσίας, (kJ/kmol)
H_k	Ενθαλπία κορεσμένων ατμών από την k-βαθμίδα*, (kJ/kmol)
H_{k-1}	Ενθαλπία κορεσμένων ατμών από την k-1-βαθμίδα, (kJ/kmol)
h_{k-1}	Ενθαλπία κορεσμένου υγρού από την k-1-βαθμίδα, (kJ/kmol)
H_N	Ενθαλπία κορεσμένων ατμών από την N-βαθμίδα, (kJ/kmol)
h_N	Ενθαλπία κορεσμένου υγρού από την N-βαθμίδα, (kJ/kmol)
h_j	Ενθαλπία κορεσμένου υγρού από τη j-βαθμίδα, (kJ/kmol)
H_{j+1}	Ενθαλπία κορεσμένων ατμών από τη j+1-βαθμίδα, (kJ/kmol)
H_{N+1}	Ενθαλπία κορεσμένων ατμών από τον αναβραστήρα, (kJ/kmol)
L_0	Μοριακός ρυθμός ροής υγρής αναρροής, (kmol/s)
L_j	Μοριακός ρυθμός ροής υγρού από τη j-βαθμίδα, (kmol/s)
L'_k	Μοριακός ρυθμός ροής υγρού από την k-βαθμίδα, (kmol/s)
L'_N	Μοριακός ρυθμός ροής υγρού από την N-βαθμίδα**, (kmol/s)
V_1	Μοριακός ρυθμός ροής ατμών από την πρώτη βαθμίδα, (kmol/s)
V_{j+1}	Μοριακός ρυθμός ροής ατμών από τη j+1-βαθμίδα, (kmol/s)

V'_{k-1}	Μοριακός ρυθμός ροής ατμών από την k-1-βαθμίδα, (kmol/s)
V'_{N+1}	Μοριακός ρυθμός ροής ατμών από τον αναβραστήρα, (kmol/s)
x_0	Μοριακό κλάσμα υγρής αναρροής ^{***} , (kmol/kmol)
x_j	Μοριακό κλάσμα κορεσμένου υγρού από τη j-βαθμίδα, (kmol/kmol)
x_{k-1}	Μοριακό κλάσμα κορεσμένου υγρού από την k-1-βαθμίδα, (kmol/kmol)
x_N	Μοριακό κλάσμα κορεσμένου υγρού από την N-βαθμίδα, (kmol/kmol)
y_1	Μοριακό κλάσμα κορεσμένων ατμών από την πρώτη βαθμίδα, (kmol/kmol)
y_j	Μοριακό κλάσμα κορεσμένων ατμών από τη j-βαθμίδα, (kmol/kmol)
y_{j+1}	Μοριακό κλάσμα κορεσμένων ατμών από τη j+1-βαθμίδα, (kmol/kmol)
y_k	Μοριακό κλάσμα κορεσμένων ατμών από την k-βαθμίδα, (kmol/kmol)
y_{k-1}	Μοριακό κλάσμα κορεσμένων ατμών από την k-1-βαθμίδα, (kmol/kmol)
y_N	Μοριακό κλάσμα κορεσμένων ατμών από την N-βαθμίδα, (kmol/kmol)
y_{N+1}	Μοριακό κλάσμα κορεσμένων ατμών από τον αναβραστήρα, (kmol/kmol)

*Ο δείκτης εκφράζει τη βαθμίδα από την οποία εξέρχεται το ρεύμα

**από τον κατώτερο δίσκο της στήλης προς τον αναβραστήρα

***ισοδύναμα, μοριακό κλάσμα υγρού που εισέρχεται στην πρώτη (ανώτερη) βαθμίδα

Πίνακας 4.21 Μεταβλητές κλασματικής απόσταξης με τη μέθοδο Sorel.

Μεταβλητές δεδομένα	(5)	F, x_F, x_D, x_B, q
Μεταβλητές σχεδιασμού	(1)	Q_R
Μεταβλητές δοκιμής	(N)	L_i
Μεταβλητές επίλυσης	(13+6N)	Πρόκειται για τις μεταβλητές που υπολογίζονται από τον αλγόριθμο που ακολουθεί (N ο αριθμός βαθμίδων)
Αλγόριθμος	(4.206)	$\rightarrow D$
	(4.207)	$\rightarrow B$
	(4.208)	$\rightarrow h_F$
	(4.209)	$\rightarrow h_D$
	(4.210)	$\rightarrow h_B$
	(4.211)	$\rightarrow H_F$
	(4.212)	$\rightarrow \bar{h}_F$
	(4.213)	$\rightarrow Q_C$
	(4.214)	$\rightarrow H_D$
	(4.215)	$\rightarrow x_0$
	(4.216)	$\rightarrow y_1$
	(4.217)	$\rightarrow V_1$
	(4.218)	$\rightarrow L_0$
	Για κάθε j-βαθμίδα στο τμήμα εμπλουτισμού	
	(4.224)	$\rightarrow x_j$
	(4.222)	$\rightarrow h_j$
	Δοκιμαστική τιμή L_j	
	(4.219)	$\rightarrow V_{j+1}$

	(4.220)	$\rightarrow y_{j+1}$
	(4.223)	$\rightarrow H_{j+1}$
	(4.221)	$\rightarrow L_j$
<p>Ελέγχεται η τιμή της μεταβλητής δοκιμής L_j, που προκύπτει από την Εξίσωση 4.221, με την αρχική τιμή της, και οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση. Οι Εξισώσεις 4.219 - 4.224 επιλύονται για κάθε βαθμίδα μέχρι το μοριακό κλάσμα της υγρής φάσης να γίνει ίσο ή μικρότερο του μοριακού κλάσματος τροφοδοσίας, οπότε ολοκληρώνονται οι υπολογισμοί στο τμήμα εμπλουτισμού. Το εν λόγω κριτήριο ισχύει στην περίπτωση τροφοδοσίας ως κορεσμένου υγρού. Στις άλλες περιπτώσεις υπολογίζεται το μοριακό κλάσμα της υγρής φάσης, όπως φαίνεται στο λογικό διάγραμμα του Σχήματος 4.35.</p>		
	(4.229)	$\rightarrow y_{N+1}$
	(4.228)	$\rightarrow H_{N+1}$
	(4.226)	$\rightarrow V'_{N+1}$
	(4.225)	$\rightarrow L'_N$
	(4.227)	$\rightarrow h_N$
	(4.230)	$\rightarrow x_N$
	(4.232)	$\rightarrow y_N$
	(4.231)	$\rightarrow H_N$
Για κάθε k-βαθμίδα στο τμήμα εξάντλησης		
Δοκιμαστική τιμή L'_{k-1}		
	(4.233)	$\rightarrow V'_k$
	(4.234)	$\rightarrow x_{k-1}$
	(4.236)	$\rightarrow h_{k-1}$
	(4.235)	$\rightarrow L'_{k-1}$
<p>Ελέγχεται η τιμή της μεταβλητής δοκιμής L'_{k-1}, που προκύπτει από την Εξίσωση 4.235, με την αρχική τιμή της, και οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση.</p>		
	(4.238)	$\rightarrow y_{k-1}$
	(4.237)	$\rightarrow H_{k-1}$
<p>Οι Εξισώσεις 5.233 ως και 5.238 επιλύονται για κάθε βαθμίδα μέχρι η συγκέντρωση της υγρής φάσης να γίνει ίση ή μεγαλύτερη της συγκέντρωσης τροφοδοσίας, οπότε ολοκληρώνονται οι υπολογισμοί στο τμήμα εξάντλησης. Ισχύει και εδώ η παρατήρηση που αναφέρεται στο τμήμα εμπλουτισμού σχετικά με την τροφοδοσία σε κατάσταση μη κορεσμένου υγρού.</p>		

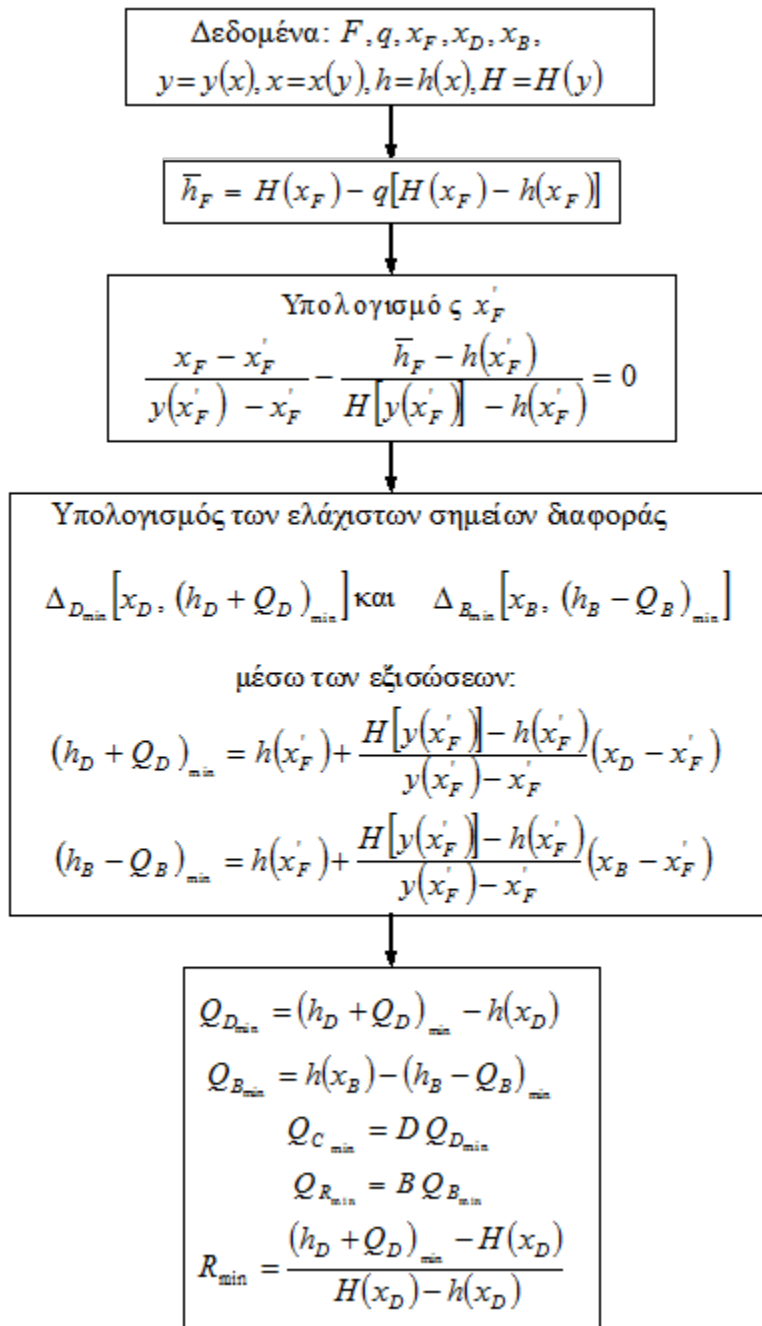
Πίνακας 4.22 Αλγόριθμος επίλυσης κλασματικής απόσταξης με τη μέθοδο Sorel.

Η επίλυση του μαθηματικού προτύπου με τον παραπάνω αλγόριθμο, μπορεί στην πράξη να αντιμετωπίσει κάποια δυσκολία ως προς τη σύγκλιση των μεταβλητών δοκιμής, δεδομένου ότι η τιμή τους, από βαθμίδα σε βαθμίδα, μεταβάλλεται κατά μικρή, σχετικά, ποσότητα, στις περισσότερες περιπτώσεις (σχεδόν ισογραμμομοριακές ροές). Για το λόγο αυτό, στην περίπτωση δυαδικών μιγμάτων, είναι ευκολότερη και παραστατικότερη η επίλυση του προβλήματος με ένα τρόπο που αποτελεί, ουσιαστικά, μίμηση της γραφικής μεθόδου Ponchon - Savarit. Μέσω της εξίσωσης ισορροπίας και των εκφράσεων της ενθαλπίας κορεσμένου υγρού και κορεσμένων ατμών, προσδιορίζονται, αρχικά, τα γραμμο-μοριακά κλάσματα του πτητικού συστατικού στις δύο φάσεις, που βρίσκονται σε ισορροπία σε κάθε ιδανική βαθμίδα, και, στη συνέχεια, οι γραμμομοριακοί ρυθμοί ροής, αποφεύγοντας με τον τρόπο αυτό τη χρήση μεταβλητών δοκιμής. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιούνται ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη, που θα αναφερθούν στη συνέχεια, και η πορεία των υπολογισμών παρουσιάζεται στο λογικό διάγραμμα του Σχήματος 4.32. Δύο από αυτά είναι τα ελάχιστα ανηγμένα θερμικά φορτία του συμπυκνωτήρα, Q_{Dmin} , και του αναβραστήρα, Q_{Bmin} . Τα μεγέθη αυτά ορίζονται από τις Εξισώσεις 4.239 και 4.240.

$$Q_D = \frac{Q_C}{D} \quad (4.239)$$

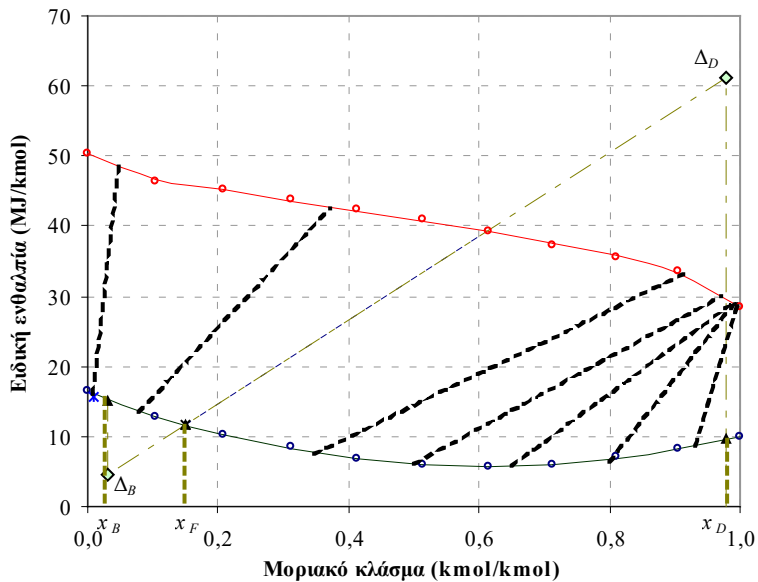
$$Q_B = \frac{Q_R}{B} \quad (4.240)$$

Σημειώνουμε ότι το ανηγμένο θερμικό φορτίο του συμπυκνωτήρα, εκφράζεται συναρτήσει του αποστάγματος, D , και όχι της ποσότητας ατμών, V_1 , που πραγματικά συμπυκνώνονται, και το αντίστοιχο φορτίο του αναβραστήρα, μέσω του υπολείμματος, B , και όχι της ποσότητας ατμών, V_{N+1} , που παράγονται, προκειμένου να ικανοποιείται το ολικό ισοζύγιο ενέργειας της στήλης. Επομένως, εκφράζουν την κατανάλωση θερμότητας ανά μονάδα προϊόντος. Για τον υπολογισμό των Q_{Dmin} και Q_{Bmin} προσδιορίζεται η εξίσωση της γραμμής ισορροπίας (γραμμή h-x ή H-y) που διέρχεται από το σημείο που αντιστοιχεί στη σύσταση και τη θερμική κατάσταση της τροφοδοσίας και, από την τιμή της ενθαλπίας που προκύπτει από την εξίσωση αυτή για τιμές μοριακών κλασμάτων που αντιστοιχούν στο απόσταγμα και υπόλειμμα, λαμβάνονται οι τιμές $(h_D+Q_D)_{min}$ και $(h_B-Q_B)_{min}$, που εκφράζουν δύο χαρακτηριστικά σημεία, Δ_{Dmin} και Δ_{Bmin} , που σε διάγραμμα ενθαλπίας - σύστασης ορίζουν τα (ελάχιστα) σημεία διαφοράς του συστήματος, και έχουν συντεταγμένες $\Delta_{Dmin}(x_D, (h_D+Q_D)_{min})$ και $\Delta_{Bmin}(x_B, (h_B-Q_B)_{min})$. Αποδεικνύεται (Σαραβάκος, 1985) ότι από τα σημεία αυτά διέρχονται οι γραμμές λειτουργίας της αποστακτικής στήλης. Πρέπει να τονιστεί ότι οι όροι (h_D+Q_D) και (h_B-Q_B) παριστάνουν συγκεκριμένες τιμές και ο συμβολισμός, ως άθροισμα δύο όρων, γίνεται με σκοπό να καθίσταται σαφές ότι οι τιμές αυτές (και τα αντίστοιχα σημεία) περιλαμβάνουν την ενθαλπία του υγρού αποστάγματος και υπολείμματος και την ενθαλπία που απομακρύνεται από το συμπυκνωτήρα ή προσφέρεται στον αναβραστήρα, και γι' αυτό αναγράφονται εντός παρενθέσεων. Το κλάσμα μάζας x_F αναφέρεται στη σύσταση υγρής φάσης, στην περίπτωση τροφοδοσίας διφασικού μίγματος, και ταυτίζεται με το x_F , όταν η τροφοδοσία είναι κορεσμένο υγρό. Από τις τεταγμένες των σημείων διαφοράς καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός των ελάχιστων απαιτούμενων θερμικών φορτίων του συμπυκνωτήρα και αναβραστήρα, καθώς και ο ελάχιστος λόγος αναρροής, βασισμένα σε δεδομένα ενθαλπίας του κάθε συγκεκριμένου συστήματος, που περιλαμβάνουν και ενδεχόμενες ενθαλπίες ανάμιξης των συστατικών.

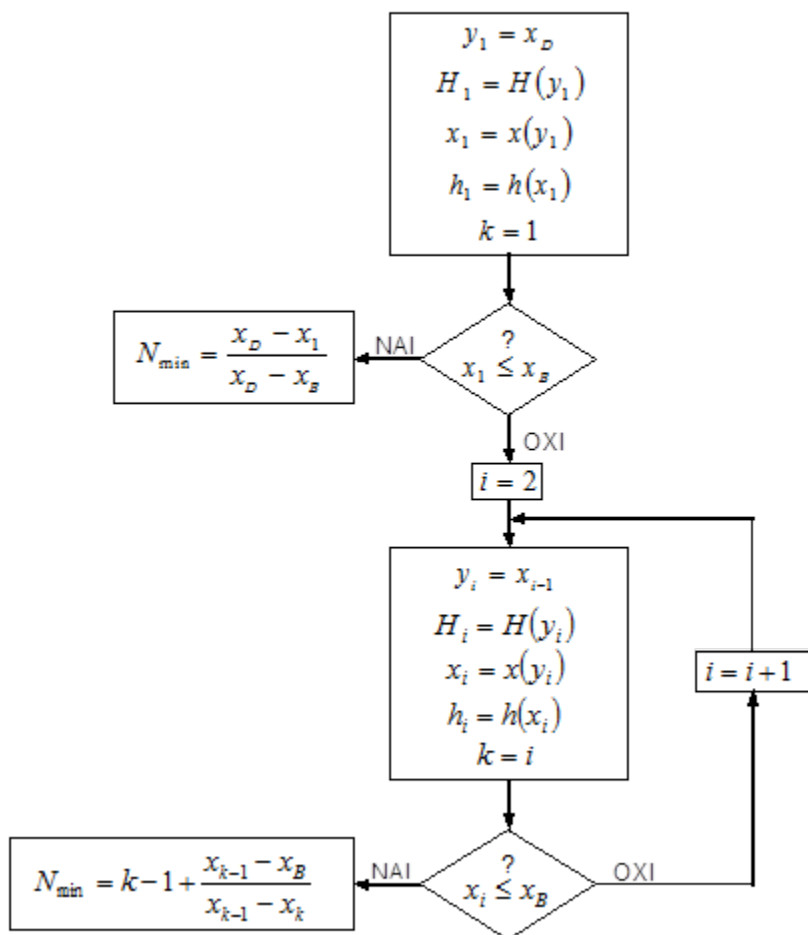


Σχήμα 4.32 Λογικό διάγραμμα υπολογισμού των ελάχιστων θερμικών φορτίων και του ελάχιστου λόγου αναρροής.

Στο Σχήμα 4.33 παριστάνεται το διάγραμμα ενθαλπίας - σύστασης για το σύστημα αμμωνία - νερό σε πίεση 20 atm. Παρατηρείται η σημαντική διαφορά των σημείων ζέσης των δύο συστατικών (διαφορά ενθαλπίας κορεσμένου υγρού και ατμών για μοριακό κλάσμα 0-νερό και 1-αμμωνία). Στο διάγραμμα παριστάνονται οι γραμμές σύνδεσης (που εκφράζουν συστάσεις ισορροπίας των δύο φάσεων) για τιμές του μοριακού κλάσματος (%) 1, 8, 35, 50, 65, 80, 93 καθώς και η ευθεία που διέρχεται από το σημείο τροφοδοσίας και τα ελάχιστα σημεία διαφοράς, η οποία υπερκαλύπτει τη γραμμή σύνδεσης που διέρχεται από το μοριακό κλάσμα υγρού 0.20.



Σχήμα 4.33 Διάγραμμα ενθαλπίας - σύστασης για το δυαδικό σύστημα αμμωνία – νερό.

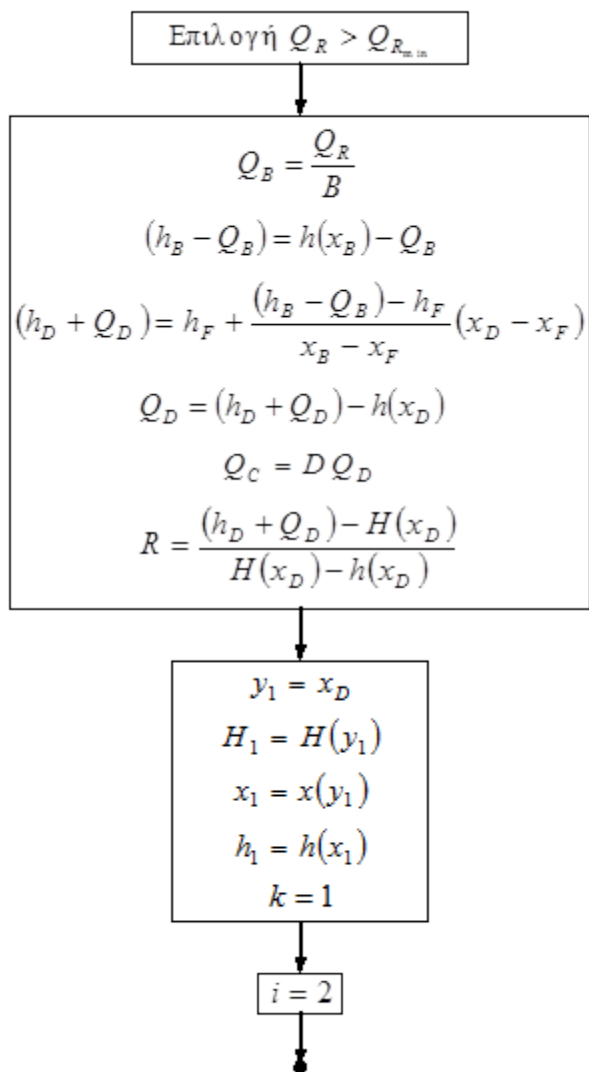


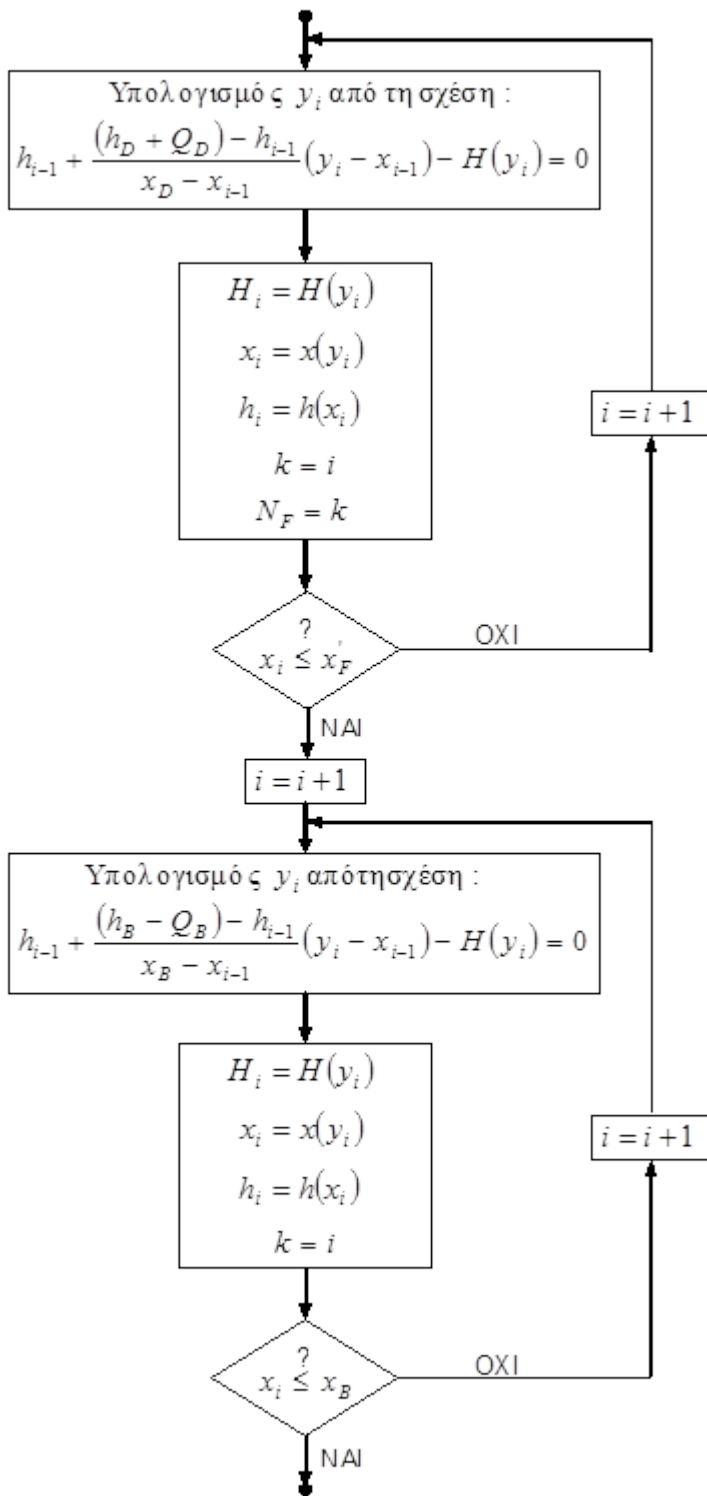
Σχήμα 4.34 Λογικό διάγραμμα υπολογισμού του ελάχιστου αριθμού βαθμίδων.

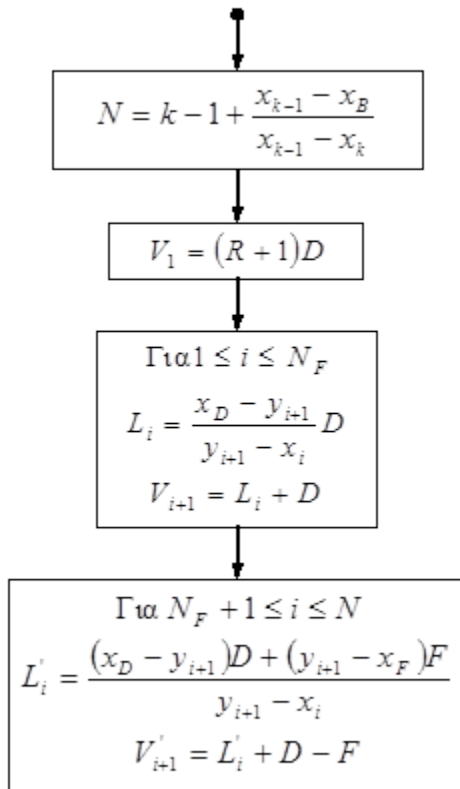
Πρέπει να τονίσουμε ότι η ταύτιση της ευθείας που διέρχεται από τα ελάχιστα σημεία διαφοράς με τη γραμμή σύνδεσης που διέρχεται από το σημείο που αντιστοιχεί στη σύσταση και θερμική κατάσταση της τροφοδοσίας, συμβαίνει στις περιπτώσεις ομαλών καμπυλών. Διαφορετικά πρέπει να προσδιοριστούν οι

γραμμές σύνδεσης για διάφορες τιμές μοριακού κλάσματος του πτητικού συστατικού και να επιλεγεί η ευθεία που αντιστοιχεί στις υψηλότερες τιμές των σημείων διαφοράς.

Στο Σχήμα 4.34 δίνεται το λογικό διάγραμμα υπολογισμού του ελάχιστου αριθμού βαθμίδων. Η μεθοδολογία στηρίζεται στην παραδοχή ότι τα σημεία διαφοράς βρίσκονται σε άπειρη απόσταση μεταξύ τους, καθώς οι ρυθμοί ροής αποστάγματος και υπολείμματος μηδενίζονται, και οι γραμμές λειτουργίας λαμβάνονται κατακόρυφες και παράλληλες.







Σχήμα 4.35 Λογικό διάγραμμα υπολογισμού του αριθμού θεωρητικών βαθμίδων και των γραμμομοριακών ρυθμών ροής με τη μέθοδο Sorel.

Στο Σχήμα 4.35 δίνεται το λογικό διάγραμμα για τον υπολογισμό του αριθμού των βαθμίδων και των γραμμομοριακών ροών αποστακτικής στήλης με τη μέθοδο Sorel. Η επιλογή του θερμικού φορτίου του αναβραστήρα, με βάση την ελάχιστη τιμή του, που υπολογίζεται από το λογικό διάγραμμα του Σχήματος 4.32, επιτρέπει τον προσδιορισμό της ευθείας που συνδέει τα σημεία διαφοράς Δ_D και Δ_B καθώς και το λόγο αναρροής R . Δεδομένου ότι, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες παραγράφους, ο λόγος αναρροής λαμβάνεται λίγο μεγαλύτερος της ελάχιστης τιμής του, το θερμικό φορτίο λαμβάνει, αντίστοιχα, τιμή λίγο μεγαλύτερη από την ελάχιστη για οικονομική λειτουργία της στήλης. Αυτό στηρίζεται και στο γεγονός ότι τα μεγέθη του λόγου αναρροής και των θερμικών φορτίων του αναβραστήρα και του συμπυκνωτήρα συνδέονται με το ολικό ισοζύγιο ενέργειας της στήλης. Μετά τον καθορισμό των σημείων διαφοράς ακολουθεί η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων της γραμμής λειτουργίας, της γραμμής σύνδεσης και της ενθαλπίας των φάσεων υγρής και ατμών. Οι γραμμές λειτουργίας του τμήματος εμπλουτισμού προσδιορίζονται με βάση την τιμή του σημείου διαφοράς Δ_D , που αντιστοιχεί στον συμπυκνωτήρα, ενώ εκείνες του τμήματος εξάντλησης με βάση το σημείο Δ_B , που αντιστοιχεί στον αναβραστήρα. Για τροφοδοσία στη βέλτιστη βαθμίδα η μετάβαση από το τμήμα εμπλουτισμού στο τμήμα εξάντλησης γίνεται όταν η το μοριακό κλάσμα του πτητικού συστατικού στη υγρή φάση της εξεταζόμενης βαθμίδας καταστεί μικρότερο από εκείνο που αντιστοιχεί στην υγρή φάση της τροφοδοσίας. Στη γραφική παράσταση των βαθμίδων αυτό αποτυπώνεται ως η τομή μιας γραμμής σύνδεσης με την ευθεία που συνδέει τα σημεία διαφοράς. Ο αριθμός των βαθμίδων ισορροπίας ταυτίζεται με εκείνον των γραμμών σύνδεσης που δημιουργούνται κατά την επίλυση. Ο υπολογισμός των γραμμομοριακών ροών γίνεται με επίλυση των ισοζυγίων μάζας για κάθε βαθμίδα (συνολικού και πτητικού συστατικού). Σημειώνουμε ότι τα ισοζύγια ενθαλπίας σε κάθε βαθμίδα λαμβάνονται υπόψη μέσω του υπολογισμού των τιμών των μοριακών κλασμάτων, από τη σχετική θέση των γραμμών κορεσμένου υγρού και ατμών ως προς τα σημεία διαφοράς, και ότι η γραμμομοριακή ροή της κάθε φάσης μεταβάλλεται από βαθμίδα σε βαθμίδα (μεταβολή κλίσης των γραμμών λειτουργίας).

4.8 Παράδειγμα Εφαρμογής Κλασματικής Απόσταξης με τη Μέθοδο Sorel

Να υπολογιστεί ο αριθμός των θεωρητικών βαθμίδων για το διαχωρισμό μίγματος αμμωνίας - νερού, σε πίεση 20 atm, μοριακής περιεκτικότητας 15% ως προς αμμωνία, προς απόσταγμα μοριακής περιεκτικότητας 98% και υπόλειμμα περιεκτικότητας 3% στο εν λόγω συστατικό. Να δοθούν οι γραμμομοριακές ροές των δύο φάσεων για κάθε βαθμίδα.

Δεδομένα ισορροπίας ατμών - υγρού και ενθαλπίας - σύστασης δίνονται στους Πίνακες 4.23 και 4.24, αντίστοιχα. Ο διαχωρισμός του μίγματος αυτού περιγράφεται, επίσης, από τον Σαραβάκο (1985) και Coulson & Richardson (1996), και βρίσκει εφαρμογή, μεταξύ άλλων, στη μονάδα απορρόφησης των συστημάτων ψύξης με αμμωνία.

Μοριακό κλάσμα NH ₃ στην υγρή φάση, x (kmol/kmol)	Μοριακό κλάσμα NH ₃ στη φάση ατμών, y (kmol/kmol)
0	0
0,0529	0,262
0,1053	0,474
0,2094	0,742
0,3120	0,891
0,4140	0,943
0,5140	0,977
0,6140	0,987
0,7120	0,990
0,8090	0,995
1	1

Πίνακας 4.23 Δεδομένα ισορροπία ατμών - υγρού για το σύστημα αμμωνίας - νερού σε πίεση 20 atm.

Μοριακό κλάσμα x , y	Ενθαλπία υγρής φάσης h (kJ/kmol)	Ενθαλπία φάσης ατμών H (kJ/kmol)	Θερμοκρασία T (°C)
0	16580,5	50495,2	211,5
0,105	12812,2	46266,4	182,5
0,209	10321,0	45198,7	165,5
0,312	8541,5	43775,1	131,5
0,414	6904,4	42519,0	113,0
0,514	5836,7	40927,9	91,0
0,614	5694,3	39148,5	76,0
0,712	6050,2	37369,0	65,5
0,809	7117,9	35589,6	58,0
0,905	8185,6	33454,1	52,5
1	9965,1	28471,6	48,5

Πίνακας 4.24 Δεδομένα ενθαλπίας - σύστασης για το σύστημα αμμωνίας - νερού σε πίεση 20 atm.

Η προσομοίωση των πειραματικών δεδομένων γίνεται με τις ακόλουθες εξισώσεις:
 Ισορροπία ατμών - υγρού:

$$y_{eq} = \frac{0,000252 + 4,295x_{eq} + 0,695x_{eq}^{3,355}}{0,821 + 4,167x_{eq}^{1,517}}$$

και

$$x_{eq} = \frac{9,068 - 5,858y_{eq} + 2,760y_{eq}^{86,12}}{-44,48 + 50,43y_{eq}^{-0,971}}$$

Ενθαλπία υγρού - σύσταση:

$$h = \frac{417521 - 819605x + 667639x^{2,112}}{9,81 + 16,63x^{0,0068}}$$

Ενθαλπία ατμών - σύσταση:

$$H = \frac{35704 - 3694y - 23049y^{0,0029}}{0,266 + 0,048y^{11,54}}$$

Εφαρμόζοντας το λογικό διάγραμμα του Σχήματος 4.35 υπολογίζονται οι τιμές των μεταβλητών που δίνονται στον Πίνακα 4.25. Στον Πίνακα 4.26 παρουσιάζεται η κατανομή μοριακών κλασμάτων αμμωνίας και μοριακών ροών των δύο φάσεων στις βαθμίδες της αποστακτικής στήλης. Αναφέρεται επίσης η ειδική ενθαλπία κάθε φάσης και η ο λόγος ροής των φάσεων (κλίση της αντίστοιχης γραμμής λειτουργίας) σε κάθε βαθμίδα Στο Σχήμα 4.36 παριστάνεται ο ελάχιστος αριθμός βαθμίδων ισορροπίας για το διαχωρισμό του Πίνακα 4.25 και διαπιστώνεται ότι το σύστημα αμμωνία - νερό διαχωρίζεται εύκολα στις 20 atm. Στο Σχήμα 4.37 δίνεται η γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων υπολογισμού των απαιτούμενων θεωρητικών βαθμίδων με τον αλγόριθμο του Σχήματος 4.35, για πίεση λειτουργίας 20 atm και λόγο $R/R_{min} = 1,2$. Η πριονωτή γραμμή στη διφασική περιοχή αποτελείται από διαδοχικά τμήματα γραμμών σύνδεσης, που παριστάνουν βαθμίδες ισορροπίας, και γραμμών λειτουργίας, που εκφράζουν τα ισοζύγια μάζας σε κάθε βαθμίδα. Παρατηρείται ότι οι προεκτάσεις των γραμμών λειτουργίας του τμήματος εμπλουτισμού διέρχονται από το σημείο διαφοράς Δ_D , ενώ εκείνες του τμήματος εξάντλησης από το Δ_B και η κλίση των γραμμών αυτών μεταβάλλεται από βαθμίδα σε βαθμίδα ως αποτέλεσμα της μη ισογραμμομοριακής ροής των φάσεων σε κάθε τμήμα της στήλης.

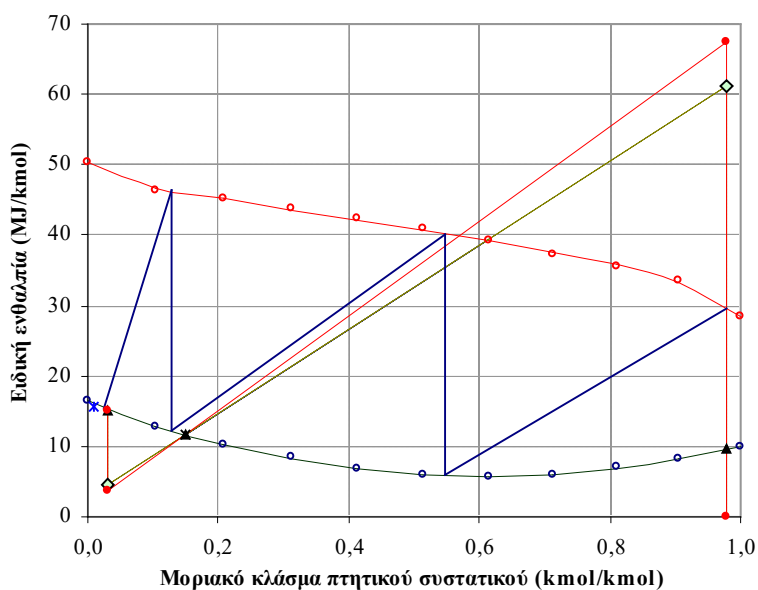
Προδιαγραφές σχεδιασμού		
Μοριακό κλάσμα συστατικού 1 στην τροφοδοσία	x_F (kmol/kmol)	0,15
Μοριακό κλάσμα συστατικού 1 στο απόσταγμα	x_D (kmol/kmol)	0,98
Μοριακό κλάσμα συστατικού 1 στο υπόλειμμα	x_B (kmol/kmol)	0,03
Μοριακός ρυθμός ροής ρεύματος διεργασίας	F (kmol/s)	0,030
Θερμική κατάσταση τροφοδοσίας	q	1,00
Μεταβλητές σχεδιασμού		
Θερμικό φορτίο αναβραστήρα	Q_R (MW)	0,301
Επίλυση προτύπου		
Ειδική ενθαλπία τροφοδοσίας σε κατάσταση κορεσμένου υγρού	$h(x_F)$ (MJ/kmol)	11,70
Ειδική ενθαλπία τροφοδοσίας σε κατάσταση κορεσμένου ατμού	$H(x_F)$ (MJ/kmol)	46,03
Ειδική ενθαλπία αποστάγματος σε κατάσταση κορεσμένου υγρού	$h(x_D)$ (MJ/kmol)	9,61
Ειδική ενθαλπία αποστάγματος σε κατάσταση κορεσμένου ατμού	$H(x_D)$ (MJ/kmol)	29,73
Ειδική ενθαλπία υπολείμματος σε κατάσταση κορεσμένου υγρού	$h(x_B)$ (MJ/kmol)	15,10
Μοριακό κλάσμα συστατικού 1 που αντιστοιχεί στην υγρή φάση τροφοδοσίας	x_F'	0,15
Μοριακό κλάσμα συστατικού 1 που αντιστοιχεί στη φάση ατμών τροφοδοσίας	$y(x_F')$	0,61
Ειδική ενθαλπία που αντιστοιχεί στην υγρή φάση τροφοδοσίας	$h(x_F')$	11,70
Ειδική ενθαλπία που αντιστοιχεί στη φάση ατμών τροφοδοσίας	$H[y(x_F')]$	39,24
Ειδική ενθαλπία τροφοδοσίας	h_F (MJ/kmol)	11,70

Ρυθμός ροής αποστάγματος	D (kmol/s)	0,004
Ρυθμός ροής υπολείμματος	B (kmol/s)	0,026
Ελάχιστη ειδική ενθαλπία σημείου διαφοράς Δ_D	$(h_D+Q_D)_{min}$ (MJ/kmol)	61,19
Ελάχιστη ειδική ενθαλπία σημείου διαφοράς Δ_B	$(h_B-Q_B)_{min}$ (MJ/kmol)	4,54
Ελάχιστο ανηγμένο θερμικό φορτίο συμπυκνωτήρα	Q_{Dmin} (kJ/kmol)	51,57
Ελάχιστο ανηγμένο θερμικό φορτίο αναβραστήρα	Q_{Bmin} (MJ/kmol)	10,56
Ελάχιστο θερμικό φορτίο συμπυκνωτήρα	Q_{Cmin} (MW)	0,20
Ελάχιστο θερμικό φορτίο αναβραστήρα	Q_{Rmin} (MW)	0,28
Ελάχιστος λόγος αναρροής	R_{min}	1,56
Ειδική ενθαλπία σημείου διαφοράς Δ_D	(h_D+Q_D) (MJ/kmol)	67,57
Ειδική ενθαλπία σημείου διαφοράς Δ_B	(h_B-Q_B) (MJ/kmol)	3,62
Ανηγμένο θερμικό φορτίο συμπυκνωτήρα	Q_D (kJ/kmol)	57,96
Ανηγμένο θερμικό φορτίο αναβραστήρα	Q_B (MJ/kmol)	11,48
Θερμικό φορτίο συμπυκνωτήρα	Q_C (MW)	0,22
Λόγος αναρροής	R	1,88
Αναλογία λόγου προς ελάχιστο λόγο αναρροής	R/R_{min}	1,20

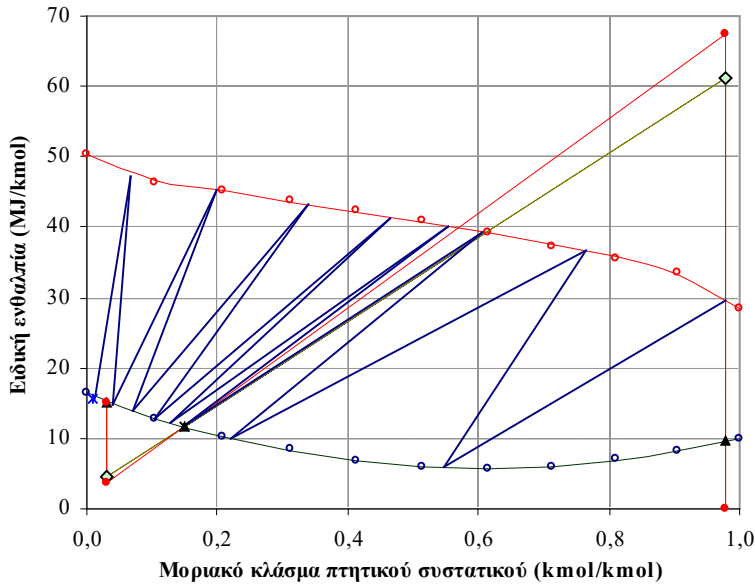
Πίνακας 4.25 Αποτελέσματα σχεδιασμού αποστακτικής στήλης με τη μέθοδο Sorel.

n	x_i (kmol/kmol)	y_i (kmol/kmol)	$h(x_i)$ (MJ/kmol)	$H(y_i)$ (MJ/kmol)	L_i (kmol/s)	V_i (kmol/s)	L_i/V_i
1	0,548	0,980	5,91	29,73	3,78E-03	1,09E-02	0,346
2	0,219	0,764	10,10	36,79	3,66E-03	7,57E-03	0,484
3	0,147	0,606	11,78	39,33	3,38E-02	7,45E-03	0,535
4	0,129	0,553	12,23	40,10	3,40E-02	7,55E-03	4,499
5	0,103	0,464	12,94	41,38	3,43E-02	7,75E-03	4,426
6	0,071	0,339	13,84	43,20	3,47E-02	8,07E-03	4,302
7	0,040	0,198	14,79	45,30	3,52E-02	8,51E-03	4,135
8	0,014	0,068	15,66	47,36	-	8,99E-03	6,424

Πίνακας 4.26 Κατανομή μοριακών κλασμάτων αμμωνίας και μοριακών ροών στις βαθμίδες της στήλης.

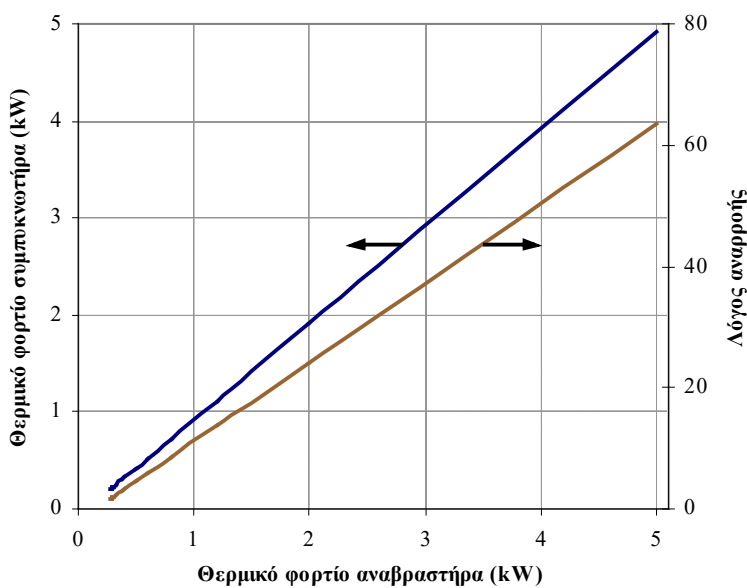


Σχήμα 4.36 Παράσταση ελάχιστου αριθμού βαθμίδων του συστήματος αμμωνία – νερό.

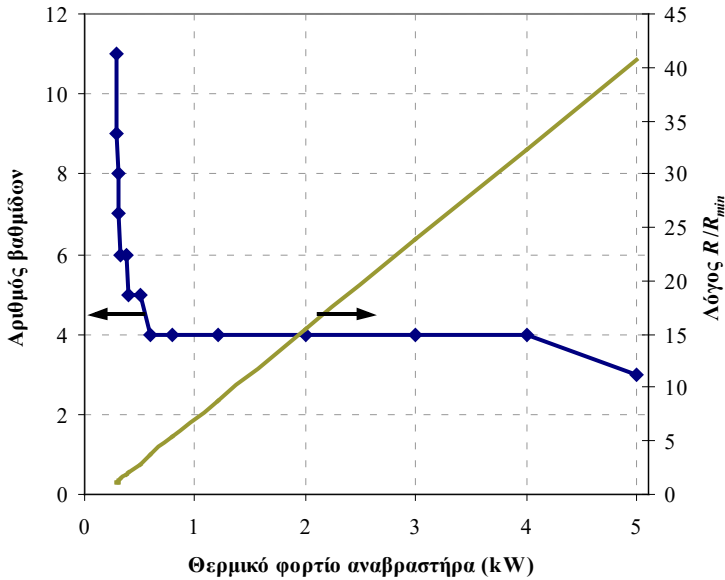


Σχήμα 4.37 Παράσταση θεωρητικών βαθμίδων του συστήματος αμμωνία - νερό, για λόγο $R/R_{min} = 1,2$ και πίεση 20 atm.

Στο Σχήμα 4.38 παρουσιάζεται η επίδραση του θερμικού φορτίου του αναβραστήρα σε εκείνο του συμπυκνωτήρα και στο λόγο αναρροής. Τα φορτία των δύο αυτών στοιχείων μεταφοράς θερμότητας είναι σχεδόν ίσα, όπως προκύπτει από τη σχεδόν διαγώνια γραμμή που παριστάνει την εξάρτησή τους, γεγονός που οφείλεται στο ότι τα εισερχόμενα και εξερχόμενα, στη στήλη, ρεύματα θεωρούνται ως κορεσμένα υγρά και η μεταβολή της ενθαλπίας τους λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας είναι πολύ μικρή συγκριτικά με εκείνη λόγω αλλαγής φάσης στον αναβραστήρα και συμπυκνωτήρα (Biegler κ.ά., 1997). Στο Σχήμα 4.39 παριστάνεται η μεταβολή του απαιτούμενου αριθμού θεωρητικών βαθμίδων, N , και του λόγου R/R_{min} ως συνάρτηση του φορτίου του αναβραστήρα, Q_R . Η σχέση $N - Q_R$ είναι αντίστοιχη με τη $N - R/R_{min}$ που παριστάνεται στο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.38 Μεταβολή του λόγου αναρροής και του θερμικού φορτίου συμπυκνωτήρα συναρτήσει εκείνου του αναβραστήρα.



Σχήμα 4.39 Μεταβολή του αριθμού θεωρητικών βαθμίδων και του λόγου R/R_{min} συναρτήσει του θερμικού φορτίου του αναβραστήρα.

Η εφαρμογή της μεθόδου Sorel απαιτεί τη χρησιμοποίηση δεδομένων ενθαλπίας - σύστασης, τα οποία διατίθενται στη βιβλιογραφία μόνο για μικρό αριθμό μιγμάτων, καθιστώντας τη μέθοδο πιο δύσκολη σε σχέση με εκείνη του Lewis. Εν τούτοις, τα αποτελέσματά της μεθόδου Sorel είναι ικανοποιητικότερα, ιδιαίτερα στην περίπτωση μιγμάτων συστατικών με μεγάλη διαφορά στις μοριακές ενθαλπίες εξάτμισής τους, ακόμη και στην περίπτωση που θεωρηθεί ότι υπάρχει γραμμική μεταβολή της ενθαλπίας των δύο φάσεων του μίγματος ως προς τη σύσταση. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνεται υπόψη στην επίλυση η διαφορά ενθαλπιών εξάτμισης των συστατικών, έστω και αν η θερμότητα ανάμιξης θεωρείται αμελητέα.

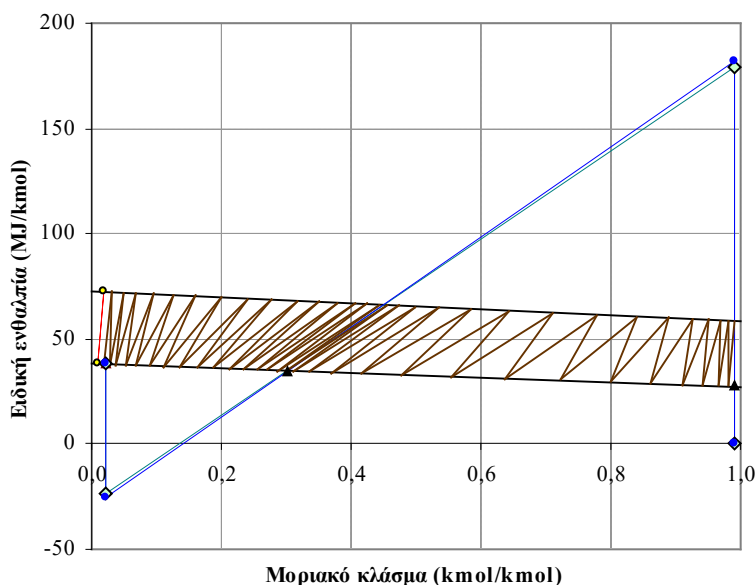
Με βάση την παρατήρηση αυτή ως επανέλθουμε στο παράδειγμα της Παραγράφου 4.4 και ως θεωρήσουμε τις θερμοκρασίες βρασμού, τις θερμοχωρητικότητες και τις ενθαλπίες εξάτμισης των δύο καθαρών συστατικών που υπολογίζονται από τις εξισώσεις του Πίνακα 4.3 και τις σταθερές του Πίνακα 4.11. Δεχόμενοι ότι το επίπεδο μηδενικής ενθαλπίας αντιστοιχεί σε 0°C, και ότι η ενθαλπία κορεσμένου υγρού και ατμών του μίγματος αποτελούν γραμμική συνάρτηση της σύστασης, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο Sorel, για τον υπολογισμό των θεωρητικών βαθμίδων, της κατανομής μοριακών κλασμάτων του 2,2,4-TMP, και των μοριακών ροών. Τα μεγέθη αυτά δίνονται στον Πίνακα 4.27, ενώ η παράσταση των θεωρητικών βαθμίδων σε διάγραμμα ενθαλπίας - σύστασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.40.

n	x_i (kmol/kmol)	y_i (kmol/kmol)	L_i (kmol/h)	V_i (kmol/h)	L_i/V_i
1	0,980	0,990	241,5	302,1	0,7995
2	0,965	0,982	241,0	301,8	0,7988
3	0,943	0,970	240,4	301,3	0,7977
4	0,910	0,952	239,4	300,6	0,7962
5	0,863	0,926	238,0	299,6	0,7942
6	0,800	0,888	236,1	298,2	0,7918
7	0,724	0,839	233,9	296,4	0,7892
8	0,638	0,778	231,5	294,2	0,7869
9	0,553	0,711	229,2	291,8	0,7854
10	0,477	0,644	227,1	289,4	0,7846
11	0,414	0,584	225,4	287,4	0,7845
12	0,368	0,536	224,2	285,7	0,7847
13	0,335	0,500	223,3	284,5	0,7851
14	0,312	0,474	222,7	283,6	0,7854
15	0,297	0,456	431,1	283,0	0,8002

16	0,286	0,443	430,5	282,6	1,5236
17	0,272	0,426	429,8	282,0	1,5242
18	0,255	0,404	429,0	281,3	1,5250
19	0,235	0,379	428,0	280,4	1,5261
20	0,212	0,349	426,9	279,5	1,5275
21	0,187	0,315	425,7	278,4	1,5292
22	0,161	0,277	424,4	277,1	1,5314
23	0,135	0,237	423,1	275,9	1,5338
24	0,110	0,197	421,9	274,6	1,5365
25	0,087	0,159	420,9	273,4	1,5393
26	0,068	0,124	419,9	272,3	1,5419
27	0,051	0,094	419,1	271,4	1,5444
28	0,038	0,068	418,5	270,6	1,5465
29	0,027	0,047	418,0	270,0	1,5483
30	0,018	0,031	-	269,5	-

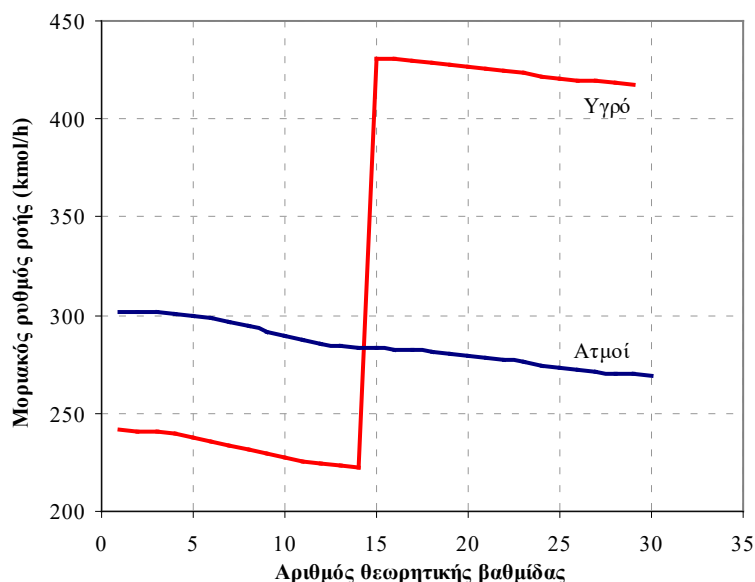
Πίνακας 4.27 Κατανομή μοριακών κλασμάτων 2,2,4-TMP και μοριακών ροών στις βαθμίδες της στήλης.

Στο Σχήμα 4.41 δίνεται η κατανομή των μοριακών ρυθμών ροής καθ' ύψος της στήλης. Το σχήμα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό γιατί εκφράζει την απόκλιση του συστήματος από τη βασική παραδοχή των σταθερών μοριακών ροών σε κάθε τμήμα της στήλης, στην οποία στηρίχτηκε η ανάπτυξη της μεθόδου Lewis. Παρατηρείται ότι οι ατμοί που ανέρχονται από την πρώτη βαθμίδα είναι αυξημένοι σε ποσότητα ως προς εκείνους που παράγονται στον αναβραστήρα κατά $(302,1-269,5)/269,5 = 12,1\%$ ή 3723,5 kg/h, δηλαδή η μεταβολή ρυθμού ροής των ατμών στα άκρα της στήλης ξεπερνά τους 3,5 tn/h, παρότι στην ανάλυση Lewis θεωρήθηκε σταθερή σε ολόκληρη τη στήλη, αφού η τροφοδοσία είναι πρακτικά κορεσμένο υγρό! Η μεγάλη αύξηση του ρυθμού ροής υγρού στη 15^η βαθμίδα οφείλεται στην υγρή τροφοδοσία που οδηγείται στο τμήμα εξάντλησης.



Σχήμα 4.40 Παράσταση θεωρητικών βαθμίδων του συστήματος 2,2,4-TMP - n-C₈, για λόγο $R/R_{min} = 1,021$.

Ο αριθμός βαθμίδων ισορροπίας που υπολογίζεται με τη μέθοδο αυτή είναι σημαντικά μικρότερος (30) σε σχέση με τον διδόμενο από τη μέθοδο FUG (~ 41) και Lewis (~ 42).



Σχήμα 4.41 Κατανομή μοριακών ρυθμών ροής των δύο φάσεων καθ' ύψος της στήλης.

Σχετικά με τα θερμικά φορτία, η μέθοδος Sorel δίνει 2604 kW και 2586 kW για τον αναβραστήρα και το συμπυκνωτήρα, αντίστοιχα, έναντι των τιμών 2537 kW και 2251 kW της μεθόδου Lewis. Με βάση το σκεπτικό ότι, στην περίπτωση που η τροφοδοσία και τα προϊόντα είναι κορεσμένα υγρά, αναμένεται σχεδόν ισότητα των θερμικών φορτίων, διαπιστώνουμε ότι η μέθοδος Sorel δίνει αποτελέσματα περισσότερο αξιόπιστα.

Η αύξηση της ροής ατμών προς την κορυφή αποδεικνύεται από το γεγονός ότι, για σχεδόν ίσα θερμικά φορτία, ο μεγαλύτερος ρυθμός ροής αναμένεται εκεί που η ενθαλπία μεταβολής φάσης είναι μικρότερη, που για το εξεταζόμενο σύστημα αντιστοιχεί στο απόσταγμα (Πίνακας 4.11).

Τέλος, ελέγχουμε το ισοζύγιο ενθαλπίας γύρω από τη στήλη. Ισχύει:

$$Fh_F + Q_R = Dh_D + Bh_B + Q_C \Rightarrow 0,058*34844+2604-0,017*27490-0,041*38255-2586 = 3,17 \text{ Kw}$$

έναντι 224,3 kW της μεθόδου Lewis (Στην πραγματικότητα το ισοζύγιο μηδενίζεται αν ληφθούν υπόψη και τα δεκαδικά νούμερα). Επομένως η μέθοδος Sorel πραγματοποιεί τους υπολογισμούς ικανοποιώντας πάντα και το ολικό ισοζύγιο ενέργειας, αφού η κατανομή των μοριακών κλασμάτων υπολογίζεται με βάση δεδομένα ενθαλπίας.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

- Benitez J., *Principles and Modern Applications of Mass Transfer Operations*, 2ed ed., John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2009.
- Biegler L.T., Grossmann I.E., Westerberg A.W., *Systematic Methods of Chemical Process Design*. Prentice Hall PTR, 1997.
- Coulson J.M. & Richardson J.F., *Chemical Engineering. Vol. 2 (4th Ed.), Particle Technology and Separation Processes*, Butterworth - Heinemann, 1996.
- Maroulis Z.B. & Saravacos G.D., *Food Process Design*. Marcel Dekker Inc., 2003.
- McCabe W.L., Smith J.C., Harriott P., *Βασικές Φυσικές Διεργασίες Μηχανικής*. Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.
- Perry R.H. & Chilton C.H., *Chemical Engineers' Handbook*. (7th Ed.), McGraw - Hill, 1997.

- Seader J.D., Henley E.J., Keith Roper D., *Separation Process Principles, Chemical and Biochemical Operations*, 3ed ed., John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2011.
- Wankat P.C., *Equilibrium Staged Separations*. Prentice Hall PTR, 1988.
- Wankat P.C., *Separation Process Engineering*, 3rd ed, Pearson Education, Inc., Prentice Hall, 2012.
- Σαραβάκος Γ.Δ., *Τεχνική Φυσικών Διαχωρισμών*. ΕΜΠ, 1985.