



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ
ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΣΕ ΜΟΝΑΔΑ
ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ-ΑΦΥΓΡΑΝΣΗΣ**

ΝΙΚΗΤΑΣ ΕΚΤΩΡ ΡΗΓΟΣ-ΛΑΛΕΑΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ: 02102039

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΡΟΓΔΑΚΗΣ

ΑΘΗΝΑΙ 2015

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	6
ΣΚΟΠΟΣ – ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	7
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	17
ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΕΥΡΕΣΗΣ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ Η ΑΝΑΓΚΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ.....	17
1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ- ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	17
1.2. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΝΕΡΟΥ	20
1.3. ΦΡΑΓΜΑΤΑ	21
1.4. ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	29
ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ	29
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	29
2.2. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΑΠΛΗ Η ΠΟΛΛΩΝ ΒΑΘΜΙΔΩΝ ΑΠΟΣΤΑΞΗ.....	30
2.3. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑ ΑΚΑΡΙΑΙΑ ΕΞΑΤΜΙΣΗ	33
2.4. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΤΟΥ ΑΤΜΟΥ.....	36
2.5. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΗΛΙΑΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΗ.....	39
2.6. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΛΥΣΗ.....	40
2.7. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΥΠΕΡΔΙΗΘΗΣΗ.....	42
2.8. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΜΙΚΡΟΔΙΗΘΗΣΗ	42
2.9. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ.....	43
2.10. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΟΣΜΩΣΗ.....	43
2.11. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΥΓΡΑΝΣΗ – ΑΦΥΓΡΑΝΣΗ ΑΕΡΙΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ [5Α]	51
2.12. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ	53
2.13 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ [5Α].....	60
2.14 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΓΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ – ΜΑΖΑΣ [5Α]	62
2.15 ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΜΕ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΜΗ ΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΩΝ ΑΕΡΙΩΝ [5Α]	65
2.16 ΕΞΙΣΣΟΡΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΣΕ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΖΑΣ [5Α].....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	70
ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΟΓΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ [5Α]	70

3.1. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΣΕ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ [5A]	70
3.2. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΣΕ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΖΑΣ [5A]	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	80
ΑΥΞΗΣΗ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΣΕ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ [5A]	80
4.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΣΕ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ, [5A].....	80
4.2 ΤΟ ΘΕΩΡΗΜΑ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ [5A]	84
4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΠΟΙΗΣΗ [5A]	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	94
ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΡΩΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ [5A].....	94
5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ [5A].....	94
5.1.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ [5A]	95
5.1.2 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ [5A]	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	100
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΥΓΡΟΥ ΑΕΡΑ.....	100
6.1. ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ [9A].....	100
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	105
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΣΤΡΩΤΟ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ [6A].....	105
7.1 ΙΣΧΥΟΥΣΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ	105
7.2 ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΙΜΟ ΠΛΕΓΜΑ.....	107
7.3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΕ (χ, ω) ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ.....	108
7.4 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ	110
7.5 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ $\omega, \gamma,$ ΚΑΙ r	113
7.6 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (ΓΕΝΙΚΑ)	115
7.7 ΟΡΟΙ ΠΗΓΩΝ.....	117
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	119
ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ.....	119
8.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ [5A].....	119
8.2 ΙΣΧΥΟΥΣΕΣ ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΜΑΣ.....	119
8.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΣΤΗΝ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΑΣ	122
8.4 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΔΜΑ [8A].....	125
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9	127
ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	127
9.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ [5A].....	127

9.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΟΡΙΑΚΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ [5A].....	128
9.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΓΝΩΣΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ [5A].....	130
9.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ [5A].....	133
9.5 ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ [5A]	134
9.6 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΟΥ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ, [5A]	138
9.7 ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ [5A]	148
9.8 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΟΓΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΣΕ ΕΝΑΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΖΑΣ, [5A]	151
9.9 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	153
9.10. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΓΑΣΙΑ	176
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10	179
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	179
10.1 ΚΥΡΙΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	179
ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ [5A]	179
ΕΙΔΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΞΗΧΘΗΣΑΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΑΣ	182
10.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	184
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α'	186
Ο ΚΩΔΙΚΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ.....	186
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β'	212
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΑΝΤΙΠΡΟΗΣ ΔΥΟ ΣΥΓΚΕΝΤΡΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ [7A]	212
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	214

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Θερμότητας του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Ευχαριστώ τον καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Ρογδάκη, για την ανάθεση αυτής της εργασίας σε εμένα, όπως και για την κατανόηση που επέδειξε και την βοήθεια που μου προσέφερε, μέσω των εύστοχων υποδείξεων του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της.

ΑΘΗΝΑΙ 2015

ΣΚΟΠΟΣ – ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα, στο 1^ο μέρος της, έγινε αρχικά μια επισκόπηση των μεθόδων αφαλάτωσης και σύγκριση μεταξύ αυτών των μεθόδων. Κατόπιν, έγινε μια πλήρης αναφορά στη μελέτη του ρυθμού παραγωγής εντροπίας σε έναν εναλλάκτη ταυτόχρονης μεταφοράς θερμότητας και μάζας, με μεγάλη συγκέντρωση μη συμπυκνώσιμων αερίων στη πλευρά του αερίου ρεύματος όπου, έχουμε φαινόμενα συμπύκνωσης. Η προσέγγιση του προβλήματος έγινε, αρχικά, με τη μέθοδο του όγκου ελέγχου με σκοπό, να διαφανεί η αδυναμία αυτής της μεθόδου για την ανάλυση του φαινομένου, σε εναλλάκτες ταυτόχρονης μεταφοράς μάζας και θερμότητας. Κατόπιν, η μελέτη του προβλήματος έγινε με τη λεπτομερή μέθοδο της ανάλυσης του οριακού στρώματος μεταφοράς θερμότητας και μάζας και τα συμπεράσματα φανέρωσαν τους μηχανισμούς παραγωγής εντροπίας σε έναν τέτοιο εναλλάκτη, ποιοί παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά την παραγωγή εντροπίας και πως μπορούμε να οδηγηθούμε σε optimum συνθήκες λειτουργίας σε μια μονάδα συμπυκνωτή-αφυγραντή, από τη σκοπιά της ελαχιστοποίησης της παραγωγής εντροπίας. Προς τούτο, γίνεται ανάπτυξη της έννοιας της εξισορρόπησης.

Στο 2^ο μέρος της εργασίας, (Κεφάλαιο 5), παρουσιάζεται η ανάλυση του οριακού στρώματος όπως περιγράφεται στη βιβλιογραφία [5A], που γίνεται, με επίλυση των αντίστοιχων εξισώσεων της (α) υ-ορμής, (β) συνέχειας, (γ) συστατικών, (δ) ενέργειας και (ε) καταστατικής εξίσωσης, ως προς τα μεγέθη-μεταβλητές του προβλήματος : (1) πυκνότητα αέρα, (2) πυκνότητα υδρατμού, (3) αξονική ταχύτητα u , (4) ακτινική ταχύτητα v_r , (5) θερμοκρασία T και (6) πίεση P , με χρήση των διατυπώσεων της ροής σε οριακό στρώμα. Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 5 της παρούσας εργασίας, στην ανάλυση της βιβλιογραφίας [5A], η πυκνότητα και οι ιδιότητες μεταφοράς θεωρήθηκαν σταθερές σε κάθε διατομή υπολογισμού, μεταβαλλόμενες από διατομή σε διατομή, ενώ, στην εξίσωση ενέργειας δεν λήφθηκε υπόψη η υλική παράγωγος της πίεσης. Οι προκύπτουσες διακριτοποιημένες εξισώσεις σε κάθε διατομή, λύνονταν όλες ταυτόχρονα σαν ένα σύνολο αλγεβρικών μη γραμμικών εξισώσεων, με τη χρήση ενός επαγγελματικού μαθηματικού προγράμματος

υπολογισμού (Engineering Equation Solver), χωρίς όμως να δίνονται περαιτέρω στοιχεία για τον αλγόριθμο επίλυσης του προκύπτοντος συνόλου μη γραμμικών εξισώσεων. Επίσης, δεν παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού της κλίσης πίεσης, μεγέθους που υπάρχει στην εξίσωση της u -ορμής. Λόγω του τρόπου υπολογισμού των μεγεθών, (ταυτόχρονη επίλυση συνόλου μη γραμμικών εξισώσεων), ως δεδομένα στην [5A], λαμβάνονταν οι θερμοκρασίες εισόδου του αέρα και του ψυκτικού μέσου, ο συντελεστής συναγωγής από τη πλευρά του ψυκτικού μέσου, η ταχύτητα του αέρα και η παροχή του ψυκτικού μέσου και εξ αυτών, ο λόγος παροχών μάζας, η σχετική υγρασία στο ρεύμα εισόδου του αέρα και η ακτίνα του σωλήνα στον οποίο ρέει ο αέρας. Στους υπολογισμούς για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση, διατηρούνταν σταθερή η διαφορά θερμοκρασιών εισόδου – εξόδου του αέρα, ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούν την ελαχιστοποίηση του ρυθμού παραγωγής εντροπίας.

Στο 3^ο μέρος της παρούσας εργασίας (Κεφάλαια 6 έως και 8), προκειμένου να γίνει μια σύγκριση και επαλήθευση των συμπερασμάτων της βιβλιογραφίας [5A] για τον υπολογισμό των μεγεθών της ροής, αναπτύχθηκε πρόγραμμα υπολογισμού που «τρέχει» μέσα από το Excel δηλαδή, είναι εύχρηστο σε κάθε υπολογιστή. Με το πρόγραμμα αυτό, υπολογίζονται τα μεγέθη της ροής οριακού στρώματος και ο ρυθμός παραγωγής εντροπίας, με βάση τη μέθοδο επίλυσης ροών οριακού στρώματος, όπως αυτή δόθηκε από τον Patankar [6A]. Η μέθοδος αυτή περιγράφεται στο κεφάλαιο 7 της παρούσας εργασίας. Σε αυτή την μέθοδο οι υπολογισμοί γίνονται βηματικά, αρχίζοντας από τη διατομή εισόδου του αέρα στον εναλλάκτη και υπολογίζοντας τα μεγέθη της ροής σε κάθε κατάντι διατομή, βήμα προς βήμα. Οι εξισώσεις που επιλύονται σε αυτή τη μέθοδο είναι (a) της u -ορμής, (b) v – ορμής, (c) συνέχειας, (d) συστατικών, (e) ενέργειας και (f) η καταστατική εξίσωση, όπως αυτές διατυπώνονται για ροή οριακού στρώματος σε συντηρητική μορφή. Οι εξισώσεις επιλύονται ως προς τα μεγέθη (1) πυκνότητα αέρα, (2) κλάσμα μάζας υδρατμού, (3) αξονική ταχύτητα u , (4) ακτινική ταχύτητα v_r , (5) θερμοκρασία T και (6) πίεση P . Σε αντιστοιχία με τις παραδοχές της [5A], η πυκνότητα και οι ιδιότητες μεταφοράς θεωρήθηκαν σταθερές σε κάθε διατομή υπολογισμού, μεταβαλλόμενες από διατομή σε διατομή, με τη διαφορά όμως, πως αυτές

λήφθηκαν από τις ψυχομετρικές εξισώσεις που περιγράφονται στο κεφάλαιο 6 της εργασίας μας. Μία επιπλέον διαφορά_στην προσέγγιση μας, σχετίζεται με την εξίσωση της ενέργειας, όπου εδώ λήφθηκε υπόψιν και η υλική παράγωγος της πίεσης ενώ παράλληλα, χρησιμοποιήθηκε ειδική επαναληπτική μέθοδος για τον υπολογισμό της κλίσης της πίεσης, όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 7. Το προκύπτον σύνολο εξισώσεων, μαζί με τις οριακές συνθήκες που λήφθηκαν ίδιες με αυτές της [5A], αποτέλεσε ένα σύνθετο πρόβλημα υπολογισμού για το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας ειδικός επαναληπτικός αλγόριθμος που περιγράφεται στο κεφάλαιο 8 της παρούσας εργασίας.

Λόγω του τρόπου υπολογισμού των μεγεθών στην εργασία μας (βηματικοί υπολογισμοί από τη διατομή εισόδου του αέρα μέχρι την διατομή εξόδου του), σαν δεδομένα στο πρόγραμμα μας λαμβάνονται η θερμοκρασία εισόδου του αέρα, η θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού μέσου, ο συντελεστής συναγωγής από τη πλευρά του ψυκτικού μέσου, η ταχύτητα του αέρα στη διατομή εισόδου του, ο λόγος παροχών μάζας, η σχετική υγρασία στο ρεύμα εισόδου του αέρα και η ακτίνα του σωλήνα στον οποίο ρέει ο αέρας. Στους υπολογισμούς που έγιναν, όπως στη βιβλιογραφία [5A], διατηρήθηκαν σταθερή η διαφορά θερμοκρασιών εισόδου – εξόδου του αέρα, για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση. Για να επιτευχθεί αυτό σε κάθε περίπτωση, για δεδομένη θερμοκρασία εισόδου του αέρα, δοκιμάζονταν διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εξόδου του ψυκτικού μέσου και γινόταν, για κάθε μία από αυτές τις δοκιμαστικές τιμές, εκτέλεση των υπολογισμών του προγράμματος, ώστε τελικά, μετά από διαδοχικές δοκιμαστικές εκτελέσεις, να καταλήξουμε σε θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού μέσου, για την οποία, το πρόγραμμα υπολογισμού δίνει σαν αποτέλεσμα την ζητούμενη θερμοκρασία εξόδου του αέρα, δηλαδή την θερμοκρασία εξόδου του αέρα που μας δίνει το δεδομένο ΔT . Φυσικά, επειδή στο πρόγραμμα μας οι ιδιότητες μεταφοράς λήφθηκαν από διαφορετική πηγή από αυτή που χρησιμοποιήθηκε στη βιβλιογραφία, [5A], αναμένεται να υπάρχει διαφορά στις τιμές των υπολογιζόμενων μεγεθών από το πρόγραμμα μας, σε σχέση με αυτές που θα λαμβάνονταν από τον επιλυτή εξισώσεων EES που χρησιμοποιήθηκε στη βιβλιογραφία [5A]. Λογικές διαφορές, επίσης, δύναται να

υπάρχουν, λόγω και των αριθμητικών σφαλμάτων που υπεισέρχονται, καθώς και απο τη χρήση διαφορετικών μεθόδων αριθμητικής ανάλυσης και προσέγγισης.

Κατόπιν, στο 4^ο μέρος της εργασίας μας (Κεφάλαια 9 και 10), ύστερα από διερεύνηση των αποτελεσμάτων που λήφθηκαν από το πρόγραμμα μας, για διάφορες τιμές του συντελεστή συναγωγής και λόγου παροχών ψυκτικού μέσου προς παροχή αέρα, εξήχθησαν συμπεράσματα που αφορούν το ρυθμό παραγωγής εντροπίας σε εναλλάκτη ταυτόχρονης μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Βρέθηκε συμφωνία των συμπερασμάτων από το πρόγραμμα μας με τα αντίστοιχα που έχουμε από τη βιβλιογραφία [5A] και επιπλέον, διατυπώνονται, περαιτέρω, νέα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της ανάλυσης μας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

ΣΥΜΒΟΛΑ ΜΕ ΛΑΤΙΝΙΚΟΥΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΕΣ

B_m	Κινούσα δύναμη μεταφοράς μάζας
\hat{C}	Αδιάστατη θερμοχωρητικότητα, $c_p M/R$
c	Συνολική μοριακή συγκέντρωση, kmol/m^3
c_i	Μοριακή συγκέντρωση συστατικού i , kmol/m^3
c_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα σε σταθερή πίεση, J/Kg-K
C	Ρυθμός θερμοχωρητικότητας, W/K
C^*	Λόγος ρυθμών θερμοχωρητικότητας
δ	Πάχος οριακού στρώματος, m
D	Συντελεστής διάχυσης για δύο συστατικά, m^2/s
D_{ij}	Συντελεστής διάχυσης για πολλά συστατικά, m^2/s
D_H	Υδραυλική διάμετρος, m
D_i^T	Παράγοντας θερμικής διάχυσης, $\text{m}^2/\text{s-K}$
e	Ειδική εσωτερική ενέργεια, J/Kg
e_i	Μοναδιαίο διάνυσμα κατά την i -οστή συντεταγμένη
f	Συνισταμένη κινούσα δύναμη συσχετισμένη με την ροή j
g	Ειδική ελεύθερη ενέργεια Gibbs, J/Kg
g_i	Μερική ειδική ελεύθερη ενέργεια Gibbs του συστατικού i , J/Kg

GOR	Λόγος κέρδους εξόδου
\dot{H}	Ρυθμός ενθαλπίας, W
h	Ειδική ενθαλπία, J/Kg
h_{conv}	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από συναγωγή, W/m ² -K
h_{fg}	Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης, J/Kg
h_i	Μερική ειδική ενθαλπία του συστατικού i , J/Kg
HCR	Τροποποιημένος λόγος ρυθμού θερμοχωρητικότητας
j	Ροή συνδεδεμένη με οιαδήποτε διαδικασία μεταφοράς
J	Ρυθμός οιασδήποτε διαδικασίας μεταφοράς
j_i	Ροή μάζας από διάχυση του συστατικού i , Kg/m ² -s
j_s	Ροή εντροπίας, W/m ² -K
k	Συντελεστής αγωγιμότητας, W/m-K
L	Συντελεστής μεταφοράς
Le	Αριθμός Lewis, Sc/Pr
m_i	Κλάσμα μάζας του συστατικού i
\dot{m}	Ρυθμός παροχής μάζας, Kg/s
M_i	Μοριακό βάρος του συστατικού i , kg/kmol
MR	Λόγος ρυθμών παροχής μάζας
n_i	Συνολική καθαρή ροή μάζας του συστατικού i , kg/m ² -s
Nu	Αριθμός Nusselt
P	Πίεση, Pa
Pr	Αριθμός Prandtl
Pe	Αριθμός Peclet
q	Ροή θερμότητας, W/m ²
\dot{Q}	Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας, W
R	Παγκόσμια σταθερά αερίων, J/Kmol-K
Re	Αριθμός Reynolds

RR	Λόγος ανάκτησης
s	Ειδική εντροπία, J/kg-K
\dot{S}'_{gen}	Ογκομετρικός ρυθμός παραγωγής εντροπίας, W/m ³ -K
Sc	Αριθμός Schmidt
Sh	Αριθμός Sherwood
$\dot{S}'_{gen,HT}$	Ρυθμός παραγωγής εντροπίας λόγω μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα μήκους σωλήνα, W/m-K
$\dot{S}'_{gen,MT}$	Ρυθμός παραγωγής εντροπίας λόγω μεταφοράς μάζας ανά μονάδα μήκους σωλήνα, W/m-K
\dot{S}'_{gen}	Ρυθμός παραγωγής εντροπίας ανά μονάδα μήκους σωλήνα, W/m-K
\dot{S}_{gen}	Ρυθμός παραγωγής εντροπίας, W/K
T	Θερμοκρασία, K ή °C
u	Διάνυσμα ταχύτητας, m/s
u	Αξονική ταχύτητα, m/s
v	Ειδικός όγκος, kg/m ³
v_r	Ακτινική ταχύτητα, m/s
x_i	Κλάσμα Mole του συστατικού i

ΣΥΜΒΟΛΑ ΜΕ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΕΣ

ϵ	Αποδοτικότητα εναλλάκτη
φ	Σχετική υγρασία
Φ	Συνάρτηση διασποράς λόγω συνεκτικότητας
γ	Αδιάστατη μοριακή συγκέντρωση
μ	Δυναμική συνεκτικότητα, kg/m-s

ω	Λόγος υγρασίας
ρ	Πυκνότητα, kg/m^3
ρ_i	Μερική πυκνότητα του συστατικού i , kg/m^3
σ	Τυπική απόκλιση
σ^2	Διασπορά
θ	Αδιάστατη θερμοκρασία

ΔΕΙΚΤΕΣ

O	Είσοδος, περιβάλλον (στο κεφάλαιο 2, μόνο)
av	Μέση τιμή
b	Ρεύματος ή από ανάμιξη – μέσος, απορριπτόμενο διάλυμα (στο κεφάλαιο 2 μόνο)
c	Ψυκτικό μέσο
C	Κρύο ρεύμα
f	Τροφοδοσία, ή νερό θάλασσας
g	Μη συμπυκνώσιμο αέριο, αέρας
H	Ζεστό ρεύμα
\max	Μέγιστο
\min	Ελάχιστο
p	Προϊόν, ή φρέσκο νερό
R	Ζεστή αποθήκη
v	Ατμός νερού
w	Τοίχωμα

ΕΚΘΕΤΕΣ

- ο Κατάσταση αναφοράς
- s Κορεσμένος /ο
- + Κανονικοποιημένη ποσότητα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΕΥΡΕΣΗΣ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ Η ΑΝΑΓΚΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ¹

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ- ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το νερό είναι το βασικότερο στοιχείο για την επιβίωση του ανθρώπου. Και το υπόγειο αλλά και το επιφανειακό νερό χρησιμοποιείται για ανθρώπινη κατανάλωση. Το νερό αυτό πρέπει να είναι αβλαβές για τον άνθρωπο, απαλλαγμένο από παθογόνους μικροοργανισμούς και από οποιεσδήποτε ουσίες σε αριθμούς και συγκεντρώσεις που αποτελούν κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού θα πρέπει να κυμαίνονται σε κάποιες αποδεκτές προδιαγραφές οι οποίες προκύπτουν νομοθετικά από τα πρότυπα ποιότητας. Το νερό αποτελεί το 60% της μάζας του ανθρώπινου σώματος και είναι βασικός παράγοντας της κυκλοφορίας και της χημικής ισορροπίας του οργανισμού μας. Ένα ποσοστό 0.5% από την ολική ποσότητα του νερού στη γη εκτιμάται ότι προορίζεται για την ανθρώπινη κατανάλωση. [2Α]

Τα τελευταία 100 χρόνια η χρήση του νερού έχει αυξηθεί περίπου κατά έξι φορές, ενώ αναμένεται ότι η χρήση θα διπλασιασθεί έως το 2050, κυρίως λόγω των συστημάτων άρδευσης και της ζήτησης από τον τομέα της γεωργίας. Η ανάγκη που έχει ο άνθρωπος για νερό είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την ποσότητα που απαιτείται μόνο για πόσιμο, για πλύσιμο και άλλες οικιακές ανάγκες. Εκτιμάται ότι απαιτείται 70 φορές περισσότερη ποσότητα νερού για την παραγωγή της τροφής

¹ Η ύλη αυτού του κεφαλαίου προέρχεται από την ακόλουθη βιβλιογραφία:

1. Δρ. Δαγκαλίδης Αθανάσιος, « Αφαλάτωση Νερού», Κλαδική Μελέτη, Ιανουάριος 2009, Τράπεζα Πειραιώς
2. Πασίσης Β. Ιωάννης, «Αφαλάτωση νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας», Μεταπτυχιακή εργασία υποβληθείσα στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών για το πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών «ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ», Αθήνα 2011.
3. DESALINATION IN THE KINGDOM OF SAUDI ARABIA: CURRENT PRACTICE AND FUTURE TRENDS Dr. Ahmed Alarifi Saline Water Conversion Corporation Monday, 17 June 2013

ενός ανθρώπου από εκείνη την ποσότητα που απαιτείται για τις οικιακές ανάγκες. [2A]

Τα τελευταία χρόνια διαρκώς μεγαλώνει το πρόβλημα της έλλειψης πόσιμου νερού σε πολλές από τις χώρες του αναπτυσσόμενου αλλά και του αναπτυγμένου κόσμου. Το 1/3 του πλανήτη αντιμετωπίζει έλλειψη νερού λόγω της κακής διαχείρισης των υδάτινων πόρων και της εντεινόμενης χρήσης τους ενώ σύμφωνα με στοιχεία του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας περίπου 1.1 δισεκατομμύριο άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση σε καθαρό και πόσιμο νερό. [2A]

Αρκετές από αυτές τις χώρες βρίσκονται στη Μέση Ανατολή καθώς και στη λεκάνη της Μεσογείου. Οι περιοχές αυτές έχουν σαν κοινό γνώρισμα τις ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και τις έντονες συνθήκες ξηρασίας αυτών των περιοχών. [2A]

Η Ελλάδα είναι μία από τις 7 χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης που αντιμετωπίζει πρόβλημα λειψυδρίας μαζί με την Μάλτα, Ισπανία, Κύπρο, Βέλγιο, Πορτογαλία, Ιταλία, ([2A]). Αυτό συμβαίνει παρά την αφθονία ανανεώσιμων υδάτινων πόρων λόγω της γεωγραφικής κατανομής του υδάτινου δυναμικού (συγκέντρωση στα δυτικά και βόρεια της χώρας), της ανορθολογικής διαχείρισης και των άνυδρων νησιών της. Το 83.8% των συνολικών υδατικών πόρων χρησιμοποιείται στη χώρα μας για άρδευση (έναντι 24% στην Ε.Ε.) με το ποσοστό αυτό να είναι κατά πολύ υψηλότερο στις περιοχές που αντιμετωπίζουν προβλήματα εξάντλησης – υποβάθμισης των υπογείων υδάτων (Θεσσαλία, Ανατ. Πελοπόννησος, Ανατ. Στερεά). [1A]

Αρκετά υδατικά διαμερίσματα της χώρας παρουσιάζουν έλλειψη κατά τους θερινούς μήνες λόγω των αυξημένων αναγκών του γεωργικού αλλά και του τουριστικού τομέα αλλά και της μη ορθής διαχείρισης των υδάτινων πόρων. Το πρόβλημα είναι εντονότερο στα νησιά του Αιγαίου, στη Θεσσαλία, την Ανατολική Πελοπόννησο και την Στερεά Ελλάδα. Η υπερβολική χρήση άριστης ποιότητας πόσιμου νερού που προέρχεται από γεωτρήσεις για άρδευση αποτελεί σπατάλη και υπερεκμετάλλευση δύσκολα ανανεώσιμων πόρων. [1A]

Σύμφωνα με μελέτες στη χώρα μας λειτουργούν περίπου 300000 γεωτρήσεις (35-40% παράνομα) που αποτελούν υπερβολικό αριθμό για τις δυνατότητες των υπεδαφικών υδροφορέων. Η ανεξέλεγκτη εκμετάλλευση έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα που διευκολύνει την εισροή του θαλασσινού νερού προκαλώντας κυρίως την υφαλμύρωση τεράστιων παραθαλάσσιων εκτάσεων σε επίπεδα επικίνδυνα για την πόση και για γεωργικές χρήσεις. [1A]

Εκτός από την υφαλμύρωση μεγάλα προβλήματα ποιότητας του πόσιμου νερού δημιουργεί η ρύπανση των υπόγειων υδάτων με νιτρικά και ο ευτροφισμός (υπέρμετρη αύξηση υδρόβιων φωτοσυνθετικών οργανισμών που προκαλείται από ρύπανση των υδάτινων πόρων από βιομηχανικά, αστικά, αγροτικά λύματα και απορρίμματα) στα επιφανειακά ύδατα. Περίπου 20 περιοχές της χώρας αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα νιτρορύπανσης (Αργολίδα, περιοχές της Θεσσαλίας, κάμπος της Θεσσαλονίκης, Κιλκίς, Πέλλα, Ημαθία, Σέρρες, πεδιάδα Άρτας – Πρέβεζας). Το φαινόμενο του ευτροφισμού εκτιμάται ότι παρουσιάζεται στο 70% των υδάτινων αποθεμάτων των λιμνών της χώρας. Η φυσική απορρύπανση των υπόγειων υδάτων των βεβαρυμμένων περιοχών εκτιμάται ότι απαιτεί τουλάχιστον 20 έτη με παύση των γεωτρήσεων και εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων. [1A]

Υπάρχουν και παράγοντες που επιβαρύνουν την κατάσταση και δεν έχουν να κάνουν με την ανθρώπινη δραστηριότητα. Το μικρό ύψος των βροχοπτώσεων όπως και οι επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες έχουν σαν αποτέλεσμα την μικρή προσφορά νερού. Επίσης η μικρή έκταση των νησιών περιορίζει το νερό που μπορεί να συγκεντρωθεί σε αυτά. Η από κάθε πλευρά προσβολή των νησιών από τη θάλασσα ευνοεί την υπόγεια απορροή αλλά και φαινόμενα υφαλμύρωσης που καταστρέφουν υπόγεια αποθέματα πόσιμου νερού. Η έντονη ηλιοφάνεια έχει σαν αποτέλεσμα να είναι πολύ έντονο το φαινόμενο της εξάτμισης που οδηγεί μεγάλο ποσοστό του βρόχινου νερού να επιστρέφει στην ατμόσφαιρα. [2A]

Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι η λειψυδρία αποτελεί σημαντικό πρόβλημα για τη χώρα μας που επιτάσσει τη λήψη μέτρων αντιμετώπισης της για την

αρμονική διαβίωση στην κοινωνία μας. Για να λυθεί το πρόβλημα της λειψυδρίας στη χώρα μας γίνεται χρήση τριών τρόπων λύσης. Μεταφορά νερού – Κατασκευή Φραγμάτων – Αφαλάτωση. Στις επόμενες παραγράφους θα δοθούν αυτές οι μέθοδοι και τα πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα τους.

1.2. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΝΕΡΟΥ

Η μεταφορά νερού με πλοία αποτελεί μέθοδο που χρησιμοποιείται για μεγάλο πλήθος νησιών για αρκετά χρόνια. Τα νησιά που υδροδοτούνται με πλωτά μέσα είναι η Αμοργός, τα Κουφονήσια, η Κίμωλος, η Ηρακλεία, η Σχοινούσα, η Φολέγανδρος, η Τήνος, η Σίκινος, η Θηρασιά, η Δονούσα, η Μήλος, το Αγαθονήσι, οι Λειψοί, η Μεγίστη, η Νίσυρος, η Πάτμος, η Σύμη, η Χάλκη, η Παλιόνησος και η Ψέριμος. Τα τελευταία χρόνια λόγω της όξυνσης του προβλήματος ακολουθούν αυτή τη λύση και νησιά μεγαλύτερα όπως η Ίος. Η λύση αυτή φαίνεται απλή καθώς δεν απαιτεί ιδιαίτερες υποδομές, παρά δεξαμενές κατάλληλης χωρητικότητας ικανές να δεχτούν την απαιτούμενη ποσότητα νερού για να καλυφθούν οι ανάγκες των κατοίκων.[2Α]

Αν και ακούγεται ως απλή λύση έχει ένα σημαντικό πρόβλημα που είναι το αρκετά υψηλό κόστος του παρεχόμενου νερού. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη και το περιβαλλοντικό κόστος από τα καυσαέρια των πλοίων μεταφοράς του νερού και από τη μόλυνση του θαλασσινού νερού από αυτά τα πλοία. Ακόμα υπάρχουν πολλές σκέψεις και για την καταλληλότητα του παρεχόμενου νερού καθώς αρκετές φορές αμφισβητείται η καταλληλότητα για χρήση του παρεχόμενου νερού από τους τελικούς χρήστες. Επίσης είτε υπάρχει αυξημένη ζήτηση ή υπάρχει αδυναμία προσέγγισης των πλοίων στα λιμάνια των πιο μικρών νησιών και αυτό δυσχεραίνει την όλη κατάσταση. [2Α]

1.3. ΦΡΑΓΜΑΤΑ

Με την κατασκευή φραγμάτων επιτυγχάνεται η εκμετάλλευση του ανάγλυφου του εδάφους των νησιών με τις έντονες κλίσεις και τις υψομετρικές διαφορές που χωρίς την κατασκευή φραγμάτων θα είχε σαν αποτέλεσμα το σύνολο των βροχοπτώσεων να σχημάτιζε χείμαρρους που ανεξέλεγκτα θα κατευθύνονταν προς την θάλασσα χωρίς να αξιοποιούνταν κατάλληλα. [2A]

Χαρακτηριστικά πρέπει να αναφερθεί ότι στη Μύκονο μετά την κατασκευή δύο φραγμάτων στην περιοχή Μαράθι με χωρητικότητα 3 εκατομμύρια και ένα εκατομμύριο κυβικά μέτρα νερού λύθηκε το πρόβλημα της ύδρευσης. [2A]

Το πρόβλημα αυτής της λύσης είναι το υψηλό κόστος κατασκευής, η απαίτηση πληθώρας υποδομών και η σημαντική αλλοίωση που προκαλεί στο περιβάλλον καθώς ως μόνιμη και βαριά κατασκευή προκαλεί όχληση. [2A]

1.4. ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ

Η αφαλάτωση είναι η επεξεργασία του νερού μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η αφαίρεση αλάτων από αλατούχα ύδατα τα οποία μπορεί είτε να είναι το αλμυρό νερό της θάλασσας ή υφάλμυρο νερό από κάποια πηγή. Έτσι λαμβάνεται πόσιμο νερό ή νερό για άρδευση. Η ποιότητα του παραγόμενου νερού όσον αφορά την συγκέντρωση σε άλατα έχει να κάνει με την προέλευση του νερού και με την μέθοδο αφαλάτωσης που χρησιμοποιείται. [2A]

Η διαδικασία αφαλάτωσης μέσω εξάτμισης ήταν γνωστή στην Αρχαία Ελλάδα όπου οι ναυτικοί χρησιμοποιούσαν στα μεγάλα ταξίδια τους μικρές συσκευές απόσταξης θαλασσινού νερού ενώ το 350 π.Χ είχε μελετηθεί πειραματικά από τον Αριστοτέλη τέτοια διάταξη. Τον 16^ο αιώνα οι Ευρωπαίοι Θαλασσοπόροι μεταφέρουν στα πλοία τους μονάδες αφαλάτωσης που χρησιμοποιούνται μόνο σε περίπτωση ανάγκης. Το 1850 ο Αμερικανός Μηχανικός Norbert Rillieux αναπτύσσει

μεθόδους απόσταξης της ζάχαρης που ελαττώνουν τις απαιτήσεις ενέργειας κατά 80%, οι οποίες στα τέλη του 19^{ου} αιώνα αρχίζουν να εφαρμόζονται και στην αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Το 1950 η Αμερικανική Κυβέρνηση δημιουργεί ειδική υπηρεσία (OSW – Office of Saline Water) και χρηματοδοτεί τις έρευνες για την αφαλάτωση με ταυτόχρονη πρώτη εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων θερμικής αφαλάτωσης σε χώρες της Μέσης Ανατολής. [1A]

Το 1960 ξεκινούν στο πανεπιστήμιο UCLA της Καλιφόρνια τα πρώτα πειράματα στην αντίστροφη όσμωση με την κατασκευή των πρώτων μεμβρανών από τους ερευνητές Sydney Loeb και Shrinivasa Sourirajan. Το 1965 κατασκευάστηκε η πρώτη πειραματική μονάδα αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού με την μέθοδο της Αντίστροφης Όσμωσης. [1A]

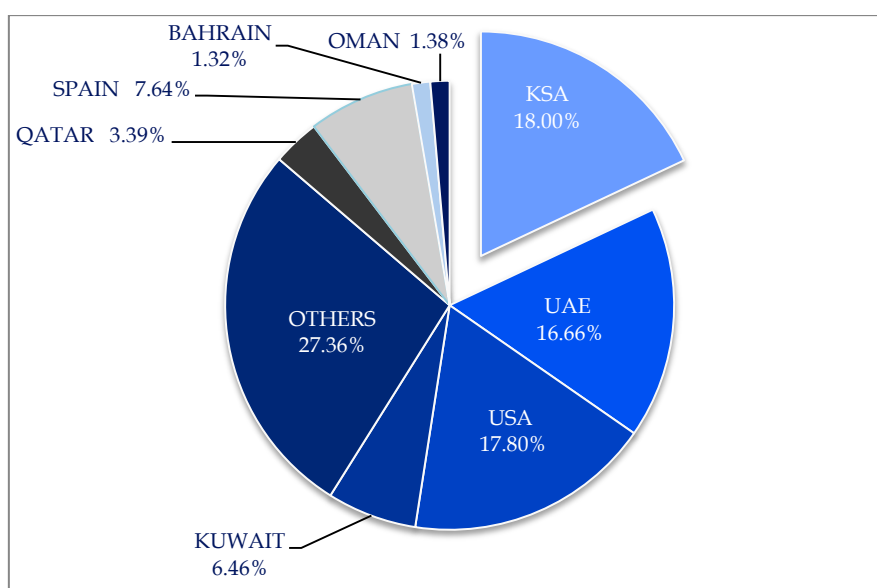
Στα τέλη της δεκαετίας του 70 ο ερευνητής John Cadotte συνεργάτης του America's Midwest Research Institute και της Film Tec Corporation εφευρίσκει μια εξαιρετικά βελτιωμένη μεμβράνη της οποίας η χρήση γενικεύεται τα επόμενα χρόνια. Την περίοδο 1990 – 2003 πραγματοποιήθηκε σημαντική τεχνολογική πρόοδος στην αντίστροφη όσμωση με αποτέλεσμα τη βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας, της ποιότητας του νερού και τη μείωση του κόστους αφαλάτωσης κατά 3 φορές. [1A]

Το 2006 σε μελέτη που δημοσιεύθηκε στο περιοδικό Science γνωστοποιήθηκε η επιτυχής κατασκευή νανοσωλήνων άνθρακα (carbon - nanotube membrane) που μειώνουν το κόστος παραγωγής κατά 3 με 4 φορές λόγω της πολύ μικρότερης απαιτούμενης πίεσης. Η μέθοδος είναι ακόμα σε πειραματικό στάδιο και σύμφωνα με εκτιμήσεις θα μπορέσει να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανική κλίμακα τα επόμενα 6 με 8 χρόνια. [1A]

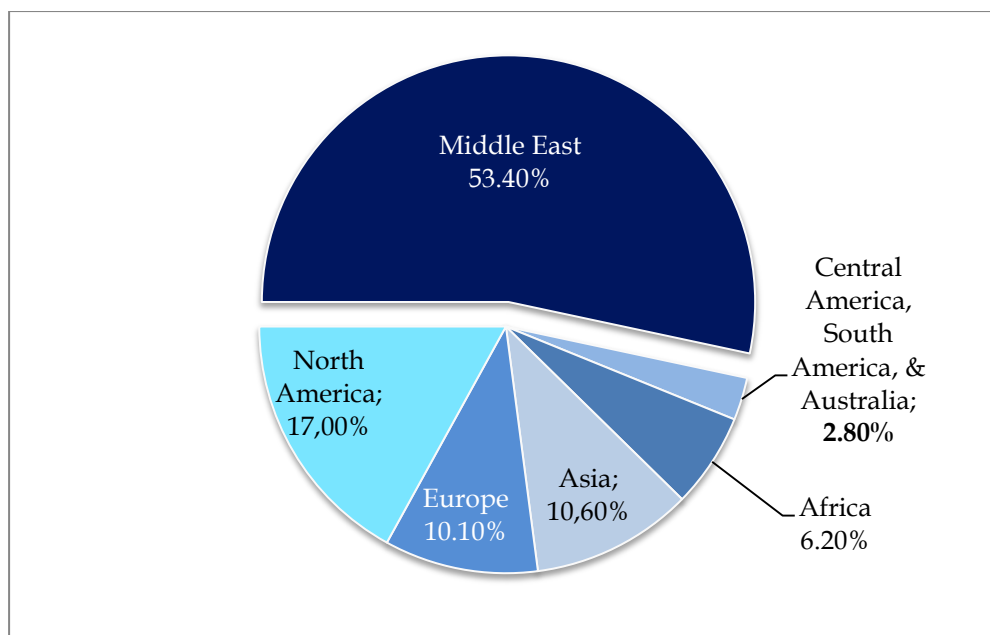
Τις τελευταίες δεκαετίες η παγκόσμια δυναμικότητα αφαλάτωσης παρουσιάζει σημαντική ανάπτυξη (8% μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης την περίοδο 1980 – 2009) η οποία οφείλεται κυρίως στην εξέλιξη των τεχνολογιών της αντίστροφης όσμωσης και στην αύξηση των αναγκών σε πόσιμο νερό. Την εποχή μας η εγκατεστημένη δυναμικότητα υπολογίζεται σε 59,9 εκ. m³/ημέρα, ενώ βρίσκονται σε φάση κατασκευής άλλα 9,1 εκ.m³/ημέρα. Οι εγκαταστάσεις

αφαλάτωσης που βρίσκονται στο παρόν σε λειτουργία υπερβαίνουν τις 14.000 (ενώ στο τέλος του 2008 ήταν 13.869 σύμφωνα με την IDA). [1A]

Περισσότερο από το μισό της παγκόσμιας δυναμικότητας βρίσκεται στις χώρες της Μέσης Ανατολής και της Βόρειας Αφρικής οι οποίες καλύπτουν το σύνολο ή πολύ σημαντικό τμήμα των αναγκών τους κυρίως με θερμική αφαλάτωση. Άλλες χώρες όπως οι ΗΠΑ, η Ισπανία, η Κίνα, η Ιαπωνία, η Αυστραλία, το Ισραήλ και η Κύπρος χρησιμοποιούν κυρίως μεθόδους μεμβρανών. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι 10 πρώτες χώρες ελέγχουν το 87,5% της παγκόσμιας δυναμικότητας. Επειδή υπάρχουν υψηλοί ρυθμοί ανάπτυξης, σταθερά περιθώρια κέρδους και ιδιαίτερα θετικές προοπτικές ο κλάδος της αφαλάτωσης έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον πολυεθνικών εταιριών από την Ευρώπη, τις ΗΠΑ, τη Ν. Κορέα, την Ιαπωνία, την Κίνα και το Ισραήλ. Γενικά οι προοπτικές του κλάδου αφαλάτωσης είναι ιδιαίτερα θετικές για τα επόμενα χρόνια. Σύμφωνα με τις προβλέψεις της Global Water Intelligence η παγκόσμια δυναμικότητα αφαλάτωσης αναμένεται να υπερδιπλασιαστεί μέχρι το 2016 (από 52 εκ. m³ / ημέρα το 2008 σε 107 εκ. m³ / ημέρα το 2016) ενώ οι επενδύσεις που θα απαιτηθούν θα υπερβούν τα 64 δισεκατομμύρια δολάρια. Η ετήσια επενδυτική δαπάνη από 2.4 δισεκατομμύρια δολάρια το 2008 αναμένεται να υπερβεί τα 8.4 δισεκατομμύρια δολάρια το 2016 (μέσος ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης 19%). [1A]



ΣΧΗΜΑ 1.4.1: ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΖΗΤΗΣΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ, ([3A])



ΣΧΗΜΑ 1.4.2: ΣΥΝΟΛΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ, ([3A])

Στην Ελλάδα οι πρώτες προσπάθειες στην αφαλάτωση έγιναν στα τέλη της δεκαετίας του 60 και αφορούσαν μικρές μονάδες ηλιακής απόσταξης. Τα επόμενα χρόνια δημιουργήθηκαν εγκαταστάσεις ηλιακής απόσταξης για ύδρευση στη Νίσυρο, Κίμωλο, Κεφαλονιά, Ιθάκη, Πάτμο, Καστελόριζο, Σύμη και Αίγινα αλλά οι περισσότερες εγκαταλείφθηκαν λόγω προβλημάτων συντήρησης ή/και λειτουργίας. Η πιο αξιόλογη εφαρμογή ήταν της Πάτμου με επιφάνεια εξάτμισης 8,665 m² και μέση παραγωγική ικανότητα 25 m³/ημέρα. [1A]

Μετά το 1980 η εφαρμογή της αφαλάτωσης για παραγωγή νερού ύδρευσης στηρίχθηκε σχεδόν αποκλειστικά στην τεχνολογία της αντίστροφης όσμωσης η οποία έγινε πιο αποδοτική και συμφέρουσα για τις Ελληνικές συνθήκες. Όμως σημειώνεται αξιόλογη πρόοδος μετά το 1990 κυρίως λόγω της αύξησης της ζήτησης για ύδρευση στα άνυδρα νησιά που προκλήθηκε από την αυξημένη τουριστική δραστηριότητα. [1A]

Το 2008 η συνολική κατανάλωση των νησιών του Αιγαίου ήταν περίπου 166 εκ m³ ετησίως που καλύπτονταν κατά 82,6 % με υπόγεια ύδατα, κατά 4,4 % με ταμειυτήρες, κατά 4,1 % με αφαλάτωση και κατά 1,4 % με μεταφορά νερού από

άλλες περιοχές, ενώ δεν καλύπτονταν συνολικό ετήσιο έλλειμμα περίπου 20 εκ. m³. [1A]

Το 2009 το υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας Αιγαίου και Νησιώτικης Πολιτικής ανακοίνωσε ένα πρόγραμμα για τη δημιουργία μονάδων αφαλάτωσης σε 13 νησιά των Κυκλάδων και της Δωδεκανήσου, (Αμοργός, Δονούσα, Κουφονήσια, Ηράκλεια, Θηρασιά, Σίκινος, Φολέγανδρος, Μεγίστη, Χάλκη, Λειψοί, Αγαθονήσι, Αρκειοί, Ψέριμος) ενώ άλλα 5 μικρά νησιά θα έπαιρναν νερό από διπλανά τους μεγαλύτερα νησιά. Το πρόγραμμα θα ήταν αυτοχρηματοδοτούμενο, τα οικόπεδα θα παραχωρούνταν από τους Δήμους, ενώ το υπουργείο αναλάμβανε να αγοράζει για μια 10ετία μία εγγυημένη ποσότητα πόσιμου νερού, σε τιμή η οποία αντιστοιχούσε στο 1/3 της τιμής του νερού που μεταφερόταν με υδροφόρα πλοία. Μετά την παρέλευση της 10ετίας οι εγκαταστάσεις θα παραχωρούνταν στους δήμους. [1A]

Το 2009 λειτουργούσαν στη χώρα μας 50 μονάδες αφαλάτωσης με συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα περίπου 35 χιλιάδες m³ / ημέρα που εξυπηρετούσαν την ύδρευση δήμων και κοινοτήτων, ενώ υπήρχαν και αρκετές εκατοντάδες μικρότερες μονάδες ιδιωτικής χρήσης (ξενοδοχεία, κατοικίες, βιομηχανίες κλπ). Σύμφωνα με εκτιμήσεις η συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού υπερβαίνει τα 50 χιλ. m³/ ημέρα και υφάλμυρου τα 100 χιλ. m³/ ημέρα με τις σημαντικότερες μονάδες να βρίσκονται στη Σύρο τη Μύκονο και τη Χίο. [1A]

Για τη χώρα μας σε μία πρώτη φάση η αφαλάτωση θα έπρεπε να εξετασθεί σαν η μόνη αποδεκτή λύση που θα υποκαθιστούσε τη μεταφορά νερού στα άνυδρα νησιά. Το 2008 εκτιμάται ότι μεταφέρθηκαν περίπου 1.600.000 m³ με μέσο κόστος μεταφοράς 8,28 ευρώ το m³. Σε 14 νησιά των Κυκλάδων μεταφέρθηκαν 570.000 m³ και σε 20 των Δωδεκανήσων 1.000.000 m³ με συνολικό κόστος 13 εκ. ευρώ. Το ποσό αυτό επαρκούσε για την κατασκευή μικρών μονάδων αφαλάτωσης δυναμικότητας τουλάχιστον 3.000 m³/ημέρα (>1.000.000 m³ ετησίως) με κόστος παραγωγής ανά m³ νερού 2 με 3 φορές χαμηλότερο από το κόστος μεταφοράς. Γνωρίζοντας ότι οι μεγαλύτερες ανάγκες εμφανίζονται στους θερινούς μήνες και ότι

για αυτό απαιτείται μεγαλύτερη ικανότητα αφαλάτωσης τουλάχιστον 20% σε ετήσια βάση και εγκαταστάσεις αποθήκευσης, τα προβλήματα των άνυδρων νησιών μπορούν να επιλυθούν οριστικά χωρίς πρόσθετο κόστος σε μία περίοδο 3 με 4 έτη.

[1A]

Για το σύνολο των νησιών του Αιγαίου εκτιμάται ότι οι ανάγκες που θεωρητικά θα μπορούσαν να καλυφθούν από την αφαλάτωση θα απαιτούσαν συνολική ημερήσια δυναμικότητα μεγαλύτερη από 55.000 m³ κατανεμημένη σε αρκετές μικρές μονάδες. [1A]

Λόγω των ειδικών συνθηκών που επικρατούν σε μικρά νησιά και σε πολλούς μικρούς ή απομονωμένους νησιώτικους οικισμούς (υψηλό κόστος ηλεκτρισμού, έντονη εποχικότητα στην κατανάλωση, έλλειψη υποδομών αποθήκευσης και διανομής), είναι εφικτή η αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού κυρίως μέσω πλωτών αιολικών μονάδων αφαλάτωσης. Ήδη λειτουργεί με επιτυχία η πρώτη πλωτή μονάδα αφαλάτωσης στην Ηρακλειά. Η μονάδα αυτή που είναι πρωτοποριακή σε παγκόσμιο επίπεδο είναι ελληνικού σχεδιασμού και κατασκευής με ανάδοχο το Πανεπιστήμιο Αιγαίου και τη συμμετοχή φορέων και εταιριών (Κ.Α.Π.Ε., Ελληνικός Νηογνώμονας Α.Ε., Περιφέρεια Νοτίου Αιγαίου, ΤΕΧΝΑΒΑ Α.Ε., ΡΕΦΛΕΞΙΟΝ ΕΠΕ, ALGOSYSTEMS Α.Ε., LAMDA Shipyards Α.Ε., ΕΠΙΣΕΥ, Ι. ΚΟΥΙΜΑΝΗΣ & Συν). Χρηματοδοτήθηκε από το ΕΠΑΝ (Συνολικό κόστος 2.870.000 ευρώ), κατασκευάστηκε στα Ναυπηγεία Ελευσίνας και κατόπιν μεταφέρθηκε με ρυμουλκό στην Ηρακλειά όπου και αγκυροβόλησε. Εκτιμάται ότι οι επόμενες μονάδες που θα κατασκευαστούν θα έχουν αρκετά μικρότερο κόστος (περίπου 700.000 ευρώ) λόγω των μικρότερων δαπανών έρευνας και ανάπτυξης και λόγω της αξιοποίησης της τεχνογνωσίας που έχει ήδη αποκτηθεί. [1A]

Εκτός από την κάλυψη της ύδρευσης ορισμένων μικρών νησιών και την ευελιξία που έχουν οι πλωτές αιολικές μονάδες αφαλάτωσης, υπάρχει και ένα αρκετά μεγαλύτερο όφελος που σχετίζεται με την ανάπτυξη της χώρας μας και την βελτίωση της ανταγωνιστικότητας της. Η αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων που διαθέτει η χώρα μας για την ανάπτυξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας (σημαντικές εγχώριες ανάγκες, ύπαρξη κατάλληλου επιστημονικού δυναμικού, ειδικές συνθήκες

που επικρατούν στο Αιγαίο, επιδοτήσεις κλπ) θα επιτρέψει τη δημιουργία ενός βιομηχανικού υποκλάδου με εξαιρετικές προοπτικές (offshore πλωτά αιολικά πάρκα, εξαγωγές πλωτών μονάδων αφαλάτωσης σε άλλες νησιώτικες χώρες ή σε αναπτυσσόμενες περιοχές που αντιμετωπίζουν προβλήματα ποιότητας του πόσιμου νερού). Η πρόσφατη εμπειρία από την ανάπτυξη της Αιολικής Ενέργειας στη Δανία, των ΑΠΕ στη Γερμανία και στην Ισπανία και της αφαλάτωσης σε χώρες όπως το Ισραήλ και την Ισπανία δείχνει ότι τα οφέλη για τη βιομηχανική δραστηριότητα ήταν πολλαπλάσια αυτών που προέκυψαν από την απλή κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρισμό ή πόσιμο νερό. Τα πλεονεκτήματα αξιοποιήθηκαν για τη δημιουργία ισχυρών βιομηχανικών κλάδων παγκόσμιας εμβέλειας με πολύ θετικές επιπτώσεις στην απασχόληση, τις εξαγωγές την έρευνα και την ανάπτυξη. [1A]

Λόγω των προβλημάτων της υφαλμύρωσης και της κακής ποιότητας του νερού που αντιμετωπίζουν και οι παράκτιες περιοχές, υπάρχουν ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη της αφαλάτωσης και σε ορισμένες πόλεις ή και οικισμούς όπου η μεταφορά νερού από την ενδοχώρα είναι ασύμφορη ή και δύσκολη λόγω των συνθηκών της περιοχής. Το μέγεθος των αναγκών αυτών είναι δύσκολο να εκτιμηθεί και εκτιμούταν ότι την περίοδο 2009 - 2014 ήταν της τάξης των 200-400.000 m³ ημερησίως. Επίσης σημαντική ζήτηση νερού αφαλάτωσης προβλέπεται από μεγάλα ξενοδοχειακά συγκροτήματα ή και εγκαταστάσεις γκολφ που θα δημιουργηθούν σε άνυδρες περιοχές (Κρήτη, νησιά). [1A]

Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι η αφαλάτωση αποτελεί έναν κλάδο ταχύτατα αναπτυσσόμενο και πολλά υποσχόμενο σε ότι αφορά τη κάλυψη των αναγκών της χώρας σε ανάγκες πόσιμου νερού ενώ επιπλέον η κατάλληλη αξιοποίηση της θα επιτύχει θετικές επιπτώσεις στην απασχόληση, την έρευνα και την ανάπτυξη.

Η διαδικασία της αφαλάτωσης μπορεί να γίνει με πολλές μεθόδους. Η επιλογή της κάθε μεθόδου εξαρτάται από την τοποθεσία, τις ειδικές καταστάσεις της κάθε περιοχής, τη διαθεσιμότητα της ενέργειας, την προέλευση του νερού (αλμυρό ή υφάλμυρο) κλπ. Δεν έχει βγει μέχρι τώρα ένα συμπέρασμα για το ποια μέθοδος αφαλάτωσης είναι η καλύτερη. Η αξιολόγηση της κάθε μεθόδου μπορεί να γίνει μόνο με βάση τις απαιτήσεις του κάθε προβλήματος. Η καλύτερη μέθοδος

είναι πάντα αυτή που παράγει αξιόπιστα την απαιτούμενη ποσότητα νερού στην ζητούμενη ποιότητα και με ένα αποδεκτό κόστος. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι περισσότερες μέθοδοι απαιτούν μια προεργασία με χημικές ουσίες στο νερό που θα χρησιμοποιηθεί ώστε να μη δημιουργηθούν άλατα, διάβρωση και δυσλειτουργία του εξοπλισμού. Επίσης σε κάποιες περιπτώσεις απαιτείται και χημική επεξεργασία του νερού και στο τελικό προϊόν, ([2Α]). Στο επόμενο Κεφάλαιο θα δοθεί η περιγραφή των κυριότερων μεθόδων αφαλάτωσης όπως αυτές εφαρμόζονται σήμερα όπως και τα συγκριτικά πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ² ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μέθοδοι αφαλάτωσης που χρησιμοποιούνται στην εποχή μας κυρίως κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες: στις μεθόδους εξάτμισης και στις μεθόδους μεμβρανών. Υπάρχουν επίσης άλλες μέθοδοι που βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο ή δεν κρίνονται ακόμα συμφέρουσες από οικονομική άποψη. Οι μέθοδοι εξάτμισης χρησιμοποιούνται σήμερα μόνο στις πετρελαιοπαραγωγούς χώρες της Μέσης Ανατολής που έχουν άφθονους ενεργειακούς πόρους ενώ στις υπόλοιπες χώρες χρησιμοποιείται κυρίως η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης που θεωρείται ως η πιο οικονομική, ([1Α]). Ονομαστικά οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι:

- Με απλή ή πολλών βαθμίδων απόσταξη (MED)
- Με πολυβάθμια ακαριαία εξάτμιση (MSF)
- Συμπύεση ατμού (VC)
- Με ηλιακή Εξάτμιση
- Με ηλεκτροδιάλυση (ED)
- Με υπερδιήθηση (UF)
- Με μικροδιήθηση

² Η ύλη αυτού του κεφαλαίου προέρχεται από την ακόλουθη βιβλιογραφία:

1. Δρ. Δαγκαλίδης Αθανάσιος, « Αφαλάτωση Νερού», Κλαδική Μελέτη, Ιανουάριος 2009, Τράπεζα Πειραιώς
2. Πασίσης Β. Ιωάννης, «Αφαλάτωση νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας», Μεταπτυχιακή εργασία υποβληθείσα στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών για το πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών «ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ», Αθήνα 2011.
3. Σαχτούρη Δ. Καλλιόπη, «Μελέτη σκοπιμότητας μονάδας αφαλάτωσης με αιολική ενέργεια», Πτυχιακή εργασία υποβληθείσα στο Τ.Ε.Ι. Κρήτης στη Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολογίας, Ηράκλειο, Ιούνιος 2008.
4. Gregory P. Thiel, "Entropy Generation Minimization of a Heat and Mass Exchanger for Use in a Humidification – Dehumidification Desalination System", MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, JUNE 2012

- Με γεωθερμία
- Με αντίστροφη όσμωση (RO)
- Με ύγρανση-αφύγρανση αέριου ρεύματος (HDH)

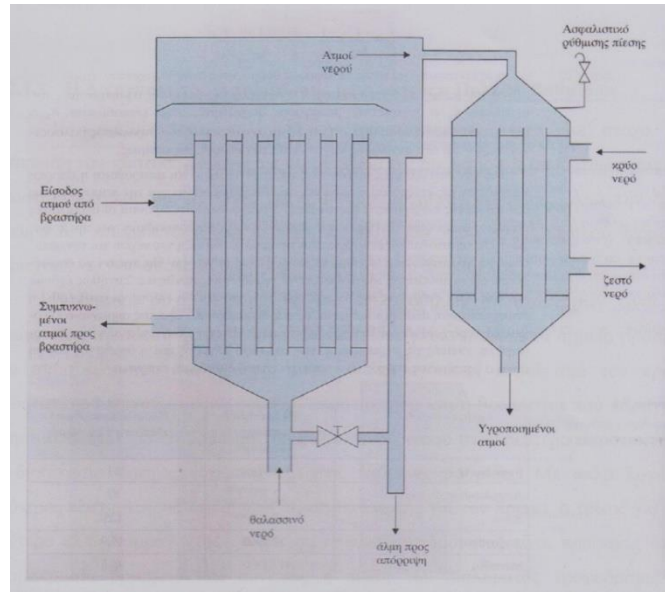
Οι διαφορετικές αυτές μέθοδοι – τεχνολογίες και οι τρόποι λειτουργίας που εφαρμόζουν θα παρουσιαστούν στις επόμενες παραγράφους.

2.2. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΑΠΛΗ Η ΠΟΛΛΩΝ ΒΑΘΜΙΔΩΝ ΑΠΟΣΤΑΞΗ

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στο γεγονός ότι η θέρμανση του θαλασσινού νερού ή του υφάλμυρου νερού εξαερώνει το νερό ενώ τα εν διαλύσει στερεά παραμένουν αμετάβλητα στο υπόλοιπο διάλυμα. Αυτό συμβαίνει όταν η θερμοκρασία της διεργασίας της απόσταξης δεν υπερβαίνει τους 300⁰C. Για την εκτέλεση της διεργασίας της απόσταξης είναι απαραίτητη η ύπαρξη κάποιας πηγής ενέργειας ή καυσίμου. Η απλή απόσταξη χρησιμοποιείται σε εκείνες τις περιπτώσεις που το μικρό μέγεθος και η συμπαγής μορφή αποτελούν το ζητούμενο στόχο ενώ η διαθέσιμη ενέργεια είναι χαμηλού κόστους. [4A]

Η διεργασία που λαμβάνει χώρα στην απλή απόσταξη έχει ως εξής:

Το θαλασινό ή το υφάλμυρο νερό θερμαίνεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας από υπέρθερμο ή υψηλής πίεσης κορεσμένο ατμό σε θερμοκρασία που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία βρασμού του για την επικρατούσα πίεση του νερού, οπότε οι ατμοί του ανέρχονται σε αποστακτική στήλη και συμπυκνώνονται σε τελικό προϊόν νερό απαλλαγμένο από άλατα με τη χρήση ενός συμπυκνωτή και διατίθεται μετά από τελική επεξεργασία προς κατανάλωση. [4A]



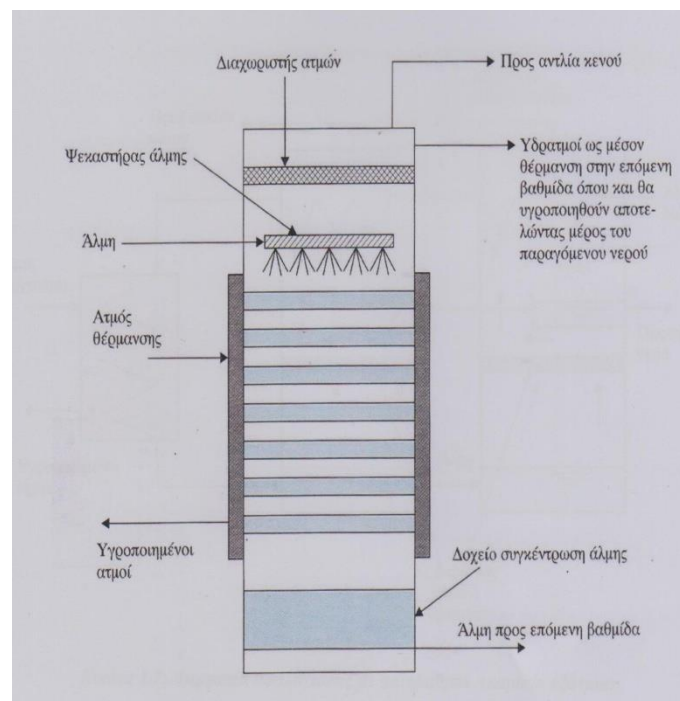
ΣΧΗΜΑ 2.2.1: ΑΠΛΗ ΒΑΘΜΙΔΑ ΑΠΟΣΤΑΞΗΣ, ([4A])

Η διεργασία διαφέρει στην απόσταξη πολλών βαθμίδων. Η βασική αρχή λειτουργίας των πολυβάθμιων αποστακτήρων είναι ότι μειώνοντας την πίεση λειτουργίας κάθε βαθμίδας μειώνεται και το σημείο βρασμού του αποσταζόμενου διαλύματος. Έτσι οι παραγόμενοι ατμοί από τον πρώτο αποστακτήρα ψύχονται στον 2^ο αποστακτήρα και η παραγόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για το βράσιμο του θαλασσινού νερού στον 2^ο αποστακτήρα. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται και στις επόμενες βαθμίδες. Δηλαδή ο 2^{ος} εξατμιστήρας λειτουργεί σαν συμπυκνωτής για τον 1^ο , ο 3^{ος} για τον 2^ο κλπ. Είναι προφανές ότι η πίεση του διαλύματος τροφοδοσίας θα μειώνεται συνεχώς. Η παραγόμενη άλμη από την 1^η βαθμίδα που βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία αποτελεί το διάλυμα τροφοδοσίας στη 2^η βαθμίδα κλπ. Με αυτό τον τρόπο το διάλυμα τροφοδοσίας δεν απαιτεί προθέρμανση μέχρι το σημείο ζέσης του. Έχουμε τη διάκριση σε τρεις τρόπους εγκατάστασης πολυβάθμιας απόσταξης. Στον 1^ο τρόπο οι ατμοί και η άλμη έχουν τροφοδοσία προς την ίδια κατεύθυνση, στον 2^ο τρόπο έχουν σε αντίθετη κατεύθυνση ενώ στον 3^ο τρόπο έχουμε παράλληλη τροφοδοσία. [4A]

Η πίεση σε όλους τους αποστακτήρες είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής και έτσι απαιτούνται αντλίες κενού. Ακόμα θα πρέπει να χρησιμοποιούνται αντλίες που θα μεταφέρουν το παραγόμενο νερό στην κατανάλωση αλλά και την άλμη όπως και όλα τα διακινούμενα ρευστά. Επίσης το διάλυμα τροφοδοσίας δεν θα πρέπει να

έχει μη υγροποιούμενα αέρια. Σε διαφορετική περίπτωση τα αέρια θα συσσωρεύονται στους αποστακτήρες αυξάνοντας την πίεση και τελικά θα σταματούν το βρασμό. Έτσι απαιτείται η χρήση κατάλληλης συστοιχίας αντλιών κενού. Συμπερασματικά σε κάθε βαθμίδα θα περιλαμβάνονται:[4A]

- Ο εναλλάκτης θερμότητας
- Ο διαχωριστής των ατμών
- Τα ακροφύσια ψεκασμού της άλμης
- Το δοχείο συγκέντρωσης της άλμης



ΣΧΗΜΑ 2.2.2: ΒΑΘΜΙΔΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑΣ ΑΠΟΣΤΑΞΗΣ, ([4A])

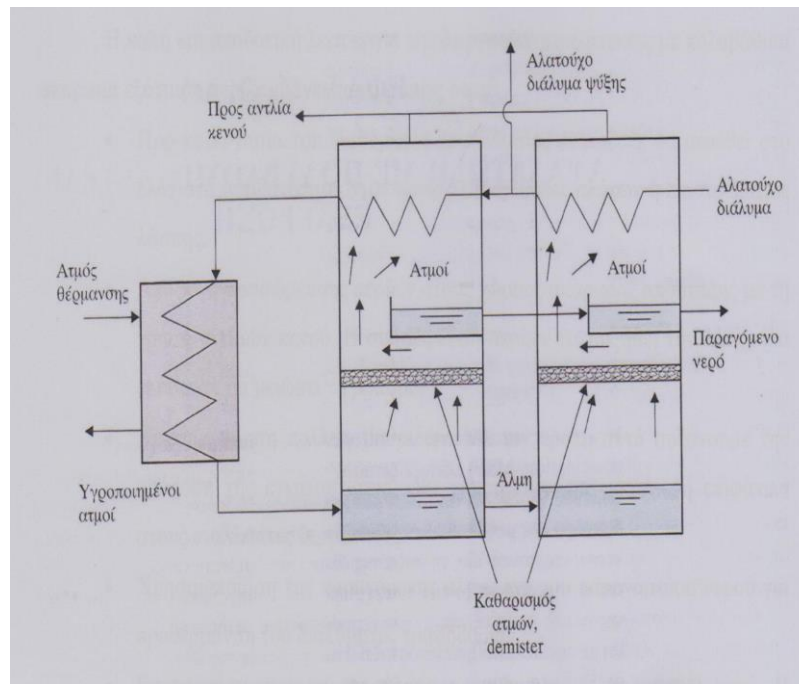


ΦΩΤ. 2.2.1: ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

2.3. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑ ΑΚΑΡΙΑΙΑ ΕΞΑΤΜΙΣΗ

Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται σε εγκαταστάσεις μεγάλης παραγωγής αφαλατωμένου νερού και αποτελεί μια καινοτόμο θεώρηση της απόσταξης. Η βασική διαφορά αυτής της μεθόδου είναι ότι η δημιουργία των ατμών του παραγόμενου νερού γίνεται σε όλη τη μάζα της άλμης και όχι στην επιφάνεια των εναλλακτών όπως στην απόσταξη. Η θέρμανση της άλμης και η εξάτμιση του νερού γίνονται σε διαφορετικά δοχεία, σε αντίθεση με την πολυβάθμια απόσταξη όπου γίνονται στο ίδιο δοχείο. Με αυτό τον τρόπο στην πολυβάθμια ακαριαία εξάτμιση το αλμυρό νερό θερμαίνεται με έναν εναλλάκτη θερμότητας κάτω από πίεση ώστε να αποφεύγεται ο βρασμός του και κατόπιν διοχετεύεται σε ένα δοχείο χαμηλής πίεσης όπου και λαμβάνει χώρα η εξάτμιση του νερού. [4A]

Η διεργασία της αφαλάτωσης με πολυβάθμια ακαριαία εξάτμιση δίνεται παραστατικά στο επόμενο σχήμα:



ΣΧΗΜΑ 2.3.1: ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑ ΑΚΑΡΙΑΙΑ ΕΞΑΤΜΙΣΗ, ([4A])

Το νερό τροφοδοσίας θαλασσινό ή υφάλμυρο με τη βοήθεια ενός εναλλάκτη θερμότητας που χρησιμοποιεί θερμούς ατμούς για μέσο θέρμανσης, θερμαίνεται σε κατάλληλη θερμοκρασία. Το νερό τροφοδοσίας για λόγους οικονομίας έχει προθερμανθεί από τους παραγόμενους ατμούς. Η πίεση παραμένει λίγο μεγαλύτερη από την τάση των ατμών για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία. Στη συνέχεια το θερμό διάλυμα τροφοδοσίας εισέρχεται σε δοχείο όπου η επικρατούσα πίεση είναι μικρότερη από εκείνη του εναλλάκτη. Έτσι το διάλυμα αρχίζει να εξατμίζεται ακαριαία από όλη τη μάζα του, μέχρι η πίεση του να γίνει ίση με την τάση κορεσμένων ατμών του διαλύματος. Κατά τη διάρκεια της εξάτμισης απαιτείται σημαντικό ποσό θερμότητας το οποίο και δίνεται από το θερμό διάλυμα τροφοδοσίας το οποίο και ψύχεται. Αποτέλεσμα της ψύξης είναι η μείωση της τάσης των ατμών του ώστε τελικά να έχουμε παύση της εξάτμισης. Οι παραγόμενοι ατμοί υγροποιούνται σε συμπυκνωτή ο οποίος χρησιμοποιεί ως μέσο ψύξης το εισερχόμενο διάλυμα τροφοδοσίας για λόγους οικονομίας κατανάλωσης ενέργειας. Η παραγόμενη άλμη διοχετεύεται στο επόμενο στάδιο όπου και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία. [4A]

Ένας τρόπος για την θέρμανση του θαλασσινού νερού κατά αυτή τη διαδικασία είναι με τη χρήση συμπαραγωγής. Η αποβαλλόμενη ενέργεια από ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας χρησιμοποιείται για να παράγει την απαιτούμενη θερμότητα που χρειάζεται η διαδικασία της αφαλάτωσης ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνεται και η ψύξη του εργοστασίου παραγωγής ενέργειας χωρίς να έχουμε αποβολή της θερμότητας στο περιβάλλον με ζημιολόγο πιθανώς τρόπο. Επίσης με αυτό τον τρόπο βελτιώνονται και τα οικονομικά δεδομένα της εγκατάστασης καθώς η συμπαραγωγή μειώνει την απαιτούμενη ενέργεια κατά 50-66%. [2A]

Η καλή και αποδοτική λειτουργία της διεργασίας αφαλάτωσης με πολυβάθμια ακαριαία εξάτμιση περιλαμβάνει παρεμβάσεις όπως:[4A]

- Προ – κατεργασία του διαλύματος τροφοδοσίας έτσι ώστε να μειωθεί στο ελάχιστο η πιθανότητα επικαθίσεως αλάτων ή επιστρώματος λάσπης.
- Αποφυγή συσσώρευσης αερίων στους χώρους ακαριαίας απόσταξης με τη χρήση αντλιών κενού. Η συσσώρευση αερίων θα αυξήσει την πίεση και θα μειώσει την εξάτμιση.
- Χρησιμοποίηση πολλών βαθμίδων. Με τον τρόπο αυτό αυξάνουμε την απόδοση της εγκατάστασης ενώ χρησιμοποιείται και μικρότερη επιφάνεια στους εναλλάκτες θερμότητας.
- Χρησιμοποίηση της παραγόμενης άλμης και του παραγόμενου νερού για προθέρμανση του διαλύματος τροφοδοσίας.
- Επαναχρησιμοποίηση της άλμης σε ανάμιξη με θαλασσινό νερό. Η ενέργεια αυτή έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του κόστους προεργασίας και τη μείωση της δαπάνης ενέργειας καθώς το θερμικό περιεχόμενο της άλμης δεν απορρίπτεται.



ΦΩΤ 2.3.1: ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑΣ ΑΚΑΡΙΑΙΑΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ

2.4. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΤΟΥ ΑΤΜΟΥ

Κατά τη μέθοδο της συμπίεσης του ατμού έχουμε απόσταξη κατά την οποία ο ατμός που εξατμίζεται από το θαλασσινό ή το υφάλμυρο νερό λαμβάνεται από μία διάταξη θερμότητας που τον συμπιέζει. Καθώς η συμπίεση του ατμού αυξάνει τόσο την πίεση όσο και την θερμοκρασία του μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την αποβαλλόμενη θερμότητα που προκύπτει από τη συμπίεση για να παραχθεί επιπλέον ατμός.[2Α]

Η συμπίεση του ατμού μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Ο 1^{ος} είναι με τη χρήση ενός συστήματος εκβολής που λειτουργεί με ατμό σε πίεση από εξωτερική πηγή ώστε να ανακυκλώνει τον ατμό κατά την διαδικασία της αφαλάτωσης. Ο 2^{ος} είναι με την συμπίεση του ατμού μέσω μιας μηχανικής διάταξης η οποία τις περισσότερες φορές λειτουργεί με ηλεκτρισμό.[2Α]

Η τεχνολογία της συμπίεσης ατμού βασίζεται σε μια απλή αρχή. Σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους αφαλάτωσης όπου η θερμότητα μεταφέρεται άμεσα στο νερό τροφοδοσίας, εδώ φτάνουμε σε υψηλότερες θερμοκρασίες με αύξηση της

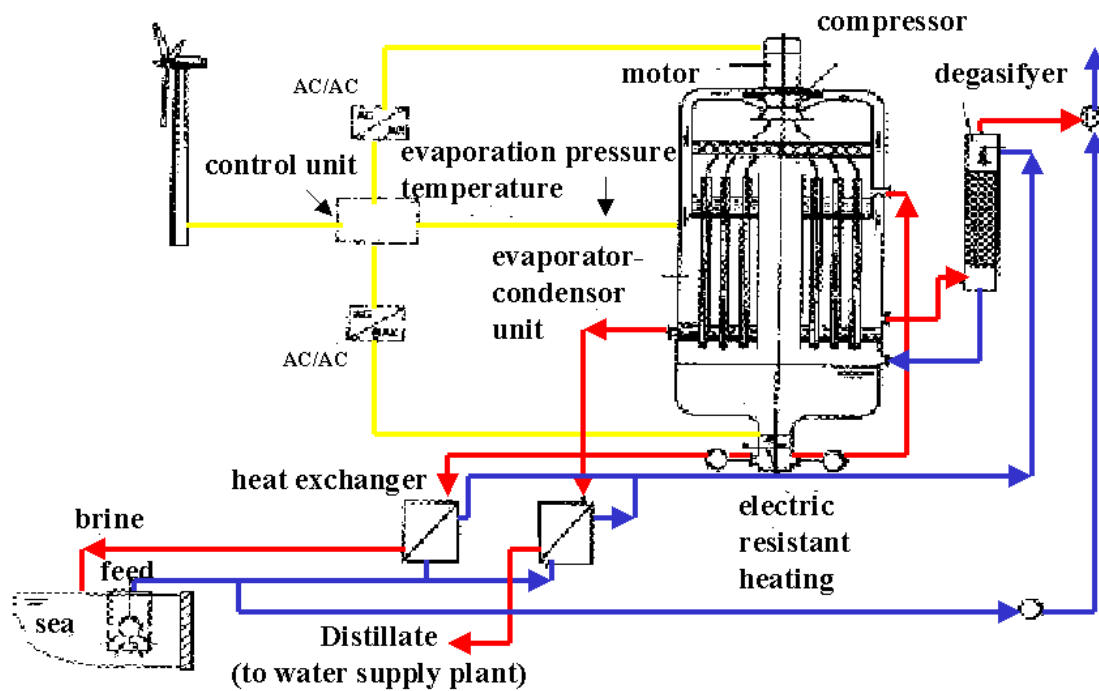
πίεσης του συστήματος. Ένα συνηθισμένο τέτοιο σύστημα αποτελείται από έναν συμπιεστή, έναν εξατμιστή και έναν εναλλάκτη θερμότητας.[2A]

Μέρος του ατμού που δημιουργείται στον εξατμιστή οδηγείται στον συμπιεστή όπου και συμπιέζεται, αυξάνοντας έτσι τη θερμοκρασία συμπύκνωσης του. Ο πεπιεσμένος ατμός επιστρέφει στον εξατμιστή μέσω σωληνώσεων που δρουν σαν εναλλάκτης θερμότητας μεταξύ του ατμού και του διαλύματος τροφοδοσίας. Καθώς ο ατμός συμπυκνώνεται στον εναλλάκτη και φεύγει από το σύστημα σαν καθαρό νερό οι σωληνώσεις θερμαίνονται προκαλώντας τη δημιουργία περισσότερου ατμού στον εξατμιστή. Ο συμπιεστής πέρα από το γεγονός ότι οδηγεί στην αύξηση της πίεσης του εξατμισμένου ατμού μειώνει και την πίεση του νερού τροφοδοσίας ελαττώνοντας έτσι και το σημείο βρασμού του. [2A]

Υπάρχουν δύο εκδοχές της μηχανικής συμπίεσης ατμού. Η μία είναι η συμπίεση ατμού που λαμβάνει χώρα σε μανομετρικές πιέσεις (VC) και η άλλη είναι η συμπίεση ατμού υπό κενό (VVC) η οποία πραγματοποιείται σε πολύ χαμηλές πιέσεις. Η συμπίεση τροφοδοτείται μηχανικά από διατάξεις που λειτουργούν ως μηχανικές τουρμπίνες. Όπως παράγεται ο ατμός μεταφέρεται στον εναλλάκτη - συμπυκνωτή όπου εναλλάσσεται θερμότητα και ο ατμός μετατρέπεται πάλι σε νερό. Το πόσιμο νερό που προκύπτει μεταφέρεται στις δεξαμενές αποθήκευσης ενώ η θερμότητα χρησιμοποιείται σε προηγούμενα στάδια της διαδικασίας. Η διαδικασία της συμπίεσης ατμού υπό κενό είναι η πιο αποδοτική όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας και τους ρυθμούς παραγωγής πόσιμου νερού. Επίσης είναι ιδιαίτερα αξιόπιστη και εύκολη στη διαχείριση και στη λειτουργία και είναι πολύ ανθεκτική, λειτουργώντας ακόμα και υπό αντίξοες συνθήκες.[2A]

Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που εισάγεται χρησιμοποιείται από τον συμπιεστή, είτε πρόκειται για μηχανική είτε για θερμική συμπίεση ατμού. Είναι επίσης απαραίτητη μία πρόσθετη πηγή θερμότητας για την εκκίνηση και για να αντισταθμίσει πιθανές θερμικές απώλειες.

Τέλος για να αυξηθεί η απόδοση του συστήματος χρησιμοποιείται ένας εναλλάκτης για προθέρμανση του διαλύματος τροφοδοσίας που εκμεταλλεύεται τη θερμότητα που βρίσκεται στην άλμη και στο απόσταγμα εξόδου.



ΣΧΗΜΑ 2.4.1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΑΤΜΟΥ

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα ενός συστήματος μηχανικής συμπίεσης ατμού είναι:[2Α]

- Μικρό μέγεθος
- Μικρές απαιτήσεις εγκατάστασης
- Καλή απόδοση
- Ενεργειακή ανεξαρτησία
- Δεν επηρεάζεται από αλατότητα νερού τροφοδοσίας
- Εύκολη μετακίνηση του
- Μη ανάγκη ύπαρξης ψύξης
- Ικανότητα να δουλεύει με μηχανή βενζίνης ή πετρελαίου

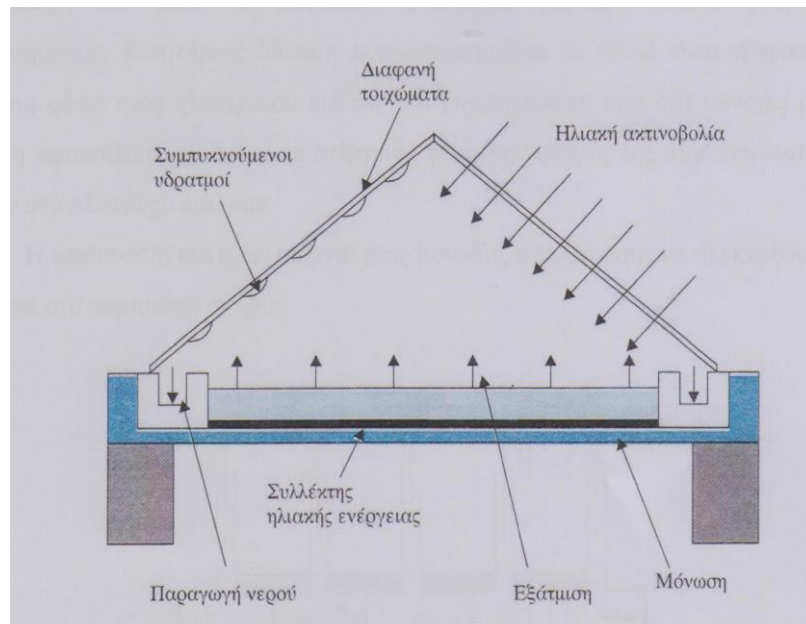


ΦΩΤ. 2.4.1: ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΑΤΜΟΥ

2.5. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΗΛΙΑΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΗ

Η αφαλάτωση με ηλιακή εξάτμιση χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια που αποτελεί μια ανεξάντλητη και χωρίς κόστος μορφή ενέργειας. Η χρησιμοποίηση της ηλιακής ενέργειας γίνεται άμεσα στους ηλιακούς αποστακτήρες όπου το νερό εξατμίζεται και οι παραγόμενοι ατμοί συμπυκνώνονται προς το παραγόμενο αφαλατωμένο νερό. [4A]

Ο ηλιακός αποστακτήρας αποτελείται από έναν «δίσκο» (pan) που η επιφάνεια του έχει μεγάλη απορροφητικότητα σε ηλιακή ακτινοβολία στον οποίο τροφοδοτείται το θαλασσινό νερό, και ένα κάλυμμα το οποίο επιτρέπει τη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας από αυτό. Η ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει το αλατούχο διάλυμα τροφοδοσίας, το νερό εξατμίζεται και ανέρχεται προς τα πάνω. Συμπυκνώνεται σε διάφανη επιφάνεια η οποία είναι συνήθως κατασκευασμένη από γυαλί, σχηματίζει ένα λεπτό στρώμα και ρέει προς τη βάση όπου και συλλέγεται. [4A]



ΣΧΗΜΑ 2.5.1: ΗΛΙΑΚΟΣ ΑΠΟΣΤΑΚΤΗΡΑΣ, ([4A])

Η ηλιακή ακτινοβολία διέρχεται από τα διαφανή τοιχώματα και απορροφάται από τη βάση του δίσκου. Η βάση του δίσκου έχει καλυφθεί από ένα φωτοαπορροφητικό υλικό. Το υλικό αυτό είναι χρωστική μαύρου χρώματος ή διάφορα πολυμερή υλικά. Ο δίσκος πληρούται από το διάλυμα προς αφαλάτωση το ύψος του οποίου ποικίλει. Λεπτό στρώμα έχει σαν αποτέλεσμα γρήγορη εξάτμιση στις ώρες άμεσης ηλιακής πρόσπτωσης και μηδενική εξάτμιση κατά τη νύχτα. Αντίθετα στρώμα υψηλής στάθμης έχει σαν αποτέλεσμα εξάτμιση μικρής ταχύτητας που διατηρείται για περισσότερες ώρες. [4A]

Γενικά η χρήση της ηλιακής ενέργειας για αφαλάτωση εφαρμόζεται σε μονάδες μικρής δυναμικότητας και κυρίως όταν δεν είναι διαθέσιμη άλλη πηγή ενέργειας.[4A]

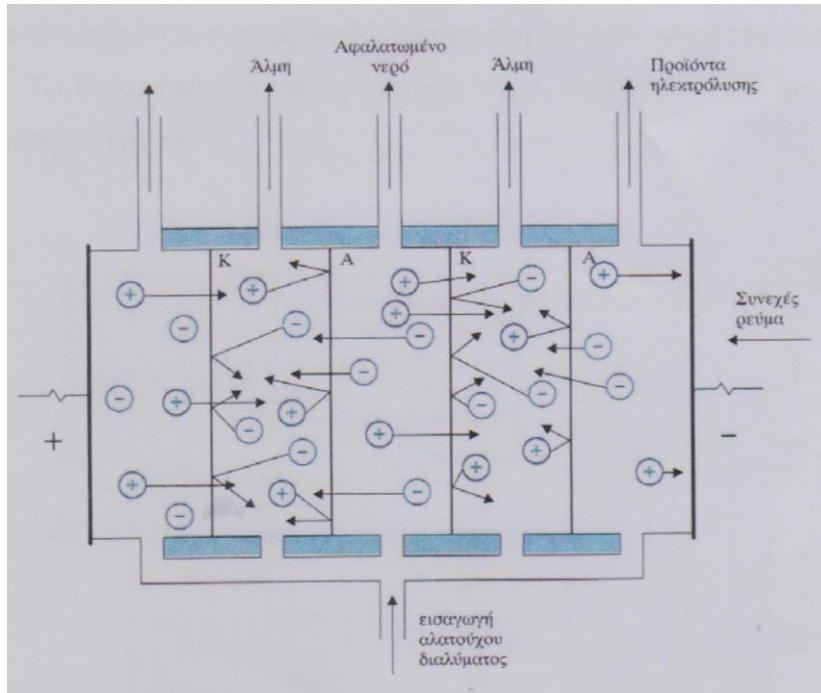
2.6. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΛΥΣΗ

Η ηλεκτροδιάλυση είναι μια διεργασία αφαλάτωσης όπου τα άλατα υπό μορφή ιόντων απομακρύνονται από την κύρια μάζα του διαλύματος μέσω μεμβρανών και έτσι το παραμένον διάλυμα έχει μικρότερη συγκέντρωση αλάτων. Η

μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού και όχι θαλασσινού. Η κινητήρια δύναμη που απομακρύνει τα ιόντα είναι η ηλεκτρική ενέργεια μέσω ενός ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από συνεχές ρεύμα. Έτσι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης των ιόντων στο αλατούχο διάλυμα.[4A]

Η μονάδα ηλεκτροδιάλυσης αποτελείται από μια σειρά στενών θαλάμων πάχους 0.1 cm δια μέσω των οποίων εισάγεται και κινείται με τη βοήθεια αντλίας το προς αφαλάτωση αλατούχο διάλυμα. Ο λόγος του μικρού πάχους των θαλάμων είναι η μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης τους και η ελαχιστοποίηση του φαινομένου της συγκέντρωσης πόλωσης. Τα τμήματα αυτά χωρίζονται μεταξύ τους εναλλακτικά από ανιονικές και κατιονικές μεμβράνες δηλαδή μεμβράνες που επιτρέπουν τη διόδο μόνο των αρνητικών ή θετικών ιόντων αντίστοιχα. Τα εξωτερικά τμήματα φέρουν ηλεκτρόδια στα οποία διοχετεύεται συνεχές ρεύμα.[4A]

Όταν τα ηλεκτρόδια συνδεθούν με μια πηγή συνεχούς ρεύματος τα ιόντα αρχίζουν να κινούνται. Τα ανιόντα κινούνται προς την άνοδο και τα κατιόντα προς την κάθοδο. Κατά την κίνηση τους συναντούν τις μεμβράνες οι οποίες επιτρέπουν μόνο στο ένα είδος από αυτά να διέλθει. Η εναλλαγή των μεμβρανών δεν επιτρέπει τα ιόντα που εγκαταλείπουν ένα θάλαμο να αντικατασταθούν από ομοειδή τους από το δίπλα θάλαμο. Κάθε μονάδα ηλεκτροδιάλυσης αποτελείται από δεκάδες μέχρι εκατοντάδες θαλάμους. Το αποτέλεσμα της διόδου του ηλεκτρικού ρεύματος είναι η παραγωγή εναλλάξ στους θαλάμους αφαλατωμένου νερού και άλμης. Στους δύο ακραίους θαλάμους έχουμε προϊόντα ηλεκτρόλυσης και για αυτό τα προϊόντα αυτών των θαλάμων απορρίπτονται.[4A]



ΣΧΗΜΑ 2.6.1: ΔΕΣΜΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΛΥΣΗΣ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ, ([4Α])

2.7. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΥΠΕΡΔΙΗΘΗΣΗ

Η υπερδιήθηση είναι μια τεχνική διαχωρισμού με τη χρήση μεμβρανών και άσκησης πίεσης. Οι μεμβράνες υπερδιήθησης χρησιμοποιούν χαμηλή πίεση και λειτουργούν σύμφωνα με την αρχή της διήθησης. Οι μεμβράνες υπερδιήθησης διαθέτουν πόρους στην επιφάνεια τους και η απόρριψη των ουσιών μεγέθους 0.3 – 0.01 μm οφείλεται στο γεγονός ότι το μέγεθος των πόρων είναι μικρότερο από 0.01 μm. Η διεργασία απορρίπτει όλα τα ευδιάλυτα μεγαλομόρια, μικροοργανισμούς, αιωρούμενα στερεά και κolloειδή.[4Α]

2.8. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΜΙΚΡΟΔΙΗΘΗΣΗ

Η μικροδιήθηση είναι μια τεχνική διαχωρισμού με τη χρήση μεμβρανών και άσκησης πίεσης. Οι μεμβράνες μικροδιήθησης χρησιμοποιούν χαμηλή πίεση και λειτουργούν σύμφωνα με την αρχή της διήθησης. Οι μεμβράνες μικροδιήθησης

διαθέτουν πόρους στην επιφάνεια τους και η απόρριψη των ουσιών μεγέθους 1 – 0.1 μm οφείλεται στο γεγονός ότι το μέγεθος των πόρων είναι μικρότερο από 0.1 μm. Η διεργασία απορρίπτει παθογόνους μικροοργανισμούς και αιωρούμενα στερεά.[4A]

2.9. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ

Η Γεωθερμία είναι η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και εμπεριέχεται σε φυσικούς ατμούς, σε επιφανειακά ή υπόγεια νερά και σε θερμά ξηρά πετρώματα. Η Ελλάδα λόγω των ειδικών γεωλογικών συνθηκών της είναι πλούσια σε αυτή τη μορφή ενέργειας. Η γεωθερμική αφαλάτωση είναι μια αποδεδειγμένη διαδικασία υπό ανάπτυξη για την παραγωγή νερού η οποία χρησιμοποιεί την ενέργεια θερμότητας. Τα οφέλη αυτής της μεθόδου είναι ότι απαιτεί λιγότερη συντήρηση από τις μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης και ότι η εισαγωγή αρχικής ενέργειας είναι από τη γεωθερμική θερμότητα που είναι χαμηλού περιβαλλοντικού αντίκτυπου ενέργεια.[4A]

2.10. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΟΣΜΩΣΗ

Η αντίστροφη όσμωση είναι μια διαδικασία αφαλάτωσης όπου ο διαλύτης ενός διαλύματος (το νερό) μεταφέρεται και διαχωρίζεται μέσω μεμβράνης από τα συστατικά του διαλύματος με την άσκηση πίεσης.[4A]

Η διάχυση είναι η μετακίνηση των μορίων από μια περιοχή χαμηλότερης συγκέντρωσης σε μια περιοχή υψηλότερης συγκέντρωσης. Η όσμωση είναι μια ειδική περίπτωση της διάχυσης στην οποία τα μόρια είναι νερό και η κλίση της συγκέντρωσης εμφανίζεται πέρα από μια ημιπερατή μεμβράνη. Η ημιπερατή μεμβράνη επιτρέπει τη μετάβαση του νερού αλλά όχι των ιόντων ή των μεγαλύτερων μορίων. Η διάχυση και η όσμωση είναι θερμοδυναμικές μεταβολές και θα συνεχιστούν έως ότου επιτευχθεί ισορροπία. Η όσμωση μπορεί να

επιβραδυνθεί, να σταματήσει ή ακόμα και να αντιστραφεί εάν εφαρμοσθεί ικανοποιητική πίεση από τη «συγκεντρωμένη» πλευρά της μεμβράνης.[4A]

Η αντίστροφη όσμωση εμφανίζεται όταν το νερό κινείται πέρα από τη μεμβράνη ενάντια στη κλίση συγκέντρωσης από την υψηλότερη συγκέντρωση στη χαμηλότερη συγκέντρωση, ([4A]). Αποτελεί δηλαδή μια διαδικασία που εξαναγκάζει το διαλύτη που βρίσκεται σε μια περιοχή υψηλής συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας να περάσει μέσα από μια μεμβράνη σε μια περιοχή όπου η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας είναι πολύ πιο χαμηλή ασκώντας μια πίεση η οποία είναι πιο μεγάλη από την οσμωτική πίεση.[2A]

Η μεμβράνη είναι ημιπερατή και είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε να επιτρέπει την διέλευση του διαλύτη αλλά όχι και της διαλυμένης ουσίας και των όποιων προσμίξεων. Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται έχουν πυκνό πλέγμα από πολυμερές υλικό στο περίβλημά τους όπου γίνεται και ο διαχωρισμός. Η πίεση που πρέπει να ασκηθεί στη μεριά της υψηλής πίεσης της διαλυμένης ουσίας είναι της τάξης των 2 – 17 bar για υφάλμυρο νερό και 40 – 70 bar για θαλασσινό νερό.[2A]

Ένα από τα πλεονεκτήματα της αντίστροφης όσμωσης είναι ότι αποτελεί μια από τις λιγότερο ενεργοβόρες μεθόδους γεγονός που κάνει το κόστος παραγωγής του νερού μικρό.[2A]

Η προεργασία είναι κρίσιμης σημασίας στην εξασφάλιση της καθαρότητας των μεμβρανών και γενικά στη καλή λειτουργία της μονάδας. Για αυτό το λόγο τα αιωρούμενα σωματίδια απομακρύνονται πρώτα με τη μέθοδο της διήθησης. Συνήθως η διαδικασία του καθαρισμού πέρα από τη διήθηση περιλαμβάνει και προσθήκη κάποιου οξέως ή κάποιας άλλης χημικής ουσίας ώστε να αποτραπεί η καθίζηση αλάτων και η ανάπτυξη μικροοργανισμών. Επιπλέον η προσθήκη χημικών γίνεται και με σκοπό να εξασφαλιστεί ένα σταθερό PH, που έχει καθορίσει ο κατασκευαστής της μεμβράνης.[2A]

Η οσμωτική πίεση ενός διαλύματος είναι φυσική ιδιότητα του διαλύματος και δεν εξαρτάται από την εκάστοτε μεμβράνη παρά μόνο από την θερμοκρασία

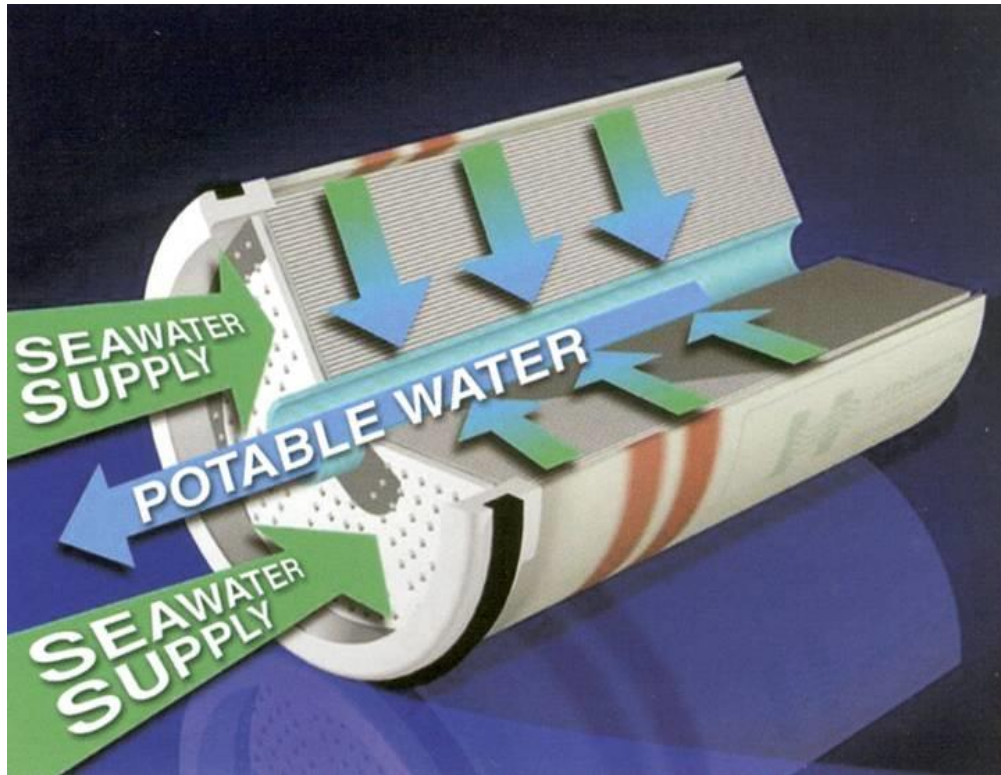
του και τη συγκέντρωση σε αυτό στερεών. Για το θαλασσινό νερό είναι περίπου 27 bar στους 15⁰C.[2A]

Η πίεση λειτουργίας μιας εγκατάστασης αντίστροφης όσμωσης πρέπει να υπερνικήσει την οσμωτική πίεση, τις απώλειες τριβών, την αντίσταση των μεμβρανών και την πίεση εκροής του προϊόντος νερού.[2A]

Οι μεμβράνες για να είναι κατάλληλες για τη διεργασία της αντίστροφης όσμωσης θα πρέπει να έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:[4A]

- Μεγάλη απόρριψη αλάτων με υψηλή διαπερατότητα διαλύτη
- Ικανότητα να σχηματίζουν λεπτά διαχωριστικά στρώματα μεγάλης αντοχής
- Ικανότητα κατασκευής με μεγάλο λόγο επιφάνειας προς όγκο
- Μεγάλο εύρος λειτουργικών παραμέτρων, πίεσης, θερμοκρασίας και είδους διαλύματος τροφοδοσίας
- Μεγάλη διάρκεια ζωής. Η διάρκεια ζωής κυμαίνεται από 3 – 5 χρόνια, εξαρτώμενη από την ποιότητα του νερού προς επεξεργασία και τον τρόπο χρήσης και καθαρισμού
- Μεγάλη αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια και βιολογικές επιθέσεις
- Ικανότητα λειτουργίας σε μεγάλο εύρος PH
- Χαμηλό κόστος

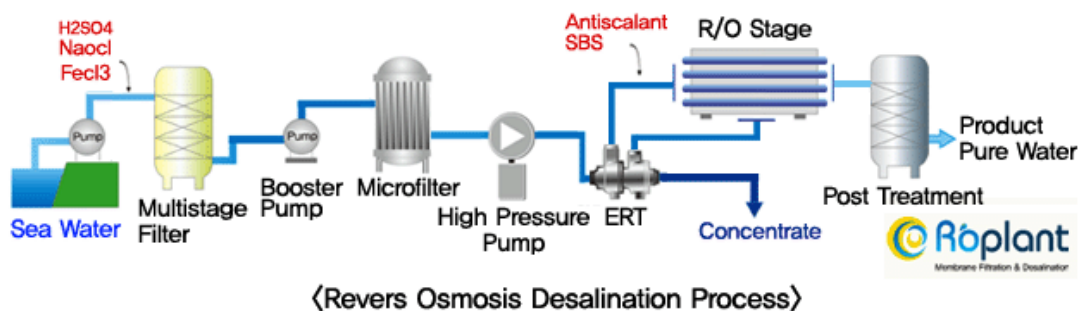
Το πιο σημαντικό για την αντίστροφη όσμωση είναι ότι τα ανεπιθύμητα στοιχεία αυτόματα φεύγουν μέσω της αποχέτευσης και έτσι δεν επικαλύπτουν τη μεμβράνη όπως συμβαίνει με τα κοινά στοιχεία φίλτρανσης. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μέρος του νερού παροχής το οποίο ξεπλένει τη μεμβράνη και την κρατάει καθαρή. Δηλαδή το σύστημα έχει μια είσοδο νερού που το τροφοδοτεί και δύο εξόδους, μία από την οποία φεύγει καθαρό νερό και μία άλλη που βγάζει νερό με ανεπιθύμητα στοιχεία. Αυτός είναι και ο λόγος που οι μεμβράνες λειτουργούν με μία μικρή συντήρηση ακόμα και μετά από πολλά χρόνια λειτουργίας.[4A]



ΣΧΗΜΑ 2.10.1: ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ

Ένα σύστημα παραγωγής νερού με αντίστροφη όσμωση αποτελείται από τρία κυρίως μέρη:[4A]

- Το σύστημα προ – κατεργασίας του νερού
- Το κυρίως σύστημα της αφαλάτωσης
- Το σύστημα μετεπεξεργασίας του νερού



ΣΧΗΜΑ 2.10.2: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ

Η επιλογή της κατάλληλης προ – κατεργασίας θα μεγιστοποιήσει την αποδοτικότητα του συστήματος και την αξιοπιστία των μεμβρανών μειώνοντας :[4A]

- Επικαθίσεις αλάτων
- Μόλυνση μεμβρανών
- Αποικοδόμηση μεμβρανών

Το σύστημα προ – κατεργασίας περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

Χλωρίωση: Για την πρόληψη της δημιουργίας επιστρώματος μόλυνσης οργανικής κυρίως προέλευσης το νερό που θα αφαλατωθεί χλωριώνεται είτε με αέριο χλώριο ή με υποχλωριώδες νάτριο ή λιγότερο συχνά με υποχλωριώδες ασβέστιο. Η χλωρίωση γίνεται με δοσομετρικές αντλίες συνεχώς ώστε η συγκέντρωση σε ενεργό χλώριο να είναι μέχρι 10 ppm. [4A]

Θρόμβωση – Κροκίδωση: Όταν το χρησιμοποιούμενο νερό έχει υψηλό ποσοστό αιωρούμενων στερεών, χρησιμοποιούνται ουσίες που προκαλούν τη συσσωμάτωση των αιωρούμενων στερεών και τελικά το διαχωρισμό τους από το νερό προς επεξεργασία σε επόμενο στάδιο. Τα συσσωματώματα και αιωρούμενα στερεά διέρχονται από δύο είδη φίλτρων. Τα φίλτρα άμμου που περιλαμβάνουν στρώσεις από αδρανή υλικά διαφορετικού μεγέθους και τα φίλτρα φυσιγγίων όπου συγκρατούνται όλα τα αιωρούμενα στερεά μεγέθους μεγαλύτερου από 1 – 5 μm. [4A]

Πολυστρωματικά φίλτρα: Τα πολυστρωματικά φίλτρα περιέχουν αδρανή υλικά σε στρώματα, και λειτουργούν σαν φίλτρα. Περιλαμβάνουν στρώσεις διαφόρων μεγεθών από τον πυθμένα προς τα επάνω:[4A]

- Χαλαζιακά μικρά χαλίκια
- Αδρανή πυριτική άμμο
- Ανθρακίτη

Η πυκνότητα αυτών των υλικών είναι τέτοια ώστε διατηρείται η διαστρωμάτωση τους ακόμα και σε ισχυρές αναδεύσεις λόγω μεγάλης ταχύτητας

του διερχόμενου θαλασσινού νερού. Ο καθαρισμός του νερού επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:[4A]

- Με τη μη δυνατότητα των αιωρούμενων σωματιδίων να διαπεράσουν το ανώτατο στρώμα λόγω μεγέθους
- Με την καθίζηση λόγω βάρους στα κατώτερα στρώματα

Επιπλέον τα φίλτρα περιλαμβάνουν τις κατάλληλες σωληνώσεις και βάνες ώστε να είναι δυνατή η έκπλυση τους.

Αποχλωρίωση: Το υπολειπόμενο χλώριο που έχει χρησιμοποιηθεί αν φτάσει στις μεμβράνες θα τις καταστρέψει. Έτσι θα πρέπει να υπάρχει το στάδιο αποχλωρίωσης. Με δοσομετρική αντλία τροφοδοτείται το νερό με αναγωγικά μέσα κατάλληλης δοσολογίας ώστε να μην υπάρχει περίπτωση να παραμείνει χλώριο στο διάλυμα. Η αποχλωρίωση μπορεί να γίνει και με φίλτρα ενεργού άνθρακα.[4A]

Ρύθμιση ΡΗ: Για την αποφυγή επικαθίσεων αλάτων χρησιμοποιούνται οξέα για τη μείωση του ΡΗ του διαλύματος. Τα οξέα που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως το υδροχλωρικό και το θειικό οξύ. Η δοσολογία τους καθορίζεται από τη σύσταση του κατεργαζόμενου νερού.[4A]

Προσθήκη αντικαθαλωτικού: Η παρεμπόδιση των επικαθίσεων αλάτων μπορεί να γίνει και με την προσθήκη ειδικών αντικαθαλωτικών ουσιών που παρεμποδίζουν την επικάθιση αλάτων. Απαιτούνται μικρές ποσότητες αυτών των ουσιών. Η δράση τους οφείλεται στο γεγονός ότι προσροφούνται επιφανειακά στο αρχικό στάδιο σχηματισμού των αλάτων που δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη των κρυστάλλων και συνεπώς το σχηματισμό επικαθίσεων αλάτων. [4A]

Φίλτρο φυσιγγίων: Για την ολοκλήρωση της προ – κατεργασίας, η θάλασσα διέρχεται από τα φίλτρα φυσιγγίων. Ο αριθμός και οι διαστάσεις των φυσιγγίων εξαρτάται από την παροχή του θαλασσινού νερού. Γενικά χρησιμοποιούνται φίλτρα από πολυμερές υλικό. Το δοχείο στο οποίο τοποθετούνται τα φυσιγγία θα πρέπει να είναι από ανοξείδωτο υλικό ή κατάλληλο πολυμερές ή χάλυβα επενδυμένο εσωτερικά με κατάλληλη επίστρωση ανθεκτική στη διάβρωση.[4A]

Το κυρίως σύστημα της αφαλάτωσης περιλαμβάνει τα ακόλουθα τμήματα:

Αντλία χαμηλής πίεσης: Η αντλία χαμηλής πίεσης είναι συνήθως περιστροφική αντλία κατάλληλης ισχύος για την τροφοδοσία των φίλτρων και της αντλίας υψηλής πίεσης και είναι κατασκευασμένη από υλικό ανθεκτικό στη διάβρωση. [4A]

Λαμβάνει το αλατούχο διάλυμα, θάλασσα ή υφάλμυρο νερό απευθείας από τη πηγή τροφοδοσίας ή από δεξαμενή εξισορρόπησης. Γενικά εγκαθίστανται δύο παράλληλες αντλίες χαμηλής πίεσης, μία σε λειτουργία και μία εφεδρική.[4A]

Αντλία υψηλής πίεσης: Η αντλία υψηλής πίεσης είναι εμβολοφόρος με τρία ή περισσότερα έμβολα, κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα και ειδικό κεραμικό υλικό για μείωση του βάρους της. Χρησιμοποιούνται επίσης και πολυβάθμιες περιστροφικές αντλίες στη σειρά από κατάλληλο υλικό. Το νερό τροφοδοσίας εξερχόμενο από την αντλία υψηλής πίεσης διοχετεύεται στα στοιχεία αντίστροφης όσμωσης που βρίσκονται στα δοχεία πίεσης.[4A]

Στοιχεία αντίστροφης όσμωσης: Αποτελούνται από ειδικά δοχεία πίεσης εντός των οποίων τοποθετούνται σε σειρά 1 – 7 στοιχεία μεμβρανών. Ο έλεγχος της ποιότητας της παραγωγής κάθε μεμβράνης γίνεται με ειδικό σωλήνα που τοποθετείται εσωτερικά των μεμβρανών στο σωλήνα παραγόμενου νερού.[4A]

Κάθε σύστημα αφαλάτωσης μπορεί να έχει ένα ή περισσότερα στοιχεία αντίστροφης όσμωσης διαταγμένα παράλληλα σχηματίζοντας μία ή περισσότερες συστοιχίες. Το νερό προς κατεργασία εισέρχεται σε κάθε στοιχείο αντίστροφης όσμωσης από το ένα άκρο ενώ από το άλλο άκρο εξέρχονται το καθαρό νερό και η άλμη. Εάν επιθυμείται μεγαλύτερη ανάκτηση η άλμη μπορεί να ανακυκλώνεται ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί δεύτερο πέρασμα σε άλλη συστοιχία στοιχείων αντίστροφης όσμωσης. Η πίεση λειτουργίας μπορεί να καθορίζεται από βάνα που υπάρχει στην έξοδο της άλμης. Τα δοχεία πίεσης είναι κατασκευασμένα ώστε να αντέχουν σε υψηλές πιέσεις και φέρουν ειδικές πλάκες στα άκρα τους με κατάλληλα εξαρτήματα ώστε να είναι δυνατή η συναρμολόγηση τους χωρίς να υπάρχουν διαρροές θάλασσας ή παραγόμενου νερού στο περιβάλλον διασφαλίζοντας τη στεγανότητα μεταξύ θάλασσας και παραγόμενου νερού.[4A]



ΦΩΤ 2.10.1: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ

Στη μετεπεξεργασία το νερό της αφαλάτωσης παρουσιάζει γενικά πολύ μικρή σκληρότητα και χαμηλό PH. Έτσι πριν πάει στην κατανάλωση θα πρέπει να προστεθούν χημικά που θα το κάνουν κατάλληλο. Ακόμα το αφαλατωμένο νερό έχει ισχυρά διαβρωτικές ιδιότητες και είναι ιδιαίτερα επιθετικό σε σωληνώσεις από απλό, γαλβανισμένο ή ακόμα και ανοξείδωτο χάλυβα.[4A]

Το σύστημα μετεπεξεργασίας περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

Ρύθμιση PH: Το PH ρυθμίζεται και αυξάνεται με προσθήκη υδροξειδίου του νατρίου ή όξινου ανθρακικού νατρίου. Η δοσολογία ρυθμίζεται ανάλογα με το PH του παραγόμενου νερού και την επιθυμητή τιμή. Για να μειωθούν οι διαβρωτικές ιδιότητες προστίθεται αντιδιαβρωτικό όπως διάφορες πολυφωσφωρικές ενώσεις. [4A]

Ρύθμιση σκληρότητας: Η αύξηση της σκληρότητας μπορεί να γίνει με προσθήκη μέσω δοσομετρικής αντλίας CaCl_2 ή MgCl_2 ή διαβίβαση του νερού μέσα από ειδικές στήλες που περιέχουν ορυκτό Calcite που περιλαμβάνει άλατα μαγνησίου και ασβεστίου. [4A]

Χλωρίωση: Η χλωρίωση του νερού γίνεται με διάλυμα υποχλωριώδους νατρίου. [4A]

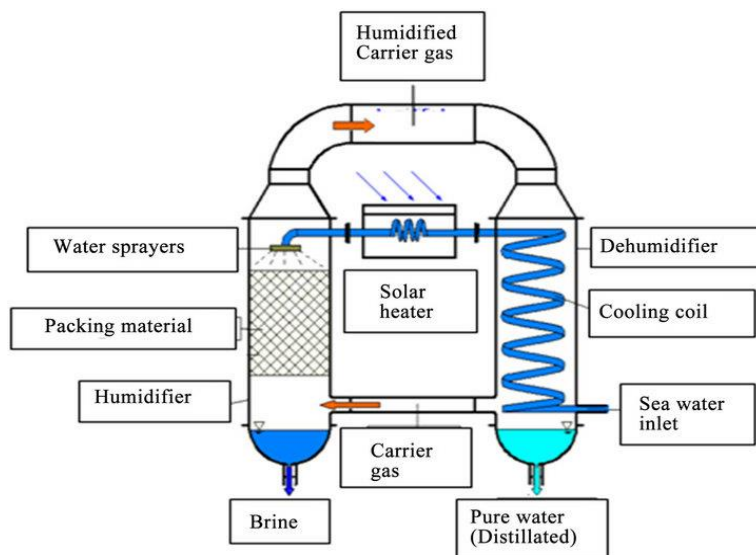
Συγκεντρωτικά η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Απομάκρυνση των διαλυμένων αλάτων. Η μέθοδος απομακρύνει σταθερά και αποτελεσματικά τα διαλυμένα άλατα, τις διαλυμένες οργανικές ουσίες, τα μικροσκοπικά σωματίδια. Συνεπώς είναι ιδανική για ένα μεγάλο τομέα εφαρμογών από την παραγωγή πεντακάθολου νερού έως την αφαλάτωση θαλασσινού νερού, ([4A]).
- Τεχνική διαχωρισμού για εξοικονόμηση ενέργειας. Η αντίστροφη όσμωση προφυλάσσει το νερό από την εξάτμιση αποτελώντας μια ενεργειακά οικονομική τεχνική διαχωρισμού που απαιτεί λιγότερη κατανάλωση ενέργειας. [4A]
- Εύχρηστη ως μέθοδος συγκέντρωσης και αποκατάστασης. Η αντίστροφη όσμωση δεν απαιτεί θέρμανση και μπορεί να συγκεντρώσει και να μετατρέπει πολύτιμα υλικά τη διαδικασία σε διαλυτή μορφή χωρίς τον εκφυλισμό που μπορεί να είχαν υποστεί αυτά τα υλικά υπό άλλες συνθήκες.[4A]
- Συμπαγής εξοπλισμός. Οι μονάδες μπορούν να κατανεμηθούν σε τρισδιάστατη διάρθρωση με εξαιρετική αποτελεσματικότητα χώρου. [4A]
- Απλός χειρισμός και έλεγχος. Η αντίστροφη όσμωση είναι μια απλή διαδικασία χωρίς περίπλοκο χειρισμό και έλεγχο ενώ η συντήρηση γίνεται εύκολα και χωρίς προβλήματα. [4A]

2.11. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΥΓΡΑΝΣΗ – ΑΦΥΓΡΑΝΣΗ ΑΕΡΙΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ [5A]

Η αφαλάτωση με αυτή τη μέθοδο μιμείται το κύκλο που ακολουθεί το νερό στη φύση με άμεσο τρόπο. Ζεστό θαλασσινό νερό ψεκάζεται σε διαστρωματωμένη επιφάνεια όπου ο ξηρός αέρας εξατμίζει καθαρό ατμό νερού από το κατερχόμενο φιλμ του θαλασσινού νερού. Ο ζεστός υγρός αέρας μετά εισέρχεται σε αφυγραντή όπου ο καθαρός ατμός συμπυκνώνεται σε στοιχεία υγροποίησης που ψύχονται με

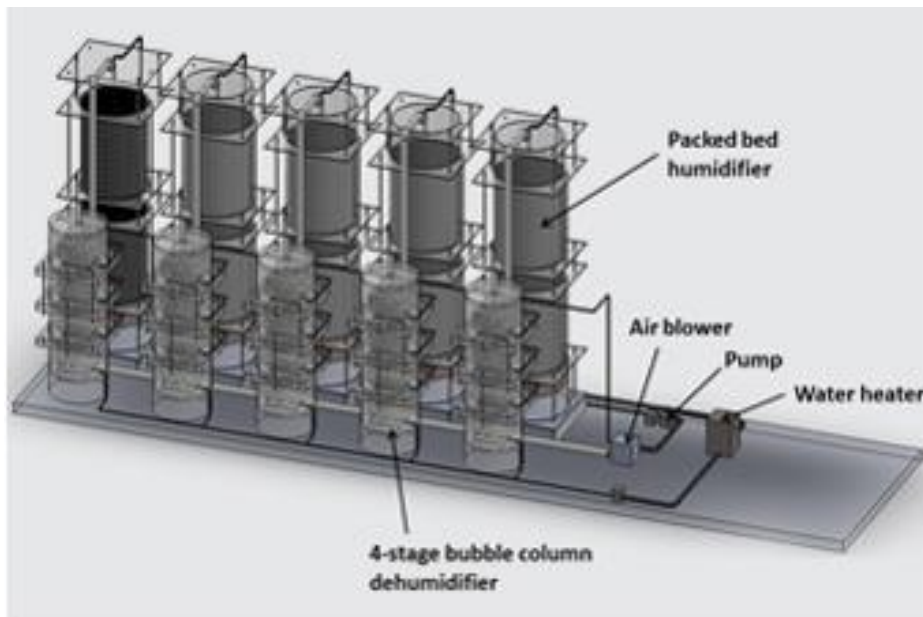
το κρύο εισερχόμενο θαλασσινό νερό. Το θαλασσινό νερό προθερμαίνεται στη διαδικασία. Ένας θερμαντής νερού μετά τα στοιχεία υγροποίησης προσδίδει την απαιτούμενη θερμότητα στο σύστημα.



ΣΧΗΜΑ 2.11.1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΗΔΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Η μέθοδος έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Υιοθετώντας τη χρήση αερίου μεταφοράς επιτρέπουμε στη διαδικασία να λαμβάνει χώρα στη μερική πίεση του ατμού νερού στον αέρα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να συμβαίνει εξάτμιση σε θερμοκρασίες αρκετά χαμηλότερες από το σημείο βρασμού του θαλασσινού νερού αξιοποιώντας τη χρήση πηγών θερμότητας χαμηλότερης θερμοκρασίας. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι απλά στον εξοπλισμό και φθηνά. Γενικά οι μέθοδοι θερμικής αφαλάτωσης μπορούν να χρησιμοποιήσουν κακής και μεταβαλλόμενης ποιότητας νερό τροφοδοσίας.

Παρόλα αυτά τα πλεονεκτήματα η μέθοδος έχει κάποια μειονεκτήματα. Το αέριο μεταφοράς που χρησιμοποιείται εμποδίζει σε μεγάλο βαθμό την συμπύκνωση στην πλευρά της αφύγρανσης, κάνοντας αναγκαία τη χρήση ογκώδους εξοπλισμού υψηλού κόστους κτήσης, και δεν υπάρχουν πολλές λύσεις σε αυτό το πρόβλημα παρά μόνο η χρήση αφυγραντών άμεσης επαφής για να αυξηθούν οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και μάζας.



ΣΧΗΜΑ 2.11.2: ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΗΔΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

2.12. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Σε ότι αφορά τη σύγκριση των μεθόδων αφαλάτωσης ενδεικτικά αναφέρονται τα ακόλουθα:

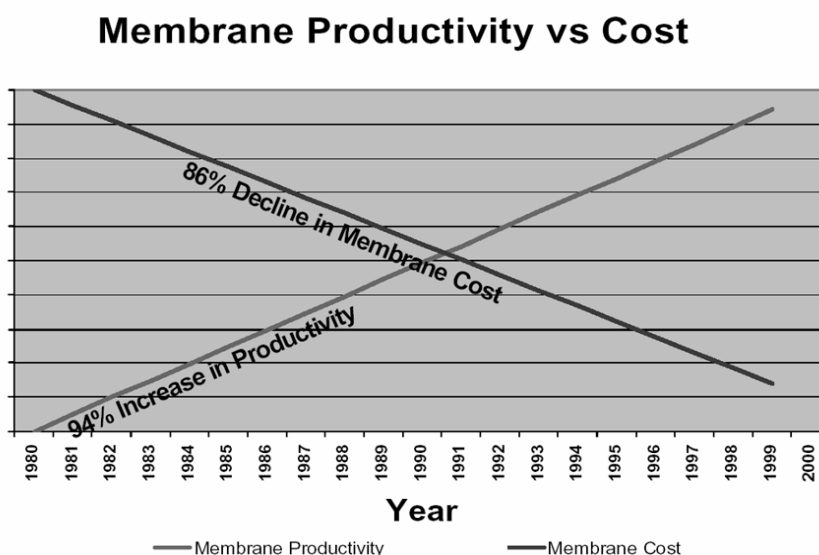
Σε μονάδες που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες η διάβρωση και η ανάπτυξη αλάτων είναι το μεγαλύτερο πρόβλημα. Η προσθήκη χημικών και η γενικότερη προεργασία του νερού εξαρτάται από την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας.

Το κόστος για το προσωπικό σε μια μεγάλη μονάδα είναι ελαφρώς μικρότερο από ότι σε μια μικρότερη. Το κόστος αυτό είναι μικρότερο για τις διαδικασίες απόσταξης σε σχέση με την αντίστροφη όσμωση.[2Α]

Η κατανάλωση ενέργειας βασίζεται σε πολλούς παράγοντες όπως η συγκέντρωση του θαλασσινού νερού, η θερμοκρασία λειτουργίας, ο ρυθμός μετατροπής, οι απώλειες θερμότητας, η διαφορά θερμοκρασίας στις θερμικές διεργασίες κλπ. Οι διαδικασίες που έχουν αλλαγή φάσης του νερού, απαιτούν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας και για αυτό το λόγο εφαρμόζονται κυρίως σε χώρες

όπου υπάρχει άφθονο φθινό πετρέλαιο, όπως στη Μέση Ανατολή. Παρόλα αυτά οι διαδικασίες που χρησιμοποιούν ατμό που έχει προέλθει από συμπαραγωγή είναι οικονομικά ελκυστικές και συγκρίνονται με το κόστος της αντίστροφης όσμωσης. Για τις διεργασίες μεμβράνης οι απαιτήσεις ενέργειας εξαρτώνται από την αλμυρότητα του νερού τροφοδοσίας. Η εξοικονόμηση με χρήση συστημάτων ανάκτησης ενέργειας μπορεί να φτάσει το 40%. [2A]

Η διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης έχει αποδειχθεί ότι είναι η πιο συμφέρουσα ενεργειακά, καθώς έχει τη μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση περίπου τη μισή σε σχέση με αυτή των θερμικών διεργασιών. Με την βελτίωση και εξέλιξη των νέων σύνθετων μεμβρανών που είναι ανθεκτικότερες στις υψηλές πιέσεις επιτυγχάνονται υψηλότεροι ρυθμοί μετατροπής του νερού. Οι νέες μεμβράνες έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, γεγονός που μειώνει το κόστος συντήρησης της μονάδας. Επίσης η αντίστροφη όσμωση χαρακτηρίζεται από τον απλό σχεδιασμό των μονάδων της, την μικρή έκταση που αυτές καταλαμβάνουν, τον μικρότερο χρόνο κατασκευής και τις μικρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σχέση με αυτές των θερμικών διεργασιών. [2A]



ΣΧΗΜΑ 2.12.1: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΜΕΜΒΡΑΝΗ RO, [3A]

Το μειονέκτημα της όμως είναι ότι παρόλο που είναι απλή στη λειτουργία, απαιτείται η συνεχής παρουσία εξειδικευμένου προσωπικού καθώς η εγκατάσταση πρέπει να βρίσκεται διαρκώς υπό συνεχή παρακολούθηση καθώς διάφορα

σφάλματα μπορούν να οδηγήσουν σε κάποια πιθανή καταστροφή των μεμβρανών. Η λειτουργία της αντίστροφης όσμωσης με μεταβλητή εισερχόμενη ισχύ δεν ενδείκνυται. Το ιδεατό είναι η λειτουργία με σταθερή ισχύ. Για αυτό χρειάζεται μια ενδιάμεση διάταξη αποθήκευσης ενέργειας η οποία όμως μειώνει την άμεσα διαθέσιμη ενέργεια και αυξάνει το αρχικό κόστος επένδυσης. Επίσης απαιτείται επάρκεια στα χημικά που χρησιμοποιούνται για την προετοιμασία του νερού καθώς και πλήθος εφεδρικών μεμβρανών σε περίπτωση βλάβης της κύριας. [2A]

Οι μεμβράνες είναι από τα πιο ακριβά στοιχεία της διάταξης και οι τελευταίες έρευνες οδηγούν στη μείωση του κόστους τους. Το υψηλό κόστος των μεμβρανών είχε οδηγήσει σε μια αναγέννηση των θερμικών διεργασιών τα τελευταία χρόνια. [2A]

Η αφαλάτωση με μηχανική συμπίεση παρόλο που καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από την αντίστροφη όσμωση παρουσιάζει λιγότερα προβλήματα από αυτή λόγω της ανοχής της στην μεταβλητή εισερχόμενη ενέργεια. Επίσης είναι πιο κατάλληλη για απομονωμένες περιοχές γιατί είναι πιο εύκολο να λειτουργήσει χωρίς ιδιαίτερα εξειδικευμένο προσωπικό και δεν χρειάζεται τόσα χημικά στην προεργασία όσο η αντίστροφη όσμωση. Μιας και είναι διαδικασία απόσταξης δεν απαιτεί μεμβράνες μειώνοντας έτσι το κόστος και προσφέρει καλύτερο ποιοτικά νερό. Τέλος λόγω της απόσταξης που γίνεται σε περίπτωση μολυσμένου νερού εξασφαλίζεται η απουσία μικροοργανισμών και μικροβίων από το παραγόμενο νερό. Το πλεονέκτημα της απουσίας των μικροοργανισμών το έχουν όλες οι διαδικασίες απόσταξης. [2A]

Μειονέκτημα είναι ότι οι μονάδες με μηχανική συμπίεση έχουν χαμηλότερη απόδοση από τις αντίστοιχες μονάδες των λοιπών θερμικών μεθόδων. [2A]

Αδιαμφισβήτητα, οι πιο ανεπτυγμένες μέθοδοι αφαλάτωσης θαλασσινού νερού είναι οι θερμικές μέθοδοι, καθώς άρχισαν να χρησιμοποιούνται εδώ και 60 χρόνια. Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος της πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) είναι πιο ανεπτυγμένη καθώς το μερίδιό της στην παγκόσμια αγορά αγγίζει το 60% ενώ στην Κεντρική Ασία αγγίζει το 80%. Η αιτία αυτού του φαινομένου είναι η αξιοπιστία που παρέχουν αυτά τα συστήματα λόγω της ώριμης τεχνολογίας τους. Ωστόσο οι

ραγδαίες εξελίξεις στην τεχνολογία των μεμβρανών έκαναν την αντίστροφη όσμωση την πιο κοινή μέθοδο αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού με αποτέλεσμα να αποτελεί μια έναν σοβαρό ανταγωνιστή των θερμικών μεθόδων αφαλάτωσης θαλασσινού νερού.[2A]

Πιο αναλυτικά τα πλεονεκτήματα της πολυβάθμιας εκτόνωσης έναντι της αντίστροφης όσμωσης είναι τα ακόλουθα:[2A]

- Η υψηλή αξιοπιστία του εγκατεστημένου συστήματος. Κατά τα χρόνια λειτουργίας τους τα συστήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης έδειξαν υψηλή αξιοπιστία αλλά και πιθανή διάρκεια ζωής πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που προβλέφθηκε κατά τη κατασκευή τους.
- Εύκολη λειτουργία. Η λειτουργία των συστημάτων πολυβάθμιας εκτόνωσης είναι πολύ εύκολη και έχουν σχεδόν τα ίδια χαρακτηριστικά με την μονάδα παραγωγής που είναι πάντα συνδεδεμένα. Αυτό σημαίνει ότι η εύρεση του προσωπικού συντήρησης και λειτουργίας είναι αρκετά εύκολη.
- Πολύ αργή υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος κατά την διάρκεια των ετών. Είναι παγκοσμίως αναγνωρισμένο ότι ένα σύστημα πολυβάθμιας εκτόνωσης με σωστή λειτουργία και συντήρηση, δεν παρουσιάζει καμία υποβάθμιση της απόδοσης του όσον αφορά την παραγωγή νερού και την ενεργειακή κατανάλωση.

Αυτά τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν συντέλεσαν στο να αποτελεί η πολυβάθμια εκτόνωση την πρώτη επιλογή έναντι στην αντίστροφη όσμωση για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού, κυρίως για περιοχές που έχουν ανάγκη και την συμπαραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.[2A]

Με το ακόλουθο παράδειγμα δίνεται μια σύγκριση των ενεργειακών αναγκών για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού από συστήματα θερμικών διεργασιών και από σύστημα αντίστροφης όσμωσης:[2A]

Ένας σύγχρονος σχεδιασμός 6 εκατομμύριων γαλονιών την ημέρα (1 εκατομμύριο γαλόνια = 4500 τόνοι), με τροφοδοσία 50000 rpm και υψηλότερη

θερμοκρασία της άλμης 110°C , σε ένα σύστημα θερμικής διεργασίας καταναλώνει περίπου 75 MW θερμικής ενέργειας και περίπου 3MWe μόνο για την ανακυκλοφορία της άλμης ενώ για τις άλλες αντλίες και τα βοηθητικά εξαρτήματα χρειάζεται περίπου 1,2 MWe.

Ένα αντίστοιχο σύστημα αντίστροφης όσμωσης θα κατανάλωνε μηχανική ή ηλεκτρική ενέργεια για να οδηγήσει την αντλία υψηλής πίεσης που τροφοδοτεί την μεμβράνη εκτός των άλλων βοηθητικών αντλιών. Η ενεργειακή κατανάλωση των αντλιών υψηλής πίεσης της αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού με ανάκτηση ύδατος 25%, συνθήκες λειτουργίας 69 bar και 60% αποδοτικότητα άντλησης υπολογίζεται σε 12,7 kWh/m. Έτσι ένα τέτοιο σύστημα θα κατανάλωνε το ελάχιστο 14,29 MWe μόνο για τις αντλίες υψηλής πίεσης.

Όσον αφορά τις ενεργειακές καταναλώσεις αυτές ευνοούν καθαρά την αντίστροφη όσμωση έναντι της πολυβάθμιας εκτόνωσης (45,7 KJ/Kg μηχανικό έργο για τα συστήματα αντίστροφης όσμωσης έναντι 240 KJ/kg θερμικής ενέργειας και 2 ή 8 KJ/Kg μηχανικής ενέργειας για τα διαδεδομένα συστήματα θερμικών διεργασιών).

Όταν το σύστημα αντίστροφης όσμωσης έχει σαν νερό τροφοδοσίας του υφάλμυρο νερό δηλαδή πολύ μικρότερης συγκέντρωσης αλάτων τότε οι μετρήσεις που αφορούν το σύστημα είναι αρκετά πιο ευνοϊκές. Στην περίπτωση αυτή δεν απαιτείται τόσο μεγάλη ενεργειακή κατανάλωση, εφόσον οι πιέσεις στο σύστημα αυτό είναι κατά πολύ μικρότερες και η ανάκτηση θερμότητας πολύ μεγαλύτερη. Ακόμα η χαμηλή αλατότητα του νερού δεν απαιτεί μεγάλη προεργασία και δεν καταπονεί τόσο τις μεμβράνες με αποτέλεσμα να αυξάνεται η διάρκεια ζωής τους.[2A]

Όσον αφορά τα συστήματα μηχανικής συμπίεσης το ποσό της ενέργειας που προστίθεται σε ένα τέτοιο σύστημα υπό τη μορφή έργου είναι μικρό αλλά ακόμα ακριβό συγκρίνοντας το με άλλες μεθόδους θερμικών διεργασιών. Τα συστήματα μηχανικής συμπίεσης υδρατμού είναι ευαίσθητα στις θερμικές απώλειες από ακτινοβολία ή από τα απορριπτόμενα ρεύματα. Βοηθητική θερμότητα απαιτείται στο σύστημα για την διατήρηση της ομαλής λειτουργίας του. Ενδεικτικά για μια

μονάδα 100 m³/d και νερό τροφοδοσίας με συγκέντρωση άλατος 42000 ppm χρειάζονται 55 KW για τον συμπιεστή, 2 KW για την αντλία της άλμης, 2 KW για κάθε αντλία τροφοδοσίας, προϊόντος, κυκλοφορίας και κενού και 0,075 KW για την χημική αντλία. Δηλαδή συνολικά απαιτείται έργο 16.578 KWh/m. Ακόμα η ελάχιστη απαιτούμενη βοηθητική θερμότητα ενός τέτοιου συστήματος για μια θερμοκρασία θαλασσινού νερού 30⁰C, είναι 24 KW όταν χρησιμοποιείται η ηλεκτρική ενέργεια για να παρέχει την επιπλέον θερμότητα. [2A]

Ένα από τα αρνητικά του συστήματος μηχανικής συμπίεσης υδρατμού είναι η παρουσία των φαινόμενων διάβρωσης όπως και ιζηματοποίησης. Για τον λόγο αυτό τα υλικά κατασκευής αυτών των συστημάτων είναι ακριβά και επιλέγονται με ιδιαίτερη προσοχή. Τέλος ένα ακόμα αρνητικό είναι η περεταίρω επεξεργασία του παραγόμενου νερού. Σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους το παραγόμενο νερό με τη μέθοδο της μηχανικής συμπίεσης υδρατμού είναι χαμηλής ποιότητας και ακατάλληλο για πόση και ως αποτέλεσμα η επεξεργασία του είναι υποχρεωτική. [2A]

Συνοψίζοντας σε μεγάλες μονάδες αντίστροφης όσμωσης με χρήση συστημάτων ανάκτησης ενέργειας επιτυγχάνεται ενεργειακή κατανάλωση περίπου 2,5 KWh/m³ θαλασσινού νερού (4,5 – 8 χωρίς τη χρήση τέτοιων συστημάτων), έναντι των 15 KWh/m³ των μονάδων μηχανικής συμπίεσης υδρατμού και των 20 KWh/m³ των μονάδων πολυβάθμιας εκτόνωσης. Επίσης η συνεχής εξέλιξη των μεμβρανών, η βελτίωση της απόδοσης των αντλιών, η χρήση συστημάτων ανάκτησης ενέργειας, η σωστή σχεδίαση των μονάδων και η επίτευξη οικονομιών κλίμακας σε χαμηλότερα επίπεδα έχουν μειώσει δραστικά το κόστος του παραγόμενου νερού σε 0,46 δολάρια – 1,17 δολάρια / m³ για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού και σε λιγότερο από 0,45 δολάρια/m³ για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού.[1A]

Τελειώνοντας σε ότι αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη λειτουργία εγκαταστάσεων αφαλάτωσης αυτές εντοπίζονται σε όλα τα στάδια παραγωγής (τροφοδοσία, προεπεξεργασία, αντίστροφη όσμωση, διάθεση άλμης, καθαρισμός μεμβρανών). Στο στάδιο της τροφοδοσίας (άντληση θαλασσινού νερού)

σημειώνεται θνησιμότητα μικρών οργανισμών, όπως μικρά ψάρια, πλαγκτόν, αυγά ψαριών, αλλά και μεγαλύτερων θαλάσσιων ειδών λόγω απορρόφησης ή πρόσκρουσης στον αγωγό εισροής.[1A]

Το σημαντικότερο πρόβλημα είναι τα απόβλητα άλμης που δημιουργούνται από την επεξεργασία του θαλασσινού ή του υφάλμυρου νερού, τα οποία διοχετεύονται χωρίς περαιτέρω επεξεργασία στη θάλασσα. Στις μικρές μονάδες αφαλάτωσης και σε περιοχές με θαλάσσια ρεύματα οι επιπτώσεις δεν είναι σημαντικές αλλά σε μεγαλύτερες μονάδες που λειτουργούν σε χώρες της Μέσης Ανατολής παρατηρήθηκε καταστροφή της θαλάσσιας πανίδας και χλωρίδας σε ακτίνα πολλών χιλιομέτρων από τις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης.[1A]

Εκτός από την αλατότητα εμφανίζονται προβλήματα και από την αύξηση της θερμοκρασίας της άλμης κατά περίπου $3 - 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ στην αντίστροφη όσμωση έναντι $10 - 15$ βαθμών στις διαδικασίες εξάτμισης. Παρατηρούνται επίσης συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων που δεσμεύονται στα ιζήματα και χημική ρύπανση που οφείλεται στα οξέα, τα απολυμαντικά μέσα και στην πλύση των μεμβρανών. [1A]

Στο στάδιο της προεπεξεργασίας αλλά και της τελικής επεξεργασίας χρησιμοποιούνται διάφορα χημικά (χλώριο, θειικό οξύ, ασβέστιο, διοξείδιο του άνθρακα κλπ) ενώ η όλη διαδικασία απαιτεί σημαντική κατανάλωση ενέργειας (περίπου $3 - 5 \text{ kWh/m}^3$ για θαλασσινό και $0,5 - 3 \text{ kWh/m}^3$ για το υφάλμυρο νερό). Πρέπει να σημειωθεί ότι η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης είναι η λιγότερο ενεργοβόρος και ρυπαίνουσα από τις άλλες καθιερωμένες μεθόδους. [1A]

2.13 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ [5A]

Για να κατανοηθεί η λειτουργία ενός συστήματος αφαλάτωσης HDH, θα πρέπει να προχωρήσουμε σε μια ανασκόπηση και σύγκριση των κοινών λειτουργικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται σε συστήματα αφαλάτωσης, ώστε να γίνει δυνατή η σύγκριση του HDH συστήματος με τα υπόλοιπα συστήματα αφαλάτωσης. Γενικά, τα συστήματα αφαλάτωσης μπορούν να ομαδοποιηθούν σε αυτά που χρησιμοποιούν κυρίως τη θερμότητα (θερμική αφαλάτωση) και σε αυτά που χρησιμοποιούν κυρίως το μηχανικό έργο. Επειδή μία μονάδα θερμότητας και μία μονάδα έργου δεν είναι το ίδιο, ούτε από πλευράς κόστους αλλά ούτε και από πλευρά θερμοδυναμικής αξίας, η απόδοση κάθε είδους αυτών των συστημάτων ποσοτικοποιείται με διαφορετική παράμετρο.

Ο λόγος GOR, δηλαδή ο λόγος ωφέλιμης εξόδου, είναι ένα μέτρο της ενεργειακής λειτουργίας σε θερμικά συστήματα αφαλάτωσης, και ορίζεται σαν το πηλίκο της λανθάνουσας θερμότητας του παραγόμενου νερού, προς την προσδιδόμενη στο σύστημα θερμότητα.

$$GOR = \frac{\dot{m}_p h_{fg}}{\dot{Q}_{in}} \quad (2.13.1)$$

Όπου \dot{m}_p είναι ο ρυθμός παροχής μάζας του προϊόντος, ή φρέσκου νερού, h_{fg} είναι η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης και \dot{Q}_{in} η είσοδος θερμότητας στο σύστημα³

Στη βάση της λειτουργίας τους, η θερμική αφαλάτωση θεμελιώνεται σε μία πολύ απλή φυσική αρχή: Το νερό παρουσιάζει μεγαλύτερη πτητικότητα, στις ίδιες συνθήκες, από το άλας του αλμυρού νερού. Επομένως, τα συστήματα θερμικής αφαλάτωσης μπορούν να συνοψιστούν σε δύο βασικά βήματα: Στο 1^ο, έχουμε ατμοποίηση καθαρού ατμού από αλατισμένο νερό, και στο 2^ο, γίνεται η συμπύκνωση του ατμού σε καθαρό νερό. Σε έναν καλό σχεδιασμό, η θερμότητα που απάγεται λόγω της συμπύκνωσης, επαναχρησιμοποιείται για την ατμοποίηση

³ Όταν η είσοδος θερμότητας στο σύστημα είναι ατμός, η παράμετρος που χρησιμοποιείται είναι ο λόγος λειτουργίας που ορίζεται εδώ σαν $PR = \dot{m}_p / \dot{m}_{steam}$. Λόγω μεταβολών στο h_{fg} με τη θερμοκρασία, αυτή η τιμή είναι παρόμοια, αν και όχι ίδια με το GOR. Πρέπει να σημειωθεί, ότι δεν εμφανίζεται να υπάρχει συμφωνία στη βιβλιογραφία για το ποια ποσότητα συμβολίζεται με GOR και ποια είναι ή PR

επιπλέον ποσοτήτων νερού. Ένας λόγος GOR ίσος με μονάδα, υπονοεί, ότι η είσοδος θερμότητας στο σύστημα είναι ακριβώς ίση, με την ποσότητα που απαιτείται για την ατμοποίηση του προϊόντος, χωρίς να έχει γίνει ανάκτηση θερμότητας. Έτσι, από θερμοδυναμική άποψη, η χρησιμότητα του GOR είναι ότι αποτελεί ένα μέτρο του πόσες φορές η λανθάνουσα θερμότητα, που δίδεται από τη συμπύκνωση, επαναχρησιμοποιείται για την ατμοποίηση επιπλέον ποσοτήτων νερού. Αυτό αποτελεί βασική πληροφορία σε ένα σύστημα θερμικής αφαλάτωσης καθώς η ανάκτηση της θερμότητας της συμπύκνωσης, είναι η βασική μέθοδος για την ελάττωση των ενεργειακών απαιτήσεων του συστήματος.

Σε συστήματα αφαλάτωσης που χρησιμοποιούν μηχανικό έργο, η κύρια παράμετρος λειτουργίας είναι το ειδικό έργο διαχωρισμού (SW) που ορίζεται σαν το πηλίκο της εισόδου μηχανικής ισχύος στο σύστημα, προς τη παροχή μάζας παραγόμενου νερού.

$$SW = \frac{\dot{W}_{in}}{\dot{m}_p} \quad (2.13.2)$$

Οι δύο παράμετροι λειτουργίας GOR και SW χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση μεταξύ δύο θερμικών συστημάτων ή δύο μηχανικών συστημάτων, αντίστοιχα. Για να συγκριθούν ένα θερμικό με ένα μηχανικό σύστημα, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη ο βαθμός απόδοσης, καθώς και η πηγή καυσίμου, του αντίστοιχου θερμικού σταθμού που παράγει τη θερμότητα ή το μηχανικό έργο.

Τελικά, ο λόγος ανάκτησης (RR), ορίζεται σαν ο λόγος, της παροχής μάζας του παραγόμενου νερού (προϊόν), \dot{m}_p , προς την παροχή μάζας του νερού εισόδου στο σύστημα, \dot{m}_f .

$$RR = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_f} \quad (2.13.3)$$

Τυπικές τιμές των GOR, SW, και RR δίνονται στη βιβλιογραφία. Θα πρέπει να τονισθεί, ωστόσο, ότι συντρέχουν και άλλοι παράγοντες για την επιλογή ενός συστήματος αφαλάτωσης (οικονομικά κριτήρια και δυνατότητα κατασκευής του έργου για την ζητούμενη ποσότητα παραγωγής νερού).

Desalination System	Typical Capacity [m ³ /d]	GOR [-]	SW [kWh/m ³]
Humidification-Dehumidification (HDH)	1-10	2	-
Solar Still	0.001-0.1	0.5-1	-
Multi-stage Flash (MSF)	100,000 – 500,000	5-10	-
Multi-effect Distillation (MED)	100,000 – 500,000	5-15	-
Reverse Osmosis	1 – 200,000	-	3-8
Mechanical Vapor Compression	1-100	-	10-15

Πίνακας 2.13.1, [5A]: Αντιπροσωπευτικές τιμές λειτουργίας και ικανότητας μερικών τυπικών συστημάτων αφαλάτωσης. Οι τιμές βασίζονται σε δεδομένα που παρουσιάζονται στο [15].

2.14 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΓΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ – ΜΑΖΑΣ [5A]

Καθώς μία πλήρως αναστρέψιμη μεταβολή δεν δύναται να επιτευχθεί σε πεπερασμένο χρονικό διάστημα, σε έναν καλά μελετημένο σχεδιασμό, επιδιώκεται ένας συνδυασμός στον οποίο η παραγωγή εντροπίας ή, ισοδύναμα, η καταστροφή της εξέργειας, θα ελαχιστοποιείται, πληρώνοντας ταυτόχρονα πρακτικές τιμές των παραμέτρων κόστους και λειτουργίας. Μπορεί να δειχθεί αναλυτικά, ότι η ελαχιστοποίηση του πηλίκου της παραγόμενης εντροπίας προς την παροχή μάζας του παραγόμενου νερού, μεγιστοποιεί τον GOR. Θεωρούμε έναν όγκο ελέγχου στον οποίο αλατισμένο νερό εισέρχεται στο σύστημα, μαζί με ροή θερμότητας ή, και ροή μηχανικής ισχύος, για να παραχθεί νερό. Η ροή άλμης εξόδου είναι \dot{m}_b και η ροή νερού εξόδου είναι \dot{m}_p . Ο 1ος θερμοδυναμικός νόμος για το σύστημα δίνει:

$$\dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_f h_f - \dot{m}_b h_b - \dot{m}_p h_p = 0 \quad (2.14.1)$$

όπου h_f , h_b , h_p είναι οι ειδικές ενθαλπίες τροφοδοσίας, άλμης εξόδου και παραγόμενου νερού, αντίστοιχα.

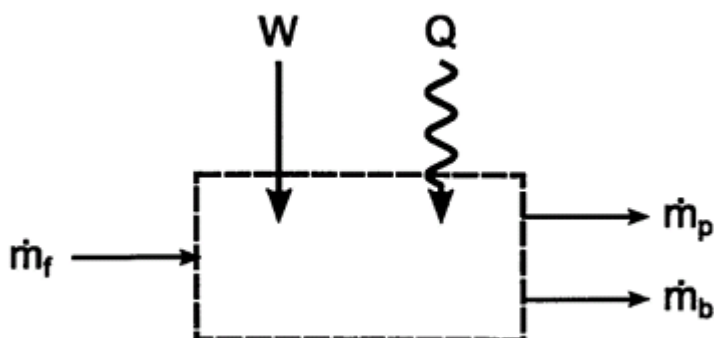
Ο 2ος νόμος της θερμοδυναμικής δίνει:

$$\frac{\dot{Q}}{T} + \dot{m}_f s_f - \dot{m}_b s_b - \dot{m}_p s_p + \dot{S}_{gen} = 0 \quad (2.14.2)$$

όπου s_f , s_b και s_p είναι οι ειδικές εντροπίες της τροφοδοσίας, άλμης εξόδου και προϊόντος, αντίστοιχα.

Η καθαρή μεταφορά εντροπίας μπορεί να αναπτυχθεί σε έναν όρο εισόδου και σε έναν όρο απόρριψης, ως:

$$\frac{\dot{Q}}{T} = \frac{\dot{Q}_{in}}{T_R} - \frac{\dot{Q}_{out}}{T_0} \quad (2.14.3)$$



Σχήμα 2.14.1: Σχηματικό διάγραμμα ενός διαχωριστή («μαύρο κουτί»)

Όπου T_R είναι η θερμοκρασία του θερμού θερμοδοχείου, και T_0 είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, ή του ψυχρού θερμοδοχείου. Συνδυάζοντας τις ανωτέρω εξισώσεις λαμβάνουμε:

$$\dot{Q}_{in} \left(1 - \frac{T_0}{T_R}\right) + \dot{m}_f g_f - \dot{m}_p g_p - \dot{m}_b g_b - \dot{W} - T_0 \dot{S}_{gen} = 0 \quad (2.14.4)$$

Όπου $g = h - Ts$, είναι η ειδική ελεύθερη ενέργεια Gibbs⁴. Από τη διατήρηση της μάζας στον όγκο ελέγχου, $\dot{m}_b = \dot{m}_f - \dot{m}_p$. Αντικαθιστώντας για το \dot{m}_b και διαιρώντας και τα δύο μέλη της εξίσωσης 2.14.4 με $\dot{m}_p h_{fg}$, παίρνουμε:

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}_p h_{fg}} \left(1 - \frac{T_0}{T_R}\right) = \frac{1}{h_{fg}} \left[\frac{\dot{m}_f - \dot{m}_p}{\dot{m}_p} g_b + g_p - \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_p} g_f + \frac{\dot{W}}{\dot{m}_p} + T_0 \frac{\dot{S}_{gen}}{\dot{m}_p} \right] \quad (2.14.5)$$

⁴ Εδώ έχει υποτεθεί ότι τα ρεύματα τροφοδοσίας, προϊόντος και εξόδου, διασχίζουν τα όρια του όγκου ελέγχου στη θερμοκρασία περιβάλλοντος T_0 . Αν δεν ήταν σε αυτή τη τιμή, η θερμοδυναμική ομαδοποίηση ($h - Ts$) θα κατέληγε στην ειδική εξέργεια ροής, και όχι στην ειδική ελεύθερη ενέργεια Gibbs

που μπορεί να ξαναγραφεί σαν:

$$\frac{1}{GOR} \left(1 - \frac{T_0}{T_R} \right) = \frac{1}{h_{fg}} \left[\frac{1}{RR} (g_b - g_f) + (g_p - g_b) + \frac{\dot{W}}{\dot{m}_p} + T_0 \frac{\dot{S}_{gen}}{\dot{m}_p} \right] \quad (2.14.6)$$

Έτσι προκύπτει ότι, για σταθερή τιμή του RR και των συνθηκών εισόδου, η ελαχιστοποίηση του όρου $\frac{\dot{S}_{gen}}{\dot{m}_p}$ μεγιστοποιεί τον GOR . Επομένως, ενισχύεται η ιδέα ότι σε θερμική αφαλάτωση, η αποδοτική ανάκτηση της διαθέσιμης θερμότητας και η ελαχιστοποίηση των μη αναστρεψιμοτήτων, επιτυγχάνει την μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης κατά τη λειτουργία.

Σε επιπλέον πρόσφατες μελέτες, έχει δοθεί έμφαση στη σημασία που έχει η ελαχιστοποίηση της δημιουργίας εντροπίας, στην μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας ενός συστήματος αφαλάτωσης ύγρανσης-αφύγρανσης αερίου ρεύματος (HDH). Το αξιοσημείωτο σε αυτό το σύστημα είναι ότι η μεγαλύτερη πηγή παραγωγής εντροπίας σε αυτό γίνεται στον αφυγραντή όπου, μεγάλες ποσότητες μη συμπυκνώσιμων αερίων (περίπου 80-90%), ελέγχουν τη συνολική μεταφορά θερμότητας και το ρυθμό συμπύκνωσης του υδρατμού.

Στις περισσότερες μελέτες, ο υπολογισμός της παραγόμενης εντροπίας γίνεται με τη θεώρηση όγκου ελέγχου. Ο υπολογισμός αυτός βοηθά στην κατανόηση της επίδρασης των μη αναστρεψιμοτήτων σε ένα σύστημα, ή στοιχείο του συστήματος, αλλά δεν δίνει πληροφορία για το που και πως δημιουργούνται αυτές οι μη αναστρεψιμότητες σε κάθε στοιχείο. Αυτό αποτελεί βασική πληροφορία σε έναν συμπυκνωτή - αφυγραντή του συστήματος HDH, όπου συμβαίνει διαρκής μεταφορά θερμότητας και μάζας. Έτσι, σ'αυτήν την περίπτωση, απαιτείται μια πιο λεπτομερής μελέτη των φαινομένων. Με αυτή τη μελέτη, θα επιχειρηθεί μια βαθύτερη κατανόηση του τρόπου δημιουργίας των μη αναστρεψιμοτήτων, του πώς ο σχεδιασμός για ελαχιστοποίηση του S_{gen} διαφέρει μεταξύ ενός εναλλάκτη μάζας - θερμότητας και ενός απλού εναλλάκτη θερμότητας και τέλος, θα δοθεί ένα πρακτικό κριτήριο για μηχανικούς υπολογισμούς για τη σχεδίαση εναλλάκτη μάζας - θερμότητας.

2.15 ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΜΕ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΜΗ ΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΩΝ ΑΕΡΙΩΝ [5A]

Έχει γίνει εκτενής βιβλιογραφία για τη συμπύκνωση ατμού από μίγματα που περιέχουν μη συμπυκνώσιμα αέρια. Ειδικά, έχει μελετηθεί αρκετά η συμπύκνωση ατμών νερού από μίγμα ξηρού αέρα και υδρατμών. Σε αυτή τη διαδικασία, το μίγμα έρχεται σε επαφή με μία ψυχρή επιφάνεια θερμοκρασίας χαμηλότερης του τοπικού σημείου δρόσου. Καθώς ο ατμός συμπυκνώνεται στην ψυχρή επιφάνεια, το μίγμα ωθείται διά συναγωγής προς την επιφάνεια, αυξάνοντας τη συγκέντρωση των μη συμπυκνώσιμων αερίων κοντά στο τοίχωμα. Δημιουργείται έτσι μια κλίση στη συγκέντρωση που οδηγεί τελικά στη διάχυση του αερίου, σε φορά αντίθετη, από τη κίνηση συναγωγής του μίγματος. Οι κλίσεις της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης λαμβάνουν σημαντικές τιμές και ειδικά για την περίπτωση υψηλών τιμών συγκέντρωσης μη συμπυκνώσιμων αερίων, τόσο η θερμική, όσο και η αντίσταση στο φαινόμενο της διάχυσης, εμποδίζουν τη διαδικασία της συμπύκνωσης.

Μία πρώτη προσπάθεια για την πρόβλεψη των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας σε αυτά τα μίγματα έγινε από τον Colburn [21], που παρατήρησε ότι ακόμα και όταν μικρές ποσότητες αέρα ήταν παρούσες σε συμπυκνωτές ατμού, οι ρυθμοί συμπύκνωσης ήταν σημαντικά χαμηλότεροι από αυτούς που προέβλεπε η θεωρία του Nusselt [22]. Ένα σημαντικό τμήμα εργασίας έγινε από τον Sparrow και από τους συνεργάτες του που χρησιμοποίησαν τεχνικές στρωτού οριακού στρώματος, για να υπολογίσουν τις επιδράσεις των μη συμπυκνώσιμων αερίων, της υπερθέρμανσης ατμού, της αντίστασης διεπιφάνειας, και άλλων φαινομένων πάνω στη συμπύκνωση σε εξωτερική ροή σε πολλές γεωμετρίες [23-25]. Οι Denny, Mills και Jusionis [26,27] μελέτησαν τη συμπύκνωση ενός αριθμού διαφόρων ειδών ατμού σε εξαναγκασμένη, στρωτή ροή, χρησιμοποιώντας εξισώσεις οριακού στρώματος. Η εργασία από τους Wang και Tu [28], είναι ένα πρώιμο παράδειγμα ανάλυσης συμπύκνωσης σε ένα κάθετο σωλήνα με μη συμπυκνώσιμα αέρια όπου, οι συγγραφείς βρήκαν πως οι επιδράσεις των μη συμπυκνώσιμων αερίων, γίνονται πιο εμφανείς σε κλειστούς χώρους γιατί η συγκέντρωση των μη συμπυκνώσιμων

αυξάνει καθώς προχωρά η συμπύκνωση. Αρκετά μοντέλα δικτύων με αντιστάσεις έχουν αναπτυχθεί για να παρέχουν ακριβείς τρόπους για τη συσχέτιση εμπειρικών δεδομένων σε συμπύκνωση εντός σωλήνα με αέρα – ατμό, ατμό – ήλιο, και άλλα μίγματα [29-31].

Κυρίως, οι μελέτες που έχουν γίνει ως τώρα αποσκοπούν στο να προβλέπουν την τιμή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε συμπυκνωτές ατμού με σχετικά μικρές ποσότητες μη συμπυκνώσιμων αερίων, ως αποτέλεσμα διαρροής ή διαλυμένων αερίων. Σε λίγες περιπτώσεις, έχει γίνει η μελέτη για μεγάλες ποσότητες μη συμπυκνώσιμων αερίων, σε περιοχή θερμοκρασιών πάνω από αυτές που συναντώνται σε συστήματα θέρμανσης – κλιματισμού (για τα οποία οι αφυγραντές έχουν μελετηθεί με λεπτομέρεια). Αυτά τα εύρη θερμοκρασιών είναι πρωτεύοντος ενδιαφέροντος σε συστήματα αφαλάτωσης HDH, για παράδειγμα. Σε μια μελέτη που εισέρχεται στο εύρος των HDH συστημάτων, ο Rao κ.α. [32], χρησιμοποιώντας τεχνικές οριακού στρώματος έδειξαν, όπως αναμενόταν, ότι οι υψηλές τιμές κλάσματος μη συμπυκνώσιμων αερίων ελαττώνουν τον ρυθμό συμπύκνωσης και μεταφοράς θερμότητας σε σημαντικό βαθμό.

2.16 ΕΙΣΣΟΡΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΣΕ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΖΑΣ [5A]

Μια προσέγγιση στην ελαχιστοποίηση της παραγόμενης εντροπίας, σε έναν εναλλάκτη θερμότητας, είναι η τεχνική της εξισορρόπησης. Το βασικό στοιχείο στη κατανόηση της σχέσης, μεταξύ της εξισορρόπησης και της παραγωγής εντροπίας, είναι η χρήση της έννοιας των παραμενουσών μη αναστρεψιμοτήτων ή, «ανισορροπιών ροής» [33]. Η ελαχιστοποίηση της παραγόμενης εντροπίας, ελαχιστοποιώντας την ύπαρξη των μη ισορροπιών ροής, βρίσκεται σε διακριτή αντίθεση με την ελαχιστοποίηση της παραγωγής εντροπίας στη μεταφορά θερμότητας, μέσω της ελαχιστοποίησης της θερμοκρασιακής διαφοράς κατά τη διεύθυνση της ροής θερμότητας. Ένα απλό, κατανοητό παράδειγμα είναι πιθανόν να εμφανίσει αυτή την αντίθεση οπότε, ως εξετάσουμε, τον εξισορροπημένο εναλλάκτη αντιρροής. Όταν η ροή (ρυθμός) θερμοχωρητικότητας, $\dot{m}c_p$, και οι

συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και των δύο ρευμάτων, είναι περίπου σταθεροί, η κινούσα θερμοκρασιακή διαφορά θα είναι σταθερή κατά την κατεύθυνση της ροής, οδηγώντας σε ελαχιστοποίηση των μη αναστρεψιμοτήτων, αν και υπάρχει πεπερασμένη θερμοκρασιακή διαφορά που παράγει εντροπία. Στην πραγματικότητα, έχει δειχθεί αναλυτικά ότι αυτή η διαμόρφωση έχει σαν αποτέλεσμα την ελάχιστη παραγωγή εντροπίας για δεδομένες θερμοκρασίες εισόδου και βαθμό απόδοσης εναλλάκτη [17].

Στην περίπτωση εναλλάκτη μάζας και θερμότητας, ο παράγοντας $\dot{m}c_p$, δεν καθορίζει πλήρως την αξονική θερμοκρασιακή κλίση του κάθε ρεύματος, λόγω της επίδρασης της λανθάνουσας συναλλασσόμενης θερμότητας και επομένως, δεν καθορίζει την, από ρευστό σε ρευστό, κινούσα θερμοκρασιακή διαφορά. Ένα πιο γενικό κριτήριο, για την ελάχιστη παραγωγή εντροπίας σε εναλλάκτη καθορισμένου μεγέθους και δεδομένης λειτουργίας στον οποίο συμβαίνουν ταυτόχρονα διεργασίες μεταφοράς θερμότητας και μάζας, δίδεται από τους Tondeur και Knaalen [34]. Αυτοί έδειξαν ότι στην περίπτωση που ισχύουν γραμμικές σχέσεις για την παραγωγή εντροπίας, και ισχύουν επιπλέον οι σχέσεις του Onsager [35,36] (δηλαδή ότι υπακούει στην αρχή της μικροσκοπικής αναστρεψιμότητας ή, πως δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά από τη θερμοδυναμική ισορροπία), το κριτήριο είναι ότι ο τοπικός ογκομετρικός ρυθμός παραγωγής εντροπίας, είναι σταθερός στο χώρο και στο χρόνο. Αυτό το αποτέλεσμα είναι γνωστό σαν το θεώρημα ελάχιστης διασποράς ή, ισοκατανομής της παραγωγής εντροπίας (EoEP). Όταν οι φαινομενολογικοί συντελεστές, δηλαδή οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και μάζας είναι σταθεροί, η ομοιομορφία (ισοκατανομή) στην παραγωγή εντροπίας είναι ισοδύναμη με την ομοιομορφία της θερμοδυναμικής κινούσας δύναμης (EoF).

Ο Johannessen κ.α. [37], μεταβάλλοντας τη σύνθετη (συνισταμένη) θερμική αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας, έδειξαν ότι η ομοιομορφία στην κινούσα δύναμη αντιστοιχεί σε ρυθμό παραγωγής εντροπίας που έχει διαφορά, περίπου στο 1%, από τον θεωρητικά ελάχιστο ρυθμό παραγωγής εντροπίας (EoEP) για τους περισσότερους εναλλάκτες θερμότητας. Ο Balkan [38] έδειξε ότι η ομοιομορφία στη θερμοκρασιακή διαφορά, μεταξύ των δύο ρευμάτων ρευστού σε έναν

εναλλάκτη αντιρροής με σταθερό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, αντιστοιχεί σε ελάχιστο περίπου ρυθμό παραγωγής εντροπίας.

Στην περίπτωση όπου ένα κορεσμένο μίγμα ξηρού αέρα και υδρατμών υφίσταται μια ταυτόχρονη, μη μηδενική μεταφορά θερμότητας και μάζας, δεν μπορεί να υπάρξει διαδικασία όπου οι κινούσες κλίσεις της θερμοκρασίας και του κλάσματος μάζας θα είναι και οι δύο, ταυτόχρονα σταθερές, σε πεπερασμένο όγκο. Αυτό είναι το αποτέλεσμα της εκθετικής αύξησης της πίεσης κορεσμού με την αύξηση της θερμοκρασίας της διεπιφάνειας μεταφοράς. Η θερμοκρασία ατμοποίησης και το κλάσμα μάζας συνδέονται με μονότονη συσχέτιση, η οποία όμως δεν είναι γραμμική. Έτσι το μέγεθος της διαφοράς του κλάσματος μάζας (ή συγκέντρωσης) που δημιουργείται από θερμοκρασιακή διαφορά, θα αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό σημαίνει ότι, σε αντίθεση με έναν εναλλάκτη θερμότητας, η ελαχιστοποίηση της παραγωγής εντροπίας είναι συνάρτηση τριών θεμελιωδών παραγόντων - κριτηρίων: (1) το λόγο των ρυθμών παροχής μάζας των δύο ρευμάτων, (2) τη μέση συγκέντρωση των ρευμάτων των διαχεόμενων συστατικών, (3) το μέγεθος των κινουσών δυνάμεων μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Όπως θα δειχθεί αργότερα, η μέση τιμή και η διασπορά στις κινούσες δυνάμεις μεταφοράς θερμότητας και μάζας, ενσωματώνει και τους τρεις αυτούς παράγοντες, σε αντίθεση με τη χρήση μόνο του λόγου των ρευμάτων των θερμοχωρητικοτήτων.

Επομένως, αν κάποιος δεν μπορεί να πετύχει την ομοιομορφία όλων των κινουσών δυνάμεων, θα πρέπει να αναγνωρίσει την κυρίαρχη πηγή της παραγωγής εντροπίας και να επιλέξει μία κατάσταση ροής που οδηγεί σε ομοιομορφία της κυρίαρχης πηγής παραγωγής εντροπίας.

Στην παρούσα εργασία, εφαρμόζεται πρώτα η μεθοδολογία της ανάλυσης σε όγκο ελέγχου για να υπολογιστεί η αύξηση της εντροπίας, ώστε να δειχθεί ότι για την ανάλυση του προβλήματος, απαιτείται μία πιο σύνθετη μέθοδος προσέγγισης. Κατόπιν, θα βρεθούν οι εκφράσεις που συνδέουν την παραγωγή εντροπίας με τις αντίστοιχες ροές μάζας και κινούσες δυνάμεις (θερμοκρασιακή κλίση και κλίση του κλάσματος μάζας ή συγκέντρωσης). Αυτές οι σχέσεις θα εφαρμοστούν σε έναν

εναλλάκτη θερμότητας και μάζας, σε μία γενική ανάλυση με αδιάστατες παραμέτρους. Εν συνεχεία, οι εξισώσεις θα εφαρμοστούν απευθείας σε μία ανάλυση στρωτού οριακού στρώματος όπου, με εφαρμογή διάφορων οριακών συνθηκών, θα επιχειρηθεί να βρεθεί εκείνη η λειτουργική διαμόρφωση στην οποία θα έχουμε ισοκατανομή παραγωγής εντροπίας, γεγονός που οδηγεί στην ελάχιστη συνολική παραγωγή της. Από τη διαδικασία αυτή θα προκύψει ένα σύνολο κριτηρίων για την ελαχιστοποίηση της παραγωγής εντροπίας. Θα μελετηθούν, επίσης, επιλεγμένες συνθήκες που αντιστοιχούν σε συμπυκνωτές του συστήματος HDH, καθώς στο σύστημα αυτό έχουμε μεγαλύτερες τιμές ρυθμών μεταφοράς μάζας και συμπύκνωσης από ότι σε άλλες περιπτώσεις οριακών στρωμάτων, με ταυτόχρονη παρουσία πολύ μεγαλύτερων συγκεντρώσεων μη συμπυκνώσιμων αερίων από ότι σε έναν κοινό συμπυκνωτή. Παρόλα αυτά, η παρούσα εργασία μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε διμερές μίγμα όπου έχουμε διάχυση συστατικών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΟΓΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ [5A]

Σε αυτό το κεφάλαιο, εισάγονται και εφαρμόζονται οι αρχές της εξισορρόπησης με τη μέθοδο του όγκου ελέγχου, τόσο σε εναλλάκτες θερμότητας, όσο και σε εναλλάκτες θερμότητας και μάζας. Εισάγονται οι απλές θερμοδυναμικές εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά αυτών των συστημάτων, με διττό σκοπό: Αφενός, να ευρεθούν οι σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν την ελαχιστοποίηση της παραγωγής εντροπίας, και αφετέρου, να καταδειχθεί ότι με τη χρήση τέτοιων μεθόδων, που περιγράφουν την ελαχιστοποίηση της παραγόμενης εντροπίας σε απλούς θερμικούς εναλλάκτες, δεν μπορεί να περιγραφεί με απτό, κατανοητό τρόπο, η παραγωγή εντροπίας σε εναλλάκτες μάζας και θερμότητας.

3.1. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΣΕ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ [5A]

Θα θεωρήσουμε έναν απλό εναλλάκτη αντιρροής, όπου η θερμότητα συναλλάσσεται μεταξύ δύο καθαρών ρευστών ουσιών, με σταθερές ειδικές θερμοχωρητικότητες. Θεωρώντας αμελητέα συναλλαγή θερμότητας (αδιαβατική διεργασία) μεταξύ του εναλλάκτη και του περιβάλλοντος, ο 1^{ος} θερμοδυναμικός νόμος μας δίνει:

$$(\dot{m}c_p)_H(T_{H,in} - T_{H,out}) = (\dot{m}c_p)_C(T_{C,out} - T_{C,in}) \quad (3.1.1)$$



ΣΧΗΜΑ 3.1.1: ΟΓΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΑΝΤΙΠΡΟΗΣ

Όπου, οι δείκτες H και C αναφέρονται στο θερμό και στο ψυχρό ρεύμα και τα γινόμενα $\dot{m}c_p$ είναι τα γινόμενα των αντίστοιχων ροών μάζας επί την ειδική θερμοχωρητικότητα. Η θερμοκρασία T είναι η μέση, θερμοδυναμικά, θερμοκρασία κάθε ρεύματος. Αν αμεληθούν οι επιδράσεις της πτώσης πίεσης στη μεταβολή της εντροπίας, ο 2^{ος} νόμος της θερμοδυναμικής, όπως εκφράζεται με την εξίσωση του Gibbs, δίνει:

$$\dot{S}_{gen} = (\dot{m}c_p)_H \ln\left(\frac{T_{H,out}}{T_{H,in}}\right) + (\dot{m}c_p)_C \ln\left(\frac{T_{C,out}}{T_{C,in}}\right) \quad (3.1.2)$$

Ο βαθμός απόδοσης του εναλλάκτη είναι το πηλίκο της συναλλασσόμενης ροής θερμότητας μεταξύ των δύο ρευμάτων και της μέγιστης δυνατής συναλλασσόμενης θερμότητας ανάμεσα στα δύο ρεύματα, με δεδομένη θερμοκρασία εισόδου των ρευστών:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{(\dot{m}c_p)_H(T_{H,in}-T_{H,out})}{(\dot{m}c_p)_{min}(T_{H,in}-T_{C,in})} = \frac{(\dot{m}c_p)_C(T_{C,out}-T_{C,in})}{(\dot{m}c_p)_{min}(T_{H,in}-T_{C,in})} \quad (3.1.3)$$

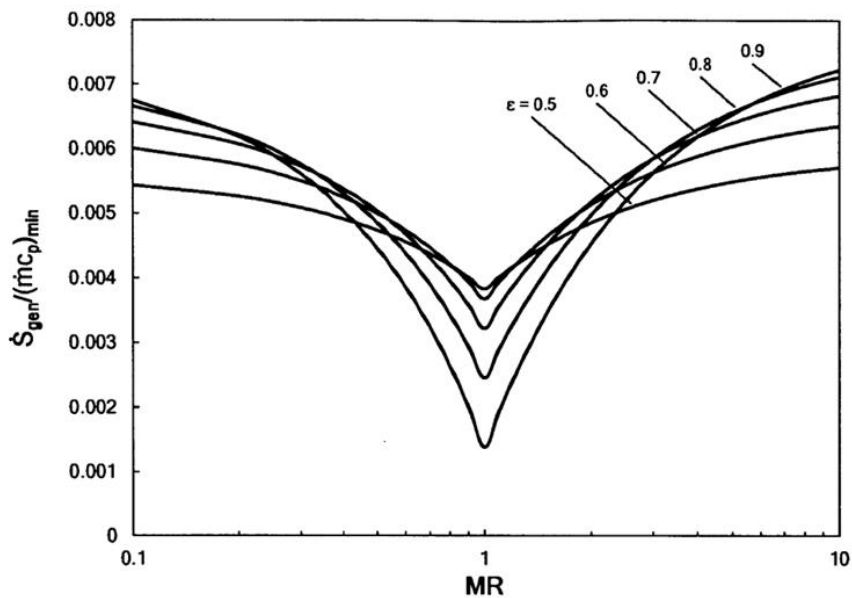
Όπου, η ελάχιστη ροή (ρυθμός) θερμοχωρητικότητας ορίζεται σαν:

$$C_{min} = (mC_p)_{min} = \min((\dot{m}c_p)_H, (\dot{m}c_p)_C) \quad (3.1.4)$$

Έχει αποδειχθεί [17, 33] ότι, για δεδομένη απόδοση και δεδομένες θερμοκρασίες εισόδων των ρευστών, ο ελάχιστος κανονικοποιημένος ρυθμός αύξησης εντροπίας επιτυγχάνεται όταν, οι παροχές μάζας είναι τέτοιες ώστε $C^* = (\dot{m}c_p)_{min} / (\dot{m}c_p)_{max} = 1$. Αυτό το αποτέλεσμα προκύπτει από τις εξισώσεις 3.1.2 και 3.1.3. Ξαναγράφοντας τον 2^ο νόμο με όρους απόδοσης C^* και θερμοκρασίες εισόδου, έχουμε:

$$\frac{\dot{S}_{gen}}{(\dot{m}c_p)_{min}} = \ln\left(\varepsilon \frac{\Delta T_{max,possible}}{T_{in,Cmin}} + 1\right) + \frac{1}{C^*} \ln\left(\varepsilon C^* \frac{\Delta T_{max,possible}}{T_{in,Cmax}} + 1\right) \quad (3.1.5)$$

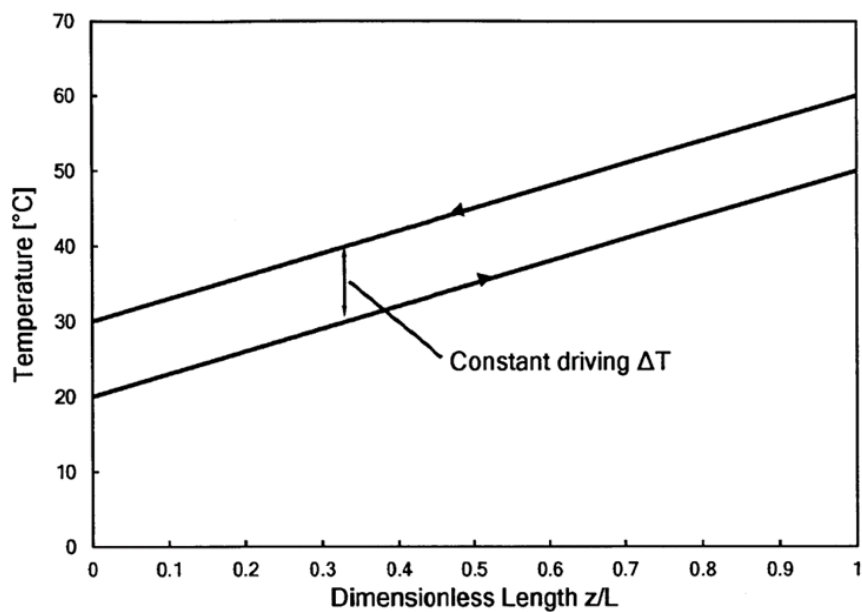
Όπου, το μέγιστο δυνατό ΔT , είναι η διαφορά μεταξύ της ζεστής και κρύας θερμοκρασίας εισόδων των ρευμάτων. Σημειώνοντας ότι εξ ορισμού, το C^* είναι ένας αριθμός μεταξύ του μηδέν και του ένα, για μια δεδομένη απόδοση και για δεδομένες θερμοκρασίες εισόδου, η παραγωγή εντροπίας φτάνει το min όταν το $C^*=1$. Δηλαδή, ο εξισορροπημένος θερμικός εναλλάκτης αντιροής ελαχιστοποιεί την παραγωγή εντροπίας. Το σχήμα 3.1.2 εμφανίζει αυτό το σημαντικό συμπέρασμα γραφικά. Καθώς ο λόγος των ρυθμών παροχής μάζας $MR = \frac{m_C}{m_H}$ μεταβάλλεται, δηλαδή καθώς η μονάδα γίνεται περισσότερο ή λιγότερο εξισορροπημένη, η κανονικοποιημένη παραγωγή εντροπίας $\frac{\dot{S}_{gen}}{(\dot{m}c_p)_{min}}$ φτάνει μια ελάχιστη τιμή. Αυτό δίδει μια απλή ερμηνεία της εξισορρόπησης από πλευράς εντροπίας: μεταβάλλοντας τον λόγο ρυθμών παροχής μάζας, μια μονάδα μπορεί να σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιεί την παραγωγή εντροπίας, ενώ ταυτόχρονα, ικανοποιεί πρακτικές φυσικές παραμέτρους (όπως π.χ. καθορισμένο μέγεθος).



Σχήμα 3.1.2, [5A]: Σε έναν θερμικό εναλλάκτη με δεδομένη απόδοση και θερμοκρασίες εισόδου, η παραγωγή εντροπίας ελαχιστοποιείται όταν ο λόγος των ροών (ρυθμών) των ολικών θερμοχωρητικότητας είναι 1. Εδώ, για απλότητα και τα δύο ρεύματα έχουν την ίδια ειδική θερμοχωρητικότητα και η ελάχιστη τιμή της τεταγμένης είναι για $MR=1$

Πρέπει να σημειωθεί ότι, αυτή η εξισορροπημένη διαμόρφωση έχει επιπλέον σαν αποτέλεσμα, μια ομοιόμορφη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα δύο ρεύματα, όπως μπορεί να διαφανεί από μία απλή ενεργειακή θεώρηση των ρευμάτων. Η θερμότητα που χάθηκε από το ζεστό ρεύμα κερδίζεται από το ψυχρό ρεύμα (ανεξάρτητα του ποιό είναι το ρεύμα με το ελάχιστο ή μέγιστο ρυθμό θερμοχωρητικότητας). Τότε, η διατήρηση της ενέργειας απαιτεί ότι

$$C_{min} \left(\frac{dT_b}{dx} \right)_{C_{min}} = C_{max} \left(\frac{dT_b}{dx} \right)_{C_{max}} \quad (3.1.6)$$



Σχήμα 3.1.3, [5A]: Προφίλ θερμοκρασιών για εξισορροπημένο θερμικό εναλλάκτη αντιρροής. Αυτή η διαμόρφωση έχει σαν αποτέλεσμα τον ελάχιστο ρυθμό παραγωγής εντροπίας

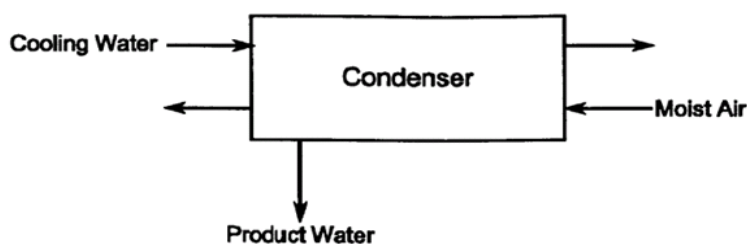
Με όρους του C^* ,

$$C^* = \left(\frac{dT_b}{dx}\right)_{Cmax} / \left(\frac{dT_b}{dx}\right)_{Cmin} \quad (3.1.7)$$

Έτσι, αν $C^*=1$, η μέση θερμοκρασία και των δύο ρευμάτων αλλάζει με τον ίδιο ρυθμό και η κινούσα θερμοκρασιακή διαφορά $T_H - T_C$ ανάμεσα στα δύο ρεύματα, παραμένει σταθερή. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 3.1.3. Αν και αυτή η αρχή είναι πολύ γνωστή, δίδεται εδώ ιδιαίτερη έμφαση γιατί είναι σχετική με την ελαχιστοποίηση της παραγωγής εντροπίας. Αργότερα, θα δειχθεί στην εργασία ότι, η ομοιόμορφη κατανομή της κινούσας δύναμης, είναι ένα πιο γενικό κριτήριο, από το $C^*=1$.

3.2. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΣΕ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΖΑΣ [5A]

Σε έναν εναλλάκτη, όπου γίνεται ταυτόχρονη συναλλαγή μάζας και θερμότητας, δεν ισχύουν οι εξισώσεις (3.1.1) και (3.1.2). Η διεργασία συναλλαγής μάζας μεταβάλλει σημαντικά το C_p , καθώς το C_p ενός μίγματος, εξαρτάται ισχυρά από τα κλάσματα μάζας των συστατικών. Επιπρόσθετα, για ένα μίγμα, η αλλαγή στην ειδική ενθαλπία του μίγματος με την θερμοκρασία $\frac{\partial h}{\partial T}$, δεν είναι ίση με την ειδική θερμοχωρητικότητα του μίγματος. Ακολουθώντας, οι εκφράσεις για την διατήρηση της ενέργειας και την παραγωγή εντροπίας, θα αναπαραχθούν για έναν εναλλάκτη μάζας και θερμότητας, ώστε να καταστεί διακριτή η διαδικασία εξισορρόπησης ενός εναλλάκτη θερμότητας, από έναν εναλλάκτη μάζας – θερμότητας.



Σχήμα 3.2.1: Όγκος ελέγχου ενός εναλλάκτη αντιρροής

Θεωρούμε σαν παράδειγμα ενός τέτοιου σύνθετου εναλλάκτη, τον συμπυκνωτή - αφυγραντή ενός συστήματος αφαλάτωσης HDH. Θεωρούμε τον όγκο ελέγχου που διακρίνεται στο σχήμα, όπου κρύο νερό ρέει σε αντιρροή με ένα ρεύμα υγρού αέρα. Οι ποσότητες που αναφέρονται στον υγρό αέρα έχουν σαν δείκτη το α . Η ροή υγρού αέρα είναι το άθροισμα της ροής υδρατμού, \dot{m}_v και ξηρού αέρα, \dot{m}_g . Οι ιδιότητες που αναφέρονται σε αυτά τα δύο συστατικά, παίρνουν τους δείκτες v και g , αντίστοιχα. Το συμπύκνωμα (ροή παραγόμενου νερού) παίρνει τον δείκτη p . Τότε η διατήρηση της μάζας δίνει:

$$\frac{dM}{dt} = \dot{m}_{\alpha,in} - \dot{m}_{\alpha,out} - \dot{m}_p = 0 \quad (3.2.1)$$

Διατυπώνοντας την ανωτέρω εξίσωση χρησιμοποιώντας την παροχή ξηρού αέρα και τον λόγο υγρασίας, παίρνουμε μία έκφραση για το \dot{m}_p :

$$\dot{m}_p = \dot{m}_g(\omega_{in} - \omega_{out}) \quad (3.2.2)$$

Όπου τα ω αναφέρονται στον λόγο υγρασίας, που ορίζεται σαν το πηλίκο της μάζας υδρατμών προς την μάζα ξηρού αέρα, $\omega = m_v/m_g$.

Εφαρμόζοντας τον 1^ο νόμο της θερμοδυναμικής για τον όγκο ελέγχου λαμβάνουμε:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}_g(h_{\alpha,in} - h_{\alpha,out}) + \dot{m}_c(h_{c,in} - h_{c,out}) - \dot{m}_p h_p = 0 \quad (3.2.3)$$

Όπου οι ειδικές ενθαλπίες του υγρού αέρα γράφονται ανά μονάδα μάζας ξηρού αέρα, $h_\alpha = h_g + \omega h_v$. Χρησιμοποιώντας τις ανωτέρω εξισώσεις η έκφραση της μεταβολής της ενθαλπίας του ψυκτικού ρευστού γίνεται:

$$\dot{m}_c(h_{c,out} - h_{c,in}) = \dot{m}_g\{(h_{\alpha,in} - h_{\alpha,out}) - (\omega_{in} - \omega_{out})h_p\} \quad (3.2.4)$$

Αναπτύσσοντας τις ποσότητες ενθαλπίας υγρού αέρα στα συστατικά τους, παίρνουμε την ακόλουθη εξίσωση:

$$\dot{m}_c(h_{c,out} - h_{c,in}) = \dot{m}_g\{(h_{g,in} - h_{g,out}) + \omega_{in}(h_{v,in} - h_p) - \omega_{out}(h_{v,out} - h_p)\} \quad (3.2.5)$$

Υποθέτοντας ότι, ο ξηρός αέρας και ο υδρατμός που αποτελούν τον υγρό αέρα συμπεριφέρονται σαν τέλεια αέρια, η ενθαλπία του υδρατμού στην είσοδο είναι

$$h_{v,in} = c_{p,v}(T_{\alpha,in} - T^0) + h^0 \quad (3.2.6)$$

Όπου, ο εκθέτης «ο» αναφέρεται σε αυθαίρετη κατάσταση αναφοράς. Οι ενθαλπίες του ξηρού αέρα και του υδρατμού στην είσοδο και στην έξοδο γράφονται με παρόμοιο τρόπο. Υποθέτοντας ότι το παραγόμενο ρεύμα νερού είναι ασυμπίεστο ρευστό, ο όρος h_p , εκφράζεται σαν:

$$h_p = c_{p,p}(T_p - T^0) + h^0 \quad (3.2.7)$$

Όπου πάλι ο εκθέτης «ο» αναφέρεται σε αυθαίρετη κατάσταση αναφοράς. Οι ενθαλπίες αναφοράς στις εξισώσεις (3.2.6) και (3.2.7), επιλέγονται σαν ενθαλπίες κορεσμένου ατμού και υγρού, αντίστοιχα, σε μία θερμοκρασία μεταξύ της θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου του αέριου ρεύματος⁵. Έτσι αφαιρώντας την εξίσωση (3.2.7) από την εξίσωση (3.2.6), έχουμε:

$$h_{v,in} - h_p = c_{p,v}(T_{\alpha,in} - T^s) - c_{p,p}(T_p - T^s) + h_{fg} \quad (3.2.8)$$

Όπου T^s είναι η επιλεγμένη θερμοκρασία κορεσμού, και h_{fg} είναι η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης για αυτή τη θερμοκρασία. Η μεταβολή της ενθαλπίας ($h_{v,out} - h_p$) στην εξίσωση (3.2.5) λαμβάνει παρόμοια μορφή. Η μοντελοποίηση του ψυκτικού ρευστού ως ασυμπίεστου, δίνει την ακόλουθη έκφραση για την ενθαλπική του μεταβολή:

$$h_{c,out} - h_{c,in} = c_{p,c}(T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (3.2.9)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.2.8) και (3.2.9), το ενεργειακό ισοζύγιο παίρνει τη μορφή:

$$\begin{aligned} \dot{m}_c c_{p,c}(T_{c,out} - T_{c,in}) = \\ \dot{m}_g \{ c_{p,g}(T_{\alpha,in} - T_{\alpha,out}) + \omega_{in} c_{p,v}(T_{\alpha,in} - T^s) - \omega_{out} c_{p,v}(T_{\alpha,out} - T^s) \\ + (\omega_{in} - \omega_{out}) [h_{fg} - c_{p,c}(T_p - T^s)] \} \end{aligned} \quad (3.2.10)$$

Η ολική συναλλασσόμενη ροή θερμότητας στον συμπυκνωτή – αφυγραντή, ή, αλλιώς, θερμικό φορτίο \dot{Q} , είναι είτε το δεξί, είτε το αριστερό μέλος της εξίσωσης (3.2.10).

Γράφοντας τον 2^ο νόμο της θερμοδυναμικής για τον όγκο ελέγχου παίρνουμε:

$$\frac{dS}{dt} = \dot{m}_g (s_{\alpha,in} - s_{\alpha,out}) + \dot{m}_c (s_{c,in} - s_{c,out}) - \dot{m}_p s_p + \dot{S}_{gen} = 0 \quad (3.2.11)$$

⁵ Σημειώστε ότι επειδή η ενθαλπία είναι μια ιδιότητα κατάστασης, και συνεπώς, δεν εξαρτάται από τη διαδρομή, η επιλογή μιας θερμοκρασίας ατμοποίησης ανάμεσα στις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του αέρα, δεν είναι μαθηματικά απαραίτητη. Επιλέγεται έτσι, μόνο γιατί οι ειδικές θερμοχωρητικότητες θεωρούνται σταθερές στο μοντέλο του τελείου αερίου, και υπολογίζονται στη μέση τιμή ανάμεσα στις δυο καταστάσεις. Επιλέγοντας μια θερμοκρασία κορεσμού ανάμεσα στην είσοδο και στην έξοδο, ελαττώνεται το σφάλμα που συνδέεται με την υπόθεση σταθερών ειδικών θερμοχωρητικότητων.

Λύνοντας για το \dot{S}_{gen} , παίρνουμε:

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}_g \{(s_{\alpha,out} - s_{\alpha,in}) + (\omega_{in} - \omega_{out})s_p\} + \dot{m}_c (s_{c,out} - s_{c,in}) \quad (3.2.12)$$

Η ειδική εντροπία για τον υγρό αέρα εκφράζεται, ανά μονάδα μάζας ξηρού αέρα, σαν $s_\alpha = s_g + \omega s_v$. Έτσι, αναπτύσσοντας τους όρους ειδικής ενθαλπίας του αέριου ρεύματος, παίρνουμε:

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}_g \{(s_{g,out} - s_{g,in}) + \omega_{out}(s_{v,out} - s_p) - \omega_{in}(s_{v,in} - s_p)\} + \dot{m}_c (s_{c,out} - s_{c,in}) \quad (3.2.13)$$

Καθώς υποθέσαμε ότι, τα συστατικά του υγρού αέρα συμπεριφέρονται σαν τέλεια αέρια, έχουμε για την ειδική εντροπία του υδρατμού στην είσοδο:

$$s_{v,in} = c_{p,v} \ln \left(\frac{T_{\alpha,in}}{T^o} \right) - R_v \ln \left(\frac{P_{v,in}}{P^o} \right) + s^o \quad (3.2.14)$$

Όπου P_v είναι η μερική πίεση του υδρατμού, P^o είναι μία αυθαίρετη πίεση αναφοράς και s^o είναι η ειδική εντροπία του υδρατμού στην κατάσταση αναφοράς P^o, T^o . Οι εκφράσεις για την είσοδο και την έξοδο του ξηρού αέρα και, για την έξοδο του υδρατμού, είναι ανάλογες. Η ειδική εντροπία του παραγόμενου νερού, θεωρώντας το σαν ασυμπίεστο ρευστό είναι:

$$s_p = c_{p,p} \ln \left(\frac{T_p}{T^o} \right) + s^o \quad (3.2.15)$$

Η κατάσταση αναφοράς για τον υδρατμό ορίζεται σαν κατάσταση κορεσμένου υδρατμού, σε μία θερμοκρασία T^s μεταξύ των $T_{\alpha,in}$ και $T_{\alpha,out}$. Η κατάσταση αναφοράς για το παραγόμενο νερό επιλέγεται ως κατάσταση κορεσμένου υγρού στην ίδια θερμοκρασία. Τότε, παίρνουμε:

$$s_{v,in} - s_p = c_{p,v} \ln \left(\frac{T_{\alpha,in}}{T^s} \right) - R_v \ln \left(\frac{P_{v,in}}{P^s} \right) + s_{fg} + c_{p,p} \ln \left(\frac{T^s}{T_p} \right) \quad (3.2.16)$$

Η μεταβολή της ειδικής εντροπίας του ψυκτικού ρευστού, θεωρούμενου ως ασυμπίεστο ρευστό, δίνεται σαν:

$$s_{c,out} - s_{c,in} = c_{p,c} \ln \left(\frac{T_{c,out}}{T_{c,in}} \right) \quad (3.2.17)$$

Χρησιμοποιώντας τις ανωτέρω εξισώσεις, (3.2.14), (3.2.16) και (3.2.17), στην εξίσωση (3.2.13), για την αύξηση της εντροπίας στον όγκο ελέγχου (εναλλάκτη) παίρνουμε:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{gen} = & \dot{m}_c c_{p,c} \ln\left(\frac{T_{c,out}}{T_{c,in}}\right) + \dot{m}_g \{c_{p,g} \ln\left(\frac{T_{g,out}}{T_{g,in}}\right) - R_g \ln\left(\frac{P_{g,out}}{P_{g,in}}\right) + \omega_{out} [c_{p,v} \ln\left(\frac{T_{\alpha,out}}{T^s}\right) - \\ & R_v \ln\left(\frac{P_{v,out}}{P^s}\right)] - \omega_{in} [c_{p,v} \ln\left(\frac{T_{\alpha,in}}{T^s}\right) - R_v \ln\left(\frac{P_{v,in}}{P^s}\right)] + (\omega_{out} - \omega_{in}) [S_{fg} + c_{p,p} \ln\left(\frac{T^s}{T_p}\right)]\} \end{aligned} \quad (3.2.18)$$

Η εξίσωση (3.2.18) εισάγει επιπλέον όρους σε σχέση με την ισχύουσα εξίσωση για τον απλό εναλλάκτη θερμότητας, καθώς το πρόβλημα περιπλέκεται από την ύπαρξη μεταφοράς μάζας και από την συνεχή χρονικά μεταβολή που αυτή επιφέρει, πάνω στην θερμοχωρητικότητα του μίγματος. Παρόλα αυτά, ο λόγος των παροχών μάζας, MR, εξακολουθεί να εμφανίζεται σαν μία παράμετρος που επηρεάζει την παραγωγή της εντροπίας.

Αν και η μέθοδος του όγκου ελέγχου που αναπτύχθηκε σε αυτό το κεφάλαιο, δίνει τις παραμέτρους με τις οποίες μπορεί να εκφραστεί η αύξηση της εντροπίας σε έναν σύνθετο εναλλάκτη, δεν μας πληροφορεί για το πώς ακριβώς γίνεται αυτή η αύξηση, ούτε μπορεί να προσφέρει βαθύτερη απάντηση, με θεμελιακό τρόπο, στο γιατί η εξισορρόπηση ενός συστήματος ελαχιστοποιεί την παραγωγή εντροπίας σε αυτό. Χωρίς μία στέρεη και ποιοτική κατανόηση των παραπάνω, είναι δύσκολο να παρουσιαστεί, ένα σύνολο κριτηρίων ελαχιστοποίησης της παραγωγής εντροπίας σε έναν εναλλάκτη μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Επομένως, απαιτείται η χρήση ενός πιο σύνθετου μοντέλου, που θα δίνει περισσότερες πληροφορίες για τον μηχανισμό αύξησης της εντροπίας σε έναν τέτοιο εναλλάκτη, φωτίζοντας τη σχέση μεταξύ εξισορρόπησης και ελαχιστοποίησης παραγωγής εντροπίας. Αυτό θα γίνει στα επόμενα κεφάλαια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΥΞΗΣΗ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΣΕ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ [5A]

Σε αυτό το κεφάλαιο θα διατυπωθούν οι εξισώσεις για την αύξηση της εντροπίας, για ταυτόχρονη μεταφορά θερμότητας και μάζας σε ένα οριακό στρώμα, όπως αυτές προκύπτουν από τις αρχές της θερμοδυναμικής και από τις εξισώσεις διατήρησης. Οι προκύπτουσες εξισώσεις θα διαμορφωθούν ώστε να κατανοηθούν οι αλληλεπιδράσεις των πηγών αύξησης εντροπίας (μετάδοση θερμότητας ή διάχυση μάζας) και να προβλεφθούν οι επιδράσεις τους προκειμένου να διατυπωθεί ένα κριτήριο βελτιστοποίησης για την ελαχιστοποίηση του S_{gen} .

4.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΣΕ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ, [5A]

Αν e είναι η ειδική (ανά μονάδα μάζας) εσωτερική ενέργεια ενός μίγματος από i – συστατικά τότε, για ένα μίγμα σε θερμοδυναμική ισορροπία, έχουμε:

$$de = Tds - Pdv + \sum_i g_i dm_i \quad (4.1.1)$$

Όπου, το T δηλώνει απόλυτη θερμοκρασία, s είναι η ειδική εντροπία, P είναι η πίεση, v είναι ο ειδικός όγκος, g_i είναι η μερική ειδική ενέργεια Gibbs του συστατικού i και m_i είναι το κλάσμα μάζας αυτού του συστατικού. Ας θεωρηθεί τώρα μία απειροστή (στοιχειώδης) μεταβολή (απόκλιση) σε κάθε αριθμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του μίγματος. Θεωρώντας τοπική θερμοδυναμική ισορροπία, από την εξίσωση (4.1.1) μπορούμε να πάρουμε μία εξίσωση που περιέχει και κλίσεις μεγεθών μη ισορροπίας, παίρνοντας την υλική παράγωγο D/Dt οπότε έχουμε:

$$\frac{De}{Dt} = T \frac{Ds}{Dt} - P \frac{Dv}{Dt} + \sum_i g_i \frac{Dm_i}{Dt} \quad (4.1.2)$$

Η εξίσωση της συνέχειας, όπου ρ είναι η πυκνότητα του μίγματος και \mathbf{u} το διάνυσμα της ταχύτητας, γράφεται:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (4.1.3)$$

Αυτή η εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γραφτεί η παράγωγος του 3^{ου} όρου στη εξίσωση (4.1.2)

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho^2} \frac{D\rho}{Dt} = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (4.1.4)$$

Η εξίσωση διατήρησης των συστατικών είναι:

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = -(\nabla \cdot \mathbf{j}_i + \rho_i \nabla \cdot \mathbf{u}) \quad (4.1.5)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση, ρ_i είναι η μερική πυκνότητα του i -συστατικού και \mathbf{j}_i είναι ένα γενικό διάνυσμα διάχυσης. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (4.1.3) και (4.1.5) μπορούμε να αντικαταστήσουμε τον 4^ο όρο στην εξίσωση (4.1.2) και να πάρουμε:

$$\frac{Dm_i}{Dt} = \frac{D}{Dt} \left(\frac{\rho_i}{\rho} \right) = \rho_i \frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{\rho} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{D\rho_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} (\nabla \cdot \mathbf{j}_i) \quad (4.1.6)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (4.1.4) και (4.1.6) στην εξίσωση (4.1.2) και μετά από αλγεβρικές πράξεις, ο ρυθμός αύξησης της εντροπίας είναι:

$$\rho \frac{Ds}{Dt} = \frac{1}{T} \left[\rho \frac{De}{Dt} + P \nabla \cdot \mathbf{u} + \sum_i g_i (\nabla \cdot \mathbf{j}_i) \right] \quad (4.1.7)$$

Για να μετασχηματίσουμε την εξίσωση (4.1.7) ώστε να περιέχει μόνο κατάλληλους όρους ροής και σχετικές κινούσες κλίσεις, πρέπει να χρησιμοποιηθεί η θερμοδυναμική εξίσωση της ενέργειας, ώστε να απαλειφθεί η υλική παράγωγος της εσωτερικής ενέργειας e . Η εξίσωση της ενέργειας για ένα μη ιονισμένο μίγμα αερίων όταν η εξαναγκασμένη διάχυση είναι αμελητέα, δίνεται από τον Mills [40] ως:

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \frac{DP}{Dt} - \nabla \cdot \mathbf{q} + \sum_i \mathbf{j}_i h_i + \mu \Phi \quad (4.1.8)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση, h είναι η ειδική ενθαλπία του μίγματος, h_i είναι η μερική ειδική ενθαλπία του συστατικού i , μ είναι η δυναμική συνεκτικότητα του μίγματος και Φ είναι συνάρτηση καταστροφής ενέργειας. Ο 3^{ος} όρος στο δεξί μέλος

της εξίσωσης (4.1.8) είναι η μεταφορά ενθαλπίας λόγω διάχυσης και το διάνυσμα \mathbf{q} είναι ένα διάνυσμα ροής θερμότητας που συνδυάζει όρο αγωγής και όρο Dufour:

$$\mathbf{q} = -\kappa \nabla T + RT \sum_i \sum_j \frac{x_i D_i^T}{M_i D_{ij}} \left(\frac{n_i}{\rho_i} - \frac{n_j}{\rho_j} \right) \quad (4.1.9)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση, κ είναι η θερμική αγωγιμότητα του μίγματος, R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων, x_i είναι το κλάσμα moles του i συστατικού, M_i είναι το μοριακό βάρος του συστατικού, D_i^T είναι ο παράγοντας θερμικής διάχυσης, D_{ij} είναι ο συντελεστής διάχυσης μεταξύ των συστατικών i και j , και n_i είναι το καθαρό άνωσμα καθαρής ροής μάζας του συστατικού i . Η ποσότητα j_i είναι ένα διάνυσμα ροής διάχυσης που λαμβάνεται από την κινητική θεωρία των αερίων κατά Charman-Enskog και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$j_i = \sum_j m_i m_j D_{ij} [\nabla x_j + (x_i - m_j) \nabla \ln P] - D_i^T \nabla \ln T \quad (4.1.10)$$

Με την χρήση της εξίσωσης (4.1.3) η εξίσωση (4.1.8) γράφεται με όρο εσωτερικής ενέργειας:

$$\rho \frac{De}{Dt} = -\nabla \cdot \mathbf{q} - P \nabla \cdot \mathbf{u} - \sum_i \nabla \cdot (\mathbf{j}_i h_i) + \mu \Phi \quad (4.1.11)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (4.1.11) στην εξίσωση (4.1.7) η τελική εξίσωση για τον ρυθμό αύξησης της εντροπίας παίρνει την μορφή:

$$\rho \frac{Ds}{Dt} = \frac{1}{T} \{ -\nabla \cdot \mathbf{q} - \sum_i [g_i (-\nabla \cdot \mathbf{j}_i) + \nabla \cdot \mathbf{j}_i h_i] + \mu \Phi \} \quad (4.1.12)$$

Η αύξηση της εντροπίας μπορεί να εκφρασθεί σαν το άθροισμα της εντροπίας που μεταφέρεται στο σύστημα και στην δημιουργία της εντροπίας μέσα στο σύστημα:

$$\frac{Ds}{Dt} = -\nabla \cdot \mathbf{j}_s + \dot{s}'_{gen} \quad (4.1.13)$$

Η εξίσωση (4.1.12) μπορεί να μετασχηματισθεί, ώστε να απομονωθεί ο όρος παραγωγής εντροπίας:

$$\rho \frac{Ds}{Dt} = - \left[\nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{q}}{T} \right) + \sum_i \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{j}_i h_i}{T} \right) - \sum_i \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{j}_i g_i}{T} \right) \right] + \left[\mathbf{q} \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) + \sum_i \mathbf{j}_i h_i \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) - \sum_i \mathbf{j}_i \cdot \nabla \left(\frac{g_i}{T} \right) + \frac{\mu \Phi}{T} \right]$$

Στην ανωτέρω εξίσωση, η 2^η αγκύλη αποτελεί την εντροπία που δημιουργείται (τον όρο \dot{s}_{gen}''') ενώ, η 1^η αγκύλη αποτελεί την εντροπία που μεταφέρεται. Έτσι, ο τοπικός ογκομετρικός ρυθμός παραγωγής της εντροπίας για ένα μίγμα στο οποίο γίνεται ταυτόχρονα μεταφορά θερμότητας και μάζας είναι:

$$\dot{s}_{gen}''' = \mathbf{q} \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) + \sum_i \mathbf{j}_i h_i \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) - \sum_i \mathbf{j}_i \cdot \nabla \left(\frac{g_i}{T} \right) + \frac{\mu\Phi}{T} \quad (4.1.14)$$

Επειδή θέλουμε να εστιάσουμε αποκλειστικά στα πιθανώς ανταγωνιστικά φαινόμενα της ταυτόχρονης μεταφοράς θερμότητας και μάζας, αμελούμε τον όρο της διασποράς ενέργειας λόγω τριβών (συνεκτικότητας), Φ . Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτός ο όρος μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην συνολική παραγωγή εντροπίας, κυρίως δε, όταν έχουμε ροή θερμότητας με συναγωγή (βλέπε παράδειγμα [41]). Παρόλα αυτά, στο υπόλοιπο της εργασίας, ο όρος Φ δεν θα ληφθεί υπόψη.

Λαμβάνοντας υπόψη την μερική ειδική ενέργεια Gibbs [42], η εξίσωση (4.1.14) μπορεί να απλοποιηθεί στην ακόλουθη:

$$\dot{s}_{gen}''' = \mathbf{q} \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) + \sum_i (-\mathbf{j}_i \frac{1}{T} \cdot \nabla g_{i|T}) \quad (4.1.15)$$

Αν το \mathbf{q} και το \mathbf{j}_i στην ανωτέρω εξίσωση ληφθούν ως καθαρή αγωγή και διάχυση κατά τον νόμο του Fick, δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της μεταφοράς θερμότητας και μάζας στην εξίσωση παραγωγής εντροπίας. Το συμπέρασμα αυτό και η ιδιαίτερη σημασία του περιγράφονται στο [42], αλλά αναφέρονται εδώ ξανά λόγω της ειδικής συνάφειας με την ανάλυση στην ενότητα 5.1. Για την ειδική περίπτωση ενός διμερούς μίγματος παίρνουμε σε αυτή την περίπτωση την εξίσωση (D είναι ο συντελεστής διάχυσης για το διμερές μίγμα, R η παγκόσμια σταθερά των αερίων):

$$\dot{s}_{gen}''' = k \left(\frac{\nabla T}{T} \right)^2 + \frac{2\rho^2 R D^T}{M_1 M_2 c} \nabla T \nabla m_1 + \frac{\rho^2 R D}{M_1 M_2 m_1 m_2 c} (\nabla m_1)^2 \quad (4.1.16)$$

Στα επόμενα, οι εξισώσεις παραγωγής εντροπίας θα απλοποιηθούν σε ειδικές μορφές που θα εφαρμοστούν στο υπόλοιπο της ανάλυσης. Το αέριο μίγμα θα μοντελοποιηθεί σαν ιδανικό με σχετικά σταθερή πυκνότητα ρ ή, προσεγγιστικώς

ισοδύναμα, σταθερή μοριακή συγκέντρωση c . Σε συνέχεια της βιβλιογραφίας που υπάρχει για τη συμπύκνωση, ο δείκτης v θα αναφέρεται σε υδρατμό και ο δείκτης g θα αναφέρεται στον ξηρό αέρα. Θα ληφθούν υπόψη μόνο η απλή αγωγή και η διάχυση σύμφωνα με το νόμο του Fick και θα υποτεθεί ότι αυτά λαμβάνουν χώρα μόνο στη κάθετη κατεύθυνση y . Τότε η εξίσωση (4.1.16) απλοποιείται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\dot{s}_{gen}''' = \frac{k}{T^2} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \frac{\rho^2 RD}{M_v M_g \rho_v \rho_g c} \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial y} \right)^2 \quad (4.1.17)$$

Γράφοντας την ανωτέρω εξίσωση με μοριακές συγκεντρώσεις και θεωρώντας σαν σταθερά το c , παίρνουμε την ακόλουθη, κομψότερη μορφή της ανωτέρω εξίσωσης:

$$\dot{s}_{gen}''' = \frac{k}{T^2} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \frac{cRD}{c_v c_g} \left(\frac{\partial c_v}{\partial y} \right)^2 \quad (4.1.18)$$

Στο υπόλοιπο της ανάλυσης θα χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις (4.1.17) και (4.1.18), αναλόγως της ευχρηστίας κάθε μιας πάνω στην περίπτωση που εξετάζεται.

4.2 ΤΟ ΘΕΩΡΗΜΑ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ [5A]

Από τις εξισώσεις (4.1.17) και (4.1.18) μπορούμε να δούμε ότι ο τοπικός ογκομετρικός ρυθμός παραγωγής εντροπίας και για μεταφορά θερμότητας αλλά και για μεταφορά μάζας είναι ανάλογος με το τετράγωνο μίας κινούσας δύναμης (κλίσης). Στην περίπτωση της αγωγής για παράδειγμα:

$$\dot{s}_{gen}''' = \mathbf{q} \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) = -k \nabla T \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) = \frac{k}{T^2} |\nabla T|^2 \quad (4.2.1)$$

Από την ανωτέρω εξίσωση προκύπτει ότι, ο τοπικός ρυθμός παραγωγής εντροπίας λόγω αγωγής θερμότητας είναι το γινόμενο της ροής θερμότητας και της κινούσας δύναμης (δηλ. θερμοκρασιακής κλίσης) που προκαλεί την υπόψιν μεταφορά θερμότητας. Για γραμμική σχέση μεταξύ της δύναμης και της ροής, το γινόμενο αυτό απλοποιείται σε μία πολυωνυμική συνάρτηση της ροής. Μπορεί να δειχθεί ότι, για κάθε διαδικασία μεταφοράς στην οποία υπάρχει γραμμική σχέση

μεταξύ της κινούσας δύναμης και της ροής, ο τοπικός ρυθμός παραγωγής εντροπίας μπορεί να εκφραστεί στην γενική μορφή:

$$\dot{s}_{gen}''' = jf = Lf^2 \quad (4.2.2)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση, \dot{s}_{gen}''' είναι ο τοπικός ογκομετρικός ρυθμός παραγωγής εντροπίας, προερχόμενος αποκλειστικά εκ μίας μόνο διαδικασίας μεταφοράς, j είναι η ροή της μεταφερόμενης ποσότητας, f είναι η συνισταμένη κινούσα δύναμη και L είναι ο συντελεστής μεταφοράς. Οι Tonder και Kvaalen [34] έδειξαν ότι ως συνέπεια αυτής της σχέσης, η διαμόρφωση που έχει σαν αποτέλεσμα τον ελάχιστο ρυθμό παραγωγής εντροπίας, για συγκεκριμένο μέγεθος και σταθερό ρυθμό απαγωγής θερμότητας (δηλ. σταθερό θερμικό φορτίο), είναι αυτή που έχει την πιο ομοιόμορφη κατανομή του f .

Αν ορίσουμε την ομοιόμορφη (μέση) κινούσα δύναμη σαν:

$$\bar{f} = \frac{\iiint f dv}{\iiint dv} \quad (4.2.3)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση, το f αντιστοιχεί σε κάθε πιθανή διανομή κινούσας δύναμης σε ένα χωρίο όγκου V . Ο συνολικός ρυθμός μεταφοράς J (παράδειγμα μεταφορά θερμότητας), είναι το ολοκλήρωμα της ροής στην περιοχή ενδιαφέροντος:

$$J = \iiint j dv = \iiint Lf dv \quad (4.2.4)$$

Ο συνολικός ρυθμός μεταφοράς J μπορεί να γραφεί χρησιμοποιώντας την μέση τιμή \bar{f} σαν:

$$J = L\bar{f}V \quad (4.2.5)$$

Τότε, από τον ορισμό της ομοιόμορφης κινούσας δύναμης, υπάρχει μία σταθερή, και μία μη σταθερή, διανομή του f στο χωρίο V που οδηγούν στον ίδιο ρυθμό μεταφοράς J (θεώρημα μέσης τιμής). Ο συνολικός ή ολικός ρυθμός παραγωγής εντροπίας είναι το ολοκλήρωμα του τοπικού ογκομετρικού ρυθμού στο χωρίο V .

$$\dot{S}_{gen} = \iiint \dot{s}_{gen}''' dV = \iiint Lf^2 dV \quad (4.2.6)$$

Για σταθερή τιμή του L , ο τοπικός ρυθμός παραγωγής εντροπίας $\overline{\dot{s}_{gen}'''}_V$ που προκύπτει από την ομοιόμορφη κινούσα δύναμη είναι, επίσης, σταθερός. Παίρνοντας τη διαφορά ανάμεσα στον συνολικό ρυθμό παραγωγής εντροπίας που προκύπτει από την ομοιόμορφη διανομή της κινούσας δύναμης, και κάθε αυθαίρετη, μη ομοιόμορφη, κατανομή κινούσας δύναμης, καταλήγουμε στην εξίσωση:

$$\dot{S}_{gen} - \overline{\dot{S}_{gen}} = \iiint \dot{s}_{gen}'''^2 - (\overline{\dot{s}_{gen}'''})^2 dV \quad (4.2.7)$$

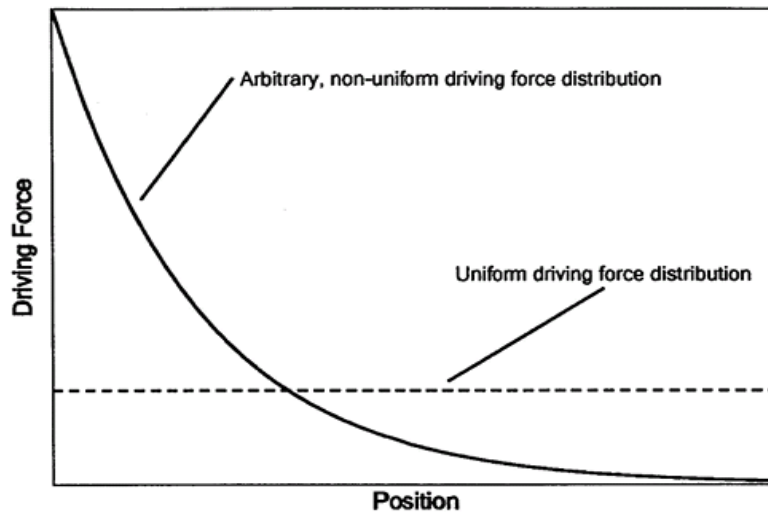
Διαιρώντας και τα δύο μέλη της εξίσωσης με τον σταθερό όγκο V , παίρνουμε:

$$\frac{\dot{S}_{gen} - \overline{\dot{S}_{gen}}}{V} = \frac{\iiint \dot{s}_{gen}'''^2 dV}{V} - \frac{\iiint (\overline{\dot{s}_{gen}'''})^2 dV}{V} = \frac{\iiint \dot{s}_{gen}'''^2 dV}{V} - (\overline{\dot{s}_{gen}'''})^2 = \sigma^2(\dot{s}_{gen}''') \quad (4.2.8)$$

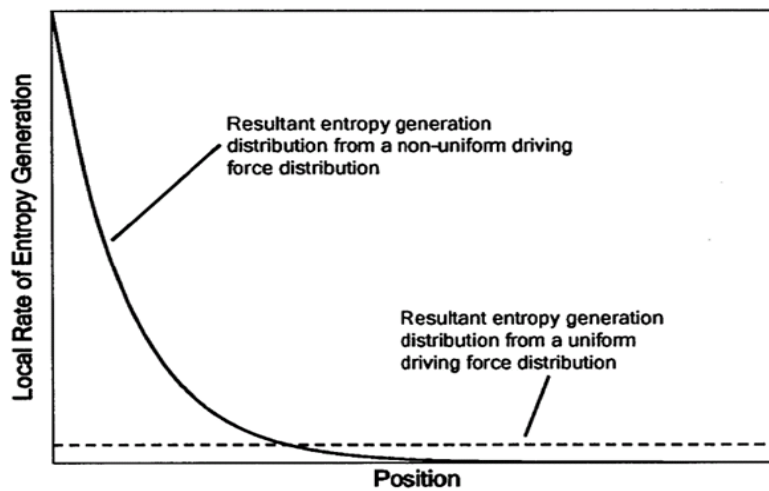
Αυτή η διαφορά είναι απλά η διασπορά του \dot{s}_{gen}''' στο χώρο V που είναι είτε θετική ή μηδέν, οπότε

$$\dot{S}_{gen} - \overline{\dot{S}_{gen}} \geq 0 \quad (4.2.9)$$

Οπότε, η κατανομή της κινούσας δύναμης που έχει σαν αποτέλεσμα τον ελάχιστο ρυθμό παραγωγής εντροπίας για σταθερά J , V και L είναι η ομοιόμορφη \bar{f}



(α) Χαμηλή θερμοκρασία εισόδου και κλάσμα ατμού

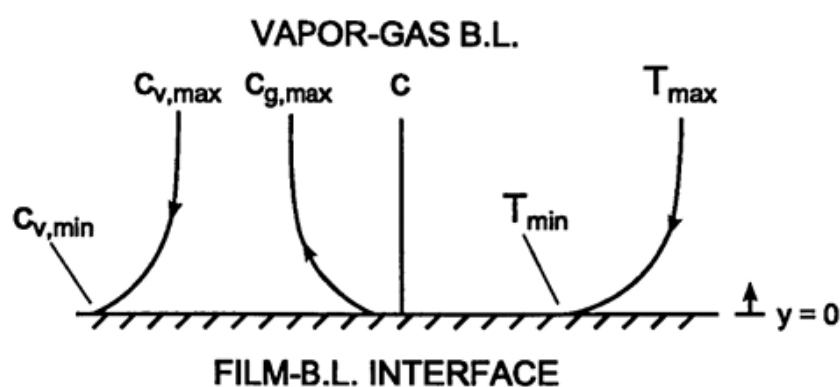


(β) Κατανομή του τοπικού ρυθμού παραγωγής εντροπίας

Σχήμα 4.2.1, [5A]: Μία απεικόνιση του θεωρήματος της ελάχιστης διασποράς: κατανομή παραγωγής εντροπίας. Οι ομοιόμορφες κατανομές της κινούσας δύναμης οδηγούν σε ομοιόμορφη κατανομή του τοπικού ρυθμού παραγωγής εντροπίας που οδηγεί σε μικρότερο ρυθμό παραγωγής εντροπίας.

4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΠΟΙΗΣΗ [5A]

Το οριακό στρώμα υδρατμού–αερίου αποτελεί την κύρια θερμική αντίσταση σε έναν συμπυκνωτή με μεγάλο ποσοστό μη συμπυκνώσιμων αερίων και είναι η περιοχή του μεγαλύτερου ρυθμού παραγωγής εντροπίας. Οι εκφράσεις της ενότητας (4.1) αδιαστατοποιούνται για να ευρεθεί ποια διαδικασία μεταφοράς κυριαρχεί στον ρυθμό παραγωγής εντροπίας, υπό δεδομένες συνθήκες. Υποτίθεται ξανά ότι οι διαδικασίες μεταφοράς που μας ενδιαφέρουν γίνονται μόνο σε μια διάσταση, θεώρηση αντιπροσωπευτική των φαινομένων σε πολλές περιπτώσεις εναλλακτών μάζας και θερμότητας.



Σχήμα 4.3.1, [5A]: Τυχαίο οριακό στρώμα στο οποίο συμβαίνει μονοδιάστατη αγωγή και διάχυση: η συνολική μοριακή συγκέντρωση θεωρείται σταθερή στο οριακό στρώμα

Σε ένα τυχαίο οριακό στρώμα, η συμπύκνωση υποτίθεται ότι συμβαίνει μόνο στην επιφάνεια όπου $T = T_{\min}$ και $y=0$. Επιπλέον, δεν έχουμε σχηματισμό ομίχλης. Και εδώ θεωρούμε ότι η συνολική μοριακή συγκέντρωση είναι περίπου σταθερή. Ο υδρατμός διαχέεται προς την επιφάνεια και τα αέρια διαχέονται προς την αντίθετη

κατεύθυνση. Ας ορίσουμε την αδιάστατη θερμοκρασία θ και την αδιάστατη συγκέντρωση γ , από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\theta = \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (4.3.1)$$

$$\gamma = \frac{c - c_{min}}{c_{max} - c_{min}} \quad (4.3.2)$$

Ένα αδιάστατο μήκος ορίζεται σαν ο λόγος της απόστασης στην οποία συμβαίνει η μεταφορά, προς το πάχος του οριακού στρώματος που αντιστοιχεί στην μεταφερόμενη ιδιότητα ή, $n = \gamma/\delta$. Η εξίσωση παραγωγής εντροπίας (4.1.18) μπορεί να γραφτεί με τις αδιάστατες ποσότητες και να δώσει την εξίσωση:

$$\dot{s}_{gen}''' = \frac{k(\Delta T)^2}{T^2 \delta_T^2} \left(\frac{\partial \theta}{\partial \eta} \right) + \frac{cRD(\Delta c_v)^2}{c_v c_g \delta_M^2} \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \eta} \right) \quad (4.3.3)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση, δ_T είναι το πάχος του θερμικού οριακού στρώματος και δ_M είναι το πάχος του οριακού στρώματος διάχυσης. Ο 1^{ος} όρος του αριστερού μέλους της εξίσωσης αποτελεί τον ρυθμό παραγωγής εντροπίας από μεταφορά θερμότητας και ο 2^{ος} όρος αποτελεί τον ρυθμό παραγωγής εντροπίας από μεταφορά μάζας ($\dot{s}_{gen,HT}'''$ και $\dot{s}_{gen,MT}'''$ αντίστοιχα).

Παρατηρώντας ότι οι αδιάστατες κλίσεις θα είναι της τάξης της μονάδας, οι κύριοι συντελεστές στις κλίσεις προσδιορίζουν τη σχετική συνεισφορά της κάθε διαδικασίας μεταφοράς στη συνολική παραγωγή εντροπίας. Ορίζεται μία αδιάστατη παράμετρος σαν το λόγο της παραγωγής εντροπίας από μεταφορά θερμότητας προς την συνολική παραγωγή εντροπίας από μεταφορά θερμότητας και μάζας:

$$\Psi = \frac{\dot{s}_{gen,HT}'''}{\dot{s}_{gen,HT}''' + \dot{s}_{gen,MT}'''} = \frac{1}{1 + \frac{\dot{s}_{gen,MT}'''}{\dot{s}_{gen,HT}'''}} \quad (4.3.4)$$

Η παράμετρος Ψ είναι ανάλογη του αριθμού Bejan, Be , που συγκρίνει την παραγωγή εντροπίας λόγω μεταφοράς θερμότητας και λόγω συνεκτικότητας, σε έναν θερμικό εναλλάκτη. Ορίζοντας τον Ψ τοιουτοτρόπως, τα όρια των τιμών του κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1. Όταν $\Psi = 0$, δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας ενώ, όταν $\Psi = 1$, δεν υπάρχει μεταφορά μάζας. Όταν το Ψ είναι μικρότερο από 0.1, η μεταφορά μάζας κυριαρχεί σαν μηχανισμός παραγωγής εντροπίας οπότε, μια καλή,

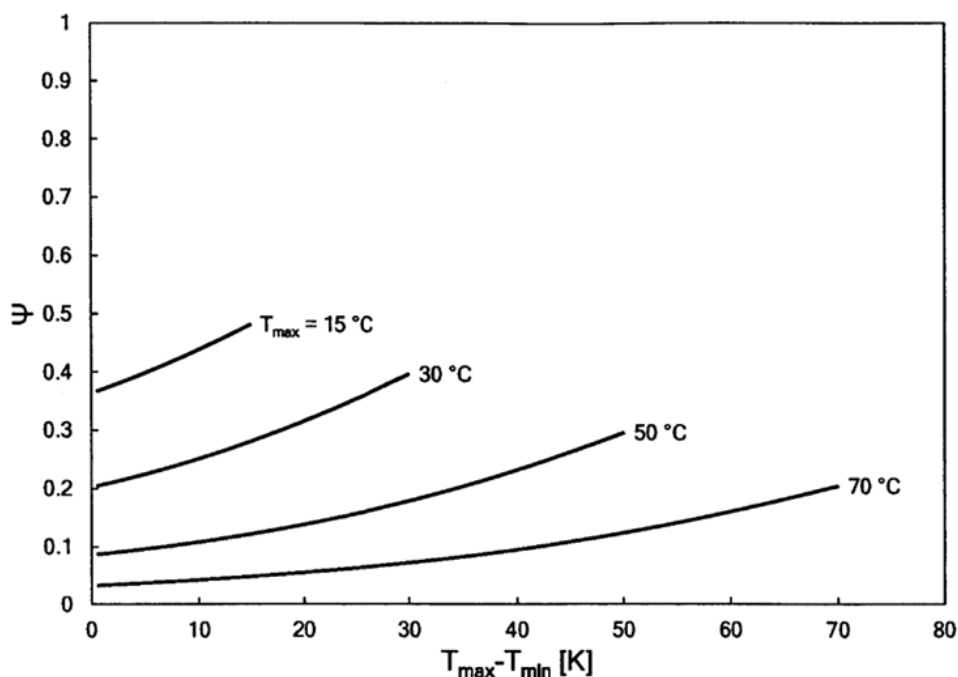
ισορροπημένη σχεδίαση θα στοχεύει να ελαχιστοποιήσει την διασπορά στην κινούσα δύναμη της μεταφοράς μάζας (κλίση του κλάσματος μάζας υδρατμού). Όταν το Ψ είναι μεγαλύτερο από 0.9, κυριαρχεί η μεταφορά θερμότητας και ένας ισορροπημένος εναλλάκτης μεταφοράς μάζας και θερμότητας είναι εκείνος, με την ελάχιστη διασπορά της κινούσας θερμοκρασιακής κλίσης. Μεταξύ αυτών των άκρων, η επίδραση του ενός φαινομένου μεταφοράς μπορεί να υπερβαίνει την επίδραση του άλλου αλλά, βασιζόμενοι αποκλειστικά σε αδιάστατη ανάλυση, δεν μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για το ποια μεταβολή στις κλίσεις (θερμοκρασίας ή κλάσματος μάζας) θα πρέπει να ελαχιστοποιήσουμε.

Η παράμετρος Ψ μπορεί να γραφεί κάνοντας χρήση αδιάστατων παραμέτρων, θερμοκρασιών και συγκεντρώσεων σαν:

$$\Psi = \left[1 + \frac{Le}{\hat{C}} \frac{T_{av}^2}{(\Delta T)^2} \frac{(\Delta c_v)^2}{c_{v,av} c_{g,av}} \right]^{-1} \quad (4.3.5)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση, Le είναι ο αριθμός Lewis και \hat{C} είναι ένας αδιάστατος όρος θερμοχωρητικότητας που ορίζεται σαν ο λόγος της ειδικής θερμοχωρητικότητας του μίγματος, προς την σταθερά αερίου του μίγματος. Καθώς σε αυτή την ανάλυση θεωρείται μίγμα αέρα – υδρατμού, ο αριθμός Prandtl (Pr), ο αριθμός Schmidt (Sc) και ο αριθμός Lewis (Le) είναι περίπου ίσοι με τη μονάδα. Υποθέτοντας ότι το μίγμα είναι ιδανικό και κορεσμένο στην ατμοσφαιρική πίεση, ο Ψ μπορεί να βρεθεί σαν συνάρτηση της κινούσας θερμοκρασιακής διαφοράς σε κάθε δεδομένη θερμοκρασία, χωρίς ειδική γνώση της γεωμετρίας της ροής.

Σχεδιάζοντας το Ψ στον κατακόρυφο άξονα και τη κινούσα θερμοκρασιακή διαφορά στον οριζόντιο, για ένα τυχαίο οριακό στρώμα όπου το μίγμα είναι κορεσμένο παντού, το σχήμα 4.3.2. δείχνει το όριο μέχρι το οποίο η μεταφορά μάζας ελέγχει το συνολικό ρυθμό παραγωγής εντροπίας. Για τις περιπτώσεις που λήφθηκαν, η μεταφορά μάζας είναι η μεγαλύτερη (και σε μερικές περιπτώσεις, η κυρίαρχη) πηγή παραγωγής εντροπίας σε ένα κορεσμένο μίγμα αέρα – ατμού στο οποίο συμβαίνει ταυτόχρονα μεταφορά μάζας και θερμότητας.



Σχήμα 4.3.2, [5A]: Αδιάστατη παράμετρος παραγωγής εντροπίας Ψ συναρτήσει της μέγιστης θερμοκρασιακής διαφοράς για κορεσμένο οριακό στρώμα, η διάχυση είναι ο κυρίαρχος παράγοντας παραγωγής εντροπίας για τα εύρη θερμοκρασιών και τις κινούσες θερμοκρασιακές διαφορές που βρίσκουμε στα συστήματα HDH.

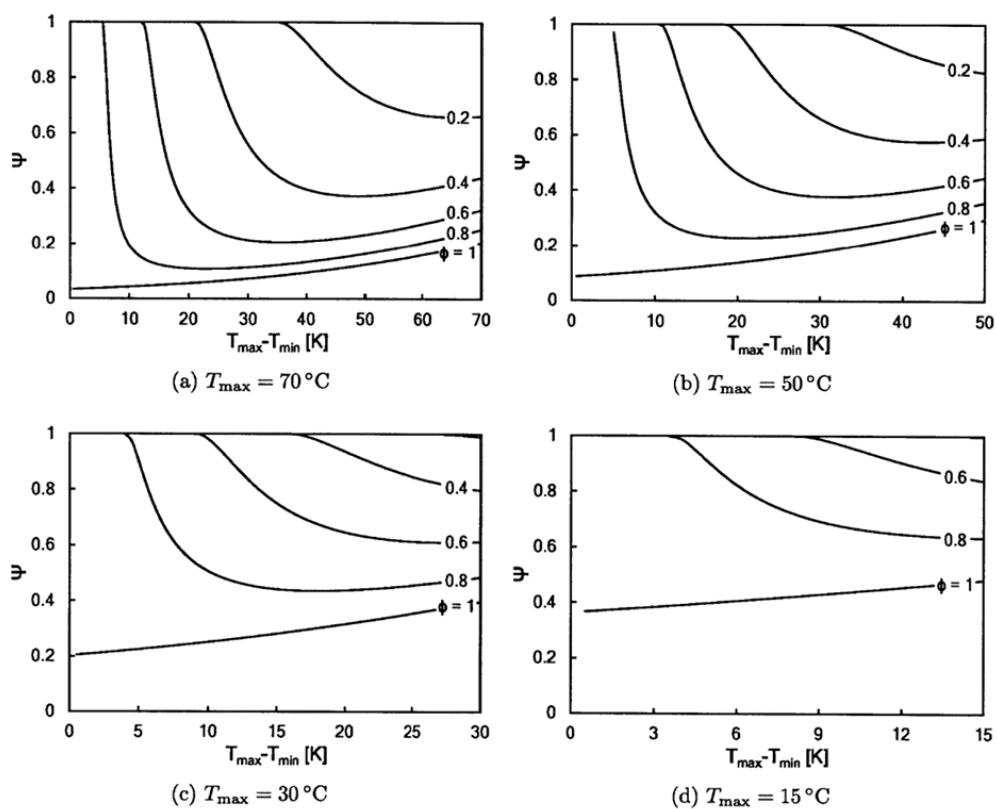
Ένα μίγμα αέρα – ατμού που είναι κορεσμένο σε όλο το οριακό στρώμα είναι αντιπροσωπευτικό κάποιων αφυγραντών, συμπεριλαμβανομένων εκείνων σε HDH σύστημα που θερμαίνεται από νερό, όπως και οι σπιτικοί αφυγραντές που λειτουργούν σε πολύ υγρά κλίματα. Ειδικά στην περίπτωση ενός αφυγραντή HDH που λειτουργεί σε θερμοκρασίες τόσο ψηλές όσο 70°C , η μεταφορά μάζας είναι η κύρια πηγή παραγωγής εντροπίας.

Σαν παράδειγμα, θεωρήστε έναν αφυγραντή με κορεσμένο αέρα εισόδου στους 70°C και επιθυμητή έξοδο στους 50°C . Υποθέτωντας ότι η κινούσα θερμοκρασιακή διαφορά του συστήματος πέφτει ανάμεσα στους 5 και στους 15 K, μετακινούμενος κάποιος στο διάγραμμα από όριο σε όριο, μπορεί να δει ότι το Ψ είναι πολύ

μικρότερο από τη μονάδα. Επιπλέον, το Ψ είναι μικρότερο από το 0.1 για ένα μεγάλο τμήμα από τη θερμοκρασιακή διαφορά εισόδου από έξοδο, προσδιορίζοντας ότι η μεταφορά μάζας είναι ο κυρίαρχος παράγοντας παραγωγής εντροπίας. Έτσι, για να ελαχιστοποιήσει κάποιος την παραγωγή εντροπίας σε έναν τέτοιο αφυγραντή, πρέπει να ελαχιστοποιήσει τη μεταβολή στη κινούσα δύναμη μεταφοράς μάζας.

Στην περίπτωση ενός μη κορεσμένου οριακού στρώματος, η μεταφορά μάζας δεν είναι πάντα ο κυρίαρχος παράγοντας στις θερμοκρασίες που προαναφέρθηκαν. Για να δειχθεί αυτό το αποτέλεσμα, γραφήματα από το Ψ συναρτήσει της θερμοκρασιακής διαφοράς ξανάγιναν, όπου έγιναν οι ακόλουθες υποθέσεις στην ανάλυση. Για να είναι η μεταφορά μάζας μη μηδενική, η θερμοκρασία της επιφάνειας στην οποία συμβαίνει συμπύκνωση, T_{min} , πρέπει να είναι μικρότερη ή, ίση, με το σημείο δρόσου που αντιστοιχεί στην τοπική θερμοκρασία ξηράς σφαίρας και τον τοπικό λόγο υγρασίας. Αν δεν έχει συμβεί ακόμα μεταφορά μάζας, ο λόγος υγρασίας θα είναι σταθερός στο οριακό στρώμα. Δηλαδή, η συνθήκη για μη μηδενική καθαρή μεταφορά μάζας είναι $T_{min} \leq T_{dp} (h=0^+, \omega_o)$. Επιπρόσθετα, η κλίση της συγκέντρωσης όπου δημιουργεί αυτή η κλίση θερμοκρασίας, πρέπει φυσικά να είναι ευνοϊκή ή, $\Delta c = c_{max} - c_{min} \geq 0$.

Για διάφορες τιμές του T_{max} που ορίζουν τους περισσότερους αφυγραντές, όπως 15°C και 70°C, το σχήμα 4.3.3 δείχνει την αύξουσα επίδραση της μεταφοράς μάζας καθώς η σχετική υγρασία στη θέση όπου $c = c_{max}$, αυξάνεται. Πιθανόν, το Ψ αυξάνει γρήγορα στη μονάδα, όταν το περιεχόμενο υγρασίας του αέρα δεν είναι αρκετά υψηλό ώστε να προσδώσει σημαντική συμπύκνωση: η μεταφορά θερμότητας κυριαρχεί στην παραγωγή εντροπίας. Όμως, αν ο σκοπός είναι να συμπυκνωθεί νερό ή, να αφυγρανθεί, είναι επιθυμητό να ψυχθεί ο αέρας σε μια κατάσταση κορεσμού, όσο το δυνατόν πιο σύντομα, καθώς το γεγονός αυτό παρέχει το μέγιστο ρυθμό συμπύκνωσης. Για μια τέτοια διάταξη, η σχετική υγρασία θα είναι πάντα μονάδα ή, κοντά στη μονάδα, στο περισσότερο μήκος του εναλλάκτη και η μεταφορά μάζας θα είναι πάντα η μεγαλύτερη, αν όχι, η κυρίαρχη πηγή παραγωγής εντροπίας.



Σχήμα 4.3.3, [5A] : Αδιάστατη παράμετρος παραγωγής εντροπίας συναρτήσει κινούσας θερμοκρασιακής διαφοράς σε καθορισμένο T_{\max} όπου, το c_{\min} αντιστοιχεί στη συγκέντρωση κορεσμού στην τοπική T και οι καμπύλες δεικνύουν τη σχετική υγρασία στη θέση, όπου $c=c_{\max}$

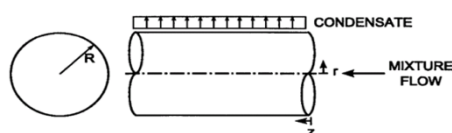
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΡΩΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ [5A]

Σε αυτό το κεφάλαιο, οι εξισώσεις που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 3.1 θα εφαρμοστούν απευθείας σε μία ανάλυση στρωτού οριακού στρώματος. Πρώτα, θα εμφανιστούν η γεωμετρία του μοντέλου, οι εξισώσεις και η αξιολόγηση του κώδικα. Το κεφάλαιο καταλήγει με μία συζήτηση των αποτελεσμάτων για την παραγωγή εντροπίας που ληφθήκαν από την ανάλυση του οριακού στρώματος. Με αυτόν τον τρόπο, (1) αναπτύσσεται ένας λεπτομερής ορισμός της ελαχιστοποίησης της παραγωγής εντροπίας, μέσω της εξισορρόπησης, για κάθε εναλλάκτη μάζας-θερμότητας, (2) εμφανίζεται η βασική επιστημονική γνώση που βρίσκεται πίσω από την εξισορρόπηση και (3) καθορίζεται ένα κριτήριο για το ελάχιστο \dot{S}_{gen} .

5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ [5A]

Θεωρήστε την περίπτωση της συμπύκνωσης εντός σωλήνα ενός μίγματος αέρα – υδρατμού, με γεωμετρία και κυλινδρικές συντεταγμένες, όπως εμφανίζονται στο σχήμα 5.1. Το ακτινικό ακρότατο του όγκου ελέγχου λαμβάνεται στη τοπική διεπιφάνεια, ανάμεσα στο οριακό στρώμα ατμού-αερίου και στο φιλμ συμπυκνώματος. Επειδή το φιλμ συμπυκνώματος είναι πολύ λεπτό σχετικά με την ακτίνα R του σωλήνα, το όριο αυτό τίθεται ως $r=R$ και αναφέρεται από εδώ και πέρα, σαν το *τοιχώμα*. Το ρεύμα του ψυκτικού μέσου δεν δείχνεται φανερά αλλά ρέει αντίρροπα στο ρεύμα υγρού αέρα, στον περιβάλλοντα τον σωλήνα δακτύλιο.



ΣΧΗΜΑ 5.1, [5A]: Γεωμετρία εσωτερικού σωλήνα συμπυκνωτή και σύστημα συντεταγμένων. Το ψυκτικό μέσο (δεν φαίνεται) ρέει αντίρροπα στο ρεύμα αέρα στον περιβάλλοντα δακτύλιο

Αυτός ο όγκος ελέγχου είναι αντιπροσωπευτικός ενός αφυγραντή σε ένα σύστημα HDH, σαν συνέπεια των υψηλών συγκεντρώσεων του αέρα που παρουσιάζονται στο μίγμα που συμπυκνώνεται. Ως αποτέλεσμα αυτών των υψηλών συγκεντρώσεων μη συμπυκνώσιμου αερίου, η βασική θερμική αντίσταση, ανάμεσα στο κυρίως ρεύμα του ψυκτικού μέσου και του μίγματος ατμού-αερίου, είναι το οριακό στρώμα ατμού-αερίου. Έτσι, μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες προσεγγίσεις. Ο συντελεστής συναγωγής του ψυκτικού μέσου είναι μεγάλος, επομένως η θερμοκρασία του τοιχώματος είναι κοντά στη θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου. Δεύτερον, επειδή ένα ελέγχον τμήμα της αντίστασης στη μεταφορά, είτε με διάχυση είτε με αγωγή, υπάρχει στο οριακό στρώμα ατμού – αερίου, η εντροπία που δημιουργείται στο φιλμ συμπύκνωσης, στο τοίχωμα του σωλήνα και στο οριακό στρώμα του ψυκτικού μέσου, λαμβάνεται σαν αμελητέα. Επομένως, η ελαχιστοποίηση της παραγωγής εντροπίας για έναν αφυγραντή του συστήματος HDH προσεγγίζεται βέλτιστα, από μία πλήρη ανάλυση των μηχανισμών παραγωγής εντροπίας στο οριακό στρώμα ατμού-αερίου. Φυσικά, στην περίπτωση χαμηλού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από τη πλευρά του ψυκτικού μέσου, οι υποθέσεις που ελέχθησαν ανωτέρω δεν ισχύουν.

5.1.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ [5A]

Τώρα, θα αναπτυχθούν οι κατάλληλες εξισώσεις οριακού στρώματος. Το διάνυσμα της ταχύτητας του ρευστού \mathbf{u} υποτίθεται ότι έχει δύο διαστάσεις, με συνιστώσες στην αξονική και στην ακτινική κατεύθυνση $\mathbf{u} = u\mathbf{e}_z + v_r\mathbf{e}_r$. Όπως υποτέθηκε πριν, το μίγμα αποτελείται από δύο ιδανικά αέρια. Η πυκνότητα του μίγματος θεωρείται σταθερή στην ακτινική κατεύθυνση αλλά μεταβαλλόμενη στην αξονική κατεύθυνση. Οι μερικές πυκνότητες του κάθε συστατικού επιτρέπεται να μεταβάλλονται και με το r και με το z . Μαθηματικά, $\rho(z) = \rho_v(r, z) + \rho_g(r, z)$. Η πίεση υποτίθεται ότι μεταβάλλεται μόνο κατά μήκος του σωλήνα z . Η θερμική διάχυση (βλέπε φαινόμενο Soret) και η διάχυση της πίεσης αμελούνται, έτσι ώστε το διάνυσμα διάχυσης να έχει μόνο τη συνιστώσα Fick. Παρομοίως, λαμβάνεται υπόψη μόνο η συνηθισμένη αγωγή. Στον υπολογισμό των ρυθμών συμπύκνωσης και μεταφοράς θερμότητας,

η επίδραση των φαινομένων Dufour και Soret, όπως έχει δειχθεί προηγουμένως [24], μπορεί να αμεληθεί.

Οι εξισώσεις διατήρησης για το οριακό στρώμα ατμού-αερίου, δηλαδή ονομαστικώς, οι εξισώσεις συνέχειας, συστατικών, ορμής και ενέργειας είναι, αντίστοιχα:

$$\frac{u}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) = 0 \quad (5.1.1.1)$$

$$\rho_v \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\rho_v}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + u \frac{\partial \rho_v}{\partial z} + v_r \frac{\partial \rho_v}{\partial r} = \frac{D}{r} \left(r \frac{\partial \rho_v}{\partial r} \right) \quad (5.1.1.2)$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial z} + \rho v_r \frac{\partial u}{\partial r} = - \frac{dP}{dz} + \frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (5.1.1.3)$$

$$\rho u c_p \frac{\partial T}{\partial z} + \rho v_r c_p \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + D \frac{\partial \rho_v}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} (c_{p,v} - c_{p,g}) \quad (5.1.1.4)$$

Οι ιδιότητες θεωρούνται σταθερές στην κατεύθυνση r και υπολογίζονται στη μέση θερμοκρασία του φιλμ που μεταβάλλεται αξονικά. Η ποσότητα D είναι ο δυαδικός συντελεστής διάχυσης για το νερό στον αέρα, και υπολογίζεται από τη συσχέτιση των Marrero και Mason [43]. Η ειδική θερμοχωρητικότητα του μίγματος είναι ένας σταθμισμένος, κατά μάζα, μέσος όρος: $c_p = m_v c_{p,v} + m_g c_{p,g}$. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες που εφαρμόζονται σε αυτή την εξίσωση, δίνονται από τα [44] και [45] για το νερό και από το [46] για τον αέρα. Για τον υπολογισμό της μέσης θερμοκρασίας του φιλμ, χρειαζόμαστε τη θερμοκρασία ρεύματος. Εδώ, η θερμοκρασία του ρεύματος λαμβάνεται καθαρά σαν μία ποσότητα μέσου όρου ενθαλπίας:

$$T_b = \frac{\int_0^R \rho u c_p T 2\pi r dr}{\int_0^R \rho u c_p 2\pi r dr} \quad (5.1.1.5)$$

Παρόλα αυτά, θα πρέπει να σημειωθεί, ότι επειδή οι ιδιότητες του μίγματος λαμβάνονται σαν σταθερές στο οριακό στρώμα, ούτε το ρ ούτε το c_p είναι συναρτήσεις του r , και επομένως, απαλείφονται από την εξίσωση (5.1.1.5). Ο αναγνώστης θα πρέπει επίσης να γνωρίζει ότι αυτή η θερμοκρασία, δεν είναι φύσει αντιπροσωπευτική της θερμοκρασίας αδιαβατικής ανάμιξης, καθώς, η εισαγωγή ενός μίγματος σε αδιαβατικό θάλαμο θα προκαλούσε πιθανά συμπύκνωση.

Οι ψυχομετρικές ιδιότητες υπολογίζονται ως ακολούθως: Ο λόγος υγρασίας του ρεύματος, ω_b , είναι η μάζα του ατμού, ανά μονάδα μάζας μη συμπυκνώσιμου αερίου:

$$\omega_b = \frac{\int_0^R \rho_v u 2\pi r dr}{\int_0^R (\rho - \rho_v) u 2\pi r dr} , \quad (5.1.1.6)$$

που είναι ακριβώς ίσο με το πηλίκο, της μερικής πυκνότητας ρεύματος του ατμού, προς την μερική πυκνότητα ρεύματος του συμπυκνώσιμου. Για να υπολογιστεί η σχετική υγρασία, χρησιμοποιείται η σχέση του ιδανικού αερίου μαζί με τη μερική πυκνότητα ρεύματος ατμού:

$$\varphi = \frac{\rho_v R_v T}{P_v^s(T)} \quad (5.1.1.7)$$

5.1.2 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ [5A]

Στην είσοδο του σωλήνα, το προφίλ της ταχύτητας και της θερμοκρασίας είναι ομοιόμορφα. Η πίεση εισόδου του μίγματος είναι καθορισμένη. Η σχετική υγρασία στην είσοδο είναι επίσης καθορισμένη, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο τον υπολογισμό των μερικών πυκνοτήτων για κάθε συστατικό, χρησιμοποιώντας τη σχέση του ιδανικού αερίου. Τότε στο $z=0$:

$$u_r(r, 0) = u_0 \quad (5.1.2.1)$$

$$v_r(r, 0) = 0 \quad (5.1.2.2)$$

$$T(r, 0) = T_0 \quad (5.1.2.3)$$

$$P(0) = P_0 \quad (5.1.2.4)$$

$$\rho_v(r, 0) = \frac{\varphi_0 P_v^s(T_0)}{R_v T_0} \quad (5.1.2.5)$$

Σε κάθε θέση μετά από την είσοδο, δίδονται κάποιες οριακές συνθήκες στο εξωτερικό σύνορο του όγκου ελέγχου, όπου $r = R$. Η διεπιφάνεια, ανάμεσα στο

οριακό στρώμα ατμού – αερίου και στο φιλμ συμπυκνώματος, είναι αδιαπέραστη από το μη συμπυκνώσιμο αέριο, επομένως, η καθαρή ροή του συστατικού αερίου πρέπει να είναι μηδέν σε αυτή τη θέση. Η συνθήκη μη ροής απαιτεί ότι η αξονική ταχύτητα θα είναι μηδέν στο τοίχωμα, υποθέτοντας ότι η ταχύτητα του φιλμ συμπυκνώματος είναι περίπου μηδέν. Επειδή, το σύνορο του όγκου ελέγχου είναι στη διεπιφάνεια του οριακού στρώματος ατμού – αερίου και του φιλμ συμπυκνώματος όπου, $r = R$, η μερική πίεση του ατμού πρέπει να είναι ίση με τη πίεση κορεσμού που αντιστοιχεί στην τοπική θερμοκρασία διεπιφάνειας. Από αυτό, μπορεί να υπολογιστεί η μερική πυκνότητα του ατμού. Τότε, για κάθε $z > 0$:

$$u(R, z) = 0 \quad (5.1.2.6)$$

$$n_g(R, z) = \rho_{g,w} v_r + j_{g,w} = 0 \quad (5.1.2.7)$$

$$T(R, z) = T_w \quad (5.1.2.8)$$

$$\rho_v(R, z) = \frac{P_v^s(T_w)}{R_v T_w} \quad (5.1.2.9)$$

Η θερμοκρασία του τοιχώματος, $T_w(z)$, βρίσκεται από την εξίσωση διατήρησης ενέργειας στο ψυκτικό μέσο σαν συνάρτηση της παροχής μάζας του, χρησιμοποιώντας ένα προκαθορισμένο συντελεστή συναγωγής για μεταφορά θερμότητας:

$$(\dot{m}c_p)_c \frac{dT_{b,c}}{dz} = h_{conv,c}(T_w - T_{b,c})2\pi R \quad (5.1.2.10)$$

Επιπλέον, η ροή θερμότητας με αγωγή και η λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης πρέπει να απορροφούνται από το ψυκτικό μέσο:

$$-[q_w + n_v(R, z)h_{fg}] = h_{conv,c}(T_w - T_{b,c}) \quad (5.1.2.11)$$

Για να κλείσουμε το πρόβλημα, δίνονται μερικές συνθήκες συμμετρίας στην κεντρική γραμμή. Δηλαδή, το προφίλ της αξονικής ταχύτητας είναι ομαλό, η ακτινική ταχύτητα είναι μηδέν, το προφίλ της θερμοκρασίας κατά την ακτινική κατεύθυνση είναι ομαλό και το προφίλ της πυκνότητας ατμού είναι, επίσης, ομαλό.

Για $r = 0$, σε όλα τα z , ισχύει:

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0 \quad (5.1.2.12)$$

$$v_r = 0 \quad (5.1.2.13)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (5.1.2.14)$$

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial r} = 0 \quad (5.1.2.15)$$

Περίληπτικά, τα δεδομένα εισόδου σε μία οποιαδήποτε μοντελοποίηση είναι : θερμοκρασία εισόδου, πίεση, σχετική υγρασία, ταχύτητα εισόδου, θερμοκρασία ρεύματος εισόδου για το ψυκτικό μέσο και ο λόγος των παροχών μάζας MR . Ο λόγος των παροχών μάζας είναι το πηλίκο της ροής μάζας του ψυκτικού μέσου προς τη ροή μάζας του μίγματος:

$$MR = \frac{\dot{m}_c}{\int_0^R \rho u 2\pi r dr} = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}} \quad (5.1.2.16)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΥΓΡΟΥ ΑΕΡΑ

Στο παρόν κεφάλαιο θα δοθούν οι ορισμοί που αφορούν τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν το μίγμα ξηρού αέρα – υδρατμού και οι εξισώσεις υπολογισμού των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και των ιδιοτήτων μεταφοράς αυτού του μίγματος που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα υπολογισμού που έγινε στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

6.1. ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ [9Α]

Ο υγρός αέρας είναι ένα μίγμα ξηρού αέρα (το οποίο αποτελείται από διάφορα αέρια) και υδρατμούς. Αυτοί οι υδρατμοί μπορεί να υπάρξουν είτε σε μία κατάσταση κορεσμού είτε σε μία υπέρθερμη κατάσταση. Ο ξηρός αέρας και οι υδρατμοί δημιουργούν ένα διμερές μίγμα. Για να καθοριστεί πλήρως η θερμοδυναμική του κατάσταση αυτού του μίγματος που αποτελείται από δύο συστατικά απαιτούνται τρεις θερμοδυναμικές ιδιότητες.

Τόσο ο ξηρός αέρας όσο και οι υδρατμοί μπορούν να θεωρηθούν τέλεια αέρια αφού και τα δύο βρίσκονται στην ατμόσφαιρα υπό σχετικές χαμηλές πιέσεις. Οι υδρατμοί βρίσκονται στην ατμόσφαιρα σε μία απόλυτα χαμηλή μερική πίεση. Οι ιδιότητες του υγρού αέρα ονομάζονται ψυχομετρικές ιδιότητες και η μελέτη της συμπεριφοράς του υγρού αέρα ονομάζεται ψυχομετρία.

1. **Η θερμοκρασία ξηράς σφαίρας** είναι η θερμοκρασία του υγρού αέρα που μετριέται με ένα συνηθισμένο θερμόμετρο. Αυτός ο όρος χρησιμοποιείται μόνο για να την διακρίνουμε από την θερμοκρασία υγρής σφαίρας.
2. **Η απόλυτη υγρασία** καθορίζεται ως το πηλίκο της μάζας των υδρατμών προς την μάζα του ξηρού αέρα σε μία δεδομένη ποσότητα του μίγματος.

Έτσι, $\chi = \frac{m_v}{m_a}$, όπου το a χρησιμοποιείται για τον ξηρό αέρα και v για τον υδρατμό.

Θεωρώντας τόσο τον ξηρό αέρα όσο και τον υδρατμό ως τέλεια αέρια μπορεί να θεωρηθεί ότι η απόλυτη υγρασία εκφράζεται με τον τύπο:

$$\chi = 0.622 * \frac{p_v}{p_a} = 0.622 * \frac{p_v}{p - p_v} \quad (6.1.1)$$

Καθώς η απόλυτη υγρασία καθορίζεται από το πηλίκο της μάζας των υδρατμών προς την μάζα του ξηρού αέρα, η συνολική μάζα του υγρού αέρα αποδίδεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$m = (1 + \chi) * m_a \quad (6.1.2)$$

3. **Η σχετική υγρασία** του υγρού αέρα είναι το πηλίκο της πραγματικής μάζας των υδρατμών σε μία δεδομένη ποσότητα με αυτή που θα είχε αν το μίγμα ήταν κορεσμένο στην ίδια θερμοκρασία ξηρής σφαίρας και στην ίδια συνολική πίεση του αέρα:

$$RH = \frac{m_v}{m_{v,sat}} \quad (6.1.3)$$

ή μπορεί να καθοριστεί ως το πηλίκο της μερικής πίεσης των υδρατμών σε μη κορεσμένο αέρα προς την μερική πίεση των υδρατμών αν αυτός είναι κορεσμένος στην ίδια θερμοκρασία:

$$RH = \frac{p_v}{p_{v,sat}} \quad (6.1.4)$$

η σχετική υγρασία συνήθως εκφράζεται σαν ποσοστό.

4. **Η ενθαλπία** του μη κορεσμένου υγρού αέρα ή του υγρού αέρα στην γραμμή κορεσμού καθορίζεται ως το άθροισμα των ενθαλπιών των συστατικών. Για αυτόν τον λόγο η ενθαλπία του υγρού αέρα είναι ίση με το άθροισμα των ενθαλπιών του ξηρού αέρα και των σχετιζόμενων υδρατμών:

$$h = h_a + \chi * h_v \quad (6.1.5)$$

όπου,

$$\begin{aligned}h &= \text{ενθαλπία υγρού αέρα, [kJ/kg}_{dryair}\text{]} \\h_a &= \text{ενθαλπία ξηρού αέρα, [kJ/kg}_{dryair}\text{]} \\h_v &= \text{ενθαλπία υδρατμών, [kJ/kg}_{vapor}\text{]} \\x &= \text{απόλυτη υγρασία, [kg}_{vapor}\text{/kg}_{dryair}\text{]} \end{aligned} \quad (6.1.6)$$

Αν ορίσουμε την ενθαλπία ως μηδέν για κορεσμένο υγρό στους 0°C και ότι η λανθάνουσα θερμότητα της ατμοποίησης σε αυτήν την θερμοκρασία είναι 2503 kJ/kg, [10A], και θεωρώντας ότι η συγκεκριμένη θερμότητα σε υπό μόνιμη πίεση ξηρού αέρα και υδρατμών είναι:

$$c_{p,a} = 1.0029 + 5.4 * 10^{-5} * t \text{ [kJ/kgK]} \quad (6.1.7)$$

$$c_{p,v} = 1.856 + 2.0 * 10^{-4} * t \text{ [kJ/kgK]} \quad (6.1.8)$$

Η ενθαλπία του υγρού αέρα αποδίδεται ως:

$$h = (1.0029 + 5.4 * 10^{-5} * t) * t + x * (2503 - 2.386 * t + (1.856 + 2 * 10^{-4} * t) * t) \text{ [kJ/kg}_{da}\text{]} \quad (6.1.9)$$

Αυτή η εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εύρος από - 40 ως 300°C. Η συνολική πίεση του αέρα μπορεί να αλλαχτεί από 0.1 σε 5 bar. Σε αυτά τα εύρη θερμοκρασιών και πιέσεων αυτή η εξίσωση δίνει καλά αποτελέσματα για πολλούς τεχνικούς υπολογισμούς.

5. **Η ειδική θερμοχωρητικότητα** του υγρού αέρα δίδεται από τον τύπο:

$$c_p = (1.0029 + 5.4 * 10^{-5} * t) + x * (1.856 + 2 * 10^{-4} * t) \text{ [kJ/kg}_{da}\text{K]} \quad (6.1.10)$$

6. **Η πυκνότητα** του υγρού αέρα δίδεται από τον τύπο :

$$\rho = \frac{1+x}{461.56*(0.62198+x)} \frac{P[\text{Pa}]}{t[\text{C}]+273.15} \text{ [m}^3\text{/kg]} \quad (6.1.11)$$

7. **Η δυναμική συνεκτικότητα** του υγρού αέρα μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\mu = \frac{\mu_A}{1 + \Phi_{AV} * X_m} + \frac{\mu_V}{1 + \frac{\Phi_{VA}}{X_m}} \quad (6.1.12)$$

Όπου:

$$\Phi_{AV} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_A}{\mu_V} \right)^{0.5} \left(\frac{m_V}{m_A} \right)^{0.25} \right]^2}{2\sqrt{2} \left(1 + \frac{m_A}{m_V} \right)^{0.5}} \quad (6.1.13)$$

$$\Phi_{VA} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_V}{\mu_A} \right)^{0.5} \left(\frac{m_A}{m_V} \right)^{0.25} \right]^2}{2\sqrt{2} \left(1 + \frac{m_V}{m_A} \right)^{0.5}} \quad (6.1.14)$$

$$x_m = 1.61 * x$$

$$m_A = 29 \quad \text{Μοριακό βάρος του ξηρού αέρα, [Kg/Kmol]}$$

$$m_V = 18 \quad \text{Μοριακό βάρος του υδρατμού, [Kg/Kmol]}$$

Και

$$\mu_A * 10^6 = 0.40401 + 0.074582 * T - 5.7171 * 10^{-5} * T^2 + 2.9928 * 10^{-8} *$$

$$T^3 - 6.2524 * 10^{-12} * T^4 \text{ [Pa s]} \quad (6.1.15)$$

$$\mu_V * 10^6 = \frac{\sqrt{\frac{T}{647.27}}}{0.0181583 + 0.0177624 * \left(\frac{647.27}{T} \right) + 0.0105287 * \left(\frac{647.27}{T} \right)^2 - 0.0036744 * \left(\frac{647.27}{T} \right)^3} \text{ [Pa s]} \quad (6.1.16)$$

είναι η δυναμική συνεκτικότητα του ξηρού αέρα και των υδρατμών κάτω από χαμηλή πίεση, αντίστοιχα.

Στις δύο τελευταίες εξισώσεις $T[\text{K}] = t[^\circ\text{C}] + 273.15$

8. Η **θερμική αγωγιμότητα** του υγρού αέρα δίνεται από τον τύπο:

$$k = \frac{k_A}{1 + A_{AV} * X_m} + \frac{k_V}{1 + \frac{A_{VA}}{X_m}} \quad (6.1.17)$$

όπου:

$$A_{AV} = 0.25 * \alpha_{AV}^{0.5} * \beta_{AV} \quad (6.1.18)$$

$$\alpha_{AV} = \frac{\mu_A}{\mu_V} * \frac{\left(\frac{m_V}{m_A} \right)^{0.75} * \left(1 + \frac{S_A}{T} \right)}{1 + \frac{S_V}{T}} \quad (6.1.19)$$

$$\beta_{AV} = \frac{1 + \frac{S_{AV}}{T}}{1 + \frac{S_A}{T}} \quad (6.1.20)$$

$$A_{VA} = 0.25 * \alpha_{VA}^{0.5} * \beta_{VA} \quad (6.1.21)$$

$$\alpha_{VA} = \frac{\mu_V * \left(\frac{m_A}{m_V}\right)^{0.75} * \left(1 + \frac{S_V}{T}\right)}{\mu_A * \left(1 + \frac{S_A}{T}\right)} \quad (6.1.22)$$

$$\beta_{VA} = \frac{1 + \frac{S_{AV}}{T}}{1 + \frac{S_V}{T}} \quad (6.1.23)$$

$$\text{Και } S_{AV} = 0.733 * \sqrt{S_A * S_V} \quad (6.1.24)$$

Οι σταθερές Sutherland για τον αέρα και για τους υδρατμούς είναι:

$$S_A = 111 \text{ [K]} \quad S_V = 961 \text{ [K]}$$

Η θερμική αγωγιμότητα του ξηρού αέρα δίνεται από τον τύπο:

$$K_A = 2.43714 * 10^{-2} + 7.83035 * 10^{-5} * t - 1.94021 * 10^{-8} * t^2 + 2.85943 * 10^{-12} * t^3 - 2.61420 * 10^{-14} * t^4 \quad (6.1.25)$$

Και για κορεσμένο υδρατμό σε εύρος από 0 έως +220 °C δίνεται από τον τύπο:

$$K_v = 1.74822 * 10^{-2} + 7.69127 * 10^{-5} * t - 3.23464 * 10^{-7} * t^2 + 2.59524 * 10^{-9} * t^3 - 3.17650 * 10^{-12} * t^4 \quad (6.1.26)$$

Στους υπολογισμούς που έγιναν στο υπολογιστικό τμήμα της εργασίας οι ιδιότητες μεταφοράς και οι θερμοχωρητικότητες λήφθηκαν ως σταθερές σε κάθε διατομή και ίσες με τις τιμές που δίνουν οι ανωτέρω εξισώσεις για τις μέσες θερμοδυναμικά συνθήκες του αέρα σε κάθε διατομή στον συμπυκνωτή. Τα υπόλοιπα μεγέθη υπολογίζονταν για τις εκάστοτε συνθήκες του μίγματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΣΤΡΩΤΟ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ [6A]

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναπτυχθεί η μεθοδολογία εύρεσης των μεγεθών ροής που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό του ρυθμού παραγωγής εντροπίας σε ροή οριακού στρώματος εντός σωλήνα. Η παρούσα μέθοδος υπολογισμού αποτελεί τη μέθοδο υπολογισμού των Patankar – Spalding⁶ για την εύρεση των μεγεθών ροής σε οριακό στρώμα. Στο πρόβλημα μας, βέβαια, έγινε εξειδίκευση αυτής της διαδικασίας δηλαδή, ο γενικός αλγόριθμος υπολογισμού που περιγράφεται στη βιβλιογραφία [6A], τροποποιήθηκε έτσι, ώστε να ληφθούν υπόψιν οι ειδικές οριακές συνθήκες που επικρατούν στην περίπτωση μας και παράλληλα, αναπτύχθηκε ειδικός αλγόριθμος υπολογισμού των μεγεθών της ροής, που περιγράφεται στο κεφάλαιο 8.

7.1 ΙΣΧΥΟΥΣΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

Οι αρχικές εξελίξεις στην υπολογιστική ρευστομηχανική και στην μεταφορά θερμότητας και μάζας ξεκίνησαν με τον υπολογισμό των οριακών στρωμάτων. Αυτός ο όρος χρησιμοποιείται σε μεγάλες και λεπτές ροές, μεγάλες όσον αφορά την κατεύθυνση της ροής και λεπτές όσον αφορά την εγκάρσια κατεύθυνση.

Ο υπολογισμός των οριακών στρωμάτων είχε μεγάλη ώθηση μετά την ανάπτυξη της ισχυρής αριθμητικής διαδικασίας από τους Patankar και Spalding που ενώ προηγουμένως ήταν είτε αδύνατο είτε πολύπλοκο να υπολογιστούν με τα μέσα των προηγούμενων μεθόδων (ομοιότητα, μη ομοιότητα και ολοκληρωτική μέθοδος) τώρα πια είναι εφικτό να υπολογιστούν με γρήγορους και οικονομικούς υπολογισμούς. Η διαδικασία, για παράδειγμα, με επιτρεπτή χρήση μεταβλητών ιδιοτήτων, επέτρεψε την χρήση ολοκληρωτικά αυθαίρετων μεταβολών στις οριακές συνθήκες της κατεύθυνσης της ροής και οδήγησε σε δημιουργία νέων νόμων για την διάχυση και τις πηγές. Με αυτό τον τρόπο ο υπολογισμός των ελεύθερων ή μη ελεύθερων φλογών ή των φωτιών σε τοίχους μπορούσε να γίνει λαμβάνοντας υπόψη την αναλυτική χημεία των χημικών αντιδράσεων. Ομοίως ο υπολογισμός τυρβωδών ροών (και η ανάπτυξη μοντέλων τύρβης ειδικότερα) μπορεί να έρθει σε

⁶ Η ύλη αυτού του κεφαλαίου βασίζεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο του βιβλίου του Anil W. Date. “Introduction to Computational Fluid Dynamics”. Cambridge University Press.

νέα επίπεδα ωρίμανσης μέσω νέων εξερευνήσεων των νόμων της διάχυσης και των πηγών που διέπουν την μεταφορά των μεταβλητών που χαρακτηρίζουν την τύρβη.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφεί η διαδικασία των Patankar – Spalding χρησιμοποιώντας απλή σημειογραφία.

Η διαδικασία των Patankar – Spalding γενικεύει όλα τα φαινόμενα οριακών στρωμάτων δύο διαστάσεων εισάγοντας νέο σύστημα συντεταγμένων. Αυτό το σύστημα επιτρέπει να λάβουμε υπόψη :

1. Αξονοσυμμετρικές όσο και επίπεδες ροές
2. Οριακά στρώματα σε τοιχώματα όσο και ελεύθερες ροές
3. Εσωτερικά (ή εντός αγωγών) όσο και εξωτερικά οριακά στρώματα

Η εξίσωση που ορίζει φαινόμενα οριακών στρωμάτων δύο διαστάσεων είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\partial(\rho u r \Phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_r r \Phi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[r \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right] + r S_\Phi \quad (7.1.1)$$

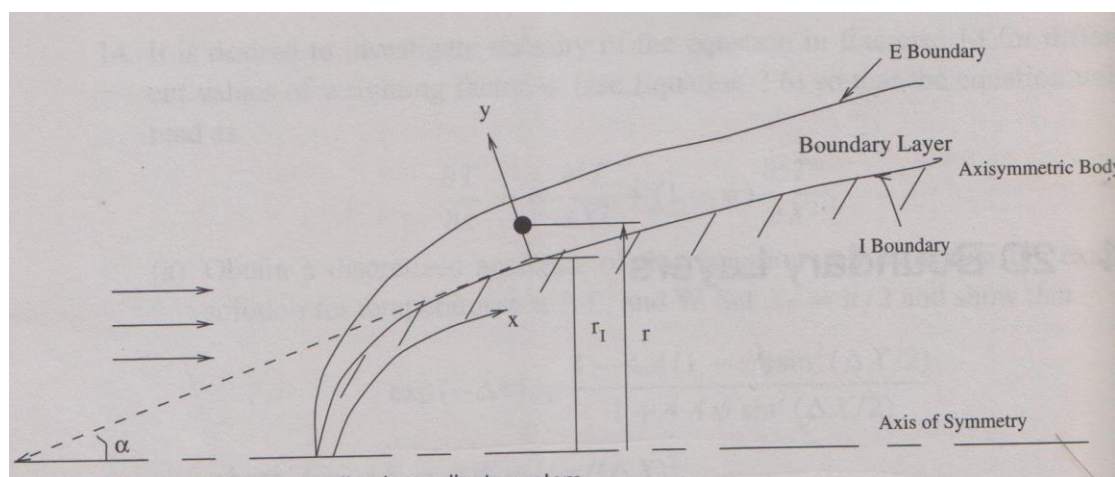
Όπου Φ είναι αντίστοιχα το u (ταχύτητα ροής), v_r (ταχύτητα αζιμουθιακή), T (θερμοκρασία), h (ειδική ενθαλπία), και w_k (κλάσμα μάζας). Οι έννοιες του Γ_Φ και S_Φ δίνονται από τον ακόλουθο πίνακα. Οι όροι των πηγών για τις εξισώσεις u και v προϋποθέτουν συμμετρία κατά τον άξονα και $\partial p / \partial r \rightarrow 0$ έτσι ώστε $\partial p / \partial x = dp / dx$. Γράφοντας την εξίσωση ενέργειας με άγνωστη την θερμοκρασία T θεωρούμε ότι η ειδική θερμοχωρητικότητα είναι σταθερή. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην παρουσία μεταφοράς μάζας, το ρ και το Γ αντιπροσωπεύουν ιδιότητες μίγματος. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές x και y αποτελούν την αξονική απόσταση και την κάθετη απόσταση από το κάτω σύνορο του οριακού στρώματος και εφαρμόζονται τόσο σε ροές με συμμετρία κατά τον άξονα όσο και σε επίπεδες ροές. Στην τελευταία περίπτωση, $r = 1$. Τα r (απόσταση από τον άξονα συμμετρίας που αποτελεί και το κάτω σύνορο του οριακού στρώματος για ροή σε σωλήνα) και το y συνδέονται με αλγεβρική εξίσωση.

Πίνακας των μεγεθών που έχουμε στην εξίσωση οριακών στρωμάτων.

Φ	Γ_Φ	S_Φ
1	0	0
u	μ	$-dp/dx + B_x$
v_r	μ	0
w_k	ρD_k	R_k
T	k/C_p	Q'''/C_p
h	k/C_p	Q'''

Η εξίσωση για το φαινομένο οριακών στρωμάτων δύο διαστάσεων πρέπει να λυθεί με τις κατάλληλες οριακές συνθήκες των I (εσωτερικών) και E (εξωτερικών) ορίων και με μία αρχική συνθήκη για $\chi = \chi_0$ για κάθε Φ . Το όριο I με ακτίνα $r_1(x)$ μπορεί να είναι όριο τοίχους ή μπορεί να είναι άξονα συμμετρίας με $r_1(x) = 0$ (όπως συμβαίνει στην περίπτωση μας). Παρόμοια το E όριο μπορεί να είναι ελεύθερο όριο ή μπορεί να είναι όριο τοίχους (όπως στην εργασία μας). Συνεπώς ο προσδιορισμός των τριών τύπων ροής που αναφέρονται εδώ μπορεί να γίνει αντιληπτός μέσα από κατάλληλο συμβολισμό των I και E ορίων ως όρια ελεύθερα, τοίχων ή συμμετρικά όρια.

Εν τέλει, σημειώνουμε ότι η εξίσωση αυτή είναι παραβολική που υποδηλώνει ότι οι τιμές του Φ σε δεδομένο χ επηρεάζονται μόνο από τις Φ τιμές ανάντι του χ , οι τιμές κατάντι του χ δεν επηρεάζουν.



Σχήμα 7.1.1, [6A]: Γενικό σύστημα συντεταγμένων για ανάλυση οριακού στρώματος

7.2 ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΙΜΟ ΠΛΕΓΜΑ

Είναι γνωστό από την θεωρία οριακού στρώματος ότι γενικά το πάχος του οριακού στρώματος της ταχύτητας και άλλων βαθμωτών μεταβλητών μπορεί να αυξηθεί ή να ελαττωθεί με αυθαίρετο τρόπο στην κατεύθυνση της ροής. Επίσης για ένα δεδομένο πεδίο μήκους L σε κατεύθυνση χ οι μέγιστες τιμές πάχους για διαφορετικά Φ_s δεν είναι γνωστές από πριν. Αυτό καθιστά την επιλογή του y_{max} στο σύστημα συντεταγμένων δύσκολη αν χρησιμοποιείται το σύστημα συντεταγμένων (χ, y) . Επιπλέον, σε αυτό το σύστημα για ένα δεδομένο αριθμό κόμβων στην κατεύθυνση y , η περιοχή ενδιαφέροντος του οριακού στρώματος μπορεί να κατέχεται από πολύ λίγους κόμβους πλέγματος, καταλήγοντας σε μη χρήσιμους

κόμβους. Παρόμοια, σε άλλες περιοχές, μπορεί να υπάρχουν περισσότεροι κόμβοι από αυτούς που απαιτούνται για ακρίβεια. Αυτό που θα ήταν ιδεατό είναι ένα πλέγμα που συστέλλεται και διαστέλλεται με τις μεταβολές του πάχους του οριακού στρώματος διατηρώντας τον ίδιο αριθμό κόμβων πλέγματος σε κάθε κάθετη κατεύθυνση και σε κάθε θέση κατά τον άξονα. Αυτό το πλέγμα που ονομάζεται προσαρμόσιμο πλέγμα έχει συντεταγμένες χ και ω όπου το ω καθορίζεται από τον τύπο: $\omega = \frac{\Psi - \psi_I}{\Psi_E - \psi_I}$, $0 \leq \omega \leq 1$ (7.2.1)

και το Ψ είναι η ακόλουθη ροϊκή συνάρτηση:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = -\rho v_r r \quad (7.2.2),$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y} = \rho u r \quad (7.2.3)$$

$$\text{Συνεπώς για κάθε } \chi \text{ έχουμε: } \Psi = \int \rho u r dy + C, \quad (7.2.4)$$

όπου το C είναι σταθερά. Η συντεταγμένη γ είναι για αυτόν τον λόγο σχετική με το Ψ και αυτό σχετίζεται με το ω μέσω της εξίσωσης του προσαρμόσιμου πλέγματος. Οι δείκτες I και E αναφέρονται στα εσωτερικά και εξωτερικά όρια.

7.3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΕ (χ, ω) ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ

Για να μετασχηματίσουμε την εξίσωση φαινόμενου οριακών στρωμάτων δύο διαστάσεων από το (χ, γ) σύστημα συντεταγμένων στο (χ, ω) σύστημα συντεταγμένων θα ακολουθήσουμε την επόμενη σειρά $(\chi, \gamma) \rightarrow (\chi, \Psi) \rightarrow (\chi, \omega)$. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση διατήρησης μάζας ($\Phi = 1$), μπορούμε να γράψουμε την εξίσωση φαινόμενου οριακών στρωμάτων δύο διαστάσεων σε μη συντηρητική μορφή:

$$\rho \left[u \frac{\partial \Phi}{\partial x} + v_r \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left[r \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right] + S. \quad (7.3.1)$$

Τώρα ο μετασχηματισμός $(\chi, \gamma) \rightarrow (\chi, \Psi)$ υπονοεί ότι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \Big|_{\gamma} = \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \Psi} \Big|_{\chi} + \frac{\partial}{\partial x} \Big|_{\Psi} \quad (7.3.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \Big|_{\chi} = \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \Psi} \Big|_{\chi} = \rho r u \frac{\partial}{\partial \Psi} \Big|_{\chi} \quad (7.3.3)$$

Αντικαθιστώντας αυτές τις εξισώσεις στην εξίσωση 7.3.1, μπορούμε να δείξουμε ότι

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{\Psi} = \frac{\partial}{\partial \Psi} \left[\rho r^2 u \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial \psi} \right] + \frac{S}{\rho u} \quad (7.3.4)$$

Επιπλέον, ο μετασχηματισμός $(\chi, \Psi) \rightarrow (\chi, \omega)$ υποδηλώνει ότι:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} |_{\psi} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} |_{\omega} + \frac{\partial \omega}{\partial x} |_{\psi} \frac{\partial \Phi}{\partial \omega} |_{\chi} \quad (7.3.5)$$

Αλλά από την εξίσωση 7.2.1

$$\frac{\partial \omega}{\partial x} |_{\psi} = \Psi_{EI}^{-1} \left[\frac{\partial \Psi}{\partial x} - \frac{\partial \psi_I}{\partial x} - \omega \frac{\partial \psi_{EI}}{\partial x} \right]_{\psi} = -\Psi_{EI}^{-1} \left[\frac{\partial \psi_I}{\partial x} + \omega \frac{\partial \psi_{EI}}{\partial x} \right] \quad (7.3.6)$$

Όπου, για διευκόλυνση,

$$\Psi_{EI} = \Psi_E - \Psi_I \quad (7.3.7)$$

Συνεπώς, αντικαθιστώντας τις ανωτέρω εξισώσεις στην εξίσωση 7.3.1, μπορούμε να γράψουμε την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} |_{\omega} + (\alpha + b \omega) \frac{\partial \Phi}{\partial \omega} |_{\chi} = \frac{\partial}{\partial \psi} \left[\rho r^2 u \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial \Psi} \right] + \frac{S}{\rho u} \quad (7.3.8)$$

Όπου:

$$\alpha = -\Psi_{EI}^{-1} \frac{\partial \psi_I}{\partial x} \quad (7.3.9)$$

$$b = -\Psi_{EI}^{-1} \frac{\partial \psi_{EI}}{\partial x} \quad (7.3.10)$$

Τώρα χρησιμοποιώντας την εξίσωση 7.2.1 έχουμε:

$$\frac{\partial}{\partial \Psi} = \Psi_{EI}^{-1} \frac{\partial}{\partial \omega} \quad (7.3.11)$$

Έτσι η εξίσωση 7.3.8 μπορεί να γραφτεί :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} |_{\omega} + (\alpha + b \omega) \frac{\partial \Phi}{\partial \omega} |_{\chi} = \frac{\partial}{\partial \omega} \left[c \frac{\partial \Phi}{\partial \Psi} \right]_x + \frac{S}{\rho u} \quad (7.3.12)$$

$$\text{όπου: } c = \Psi_{EI}^{-2} \rho r^2 u \Gamma \quad (7.3.13)$$

Η εξίσωση 7.3.12 αντιπροσωπεύει την εξίσωση 7.1.1 στο (χ, ω) σύστημα συντεταγμένων σε μη συντηρητική μορφή. Για να αναπτύξουμε την συντηρητική μορφή, η εξίσωση γράφεται:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} |_{\omega} + \frac{\partial}{\partial \omega} \left[(\alpha + b \omega) \Phi - c \frac{\partial \Phi}{\partial \omega} \right] - \Phi \frac{\partial}{\partial \omega} (\alpha + b \omega) = \frac{S}{\rho u} \quad (7.3.14)$$

Όπου, αφού το α και το b δεν είναι συναρτήσεις του ω ,

$$\Phi \frac{\partial}{\partial \omega} (\alpha + b \omega) = b \Phi \quad (7.3.15)$$

Τώρα, θεωρούμε την ταυτότητα

$$\Psi_{EI}^{-1} \frac{\partial}{\partial x} (\Psi_{EI} \Phi) = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \Phi \Psi_{EI}^{-1} \frac{\partial \Psi_{EI}}{\partial x} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} - b \Phi \quad (7.3.16)$$

Χρησιμοποιώντας τις δύο τελευταίες εξισώσεις μπορούμε να γράψουμε την εξίσωση 7.3.14 όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\Psi_{EI} \Phi) + \frac{\partial}{\partial \omega} [\Psi_{EI} \{ (\alpha + b \omega) \Phi - c \frac{\partial \Phi}{\partial \omega} \}] = \frac{\Psi_{EIS}}{\rho u} \quad (7.3.17)$$

Αυτό είναι η απαιτούμενη εξίσωση οριακού στρώματος στο σύστημα συντεταγμένων (χ, ω) . γραμμένη σε συντηρητική μορφή.

Από τις εξισώσεις 7.3.7 και 7.2.4 είναι εύκολο να δείξουμε ότι το Ψ_{EI} αντιπροσωπεύει την συνολική ροή μάζας κατά την κατεύθυνση της ροής μέσα στο οριακό στρώμα για οποιοδήποτε χ . Αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας τους ορισμούς των α , b , και c και χρησιμοποιώντας την εξίσωση 7.3.11 μπορούμε να δείξουμε:

$$\Psi_{EI} \{ (\alpha + b \omega) \Phi - c \frac{\partial \Phi}{\partial \omega} \} = r \dot{m} \Phi - \rho \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad (7.3.18)$$

$$\text{Όπου: } \frac{\partial}{\partial \omega} = \frac{\Psi_{EI}}{\rho u} \frac{\partial}{\partial y} \quad (7.3.19)$$

$$\text{Και } r \dot{m} = r \rho v_r = (1 - \omega) r_I \dot{m}_I + \omega r_E \dot{m}_E \text{ με το } \dot{m}_E = (\rho v_r)_E, \dot{m}_I = (\rho v_r)_I. \quad (7.3.20)$$

Συνεπώς η συνολική ροή μάζας κατά την κάθετη κατεύθυνση προς την κύρια ροή m είναι σε κάθε y ένα μέσο άθροισμα των ροών μάζας στο εσωτερικό και στο εξωτερικό σύνορο στην θετική y κατεύθυνση.

Η εξίσωση 7.3.18 συνεπώς αντιπροσωπεύει την συνολική ροή διάχυσης – συναγωγής στην y κατεύθυνση. Έτσι αντικαθιστώντας την εξίσωση 7.3.18 η εξίσωση 7.3.17 μπορεί να γραφτεί :

$$\frac{\partial}{\partial x} (\Psi_{EI} \Phi) + \frac{\partial}{\partial \omega} [r \dot{m} \Phi - r \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y}] = \frac{\Psi_{EIS}}{\rho u} \quad (7.3.21)$$

7.4 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Θεωρούμε το (χ, ω) πλέγμα στην θέση κατά την κατεύθυνση της ροής χ . Ο δείκτης u αναφέρεται στο ανάντι και ο d στο κατόντι. Σημειώστε ότι οι κόμβοι N (άνω από τον κόμβο υπολογισμού P), P , S (κάτω από τον κόμβο υπολογισμού P) δεν είναι ισαπέχοντες γιατί το $\Delta \omega$ γενικά δεν είναι ομοιόμορφο. Αυτό θα γίνει φανερό σε ακόλουθο τμήμα. Για να εξαχθεί η διακριτοποιημένη εκδοχή της εξίσωσης 7.3.21,

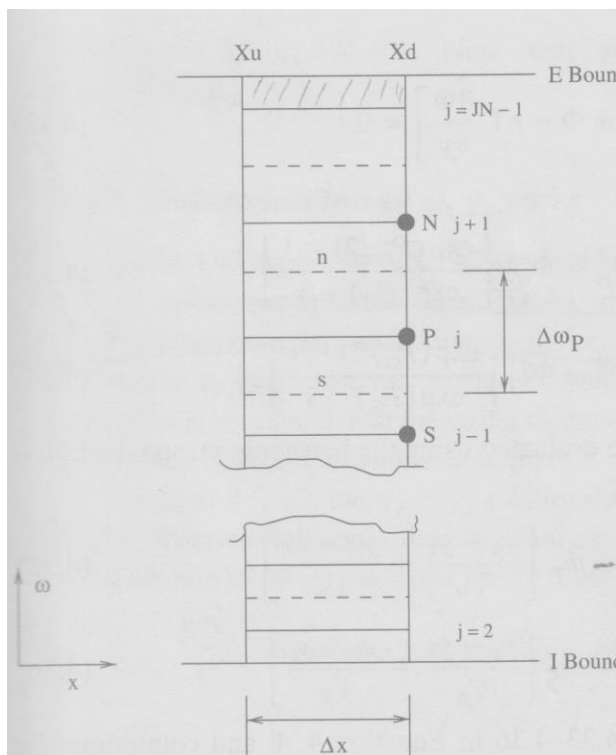
κάθε όρος στην εξίσωση θα ολοκληρωθεί στον όγκο ελέγχου. Έτσι, υποθέτοντας τον όρο πηγής S να είναι σταθερά στον όγκο ελέγχου έχουμε:

$$\int_{x_u}^{x_d} \int_s^n \frac{\Psi_{EIS}}{\rho u} dx d\omega = \int_{x_u}^{x_d} \int_s^n \frac{s}{\rho u} dx d\omega = \int_{x_u}^{x_d} \int_s^n S r dx dy = S r_p \Delta x \Delta y = S \Delta V \quad (7.4.1)$$

$$\text{Όπου } \Delta V = r_p \Delta x \Delta y \quad (7.4.2)$$

Ομοίως, ο όρος συναγωγής κατά την κύρια κατεύθυνση ροής ολοκληρώνεται στο:

$$\int_{x_u}^{x_d} \int_s^n \frac{\partial}{\partial x} [\Psi_{EI} \Phi] dx d\omega = [(\Psi_{EI} \Phi)^d - (\Psi_{EI} \Phi)^u] \Delta \omega \quad (7.4.3)$$



Σχήμα 7.4.1, [6A]: Πλέγμα πεπερασμένων διαφορών για ανάλυση οριακού στρώματος

Τελικά ο όρος συναγωγής – διάχυσης στην κάθετη προς την κύρια ροή κατεύθυνση ολοκληρώνεται στο:

$$\int_{x_u}^{x_d} \int_s^n \frac{\partial}{\partial \omega} [r \dot{m} \Phi - r \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y}] dx d\omega = \{r \dot{m} \Phi - r \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y}\}_n \Delta x - \{r \dot{m} \Phi - r \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y}\}_s \Delta y \quad (7.4.4)$$

Η εξίσωση 7.4.4 υποδηλώνει ότι η καθαρή ροή στα όρια της επιφάνειας ολοκλήρωσης είναι ομοιόμορφη μεταξύ x_u και x_d . Τώρα υποθέτοντας γραμμική μεταβολή του Φ μεταξύ γειτονικών κόμβων έχουμε:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n = \frac{\Phi_N^d - \Phi_p^d}{\Delta y_n}, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s = \frac{\Phi_p^d - \Phi_S^d}{\Delta y_s} \quad (7.4.5)$$

Όπου $\Delta y_n = y_N - y_p$ και $\Delta y_s = y_p - y_S$. Σημειώστε ότι τα Φ υπολογίζονται στο x_d και όχι στο μέσο μεταξύ x_u και x_d . Ωστόσο, υποθέτοντας ότι το Δx είναι μικρό, αυτή η ελευθερία είναι επιτρεπτή.

Για να υπολογίσουμε τις ροές συναγωγής στα όρια των όγκων ελέγχου χρησιμοποιούμε το εκθετικό σχήμα που προκύπτει από την ακριβή λύση της εξίσωσης $\frac{\partial}{\partial y} [r \dot{m} \Phi - r \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y}] = 0$

$$\text{Τότε έχουμε: } \Phi_n = \Phi_p^d + (\Phi_N^d - \Phi_p^d) \left[\frac{\exp\left(\frac{P_{cn}}{2}\right) - 1}{\exp(P_{cn}) - 1} \right] \quad (7.4.7)$$

$$\Phi_s = \Phi_S^d + (\Phi_p^d - \Phi_S^d) \left[\frac{\exp\left(\frac{P_{cs}}{2}\right) - 1}{\exp(P_{cs}) - 1} \right] \quad (7.4.8)$$

Όπου οι αριθμοί Peclet υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τον αρμονικό μέσο

$$P_{cn} = \frac{\dot{m}_n \Delta y_n}{\Gamma_n} = \dot{m}_n \left[\frac{y_n - y_p}{\Gamma_p} + \frac{y_N - y_n}{\Gamma_N} \right] \quad (7.4.9)$$

$$P_{cs} = \frac{\dot{m}_s \Delta y_s}{\Gamma_s} = \dot{m}_s \left[\frac{y_s - y_S}{\Gamma_s} + \frac{y_p - y_s}{\Gamma_p} \right] \quad (7.4.10)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 7.4.7 – 7.4.10 στην εξίσωση 7.4.4 και συνδυάζοντας την τελευταία με τις εξισώσεις 7.4.1 και 7.4.3 μπορούμε να δείξουμε ότι η διακριτοποιημένη μορφή της εξίσωσης 7.3.26 παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$A P \Phi_p^d = A N \Phi_N^d + A S \Phi_S^d + A U \Phi_p^u + S \Delta V \quad (7.4.11)$$

Όπου :

$$A N = \frac{r_n \dot{m}_n \Delta x}{\exp P_{cn} - 1} \quad (7.4.12)$$

$$A S = \frac{r_s \dot{m}_s \Delta x \exp P_{cs}}{\exp P_{cs} - 1} \quad (7.4.13)$$

$$A U = \Psi_{EI}^u \Delta \omega, \quad A P = A U + A N + A S \quad (7.4.14)$$

Και όπως προκύπτει από την εξίσωση 7.3.20:

$$r_n \dot{m}_n = (1 - \omega_n) r_I \dot{m}_I + \omega_n r_E \dot{m}_E \quad (7.4.14\alpha)$$

$$r_s \dot{m}_s = (1 - \omega_s) r_I \dot{m}_I + \omega_s r_E \dot{m}_E \quad (7.4.14.\beta)$$

Για την εξαγωγή του συντελεστή AP χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση διατήρησης μάζας:

$$\begin{aligned} \int_s^n \frac{\partial}{\partial x} (\rho r u) dy &= - \int_s^n \frac{\partial}{\partial y} (\rho r v_r) dy \\ &= - (r_n \dot{m}_n - r_s \dot{m}_s) \end{aligned} \quad (7.4.15)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\partial}{\partial x} \int_s^n \frac{\partial \Psi}{\partial y} dy \\ &= \frac{\Delta \omega}{\Delta x} (\psi_{EI}^d - \psi_{EI}^u) \end{aligned} \quad (7.4.16)$$

Εν τέλει, χρησιμοποιώντας συμβολισμό κόμβων στην εξίσωση 7.4.11 έχουμε:

$$A P_j \Phi_j = A N_j \Phi_{j+1} + A S_j \Phi_{j-1} + A U_j \Phi_j^u + S_j \Delta V_j \quad (7.4.17)$$

Για $j = 2, 3, \dots, J N - 1$. Πρέπει να σημειώσουμε ότι ο εκθέτης d δεν χρησιμοποιείται για ευκολία.

7.5 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ω , γ , ΚΑΙ r

Η εξίσωση 7.4.17 αντιπροσωπεύει μια ομάδα αλγεβρικών εξισώσεων στη κατάντι θέση κατά τη κατεύθυνση ροής x_d . Αυτές οι εξισώσεις μπορούν να λυθούν από τη μέθοδο TDMA όταν οι τιμές του Φ_j^u στην ανάντι θέση κατά τη κατεύθυνση ροής x_u είναι γνωστές μαζί με τις δύο οριακές συνθήκες στην κατάντι θέση κατά τη κατεύθυνση ροής x_d (για παράδειγμα για $j = 1$ και $j = J N$). Συνεπώς ξεκινώντας με $\chi = \chi_0$ μπορούμε να έχουμε βηματική διαδικασία παίρνοντας το βήμα $\Delta \chi$. Αυτή η κατάσταση μοιάζει πολύ με το χρονικά μεταβαλλόμενο πρόβλημα αγωγής κατά το οποίο η βηματική διαδικασία εκτελείται με χρονικό βήμα Δt .

Συνεπώς, για $\chi = \chi_0$ η σχέση $u_j \sim y_j$ (στην περίπτωση μας $u_j \sim r_j$) θεωρείται ότι έχει προ περιγραφεί είτε από πειραματικά αποτελέσματα είτε από μία αναλυτική λύση. Κάποιος μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτές τις τιμές για να καθορίσει τα ω_j μία και καλή ως εξής:

Από την διαμέριση στην αρχική διατομή έχω τα r_j και r_{cj} ($r_j = j^* \Delta r$, $r_{cj} = 0.5^* (r_j + r_{j-1})$, όπου r_{cj} είναι το r για το νότιο όριο (s όριο του κόμβου j) βλέπε σχήμα 7.4.1).

Ορίζοντας $\psi_1 = 0$ μπορούμε να βρούμε τα $\Psi_j = \psi(r=r_j)$ και $\Psi_{c_j} = \psi(r=r_{c_j})$ από την εξίσωση 7.2.4 με αριθμητικό τρόπο:

$$\Psi_1 = \Psi_{c1} = 0$$

Για $j = 2$ μέχρι το άνω όριο:

$$\Psi_j = \Psi_{j-1} + 0.5*(r_j*u_j*\rho_j + r_{j-1}*u_{j-1}*\rho_{j-1})*(r_j - r_{j-1}) \quad (7.5.1)$$

$$\Psi_{c_j} = \Psi_{c_{j-1}} + 0.5*(r_j*u_j*\rho_j + r_{j-1}*u_{j-1}*\rho_{j-1})*(r_{c_j} - r_{c_{j-1}}) \quad (7.5.2)$$

Κατόπιν από την εξίσωση 7.2.1 βρίσκονται τα ω_j και ω_{c_j} και έτσι για την αρχική διατομή έχουμε:

$$\omega_j = \omega_p, \quad \omega_{c,j} = \omega_s, \quad \Psi_j = \Psi_p, \quad \Psi_{c,j} = \Psi_s$$

$$r_j = r, \quad r_{c,j} = r_s \quad (7.5.3)$$

Όπου, για $\chi = \chi_0$, τα r_j ($j = 1, 2, \dots, J, N$) είναι γνωστά. Έτσι, $r_{c,1} = \gamma_1$ όπου το γ_1 αναφέρεται στο I όριο και το γ_{JN} στο E όριο. Τώρα από την γεωμετρία του προβλήματος μας (σχήμα 7.1.1) συνάγεται ότι ισχύει ο τύπος :

$$r = r_1 + \gamma \cos(\alpha), \text{ όπου στην περίπτωση μας } \alpha=0 \text{ και } r_1 = 0 \Rightarrow r = \gamma \quad (7.5.4)$$

και αυτό ολοκληρώνει τον καθορισμό του πλέγματος στο $\chi = \chi_0$.

Επομένως το ω_j στο r_j αντιπροσωπεύει το λόγο της παροχής μάζας κατά την διεύθυνση ροής από το $r_1 = r_I$ μέχρι το r_j προς τη συνολική παροχή μάζας από το r_I μέχρι το r_E στο $\chi = \chi_0$. Τώρα υποτίθεται ότι αυτός ο λόγος παραμένει αμετάβλητος για όλες τις τιμές του χ οπότε η διανομή των ω_j δεν μεταβάλλεται κατά την κατεύθυνση του χ .

Πρέπει να σημειωθεί ότι η απόσταση γ και επομένως το r πρέπει να μεταβάλλεται κατά την κατεύθυνση του χ καθώς το οριακό στρώμα μεταβάλλεται. Επομένως πρέπει να βρεθεί η σχέση του r_j με το ω_j που θα εφαρμόζεται σε κάθε χ .

Για την αξονοσυμμετρική ροή από την βιβλιογραφία έχουμε:

$$I(\omega_j) = r_1*\gamma(\omega_j) + \cos(\alpha)*\gamma(\omega_j)^2/2 \quad (7.5.5)$$

$$\text{Όπου στην ανωτέρω εξίσωση } I(\omega_j) = \Psi_{EI} \int_0^{\omega_j} \frac{d\omega}{\rho u} \quad : \quad (7.5.6)$$

Επειδή στην περίπτωση μας, $r_1 = \alpha = 0$, και $\gamma(\omega_j) = r_j$

$$I(\omega_j) = \frac{r_j^2}{2} \quad (7.5.7)$$

Η λύση αυτής της δευτεροβάθμιας εξίσωσης είναι:

$$r_j = (2I(\omega_j))^{0.5} \quad (7.5.8)$$

όπου το $I(\omega_j)$ δίνεται από την εξίσωση 7.5.6 για κάθε ω_j . Έτσι υπολογίζουμε τα r_j και $r_{c,j}$ για κάθε ω_j σε κάθε διατομή.

7.6 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (ΓΕΝΙΚΑ)

Για κλειστή ροή στα όρια E και I, υπάρχουν δύο τύποι οριακών συνθηκών: η συμμετρία και το τοίχωμα.

Συμμετρία

Δεν μπορεί να υπάρχει ροή μάζας όταν έχω συμμετρία στο E ή I όριο. Επίσης $\partial\Phi / \partial n|_b = 0$, όπου ο δείκτης b υποδηλώνει τους E και I κόμβους ορίων. Αυτό σημαίνει ότι:

$$\Phi_b = \Phi_{nb} \text{ και } \dot{m}_b = 0 \quad (7.6.1)$$

Όπου ο δείκτης nb χρησιμοποιείται για τον γειτονικό κόμβο στο όριο. Μία επιπλέον συνέπεια της συνθήκης $\dot{m}_b = 0$ είναι ότι $\partial\Psi_b / \partial\chi = 0$ ή ότι το Ψ_b είναι σταθερό.

Τοίχωμα

Ο όρος τοίχωμα ορίζει ένα στερεό σύνορο. Παρόλα αυτά πρέπει να θυμόμαστε ότι όταν ένα αέριο ρέει πάνω σε μία υγρή επιφάνεια, η διεπιφάνεια αερίου – ρευστού θα αρχίσει να συμπεριφέρεται σαν τοίχωμα. Για διαφορετικά Φ , οι συνθήκες του ορίου τοίχου θα είναι και αυτές διαφορετικές. Αυτές είναι οι ακόλουθες:

Μεταβλητές ταχύτητας $\Phi = u$ ή w

Για αυτές τις μεταβλητές έχω :

$$u_b = u_{wall}, v_b = v_{wall} \quad (7.6.2)$$

Έτσι η ταχύτητα κατά την κατεύθυνση ροής θα είναι πάντα μηδενική εκτός εάν η ίδια η επιφάνεια κινείται με ταχύτητα u_{wall} . Στην περίπτωση μας έχουμε $u_{wall} = 0$. Η εξίσωση 7.6.2 για αυτόν τον λόγο δείχνει την συνθήκη μη ολίσθησης.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, ένα υγρό μπορεί να εκχύνεται στο οριακό στρώμα ή το οριακό στρώμα μπορεί να αναρροφάται μέσα από έναν τοίχο. Αλλιώς στην περίπτωση της ατμοποίησης ή της επιφανειακής καύσης, η μάζα θα μεταφέρεται μέσα στο οριακό στρώμα. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις το \dot{m}_b είναι γνωστό και η συνέπεια είναι:

$$\Psi_b(x) = \Psi_b(x - \Delta x) - r_b \dot{m}_b \Delta x \quad (7.6.3)$$

Όπου στην περίπτωση μας b είναι το όριο E και $r_b \dot{m}_b = R \dot{m}_b = R \dot{m}_E$

Θερμικές Μεταβλητές $\Phi = T$ ή h

Για αυτές τις μεταβλητές συνήθως δύο είδη συνθηκών προσδιορίζονται. Αρχικά η τιμή της μεταβλητής ώστε:

$$T_b = T_{wall}(x), h_b = h_{wall}(x). \quad (7.6.4)$$

Στη 2^η περίπτωση καθορίζεται η ροή θερμότητας q_b . Στο πρόβλημα μας όπως θα εκτεθεί στο επόμενο κεφάλαιο θα χρησιμοποιηθεί η οριακή συνθήκη 7.6.4 σαν τμήμα επαναληπτικής διαδικασίας για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του τοιχώματος, καθώς στο τοίχωμα έχουμε ροή θερμότητας που εκ των προτέρων δεν είναι γνωστή και εξαρτάται από τη θερμοκρασία του τοιχώματος και από τη μεταφορά μάζας μέσω της συμπύκνωσης του υδρατμού σε αυτό (βλέπε κεφάλαιο 8).

Μεταβλητές μεταφοράς μάζας $\Phi = W_k$

Η πιο συνηθισμένη οριακή συνθήκη για αυτές τις μεταβλητές στην περίπτωση μας στο E όριο είναι: $\dot{m}''_b = r_b \dot{m}_b = (W_{k,b} - 1)^{-1} \Gamma_k \frac{\partial W_k}{\partial y} |_{y=R}$ (7.6.5)

Σε προβλήματα ατμοποίησης ή συμπύκνωσης οι τιμές του $W_{k,b}$ μπορούν να προσδιοριστούν από την κατάσταση ισορροπίας (ή κατάσταση κορεσμού) που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία T_b .

$$W_{k,b} = f(T_b) \quad (7.6.6)$$

Έτσι σε προβλήματα μεταφοράς μάζας το \dot{m}_b μπορεί να είναι γνωστό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρεθεί το Ψ_b στη κατάντι θέση από την εξίσωση 7.6.3.

7.7 ΟΡΟΙ ΠΗΓΩΝ

ΕΞΙΣΩΣΗ ΟΡΜΗΣ

Σε εσωτερικές ροές πρέπει να χρησιμοποιείται μία ειδική διαδικασία για να καθορισθεί η κλίση πίεσης. Αυτή η διαδικασία στηρίζεται στην ικανοποίηση της ισορροπίας για την συνολική ροή μάζας σε οποιαδήποτε περιοχή κατά την κατεύθυνση ροής χ . Συνεπώς γενικά σε αγωγούς, αφήνοντας το $A_d(x)$ να αντιπροσωπεύει την περιοχή αγωγού μεταξύ του άξονα συμμετρίας (όριο Ι) και του τοίχου (όριο Ε) έχουμε :

$$A_d = \int_I^E r dr = \Psi_{EI} \int_0^1 \frac{d\omega}{\rho u}. \quad (7.7.1)$$

$$\frac{A_d}{\Psi_{EI}} = C = \sum \frac{\Delta\omega_j}{\rho_j u_j}. \quad (7.7.2)$$

Το πρόβλημα τώρα είναι να αντικαταστήσουμε το u_j σε σχέση με την κλίση πίεσης. Για να πετύχουμε αυτό ο Patankar γράφει την διακριτοποιημένη έκδοση της εξίσωσης της ορμής:

$$AP_j u_j = AN_j u_{j+1} + AS_j u_{j-1} + D_j - \Delta V_j p_x \quad (7.7.3)$$

Όπου p_x είναι η κλίση πίεσης και το D_j περιλαμβάνει όρους πηγής που προκύπτουν από άλλες δυνάμεις σώματος. Για να λυθεί αυτή η εξίσωση με τη μέθοδο TDMA έχουμε την προκύπτουσα εξίσωση:

$$u_j = A_j u_{j+1} + B_j - R_j P_x \quad (7.7.4)$$

Όπου $R_1 = R_{JN} = 0$. Έτσι οι επαναληπτικές σχέσεις θα πάρουν την ακόλουθη μορφή :

$$A_j = \frac{AN_j}{DEN} \quad B_j = \frac{AS_j B_{j-1} + D_j}{DEN} \quad R_j = \frac{AS_j R_{j-1} + \Delta V_j}{DEN} \quad (7.7.5)$$

Όπου $DEN = AP_j - AS_j A_{j-1}$. Σημειώστε ότι τα $A(2)$, $B(2)$, ΚΑΙ $R(2)$ μπορούν να βρεθούν από την εξίσωση 7.7.3. Για αυτό τον λόγο οι συντελεστές των εξισώσεων 4.80 βρίσκονται για $J=3$ έως $JN-1$ αναδρομικά. Τώρα γράφουμε:

$$u_j = F_j - G_j P_x \quad (7.7.6)$$

Όπου πάλι αναδρομικά, τα F_j και G_j μπορούν να προσδιοριστούν για $j = JN - 1$ έως το 2 από τις εξισώσεις:

$$F_j = A_j F_{j+1} + B_j, \quad G_j = A_j G_{j+1} + R_j, \quad (7.7.7)$$

Όπου $A(JN) = G(JN) = 0$. Έτσι είναι δυνατό να αντικαταστήσουμε το u_j στην εξίσωση 7.7.2 με την εξίσωση 7.7.6. Το αποτέλεσμα που παίρνουμε είναι μία μη γραμμική εξίσωση για το P_x :

$$\sum_1^{JN-1} \frac{\Delta\omega_j}{\rho_j(F_j - G_j P_x)} - C = 0 \quad (7.7.8)$$

Σε αυτή την εξίσωση το C είναι από την εξίσωση 7.7.2. Αυτή η εξίσωση μπορεί να λυθεί με την διαδικασία Newton – Raphson:

$$P_x = P_x^* + \frac{C - S_1}{S_2}$$

$$S_1 = \sum_1^{JN-1} \frac{\Delta\omega_j}{\rho_j(F_j - G_j P_x^*)}$$

$$S_2 = \sum_1^{JN-1} \frac{\Delta\omega_j G_j}{\rho_j(F_j - G_j P_x^*)^2} \quad (7.7.9)$$

Όπου το P_x^* είναι η εκτιμώμενη κλίση πίεσης. Οι επαναλήψεις, συνήθως πέντε, συνεχίζονται μέχρι $|C - S_1| < 10^{-4} C$.

ΕΞΙΣΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι όροι πηγής στην εξίσωση ενέργειας και μεταφοράς μάζας εξαρτώνται από την κάθε περίπτωση. Για το πρόβλημα μας έχουμε (βλέπε πίνακα σελ. 90):

$$Q''' = \frac{Dp}{Dt} + \dot{Q}_{md} \quad (7.7.10)$$

Όπου: το $Dp/Dt = u\partial p/\partial x$ αντιπροσωπεύει την επίδραση έργου πίεσης σε σταθερή ροή, και \dot{Q}_{md} αντιπροσωπεύει την συνεισφορά της μεταφοράς μάζας με διάχυση συστατικών:

$$\dot{Q}_{md} = D \frac{\partial \rho_v}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} (c_{p,v} - c_{p,g}) \quad (7.7.11)$$

ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ

Οι όροι πηγής στην εξίσωση μεταφοράς μάζας είναι μηδέν γιατί δεν έχουμε χημική αντίδραση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

Στη συνέχεια θα δοθεί ο αλγόριθμος υπολογισμού των μεγεθών της ροής σύμφωνα με τη θεωρία που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 7, όπως αυτός τροποποιήθηκε στην περίπτωση μας για την αντιμετώπιση των ειδικών οριακών συνθηκών που επικρατούν στο πρόβλημα μας. Θα γίνει πρώτα ειδική μνεία στις οριακές συνθήκες, οι οποίες εισάγουν στον αλγόριθμο μη γραμμικότητα και κάνουν απαραίτητη τη χρήση επαναληπτικής μεθόδου για τον υπολογισμό των μεγεθών της ροής. Κατόπιν, θα γίνει περιγραφή του αλγόριθμου βήμα – βήμα.

8.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ [5A].

8.2 ΙΣΧΥΟΥΣΕΣ ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΜΑΣ

Στο παρόν πρόβλημα έχουμε την περίπτωση υπολογισμού που αναφέρεται στο κεφάλαιο 7, μόνο που το κάτω όριο είναι ο άξονας συμμετρίας του εσωτερικού σωλήνα στον οποίο ρέει το μίγμα ξηρού αέρα και υδρατμών και το άνω όριο είναι το τοίχωμα του εσωτερικού σωλήνα στο οποίο λαμβάνει χώρα η συμπύκνωση υδρατμών. Σημειώνεται ότι στον αλγόριθμο λαμβάνεται υπόψη η ροή του ψυκτικού ρευστού στον εξωτερικό σωλήνα του εναλλάκτη και βρίσκεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του κατά μήκος του εναλλάκτη από ισοζύγιο θερμότητας.

Αν θεωρήσουμε το χώρο μεταξύ του άξονα συμμετρίας του εσωτερικού σωλήνα και του τοιχώματος του να χωρίζονται σε $JN-1$ τμήματα για τα οποία έχουν καθοριστεί εξ αρχής τα ω_j και ω_{j+1} όπως περιγράφεται στην παράγραφο 7.5 του κεφαλαίου 7 έχουμε προς υπολογισμό για κάθε τιμή της αξονικής θέσης x , JN τιμές από κάθε μία από τις μεταβλητές (αξονική ταχύτητα, θερμοκρασία, κάθετη ταχύτητα, κλάσμα μάζας). Επίσης θεωρούμε ότι το αξονικό μήκος του εναλλάκτη

έχει διαχωρισθεί σε IN-1 τμήματα οπότε ο υπολογισμός των μεγεθών θα γίνει σε IN αξονικές θέσεις.

Για κάθε μία από τις αξονικές θέσεις οι οριακές συνθήκες διατυπώνονται ως εξής (ο κόμβος 1 είναι στον άξονα συμμετρίας ενώ ο κόμβος JN είναι στο τοίχωμα του σωλήνα για κάθε αξονική θέση):

1) Αξονική ταχύτητα u:

$$u(1) = u(2) \text{ (προκύπτει από τη συμμετρία της ροής, } \frac{\partial u}{\partial r} = 0 \text{)}$$

$$u(JN) = 0 \text{ (συνθήκη μη ολίσθησης)}$$

2) Θερμοκρασία T:

$$T(1) = T(2) \text{ (προκύπτει από τη συμμετρία της ροής, } \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \text{)}$$

$T(JN)$ όπως προκύπτει από τη λύση μη γραμμικής εξίσωσης με τη μέθοδο Newton-Raphson που εκφράζει τη διατήρηση της ενέργειας μεταξύ των δύο ρευμάτων ρευστού όπως εκτίθεται κατωτέρω:

Έχουμε ότι η ροή θερμότητας από συμπύκνωση + ροή θερμότητας από αγωγή προς το τοίχωμα = ροή θερμότητας από το τοίχωμα προς το ψυκτικό ρευστό

Ροή θερμότητας από συμπύκνωση (με χρήση της εξίσωσης 7.6.5)

$$\dot{q}_1 = \dot{m}_b h_{fg}(T_{wall}) = \left(\frac{1}{R} (w_{wall} - 1) \right)^{-1} \Gamma \left. \frac{\partial w}{\partial r} \right|_{r=R} h_{fg}(T_{wall}) \quad (8.2.1)$$

Ροή θερμότητας από αγωγή:

$$\dot{q}_2 = -\kappa \frac{\partial T}{\partial r} \quad (8.2.2)$$

Ροή θερμότητας από το τοίχωμα προς το ψυκτικό ρευστό

$$\dot{q}_3 = h(T_{wall} - T_{coolant})$$

Διακριτοποιώντας τους όρους μερικών παραγώγων και λαμβάνοντας υπόψη ότι $\Gamma = \rho \cdot D$ και ότι το τοίχωμα αντιστοιχεί στον κόμβο JN σε κάθε διατομή λαμβάνουμε την ακόλουθη μη γραμμική εξίσωση

$$h * (T(JN) - T_{coolant}(x)) = k \left\{ \frac{(T(JN-1) - T(JN))}{(r(JN) - r(JN-1))} \right\} + \frac{\rho D}{R(-1 + W(JN))} \left\{ \frac{(W(JN) - W(JN-1))}{(r(JN) - r(JN-1))} \right\} h_{fg} \quad (8.2.3)$$

με R την ακτίνα του εσωτερικού σωλήνα όπου λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση 5.1.2.10 και ολοκληρώνοντας άμεσα (κατά Euler):

$$T_{coolant}(x) = T_{coolant}(x - \Delta x) - h * (T(JN_{x-\Delta x}) - T_{coolant}(x - \Delta x)) 2\pi R \Delta x / (\dot{m}_w * 4180) \quad (8.2.4)$$

η θερμοκρασία του ψυκτικού ρευστού στην θέση x εξαρτώμενη από την τιμή της ανάντι $T_{coolant}(x - \Delta x)$, την θερμοκρασία του τοιχώματος ανάντι $T(JN_{x-\Delta x})$ την παροχή ψυκτικού ρευστού \dot{m}_w και τον συντελεστή συναγωγής του ψυκτικού ρευστού h.

3) **Κλάσμα μάζας w:**

$$w(1) = w(2) \text{ (προκύπτει από τη συμμετρία της ροής, } \frac{\partial w}{\partial r} = 0)$$

$$w(JN) = \text{Τιμή για κορεσμένο μίγμα αέρα υδρατμών για τη θερμοκρασία } T(JN)$$

(8.2.5)

4) **Κάθετη ταχύτητα v:**

$$V_r(1) = 0 \text{ (προκύπτει από τη συμμετρία της ροής)}$$

$$v_r(JN) = \frac{D}{R(-1 + W(JN))} \left\{ \frac{(W(JN) - W(JN-1))}{(r(JN) - r(JN-1))} \right\}$$

όπως προκύπτει από την $\rho^* v_r(JN) = \dot{m}_E = \dot{m}_b$ (εξίσωση 7.3.20) και \dot{m}_b από την εξίσωση 7.6.5

(8.2.6)

8.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΣΤΗΝ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΑΣ

Αυτός έχει διαφορά από τη γενική μέθοδο υπολογισμού που περιγράφεται στη βιβλιογραφία, [6A], στο ότι η τιμή της θερμοκρασίας στη θέση JN και επομένως οι τιμές του κλάσματος μάζας w και της ταχύτητας v_r δεν είναι εκ των προτέρων γνωστές αλλά υπολογίζονται με επαναληπτική διαδικασία. Συγκεκριμένα τα βήματα του αλγόριθμου είναι τα κάτωθι:

Υπολογισμοί στο χ_0 (ο δείκτης u αναφέρεται στα ανάντι μεγέθη της ροής)

1. Στην αρχή διάβασε τα δεδομένα και απόδωσε τιμές στα μεγέθη Φ (u, v_r, T, P, W, ρ) τα οποία καθορίζονται για j = 1, 2,, JN-1 για το επιλεγμένο JN στην αρχική διατομή.
2. Στο τοίχωμα υπολόγισε την θερμοκρασία με αριθμητική επίλυση της 8.1.3. Εμείς χρησιμοποιούμε την μέθοδο Newton – Raphson όπου η παράσταση προς μηδενισμό (εξίσωση προς επίλυση) είναι:

$$k \left\{ \frac{(T(JN-1) - T(JN))}{(r(JN) - r(JN-1))} \right\} + \frac{\rho D}{R(-1 + W(T(JN)))} \left\{ \frac{(W(T(JN)) - W(JN-1))}{(r(JN) - r(JN-1))} \right\} h_{fg}(T(JN)) - h * (T(JN) - T_{coolant}(x)) = F(T(JN))$$

Στην ανωτέρω εξίσωση ο άγνωστος είναι το T(JN) και η λύση έχει ως εξής:

- Θέσε T(JN) = Tstar (ίση στην αρχή με 0.5*(Tcoolant + T(JN-1)))
- Υπολόγισε το W(Tstar) από ψυχομετρία για κορεσμένο αέρα
- Υπολόγισε το hfg(Tstar) από τις ιδιότητες ατμού-νερού
- Υπολόγισε το F(Tstar)=F1
- Θέσε Tstarr = Tstar+ 0.01
- Υπολόγισε το W(Tstarr) από ψυχομετρία για κορεσμένο αέρα
- Υπολόγισε το hfg(Tstarr) από τις ιδιότητες ατμού-νερού
- Υπολόγισε το F(Tstarr)=F2
- Η παράγωγος της F στο Tstar αριθμητικά υπολογισμένη είναι ίση με DF=(F2-F1)/0.01
- Υπολόγισε νέα εκτίμηση T1= Tstar – F1/DF
- Αν |T1 – Tstar| < 0.00001 η επίλυση της εξίσωσης έχει ολοκληρωθεί με

$T(JN)=T1$ αλλιώς θέτω $Tstar= T1$ και επαναλαμβάνω τα ανωτέρω βήματα

3. Υπολόγισε από την εξίσωση 7.6.5 το \dot{m}_b και από την συνθήκη κορεσμού το $W(JN)= W(T(JN))$ από ψυχομετρία και το $v_r(JN)$ από την εξίσωση 8.2.6.
4. Θέτουμε $x_u = x_0$ και υπολογίζουμε τα ω_j ($j = 1, 2, \dots, JN$) από τα καθορισμένα u_j για μία επιλεγμένη τιμή του $\Psi_I^u = 0$. (παράγραφος 7.5)
5. Υπολογίστε τα Ψ_E^u και συνεπώς το Ψ_{EI}^u (παράγραφος 7.5)

Ξεκίνημα νέου βήματος (ο δείκτης d αναφέρεται στα κατάντι μεγέθη της ροής)

6. Επιλέξτε Δx ώστε $x_d = x_u + \Delta x$. Υπολογίστε τα ρ_j, μ_j και C_{pj} από κατάλληλες γνωστές συναρτήσεις (ψυχομετρία) από τις ανάντι τιμές των βαθμωτών μεγεθών Φ_j^u . Προσδιορίστε ή υπολογίστε τα \dot{m}_I και \dot{m}_E όπου $\dot{m}_E = \dot{m}_b$. όπως υπολογίζεται από την εξίσωση 7.6.5. Οι τιμές των ρ, μ, c_p θα θεωρηθούν σταθερές σε κάθε διατομή κατά τους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν και θα υπολογίζονται από τα μέσα μεγέθη διατομής.
7. Επιλέξτε σχετικά Φ και υπολογίστε τους συντελεστές και τους όρους πηγών στην εξίσωση διατήρησης χρησιμοποιώντας ανάντι τιμές στην εξίσωση της υ ταχύτητας για τα μεγέθη που εμφανίζονται στον υπολογισμό των συντελεστών. Σημειώστε ότι η κλίση πίεσης για εσωτερικές ροές πρέπει να υπολογισθεί κατάλληλα σύμφωνα με την παράγραφο 7.7.
8. Τώρα λύστε την διακριτοποιημένη εξίσωση διατήρησης ως προς $u(J)$, ($J=1$ ως JN) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο TDMA, ([8A]), τις οριακές συνθήκες που έχουν διατυπωθεί στην παράγραφο 8.2 και τη κλίση της πίεσης που έχει υπολογιστεί στο βήμα 7.
9. Θεωρείστε αρχική τιμή για τη θερμοκρασία κατάντι $T(JN) = T1$
10. Υπολογίστε τους συντελεστές και τους όρους πηγών στην διακριτοποιημένη

εξίσωση διατήρησης για την εύρεση της θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας ανάντι τιμές για τα μεγέθη που εμφανίζονται στον υπολογισμό των συντελεστών. Κατόπιν επιλύστε ως προς $T(J)$, ($J=1$ ως JN) την εξίσωση της θερμοκρασίας με τη μέθοδο TDMA χρησιμοποιώντας την συνθήκη $T(JN) = T_1$, και $T(1)=T(2)$

11. Υπολογίστε τους συντελεστές και τους όρους πηγών στην διακριτοποιημένη εξίσωση διατήρησης για την εύρεση του κλάσματος μάζας χρησιμοποιώντας ανάντι τιμές για τα μεγέθη που εμφανίζονται στον υπολογισμό των συντελεστών. Κατόπιν επιλύστε ως προς $w(J)$, ($J=1$ ως JN) την εξίσωση του κλάσματος μάζας χρησιμοποιώντας την συνθήκη (8.2.5) για $T(JN)=T_1$ και τη συνθήκη $w(1)=w(2)$.
12. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 8.2.4 βρείτε την θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου κατάντι $T_{coolant}(x)$
13. Υπολογίστε το \dot{m}_b από την εξίσωση 7.6.5 για τα μεγέθη που έχουν υπολογιστεί.
14. Υπολογίστε τους συντελεστές και τους όρους πηγών στην διακριτοποιημένη εξίσωση διατήρησης για την εύρεση της ταχύτητας v_r χρησιμοποιώντας ανάντι τιμές για τα μεγέθη που εμφανίζονται στον υπολογισμό των συντελεστών. Κατόπιν επιλύστε ως προς $v(J)$, ($J=1$ ως JN) την εξίσωση της v_r ταχύτητας χρησιμοποιώντας το \dot{m}_b από το βήμα 13, και την συνθήκη (8.2.6) για $T(JN)=T_1$ και τη συνθήκη $v_r(1)=v_r(2)$.
15. Επιλύστε την εξίσωση (8.2.3) για τις τιμές των $w(JN-1)$ και $T(JN-1)$ που έχουν βρεθεί από τα βήματα 10 και 11 σύμφωνα με την μέθοδο που αναφέρθηκε στο βήμα 2 για να βρεθεί νέα τιμή για το $T(JN) = T_2$
16. Αν η διαφορά T_1-T_2 είναι αρκετά μικρή προχωρήστε στο επόμενο βήμα αλλιώς θέστε $T_1=T_2$ και επαναλάβετε τα βήματα 10 έως 15 μέχρι σύγκλισης

των τιμών T1 και T2.

17. Υπολογίστε τα κατάντι r_j χρησιμοποιώντας το u_j που μόλις υπολογίστηκε από το βήμα 8 σύμφωνα με τη θεωρία του κεφαλαίου 7 παράγραφος 7.5.

18. Θέστε $x_u = x_d$ και $\Phi_p^u = \Phi_p$ για κάθε Φ και υπολογίστε τα νέα Ψ_E^u και Ψ_{EI}^u , \dot{m}_i και \dot{m}_E από τη θεωρία του κεφαλαίου 7 λαμβάνοντας υπόψη ότι στο όριο E (τοίχωμα σωλήνα) έχουμε μεταφορά μάζας λόγω συμπύκνωσης από την εξίσωση 7.6.3.

19. Υπολογίστε τα μεγέθη T_{bulk} , W_{bulk} , ρ_{bulk} και εξ αυτών τα μεγέθη c_p , μ , κ (από ψυχομετρία) για τη κατάντι διατομή από τις εξισώσεις

$$T_{bulk} = \frac{\int u \cdot T \cdot 2\pi r dr}{\int 2\pi u r dr}, \quad W_{bulk} = \frac{\int u \cdot W \cdot 2\pi r dr}{\int 2\pi u r dr},$$
 ρ_{bulk} από ψυχομετρία (όπου τα ολοκληρώματα υπολογίζονται αριθμητικά)

20. Για συγκεκριμένες θέσεις κατά το μήκος του σωλήνα υπολογίστε την παραγωγή εντροπίας και το μέγεθος Ψ (κεφάλαιο 4)

21. και γυρίστε στο βήμα 6 για να εκτελέσετε νέο βήμα.

22. Συνεχίστε μέχρι η περιοχή ενδιαφέροντος στην κατεύθυνση x να έχει καλυφθεί.

Επιλέγοντας ένα αρκετά μικρό Δx απλοποιήσαμε τη διαδικασία των υπολογισμών διότι με αρκετά μικρό Δx τα AN, AS και S μπορούν να υπολογιστούν από τις ανάντι τιμές των μεγεθών.

8.4 Η ΜΕΘΟΔΟΣ TDMA [8A]

Η μέθοδος TDMA εφαρμόζεται σε γραμμικά συστήματα της μορφής

$$a_i T_i = b_i T_{i+1} + c_i T_{i-1} + d_i \quad (8.4.1)$$

Με εφαρμογή της ανωτέρω εξίσωσης σε όλους τους κόμβους $i = 1, 2, 3 \dots n-1, n$ όπου $c_1 = b_n = 0$ προκύπτει σύστημα γραμμικών εξισώσεων τριδιαγώνιας μορφής. Οι εξισώσεις του συστήματος 8.3.1 φέρονται στη μορφή

$$T_i = A_i T_{i+1} + B_i T_{i-1} + C_i, \quad i=1,2,3 \dots n \quad B_1=A_n=0 \quad (8.4.2)$$

Συνδυάζοντας την πρώτη και τη δεύτερη εξίσωση του συστήματος 8.4.2 απαλείφεται η άγνωστος T_1 . Η προκύπτουσα εξίσωση συνδυάζεται με την Τρίτη ($i=3$) εξίσωση του συστήματος ώστε να απαλειφθεί η T_2 κ.ο.κ. Το σύστημα των εξισώσεων που προκύπτει με αυτό τον τρόπο είναι της μορφής

$$T_1 = A_1 T_2 + C_1$$

$$T_2 = A_2' T_3 + C_2'$$

$$T_3 = A_3' T_4 + C_3'$$

.....

$$T_i = A_i' T_{i+1} + C_i'$$

.....

$$T_{n-1} = A_{n-1}' T_n + C_{n-1}'$$

$$T_n = C_n'$$

Όπου οι συντελεστές δίδονται από τις αναδρομικές σχέσεις

$$A_i' = \frac{A_i}{1 - A_{i-1}' B_i}, \quad C_i' = \frac{C_i + C_{i-1}' B_i}{1 - A_{i-1}' B_i} \quad \text{με } i = 2, 3 \dots n, \quad A_1' = A_1, \quad A_n' = A_n = 0, \quad C_1' = C_1.$$

Συνεπώς οι άγνωστοι υπολογίζονται κατά τη σειρά T_n, T_{n-1}, \dots, T_1 με διαδοχικές αντικαταστάσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

9.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ [5A]

Για να αξιολογηθεί το παρόν μοντέλο και η αριθμητική του εφαρμογή, τα αποτελέσματα από μερικές μοντελοποιήσεις συγκρίνονται με γνωστά αποτελέσματα. Θεωρείται μία περίπτωση που έχουμε μόνο μεταφορά θερμότητας: οριακές συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας τοιχώματος σε ταυτόχρονα αναπτυσσόμενη στρωτή εσωτερική ροή. Οι μοντελοποιήσεις συγκρίνονται επίσης με προβλέψεις από μία προσέγγιση χαμηλού ρυθμού μεταφοράς μάζας. Μία σύντομη αναφορά από τη θεωρία μεταφοράς μάζας κρίνεται αναγκαία καθώς, οι υψηλές συγκεντρώσεις των μη συμπυκνώσιμων αερίων, εμποδίζουν τη συμπύκνωση σε τέτοιο βαθμό, που η καθαρή ροή μάζας του ατμού μέσω του οριακού στρώματος γίνεται σχεδόν τελείως με διάχυση. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη συμπύκνωση με παρουσία χαμηλών ποσοτήτων μη συμπυκνώσιμων αερίων,

όπου η κίνηση συναγωγής του μίγματος προς το φιλμ συμπύκνωσης είναι, συγκριτικά, σημαντική. Αν και η προσέγγιση χαμηλού ρυθμού χρησιμοποιείται σαν σημείο σύγκρισης, πρέπει να σημειωθεί ότι το παρόν μοντέλο είναι εξίσου εφαρμόσιμο σε περιπτώσεις όπου η μεταφορά μάζας είναι υψηλού ρυθμού.

9.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΟΡΙΑΚΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ [5A]

Ο τοπικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ορίζεται σαν:

$$h_{conv} = \frac{k(\frac{\partial T}{\partial r})_R}{T_b - T_w} \quad (9.2.1)$$

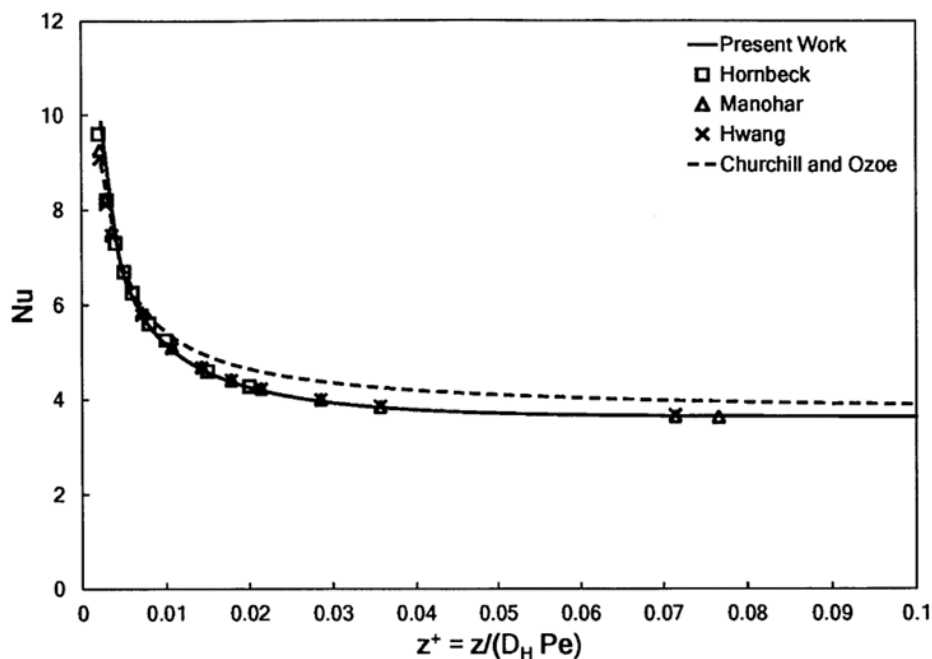
Οριζόμενος με αυτό τον δεδομένο τρόπο, ο h_{conv} , αντιπροσωπεύει μόνο τη ροή αισθητής θερμότητας και δεν περιέχει την ενθαλπία που μεταφέρεται από τον διαχεόμενο ατμό. Ο τοπικός αριθμός Nusselt ορίζεται ως

$$Nu = \frac{h_{conv} D_H}{k}$$

Ο τοπικός αριθμός Nusselt μεταβάλλεται αξονικά.

Θεωρήστε μία μοντελοποίηση του παρόντος οριακού στρώματος με τις ακόλουθες οριακές συνθήκες: $T_o = 70^\circ \text{C}$, $\phi_o = 0.1$, και έναν αρκετά υψηλό ρυθμό ψυκτικού μέσου, ώστε να υπάρχει σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος $T_w = 23^\circ \text{C}$. Σε τόσο χαμηλές τιμές της υγρασίας εισόδου, θα εμφανιστεί λίγη συμπύκνωση ατμού. Σε αυτή την περίπτωση, η μεταφορά μέσω του μίγματος του οριακού στρώματος είναι σχεδόν αποκλειστικά η μεταφορά θερμότητας και τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης μπορούν να συγκριθούν προσεγγιστικά με γνωστές περιπτώσεις που έχουμε μόνο μεταφορά θερμότητας. Υπάρχει μία αρκετά γνωστή σειρά λύσεων για τη μεταφορά θερμότητας, με ταυτόχρονα αναπτυσσόμενη στρωτή ροή σε έναν αγωγό με κυκλική διατομή και σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος (δες π.χ. [48]). Αυτή η λύση, και τα αποτελέσματα από μερικές αριθμητικές προσομοιώσεις που μοντελοποιούν την ίδια διάταξη, παρέχονται σαν συγκριτικά σημεία για την αξιολόγηση του μοντέλου. Το σχήμα 9.2.1 που είναι ένα γράφημα του αριθμού

Nusselt συναρτήσει μίας αδιάστατης παραμέτρου μήκους $z^+ = z/(D_H Pe)$, έχει καλή συμφωνία ανάμεσα στην παρούσα εργασία και τα αριθμητικά δεδομένα του Manohar [49], Hornbeck [50], και από τον Hwang, όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία [51]. Παρουσιάζεται επίσης, η προσεγγιστική καμπύλη της σειράς των Churchill και Ozoe [52] που έχει ένα σφάλμα 6% και 25%, και δείχνει καλή συμφωνία με αυτά τα όρια λάθους. Καθώς η ροή γίνεται πλήρως ανεπτυγμένη, $z^+ > 0.037$, ο αριθμός Nusselt τείνει στο 3.66. Τα αποτελέσματα από το παρόν μοντέλο έχουν τάση να είναι εντός του 0.6% της αναλυτικής λύσης για τη περίπτωση μόνο μεταφοράς θερμότητας.



Σχημα 9.2.1, [5A]: Γράφημα του αριθμού Nu συναρτήσει αδιάστατου μήκους για χαμηλή τιμή σχετικής υγρασίας στην είσοδο και σταθερή θερμοκρασία εισόδου, που πιστοποιεί τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

9.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΓΝΩΣΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ [5A]

Με ειδικές οριακές συνθήκες, τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης από το παρόν μοντέλο μπορούν να συγκριθούν με γνωστές περιπτώσεις καθαρής μεταφοράς μάζας. Τα προβλήματα μεταφοράς μάζας συνήθως υποδιαιρούνται σε αυτά που καλούνται χαμηλού ρυθμού και σε αυτά που καλούνται υψηλού ρυθμού. Λεπτομερείς περιγραφές των αρχών πίσω από αυτές τις δύο κατηγορίες περιγράφονται με λεπτομέρεια στη βιβλιογραφία (βλ. [53], [54]). Σχετικά σημεία από κάθε μία, θα δοθούν περιληπτικά σε αυτή την εργασία για κατανόηση.

Η διάκριση μεταξύ προβλημάτων υψηλού και χαμηλού ρυθμού μεταφοράς μάζας είναι πάρα πολύ απλή με όρους καθαρής ροής μάζας των συστατικών,

$$\mathbf{n}_i = \rho_i \mathbf{u}_i + \mathbf{j}_i \quad (9.3.1)$$

Ο 1^{ος} όρος της εξίσωσης 9.3.1, αντιπροσωπεύει τη ροή μάζας με συναγωγή του συστατικού i . Σε προβλήματα υψηλού ρυθμού μεταφοράς μάζας, αυτός ο όρος είναι κυρίαρχος. Σε ένα πρόβλημα χαμηλού ρυθμού μεταφοράς μάζας, ο 2^{ος} όρος του δεξιού μέλους της εξίσωσης, ο όρος διάχυσης, κυριαρχεί. Επειδή το μοντέλο χαμηλού ρυθμού απαιτεί ότι η μεταφορά μάζας γίνεται κυρίως με διάχυση, οι τρεις εξισώσεις διατήρησης, συστατικών, ορμής και ενέργειας, μπορούν να επιλυθούν αμελώντας τους όρους που συνδέουν αυτές τις τρεις εξισώσεις. Μετά η ομοιότητα μεταξύ των εξισώσεων γίνεται γρήγορα φανερή. Ο αριθμός Sherwood είναι ένας αδιάστατος συντελεστής μεταφοράς μάζας, που ορίζεται σαν

$$Sh = \frac{h_{mass} D_H}{D} \quad (9.3.2)$$

Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας είναι το πηλίκο της ροής μάζας λόγω διάχυσης που διαπερνά το όριο του όγκου ελέγχου, προς την κινούσα διαφορά μερικής πυκνότητας,

$$h_{mass} = \frac{j_{i,w}}{\Delta \rho_i} \quad (9.3.3)$$

Λόγω της ομοιότητας στις προκύπτουσες μορφές των εξισώσεων ενέργειας και συστατικών, μπορεί να δειχθεί ότι στη προσέγγιση χαμηλού ρυθμού, για πλήρως ανεπτυγμένη, στρωτή, εσωτερική ροή, $Nu = Sh$.

Σε υψηλές σχετικές υγρασίες και σε θερμοκρασίες που πλησιάζουν αυτές του κορεσμένου ατμού σε συγκεκριμένη πίεση (σε αυτή την περίπτωση, ατμοσφαιρική), η συγκέντρωση του υδρατμού είναι μεγάλη και του μη συμπυκνώσιμου αερίου είναι μικρή. Σε αυτή την περίπτωση, η διαδικασία θα ήταν περισσότερο αντιπροσωπευτική του ευρέως μελετημένου προβλήματος της συμπύκνωσης καθαρού ατμού, παρουσία μικρής συγκέντρωσης μη συμπυκνώσιμων αερίων: Ένα πρόβλημα μεγάλου ρυθμού μεταφοράς μάζας. Παρόλα αυτά, όταν τα κλάσματα μη συμπυκνώσιμων είναι υψηλά, η καθαρή ροή μάζας του ατμού γίνεται κυρίως μέσω διάχυσης και το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με λογική ακρίβεια, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του χαμηλού ρυθμού.

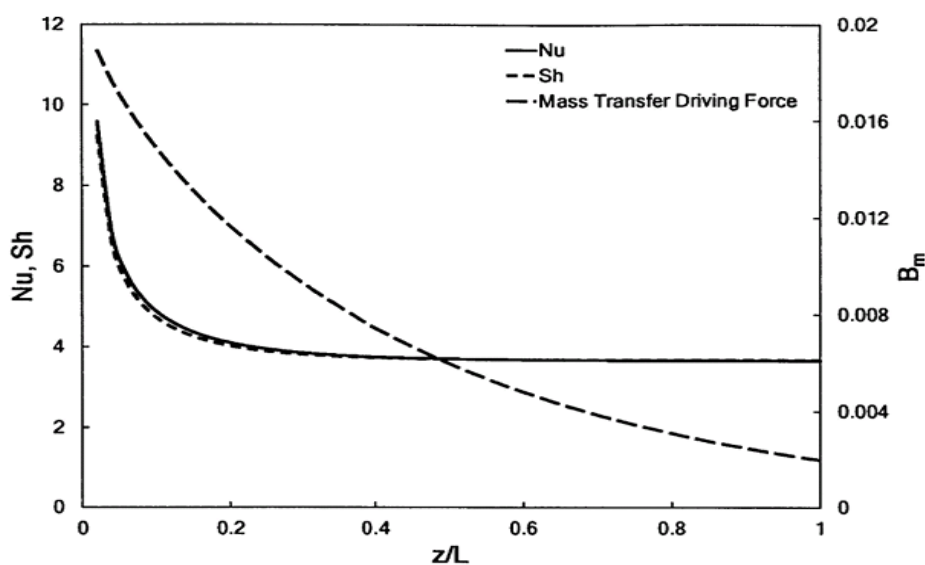
Η αξιολόγηση της κινούσας δύναμης μεταφοράς μάζας δίδει μία εκτίμηση για το άνω όριο της προσέγγισης χαμηλού ρυθμού, που δίδεται στο [53], όταν έχουμε ένα συστατικό που εξέρχεται του ορίου του όγκου ελέγχου σαν:

$$B_m = \frac{m_{v,b} - m_{v,w}}{1 - m_{v,w}} \leq 0.2 \quad (9.3.4)$$

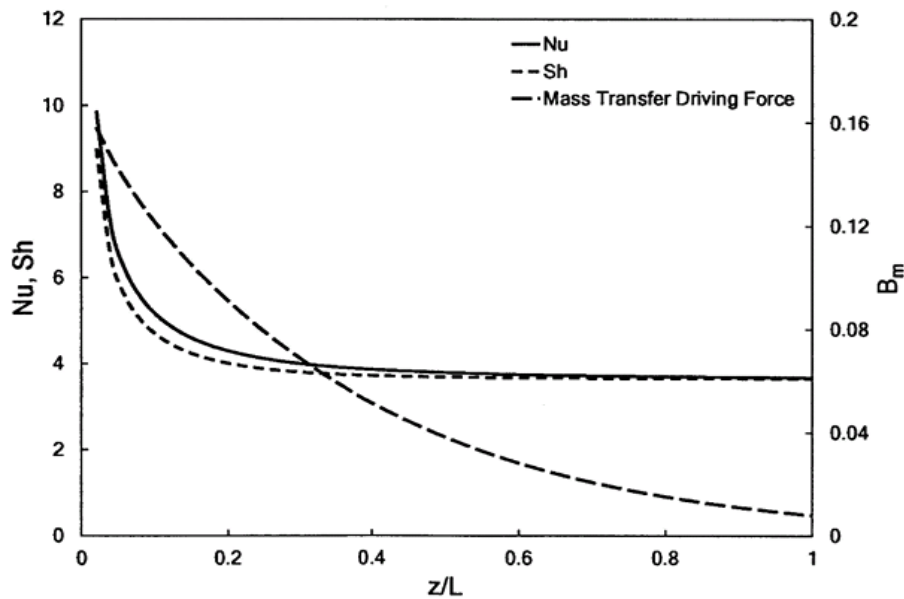
Για το παρόν πρόβλημα ενός μίγματος αέρα και ατμού, ένα άνω όριο για το B_m εμφανίζεται όταν το μίγμα μόλις αρχίζει να συμπυκνώνεται, $m_{v,b}$ είναι σε μέγιστο και το $m_{v,w}$ είναι περίπου μηδέν. Τότε, η εξίσωση 9.3.4 απλοποιείται στον όρο $m_{v,b}$. Επομένως, η προσέγγιση χαμηλού ρυθμού δεν ισχύει όταν το συνολικό μίγμα είναι κορεσμένο, έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη από περίπου 69°C , και η επιφάνεια στην οποία συμβαίνει η συμπύκνωση είναι κρύα και ξηρή, ώστε το $m_{v,w} = 0$. Όλες οι μοντελοποιήσεις σε αυτή την εργασία είναι εντός αυτού του ορίου, καθορίζοντας ότι η προσέγγιση χαμηλού ρυθμού είναι εφαρμόσιμη για την αξιοποίηση του μοντέλου. Η απόκλιση από την εξίσωση $Sh=Nu$ είναι, κατά ένα μέρος, ένα μέτρο του πόσο καλή είναι η προσέγγιση χαμηλού ρυθμού για μια μοντελοποίηση.

Θεωρήστε τις ίδιες οριακές συνθήκες όπως δίδονται για την περίπτωση που έχουμε μόνο μεταφορά θερμότητας, με τη διαφορά ότι στην είσοδο η σχετική υγρασία θα

είναι 1, αντί για 0.1. Τότε η μεταφορά από το οριακό στρώμα δεν είναι πλέον κυρίως μεταφορά θερμότητας και το πρόβλημα χαρακτηρίζεται από ταυτόχρονη μεταφορά μάζας και θερμότητας. Τα σχήματα 9-3a και 9-3b, συγκρίνουν το Nu και Sh, κατά μήκος του σωλήνα, για δύο περιπτώσεις: μία υψηλής θερμοκρασίας εισόδου και μια χαμηλής θερμοκρασίας εισόδου και συνεπώς, υψηλής και χαμηλής τιμής του κλάσματος μάζας ατμού. Και στις δύο περιπτώσεις, ο λόγος ρυθμών μεταφοράς μάζας είναι υψηλός ώστε, η θερμοκρασία τοιχώματος στο μοντέλο να διατηρείται σταθερή $T_w = 15^{\circ}\text{C}$. Όπως αναμένεται, η μεγαλύτερη διαφορά ανάμεσα στους Nu και Sh είναι στην αναπτυσσόμενη περιοχή της μοντελοποίησης με μεγάλη θερμοκρασία εισόδου, όπου το B_m είναι μεγαλύτερο.



ΣΧΗΜΑ 9.3.a, [5A] Nu και Sh συναρτήσει του μήκους για χαμηλή θερμοκρασία και κλάσμα ατμού στην είσοδο. Ο Nu και Sh γίνονται μεταξύ τους παράλληλοι έξω από την περιοχή όπου τα φαινόμενα της αναπτυσσόμενης ροής είναι σημαντικά.



ΣΧΗΜΑ 9.3.b , [5A]. Nu και Sh συναρτήσεως του μήκους για υψηλή θερμοκρασία και κλάσμα ατμού στην είσοδο. Ο Nu και Sh γίνονται μεταξύ τους παράλληλοι έξω από την περιοχή όπου τα φαινόμενα της αναπτυσσόμενης ροής είναι σημαντικά.

Είναι εμφανές, πως τα αποτελέσματα που δίδονται στην παρούσα υποενότητα, εμφανίζουν συμβατότητα με αποδεκτές λύσεις στα ανακλύπτοντα προβλήματα.

9.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ [5A]

Τα αποτελέσματα, που δείχνουν την κατανομή του ρυθμού παραγωγής εντροπίας λόγω μεταφοράς θερμότητας και μάζας, θα συζητηθούν σε αυτή την ενότητα. Για να γίνει αυτό, χρειάζεται να οριστούν κάποιες παράμετροι. Πρώτα, ένας τοπικός ρυθμός παραγωγής εντροπίας ή, ρυθμός παραγωγής εντροπίας ανά μονάδα μήκους σωλήνα, υπολογίζεται ολοκληρώνοντας τον όρο του τοπικού, ανά μονάδα όγκου, ρυθμού παραγωγής εντροπίας στη διατομή που ορίζεται στο σχήμα 5-1:

$$\dot{S}'_{gen} = \int_0^R \dot{s}'_{gen} 2\pi r dr = \int_0^R \left[\frac{k}{T^2} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \frac{\rho^2 R D}{M_v M_g \rho_v \rho_g c} \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial r} \right)^2 \right] 2\pi r dr \quad (9.4.1)$$

Αν το ολοκλήρωμα χωρισθεί σε ρυθμό παραγωγής εντροπίας λόγω μεταφοράς θερμότητας και σε ρυθμό παραγωγής εντροπίας λόγω μεταφοράς μάζας, μπορεί να

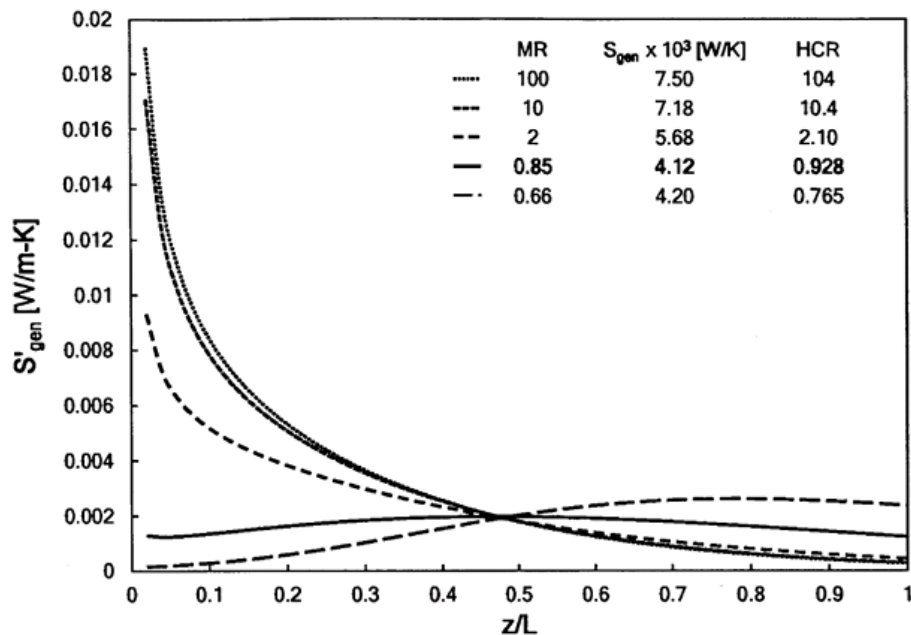
υπολογιστεί ο ρυθμός παραγωγής εντροπίας ανά μονάδα μήκους σωλήνα λόγω κάθε φαινομένου με τη χρήση παρόμοιας ολοκλήρωσης. Αυτές οι δύο ποσότητες θα εμφανιστούν σαν $\dot{S}'_{gen,HT}$ και $\dot{S}'_{gen,MT}$ αντίστοιχα. Ο συνολικός ρυθμός παραγωγής εντροπίας για μία διάταξη, είναι

$$\dot{S}_{gen} = \int_0^L \int_0^R \dot{s}'_{gen} 2\pi r dr dz \quad (9.4.2)$$

Λόγω μικρών μεταβολών στην αριθμητική εφαρμογή, οι συνολικές τιμές του \dot{S}_{gen} υπολογίζονται με μια ακρίβεια περίπου 5%.

9.5 ΕΙΣΩΡΡΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ [5A]

Το σχήμα 9.5.1 είναι ένα γράφημα του τοπικού ρυθμού παραγωγής εντροπίας συναρτήσει της αξονικής θέσης z/L , για διαφορετικά MR. Για κάθε τιμή του MR, οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου είναι δεδομένες. Σε αυτή την περίπτωση, $T_o = 40^\circ\text{C}$, $\phi_o=1$, και η θερμοκρασία εξόδου είναι 10°C (Αυτές οι τιμές είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικές ενός θερμοκρασιακού εύρους που συναντάται σε συστήματα κλιματισμού και θέρμανσης, παρά σε σύστημα αφαλάτωσης HDH). Με αυτό τον τρόπο, οι τοπικοί ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας και συμπύκνωσης είναι ίδιοι για κάθε καμπύλη. Τότε, από την εξίσωση 9.4.2, ο συνολικός ρυθμός παραγωγής εντροπίας, για μια δεδομένη τιμή του MR, είναι το εμβαδό κάτω από κάθε καμπύλη.

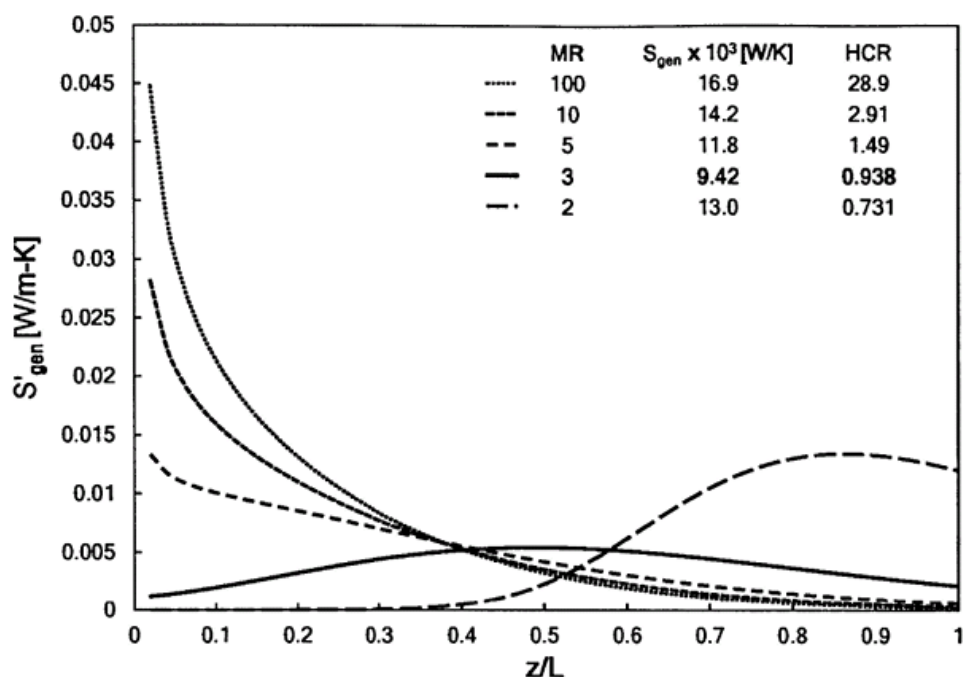


Σχήμα 9.5.1, [5A]: Η ελαχιστοποίηση της διασποράς στον τοπικό ρυθμό παραγωγής εντροπίας, οδηγεί σε συνολική ελαχιστοποίηση στον ρυθμό παραγωγής εντροπίας: οι καμπύλες με την πιο ίση διανομή του \dot{S}'_{gen} έχουν τη πιο μικρή επιφάνεια κάτω από τη καμπύλη. Η στερεή καμπύλη καθορίζει το χαμηλότερο συνολικό ρυθμό παραγωγής εντροπίας

Καθώς η κατανομή του τοπικού ρυθμού παραγωγής εντροπίας σε όλο το μήκος του σωλήνα γίνεται πιο ομοιόμορφη, το αντίστοιχο εμβαδό κάτω από αυτή τη καμπύλη γίνεται μικρότερο. Αυτό είναι μία επιβεβαίωση του θεωρήματος ισοκατανομής της παραγωγής εντροπίας. Για δεδομένο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και διάχυσης, η διάταξη που οδηγεί στο χαμηλότερο ρυθμό παραγωγής εντροπίας είναι αυτή στην οποία, η κατανομή στο χώρο του ρυθμού παραγωγής εντροπίας είναι πιο ομοιόμορφη. Μαθηματικά, αυτό αποτιμάται, θεωρώντας τη διασπορά του \dot{S}'_{gen} γύρω από τη μέση τιμή του: Καθώς αυτή η διασπορά πλησιάζει σε μία ελάχιστη τιμή, το ίδιο συμβαίνει και στο \dot{S}'_{gen} του συστήματος.

Το κριτήριο ομοιομορφίας του ρυθμού παραγωγής εντροπίας, για τον ελάχιστο ρυθμό παραγωγής εντροπίας, είναι αρκετά γενικό και ισχύει ανεξάρτητα από την

υγρασία εισόδου και την θερμοκρασία. Για παράδειγμα, το σχήμα 9.5.2 δείχνει ένα σετ καμπυλών που αντιστοιχούν σε θερμοκρασία εισόδου $T_o = 70^\circ\text{C}$, $\phi_o=1$ και θερμοκρασία εξόδου 40°C . Αν και το MR που αντιστοιχεί στο χαμηλότερο \dot{S}_{gen} δεν είναι το ίδιο, η τάση είναι, ποιοτικά, η ίδια: Η ελάχιστη επιφάνεια κάτω από τη καμπύλη αντιστοιχεί με την ελάχιστη διασπορά της καμπύλης από τη μέση τιμή.



Σχήμα 9.5.2, [5A]: Η ελαχιστοποίηση της διασποράς στον τοπικό ρυθμό παραγωγής εντροπίας οδηγεί σε συνολική ελαχιστοποίηση στον ρυθμό παραγωγής εντροπίας: οι καμπύλες με την πιο επίπεδη διανομή του \dot{S}'_{gen} έχουν τη πιο μικρή επιφάνεια κάτω από τη καμπύλη. Η στερεή καμπύλη καθορίζει το χαμηλότερο συνολικό ρυθμό παραγωγής εντροπίας

Στα σχήματα 9.5.1 και 9.5.2, οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του αέρα είναι σταθερές. Διάφοροι συνδυασμοί του λόγου ρυθμών παροχής μάζας και θερμοκρασίας εισόδου του ψυκτικού μέσου έχουν κατόπιν επιλεχθεί, για να διατηρηθούν αυτές οι τιμές θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου του αέρα και επομένως οι συνολικοί ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας και διάχυσης. Επειδή ο

λόγος των ρυθμών παροχής μάζας και συνεπώς, ο ρυθμός ενθαλπίας του ψυκτικού μέσου έχουν μεταβληθεί, η έννοια του ομοιόμορφου ρυθμού παραγωγής εντροπίας μαζί με τα σχήματα 9.5.1 και 9.5.2 μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν, για να εξηγηθεί η έννοια της εξισορρόπησης, από πλευράς εντροπίας.

Θεωρήστε έναν εναλλάκτη αντιρροής υπό μορφή σωλήνα εντός σωλήνα (συγκεντρικοί σωλήνες). Σε έναν τέτοιο εναλλάκτη, είναι γνωστό ότι μία ομοιόμορφη κινούσα $\Delta T = T_b - T_w$ κατά μήκος της μονάδας, οδηγεί σε ελάχιστη τιμή του ρυθμού παραγωγής εντροπίας για συγκεκριμένες θερμοκρασίες εισόδου και συγκεκριμένες τιμές του βαθμού απόδοσης του εναλλάκτη. Αυτή η ομοιόμορφη τιμή του ΔT είναι μια συνέπεια εξισορροπημένων ρυθμών θερμοχωρητικότητας σε κάθε ρεύμα, δηλ. $\frac{(\dot{m}c_p)_{min}}{(\dot{m}c_p)_{max}} = 1$, σύμφωνα με [17]. Αυτό ισχύει, γιατί ο ρυθμός παροχής μάζας ελέγχει την συμπεριφορά της θερμοκρασίας ενός δεδομένου ρεύματος, για δεδομένη μεταφορά θερμότητας (θερμικό φορτίο) και έτσι, επηρεάζει τη διανομή της κινούσας θερμοκρασιακής διαφοράς ΔT κατά μήκος του σωλήνα. Η διανομή της κινούσας θερμοκρασιακής διαφοράς είναι αυτή που ελέγχει την κατανομή του τοπικού ρυθμού παραγωγής εντροπίας, και από το θεώρημα της ελάχιστης διασποράς, την απόκλιση από τον ελάχιστο συνολικό ρυθμό παραγωγής εντροπίας για το σύστημα. Από τη σκοπιά της εντροπίας επομένως, η εξισορρόπηση ενός εναλλάκτη θερμότητας είναι, βασικά, η χειραγώγηση του ρυθμού θερμοχωρητικότητας ενός ρεύματος για να επιτευχθεί ένας ομοιόμορφος ρυθμός παραγωγής εντροπίας. Αυτό επίσης υποδηλώνει ότι, από πλευράς εντροπίας, μία ανισορροπία ροής ή παραμένουσα μη αναστρεψιμότητα, δεν είναι τίποτα άλλο παρά εντροπία που παράγεται λόγω ανισοτήτων στην κατανομή του ρυθμού παραγωγής εντροπίας σε έναν καθορισμένο όγκο.

Παρόλα αυτά, για έναν εναλλάκτη θερμότητας – μάζας, και το \dot{m} και το c_p μεταβάλλονται, καθώς ο ατμός από το αέριο ρεύμα συμπυκνώνεται οπότε, το $\dot{m}c_p$ δεν αντιπροσωπεύει τελείως τη σχέση των ρυθμών ενθαλπίας των ρευμάτων ή, τη μεταφορά θερμότητας, με τη θερμοκρασία και την υγρασία. Σαν αποτέλεσμα το $\frac{(\dot{m}c_p)_{min}}{(\dot{m}c_p)_{max}} = 1$ δεν αντιστοιχεί σε εξισορροπημένο εναλλάκτη μάζας – θερμότητας. Η

εναλλακτική πλευρά θεώρησης του ομοιόμορφου ρυθμού παραγωγής εντροπίας προσφέρει ένα πλαίσιο για την κατανόηση μιας ευρύτερης έννοιας εξισορρόπησης. Αν δηλαδή, η εξισορρόπηση θεωρηθεί με όρους ελαχιστοποίησης του τοπικού ρυθμού παραγωγής εντροπίας τότε, κάποιος χρειάζεται μόνο να προσδιορίσει την κυρίαρχη πηγή παραγωγής εντροπίας σε κάθε εναλλάκτη θερμότητας-μάζας για να σχεδιάσει έχοντας σκοπό έναν ελάχιστο ρυθμό παραγωγής εντροπίας.

Επιπλέον, αν η διάταξη που έχει σαν αποτέλεσμα την ελάχιστη παραγωγή εντροπίας για κάθε ρυθμό διάχυσης και μεταφοράς θερμότητας, είναι αυτή στην οποία, η παραγωγή εντροπίας είναι πιο ομοιόμορφα κατανεμημένη στο χώρο τότε, η συγκεκριμένη διάταξη θα οδηγεί στο ελάχιστο \dot{S}_{gen} ανά μονάδα παραγόμενου νερού – τον κανονικοποιημένο ρυθμό παραγωγής εντροπίας για ένα σύστημα αφαλάτωσης. Αυτό το συμπέρασμα είναι πολύ γενικό, και έχει βρεθεί να είναι ισχύον, ανεξάρτητα της θερμοκρασίας εισόδου και του κλάσματος ατμού.

9.6 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΟΥ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ, [5A]

Η προηγούμενη ενότητα καθόρισε ότι μεταβάλλοντας τον λόγο των ρυθμών παροχής μάζας (ή, εξισορροπώντας) έχουμε μια αποδοτική μέθοδο να δημιουργήσουμε έναν ομοιόμορφο ρυθμό παραγωγής εντροπίας ανά μονάδα μήκους του σωλήνα, και έτσι να ελαχιστοποιήσουμε τον ρυθμό παραγωγής εντροπίας για το σύστημα. Παρόλα αυτά, η συσχέτιση του MR με τους τοπικούς ρυθμούς παραγωγής εντροπίας σε κάθε θέση απαιτεί πλήρη γνώση των προφίλ θερμοκρασίας και συγκέντρωσης. Αυτό δεν είναι πρακτικό στις περισσότερες εφαρμογές μηχανικής σχεδίασης. Έτσι, είναι επιθυμητό να υπάρχει ένα κριτήριο που είναι πιο εύκολο να υπολογιστεί και που προσεγγίζει τον ομοιόμορφο ρυθμό παραγωγής εντροπίας. Μία θεώρηση των εξισώσεων που έχουμε δείχνει την ομοιότητα, ανάμεσα στις εκφράσεις για τον ρυθμό παραγωγής εντροπίας λόγω της μεταφοράς θερμότητας, κατά μήκος μίας πεπερασμένης θερμοκρασιακής διαφοράς και λόγω διάχυσης, κατά μήκος μίας πεπερασμένης διαφοράς συγκεντρώσεων, προτείνοντας ότι, αν μια ομοιόμορφη κινούσα θερμοκρασιακή διαφορά ελαχιστοποιεί την παραγωγή εντροπίας λόγω μεταφοράς θερμότητας, αντίστοιχα,

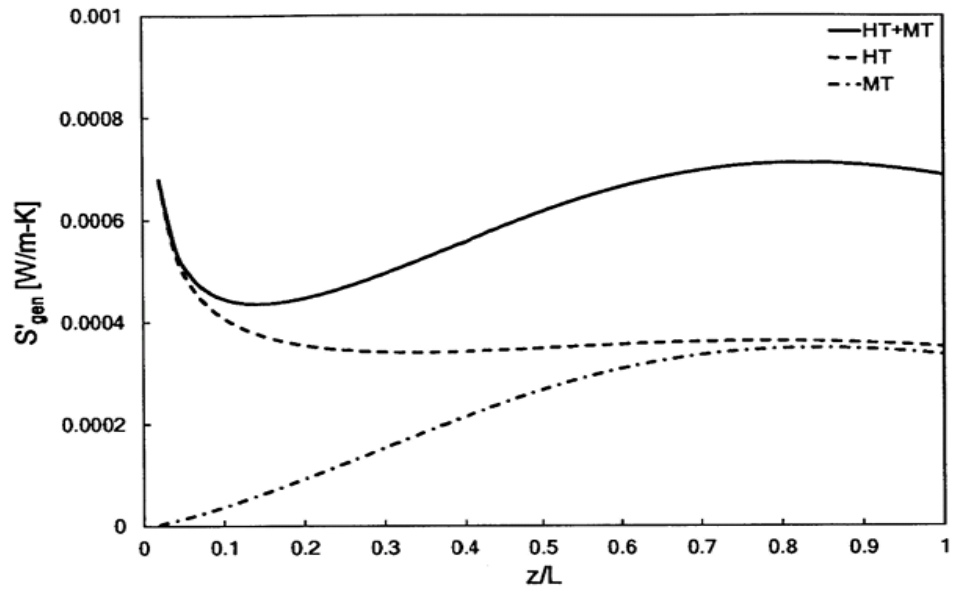
μία ομοιόμορφη κινούσα διαφορά συγκεντρώσεων θα ελαχιστοποιεί την παραγωγή εντροπίας λόγω διάχυσης.

Για παράδειγμα, το σχήμα 9.6.1 δείχνει το \dot{S}'_{gen} συναρτήσει του z/L , αναλυόμενο στις αιτιώδεις διαδικασίες μεταφοράς – μεταφορά θερμότητας (HT) και μεταφορά μάζας (MT) – για μια σχετικά χαμηλή θερμοκρασία εισόδου ($T_0 = 35^\circ\text{C}$). Σε αυτή την περίπτωση, η συγκεκριμένη τιμή του MR έχει σαν αποτέλεσμα ένα προφίλ θερμοκρασιών παρόμοιο με ενός εξισορροπημένου εναλλάκτη θερμότητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.6.b όπου, η κινούσα ΔT είναι σχεδόν σταθερή κατά μήκος του σωλήνα και, με εξαίρεση μια μικρή περιοχή κοντά στην είσοδο, ο ρυθμός παραγωγής εντροπίας λόγω μεταφοράς θερμότητας είναι, επίσης, ομοιόμορφος στο χώρο. Η ελαχιστοποίηση της μεταβολής (μεταβλητότητας) της κινούσας θερμοκρασιακής διαφοράς είναι ένα καλό μέσο πρόγνωσης της ελάχιστης διασποράς στην παραγωγή εντροπίας λόγω μεταφοράς θερμότητας. Επειδή όμως η θερμοκρασία και η συγκέντρωση ατμού δεν συσχετίζονται γραμμικά, η κινούσα διαφορά στη συγκέντρωση, $\Delta\rho_v = \rho_{v,b} - \rho_{v,w}$, όπως δείχνεται στο σχήμα 9.6.1, δεν είναι σταθερή στο χώρο. Το αποτέλεσμα είναι, μια μεγάλου βαθμού, μη γραμμική κατανομή της παραγωγής εντροπίας λόγω μεταφοράς μάζας, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.6.1.a. Επιπλέον, επειδή η διάχυση παίζει ένα σημαντικό ρόλο ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες, αυτή η διάταξη δεν είναι εκείνη που ελαχιστοποιεί τον τοπικό ρυθμό παραγωγής εντροπίας.

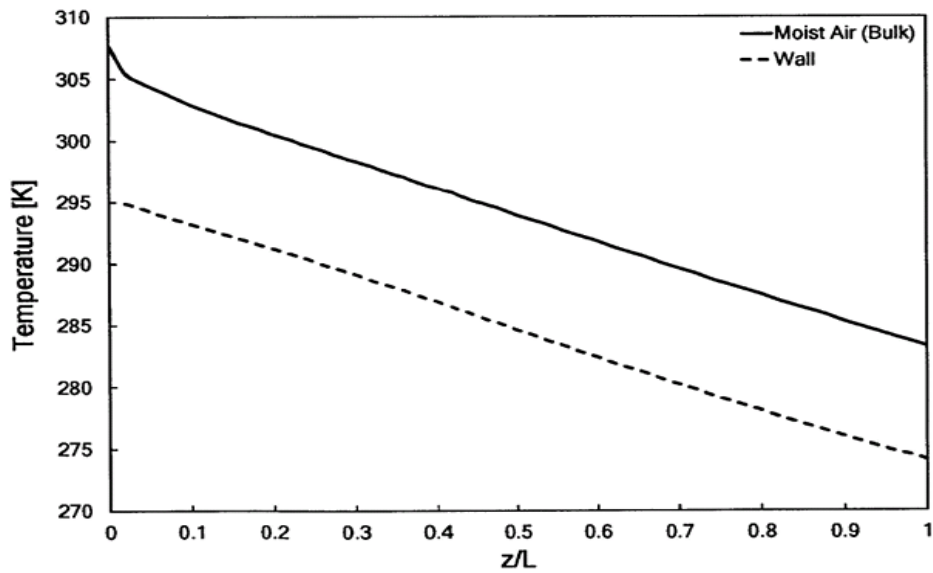
Επομένως, είναι φανερό, πως αν και είναι επιθυμητό να έχουμε ομοιόμορφες κινούσες δυνάμεις μεταφοράς θερμότητας και μάζας, είναι αδύνατο να πετύχουμε και τα δύο, χωρίς τη δυνατότητα να μεταβάλλουμε το MR ανεξάρτητα σε κάθε z . Παρόλα αυτά, στις υψηλές θερμοκρασίες εισόδου και στα υψηλά κλάσματα ατμού που συναντώνται σε HDH συστήματα, η μεταφορά μάζας παίζει έναν πολύ πιο σημαντικό ρόλο στην παραγωγή εντροπίας, από ότι η μεταφορά θερμότητας. Το σχήμα 9.7 δείχνει τα προφίλ της παραγωγής εντροπίας, της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης ενός τέτοιου συστήματος. Το σχήμα της καμπύλης της παραγωγής εντροπίας, λόγω μεταφοράς μάζας, ελέγχει καθαρά το σχήμα του αθροίσματος των καμπυλών HT και MT (αυτές οι καμπύλες αντιστοιχούν στην διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 9.5.2). Τότε, η ελαχιστοποίηση της διασποράς (ισοδύναμα, της

μεταβολής) στην κινούσα διαφορά συγκέντρωσης, είναι μία καλή προσέγγιση για τον ελάχιστο ρυθμό παραγωγής εντροπίας υπό την αίρεση, ότι το θερμοκρασιακό προφίλ που θα προκύψει, διαθέτει έναν ελάχιστο επαρκή βαθμό εξισορρόπησης ώστε η παραγωγή εντροπίας λόγω μεταφοράς θερμότητας να μη γίνεται σημαντική.

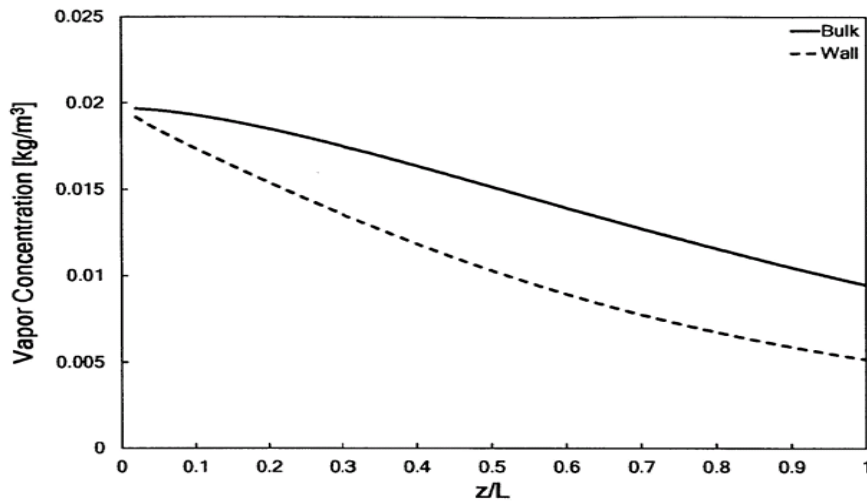
Ο ελάχιστος ρυθμός παραγωγής εντροπίας συσχετίζεται ικανοποιητικά με την ελάχιστη διασπορά (μεταβλητότητα) στην κινούσα διαφορά συγκέντρωσης, ειδικά σε κορεσμένα μίγματα με θερμοκρασίες μεγαλύτερες περίπου από 50⁰C που εμφανίζονται σε μεγάλο εύρος λειτουργίας των συστημάτων HDH. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να αποδοθεί στους επόμενους δύο παράγοντες: (1) Η ελάχιστη παραγωγή εντροπίας, λόγω διάχυσης, είναι το αποτέλεσμα μίας ομοιόμορφης κινούσας διαφοράς συγκεντρώσεων, (2) Η διάχυση είναι η μεγαλύτερη, και συνήθως, η κυρίαρχη πηγή παραγωγής εντροπίας σε έναν αφυγραντή συστήματος HDH. Συνεπώς, η ελαχιστοποίηση της παραγωγής εντροπίας λόγω διάχυσης, αντιστοιχεί, στην ελαχιστοποίηση της παραγωγής της συνολικής εντροπίας. Αυτός είναι ένας βασικός διαχωρισμός ανάμεσα στους μηχανισμούς παραγωγής εντροπίας σε συμπυκνωτές συστημάτων HDH και στους αντίστοιχους συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού που λειτουργούν σε αρκετά πιο χαμηλές θερμοκρασίες και κλάσματα ατμού.



(α) Κατανομή του ρυθμού παραγωγής εντροπίας



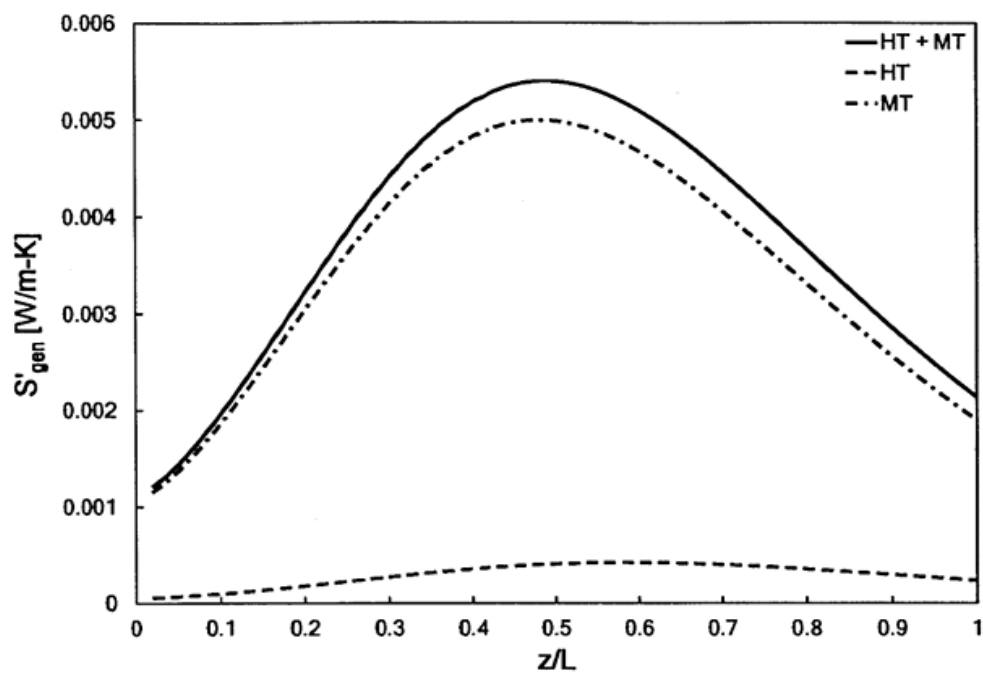
(β) Προφίλ θερμοκρασιών



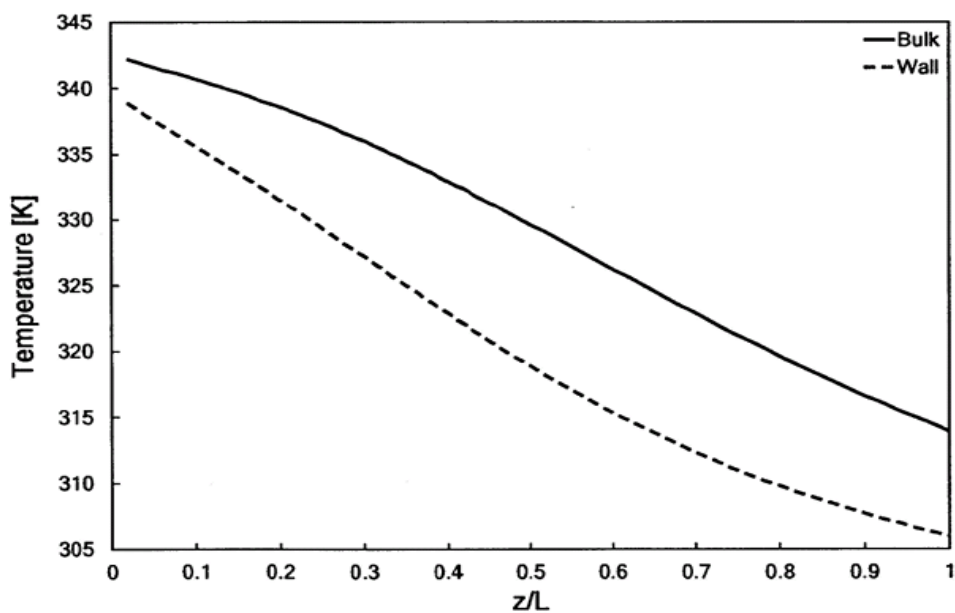
(γ) Προφίλ συγκέντρωσης υδρατμών

Σχήμα 9.6.1, [5A]: Παραγωγή εντροπίας, προφίλ θερμοκρασίας και συγκέντρωσης σε ένα εξισορροπημένο θερμοκρασιακά σύστημα με χαμηλό κλάσμα ατμού στην είσοδο

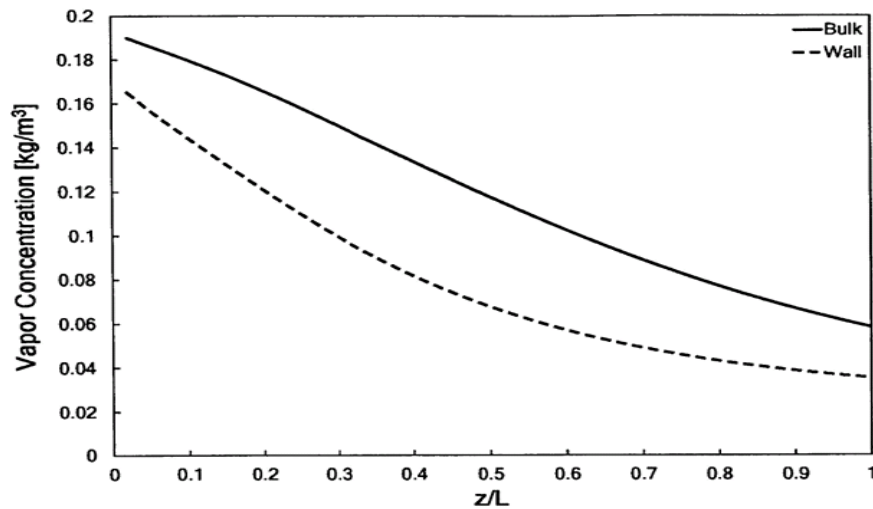
Το όριο εφαρμοσιμότητας της ομοιόμορφης κινούσας $\Delta\rho_v$ σαν κριτήριο ελαχιστοποίησης παραγωγής εντροπίας, τίθεται, σε μεγάλο βαθμό, από το κλάσμα μάζας του ατμού στην είσοδο. Σε όρους ψυχομετρίας, το περιεχόμενο σε υδρατμούς ενός μίγματος υγρού αέρα μπορεί να εκφρασθεί με δύο παράμετρους: τη θερμοκρασία και ένα μέτρο της υγρασίας – τυπικά, είτε τη σχετική υγρασία ή το λόγο υγρασίας. Έχει βρεθεί ότι σε υψηλές θερμοκρασίες, η σχετική κυριαρχία της διάχυσης στην συνολική παραγωγή εντροπίας, είναι λιγότερο ευαίσθητη στη σχετική υγρασία στην είσοδο. Πάρτε για παράδειγμα, δύο περιπτώσεις με $T_o = 80^\circ\text{C}$ και σχετική υγρασία εισόδου 1 και 0.2. Ακόμα και σε χαμηλή σχετική υγρασία, η παραγωγή εντροπίας λόγω μεταφοράς μάζας είναι αρκετά υψηλή. Αντίθετα, σε χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου, η σχετική κυριαρχία της διάχυσης στο συνολικό ρυθμό παραγωγής εντροπίας είναι αρκετά περισσότερο ευαίσθητη στη σχετική υγρασία.



(a) Κατανομή του ρυθμού παραγωγής εντροπίας



(b) Προφίλ θερμοκρασιών

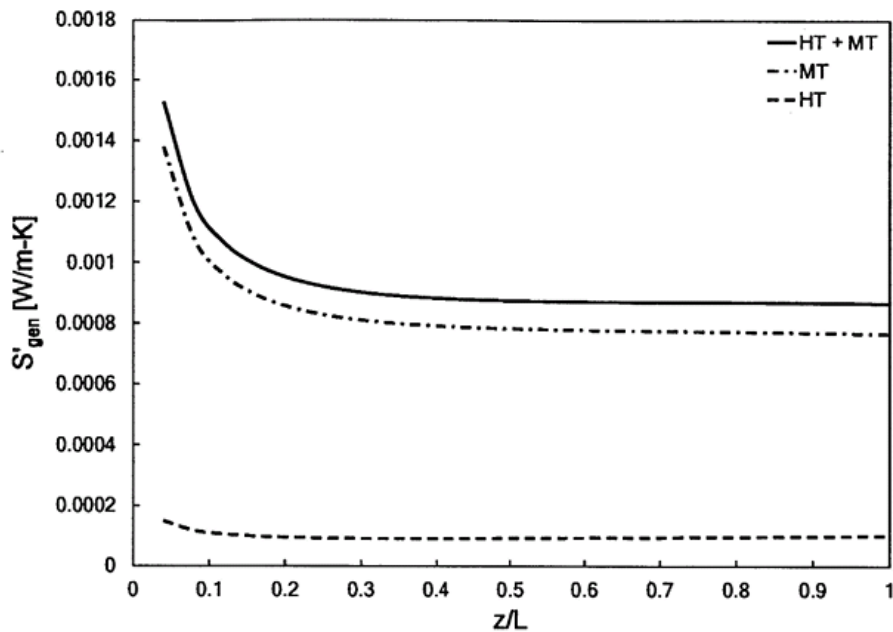


(c) Προφίλ μερικής πυκνότητας υδρατμού

Σχήμα 9.6.2, [5A]: Παραγωγή εντροπίας, προφίλ θερμοκρασίας και συγκέντρωσης σε ένα εξισορροπημένο σύστημα με υψηλό κλάσμα ατμού στην είσοδο

Η σχετική υγρασία της εισόδου αποτελεί μία κακή ένδειξη του περιεχόμενου ατμού σε συμπυκνωτές υγρού αέρα που λειτουργούν σε μεγάλα θερμοκρασιακά εύρη. Σε σύγκριση με τα συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού, η αυξημένη θερμοκρασία του μίγματος είναι αρκετά υψηλή για να επιτρέψει υψηλά κλάσματα ατμού, ακόμα και σε χαμηλές σχετικές υγρασίες. Κατά τον υπολογισμό των σχετικών ρυθμών παραγωγής εντροπίας, είναι το κλάσμα μάζας (ή η συγκέντρωση) του ατμού στην είσοδο, που είναι ο παράγοντας μεγαλύτερης σημασίας. Έτσι, ο λόγος υγρασίας προσφέρει καλύτερη πρόβλεψη (από την σχετική υγρασία) της κυριαρχίας της παραγωγής εντροπίας λόγω μεταφοράς μάζας.

Μέχρι τώρα, η συζήτηση έχει περιοριστεί σε θεώρηση ροών που είναι, θερμικά και υδραυλικά, τελείως ανεπτυγμένες στο κυρίως μήκος του σωλήνα. Τώρα θα εξεταστεί η επίδραση της μεταβολής των συντελεστών της μεταφοράς μάζας και θερμότητας στην πρόβλεψη του ομοιόμορφου ρυθμού παραγωγής εντροπίας. Έγιναν κάποιες μοντελοποιήσεις, στις οποίες η ροή δεν ήταν ούτε υδραυλικά ούτε

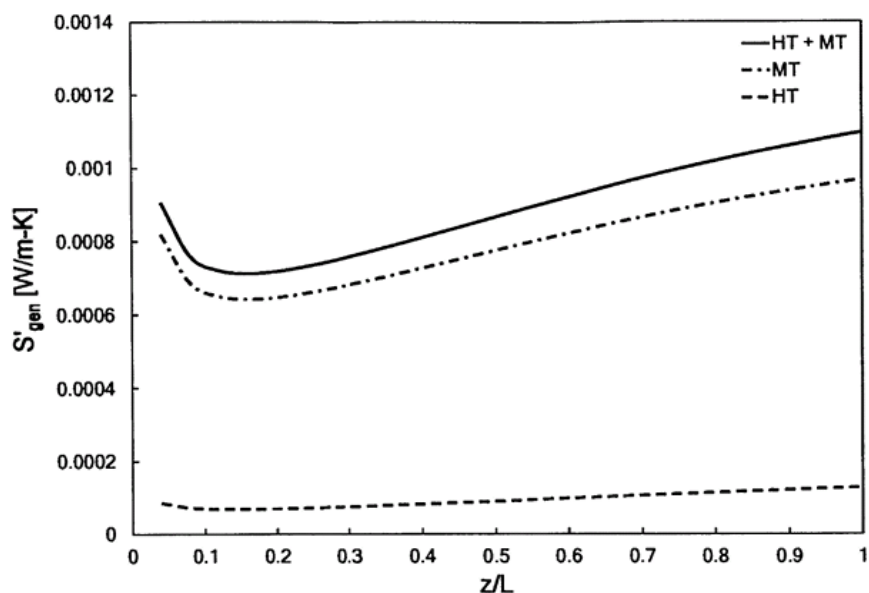


Σχήμα 9.6.3, [5A]: Προφίλ παραγωγής εντροπίας για σταθερή κινούσα $\Delta\rho_v$ στην πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή

θερμικά, πλήρως ανεπτυγμένες για το μεγαλύτερο τμήμα του σωλήνα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο ελάχιστος ρυθμός παραγωγής εντροπίας εξακολουθούσε να αντιστοιχεί ικανοποιητικά με την ελάχιστη διασπορά στον τοπικό ρυθμό παραγωγής εντροπίας. Ωστόσο, οι μοντελοποιήσεις δεν χαρακτηρίζονταν από σταθερή κινούσα διαφορά θερμοκρασίας ή συγκέντρωσης. Για παράδειγμα, συγκρίνετε τα σχήματα 9.6.3 και 9.6.4. Στο σχήμα 9.6.3, καθώς η ροή φτάνει την πλήρως ανεπτυγμένη συνθήκη, οι κινούσες διαφορές γίνονται σχεδόν σταθερές στο χώρο και η χωρική διανομή του ρυθμού παραγωγής εντροπίας γίνεται «επίπεδη». Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το σχήμα 9.6.4, όπου ο ρυθμός παραγωγής εντροπίας αυξάνει αξιοσημείωτα, καθώς η ροή γίνεται πλήρως ανεπτυγμένη. Πιθανόν, αντίθετα από ότι αναμένεται, η διαμόρφωση με το μη ομοιόμορφο $\Delta\rho_v$ (δείχνεται στο σχήμα 9.6.4) να οδηγεί στο ελάχιστο συνολικό \dot{S}_{gen}

Η σύγκυση που προκαλείται από τους μεταβλητούς συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και μάζας υπάρχει γιατί η χωρική διαφοροποίηση στην κινούσα δύναμη είναι μεγαλύτερη στην παρουσία αναπτυσσόμενων οριακών στρωμάτων.

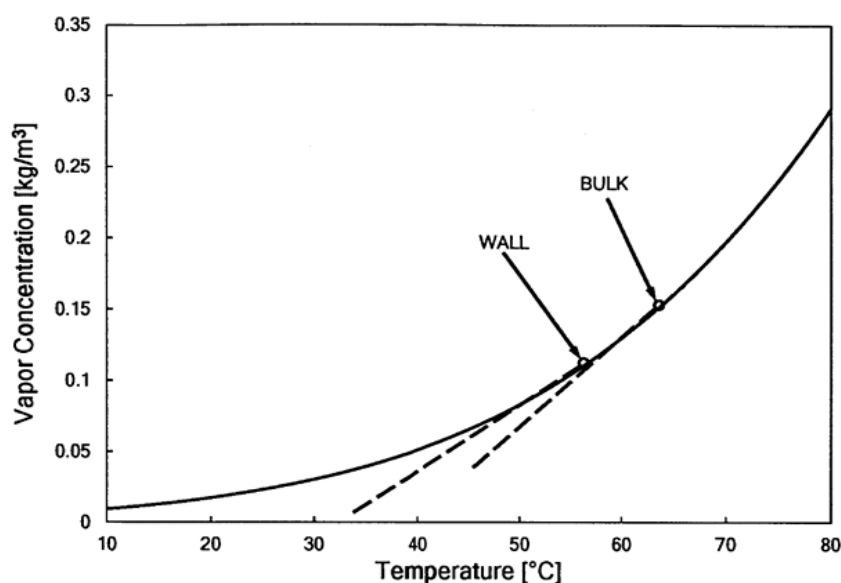
Ο τελικός παράγοντας – κλειδί που διακρίνει την εξισορρόπηση σε συμπυκνωτές υγρού αέρα, από την εξισορρόπηση σε καθαρούς εναλλάκτες θερμότητας, είναι η επίδραση που έχει η καμπυλότητα της γραμμής κορεσμού στον ρυθμό ενθαλπίας ενός ρεύματος. Όταν τα κλάσματα ατμού είναι υψηλά, έχει δειχθεί ότι χωρίς την ικανότητα να αλλάζουμε το MR σε κάθε z , είναι δύσκολο να πετύχουμε μια τελείως



Σχήμα 9.6.4, [5A]: Προφίλ παραγωγής εντροπίας για ελάχιστη μεταβολή στη κινούσα $\Delta\rho_v$ σε όλο το μήκος

ομοιόμορφη διανομή στο \dot{S}'_{gen} . Η διασπορά μπορεί μεν να ελαχιστοποιείται αλλά υφίσταται ακόμα καμπυλότητα στο γράφημα \dot{S}'_{gen} συναρτήσεως του z/L . Επιπλέον, η καμπυλότητα αυτή είναι ορατά μεγαλύτερη σε υψηλότερες θερμοκρασίες (συγκρίνετε τις καμπύλες με διακεκομμένη στα σχήματα 9.5.1 και 9.5.2). Αυτό είναι αποτέλεσμα της εκθετικής μορφής της καμπύλης κορεσμού.

Σαν ένα σχετικό παράδειγμα, θεωρήστε μια αυθαίρετη θέση z στο σωλήνα. Αν το ρεύμα είναι κορεσμένο και συμβαίνει συμπύκνωση, οι καταστάσεις στο τοίχωμα και στο ρεύμα είναι επίσης κορεσμένες και μπορούν να σχεδιαστούν στη καμπύλη κορεσμού, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.6.5. Σε μία άλλη θέση $z+\Delta z$, η αλλαγή στη θέση και των δύο αυτών σημείων, καθορίζεται εξ ολοκλήρου, από τον ρυθμό ενθαλπίας του ρεύματος και τους συντελεστές μεταφοράς. Στο χαμηλό άκρο της καμπύλης κορεσμού, η διαφορά στην καμπυλότητα ανάμεσα στις καταστάσεις του τοιχώματος και του ρεύματος, είναι μικρότερη από ότι στο υψηλό άκρο και επομένως, ένας συμπυκνωτής που λειτουργεί σε αυτές τις θερμοκρασίες εξισορροπείται πιο εύκολα. Επιπλέον, αν οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας είναι τέτοιοι ώστε οι κινούσες ΔT και $\Delta \rho_v$ να είναι μικρές, και τα δύο σημεία στο σχήμα 9.6.5 θα συναντήσουν τοπικά παρόμοιες καμπυλότητες και ακόμη, οι κλίσεις της αξονικής συγκέντρωσης και της θερμοκρασίας, στο τοίχωμα και στο ρεύμα, θα τείνουν να μην αποκλίνουν.



Σχήμα 9.6.5,[5A]: Η εκθετική μεταβολή της συγκέντρωσης κορεσμένου ατμού με τη θερμοκρασία σημαίνει ότι οι καταστάσεις του ρεύματος και του τοιχώματος καταλαβαίνουν τοπικά διαφορετικές καμπυλότητες, που οδηγεί σε ανισότητες στη διανομή του ρυθμού παραγωγής εντροπίας

9.7 ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ [5A]

Όπως προαναφέρθηκε, ένα ειδικό σύνολο καμπυλών σαν αυτές που δείχνονται στο σχήμα 9.6.1 λήφθηκε, επιλέγοντας να σταθεροποιηθούν οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του αέρα και ένα άλλο έπειτα, μεταβάλλοντας την θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού μέσου και τον ρυθμό παροχής μάζας του. Με αυτό τον τρόπο, ένα απλό σύνολο δεδομένων αντιπροσωπεύει έναν συγκεκριμένο ολικό ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και συμπύκνωσης και διαστατές τιμές του ρυθμού παραγωγής εντροπίας μπορούν να συγκριθούν για να καθοριστεί το ελάχιστο. Παρόλα αυτά, χωρίς κανονικοποίηση, οι ρυθμοί παραγωγής εντροπίας δεν μπορούν να συγκριθούν ανάμεσα σε διαφορετικά σύνολα δεδομένων. Όπως αναφέρθηκε με λεπτομέρεια στην ενότητα 9.3, επειδή ούτε ο ρυθμός παροχής μάζας του μίγματος, ούτε η ειδική θερμοχωρητικότητα του είναι σταθερές, το γινόμενο του ρυθμού παροχής μάζας και ειδικής θερμοχωρητικότητας δεν είναι μία κατάλληλη παράμετρος κανονικοποίησης για την παραγωγή εντροπίας. Έτσι, για να κάνουμε σύγκριση των ρυθμών παραγωγής εντροπίας μεταξύ διάφορων συνόλων, ένας κανονικοποιημένος συνολικός ρυθμός παραγωγής εντροπίας ορίζεται σαν:

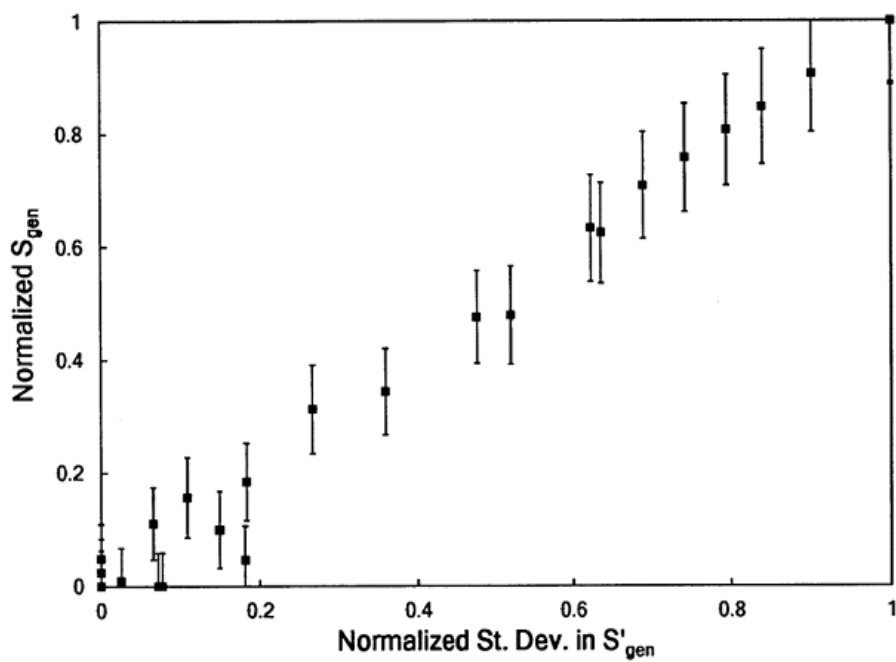
$$\dot{S}_{gen}^+ = \frac{\dot{S}_{gen,i} - \dot{S}_{gen,min,i}}{\dot{S}_{gen,max,i} - \dot{S}_{gen,min,i}} \quad (9.7.1)$$

όπου ο δείκτης i καθορίζει, ότι ο ελάχιστος και ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής εντροπίας αναφέρονται σε έναν ορισμένον συνολικό ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και συμπύκνωσης, για παράδειγμα, την ελάχιστη και μέγιστη τιμή του \dot{S}_{gen} , για δεδομένη θερμοκρασία και κλάσμα υδρατμών στην είσοδο και έξοδο του αέρα. Η κανονικοποιημένη τυπική απόκλιση (τετραγωνική ρίζα της διασποράς) στον ρυθμό παραγωγής εντροπίας, ανά μονάδα μήκους, σωλήνα ορίζεται με παρόμοιο τρόπο, σαν:

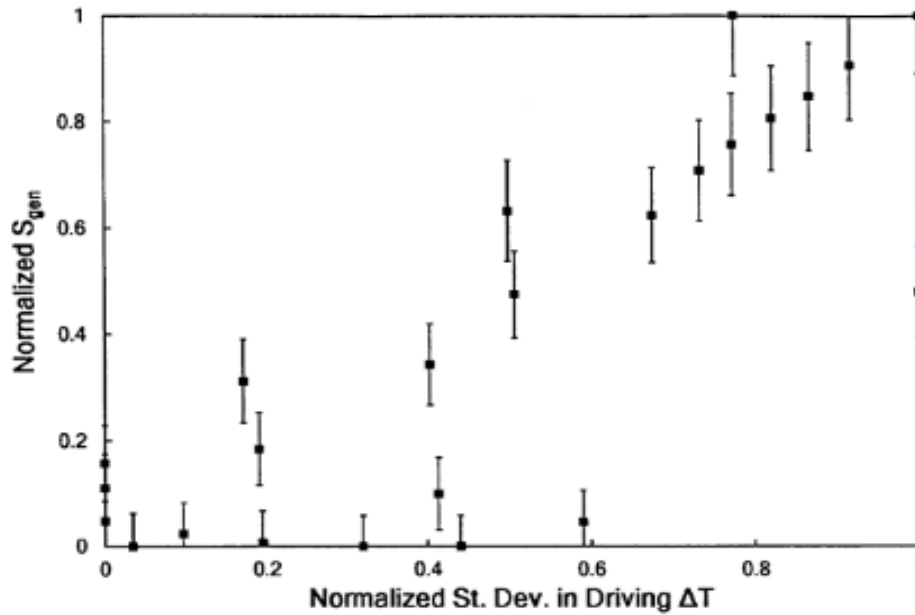
$$\sigma^+ = \frac{\sigma(\dot{S}'_{gen,i}) - [\sigma(\dot{S}'_{gen,i})]_{min}}{[\sigma(\dot{S}'_{gen,i})]_{max} - [\sigma(\dot{S}'_{gen,i})]_{min}} \quad (9.7.2)$$

Η σχεδίαση της εξίσωσης (9.7.1) στον οριζόντιο άξονα και της (9.7.2) στον κατακόρυφο, για διάφορα εύρη τιμών θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου και διάφορα MR, όπως δείχνεται στο σχήμα 9.7.1, δίδει μια επιβεβαίωση του κριτηρίου βελτιστοποίησης που προτάθηκε αρχικά από τους Tondeur και Kvaalen [34] (Τα δεδομένα έχουν εύρος από μία υψηλή θερμοκρασία εισόδου 70⁰C μέχρι σε μία χαμηλή θερμοκρασία εισόδου των 10⁰C). Καθώς η κατανομή του \dot{S}'_{gen} γίνεται πιο ομοιόμορφη, το συνολικό \dot{S}_{gen} ελαττώνεται, άσχετα από τις συνθήκες εισόδου και τη μεταβολή στους συντελεστές μεταφοράς μάζας και θερμότητας.

Ο ορισμός μίας κανονικοποιημένης τυπικής απόκλισης στην κινούσα θερμοκρασιακή διαφορά, με τρόπο ανάλογο όπως για τον τοπικό ρυθμό παραγωγής εντροπίας, (9.7.2), επιτρέπει τη σύγκριση του συνολικού ρυθμού παραγωγής εντροπίας με τοπικές μεταβολές στην κινούσα θερμοκρασιακή διαφορά. Μπορεί να δειχθεί στο σχήμα 9.7.1, ότι μία σταθερή κινούσα θερμοκρασιακή διαφορά δεν αντιστοιχεί πάντα σε έναν ελάχιστο ρυθμό παραγωγής εντροπίας, όπως θα γινόταν στην περίπτωση, ας πούμε, ενός εναλλάκτη θερμότητας. Το γράφημα, ωστόσο, του ρυθμού παραγωγής εντροπίας συναρτήσει μιας κανονικοποιημένης τυπικής απόκλισης στην κινούσα διαφορά μερικών πυκνοτήτων, στο σχήμα 9.7.2, παρουσιάζει μια πιο παρόμοια συσχέτιση με το σχήμα 9.7.1. Ο ελάχιστος ρυθμός παραγωγής εντροπίας αντιστοιχεί καλύτερα στο ελάχιστο της κινούσας διαφοράς μερικής πυκνότητας γιατί, ο ρυθμός παραγωγής εντροπίας ελέγχεται, σε μεγάλο βαθμό, από τη διάχυση στις διαμορφώσεις που παρουσιάζονται.



Σχήμα 9.7.1, [5A]: Η ελαχιστοποίηση της τυπικής απόκλισης (ισοδύναμα τη διασπορά, καθώς η τυπική απόκλιση είναι η τετραγωνική ρίζα της διασποράς) στον τοπικό ρυθμό παραγωγής εντροπίας οδηγεί σε ένα συνολικό ελάχιστο στο ρυθμό παραγωγής εντροπίας. Οι μπάρες σφάλματος που δείχνονται βασίζονται στην διάδοση μίας κατά μέγιστο 5% αβεβαιότητας στο διαστατοποιημένο \dot{S}_{gen} προς τις κανονικοποιημένες τιμές του \dot{S}_{gen}^+



Σχήμα 9.7.2,[5A]: Η ελαχιστοποίηση της τυπικής απόκλισης στη κινούσα θερμοκρασιακή διαφορά δεν αντιστοιχεί σε ελάχιστο ρυθμό παραγωγής εντροπίας. Οι μπάρες σφάλματος που δείχνονται βασίζονται στην διάδοση μίας κατά μέγιστο 5% αβεβαιότητας στο διαστατοποιημένο \dot{S}_{gen} προς τις κανονικοποιημένες τιμές του \dot{S}_{gen}^+

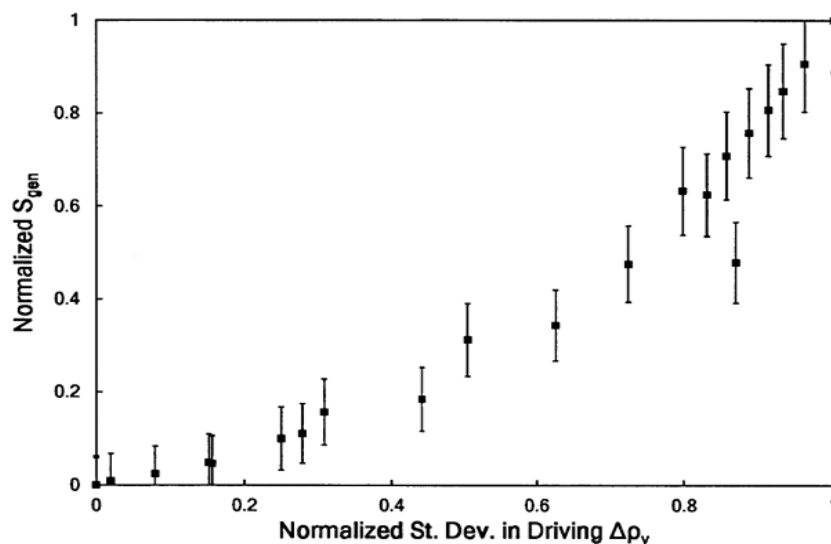
9.8 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΟΓΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΣΕ ΕΝΑΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΖΑΣ, [5A]

Όπως συζητήθηκε προηγουμένως, σε έναν εναλλάκτη θερμότητας, όταν ο λόγος των ρυθμών θερμοχωρητικότητας (ο λόγος του ελάχιστου προς το μέγιστο $\dot{m}c_p$) είναι μονάδα, η παραγωγή εντροπίας ελαχιστοποιείται. Ωστόσο, επειδή το γινόμενο $\dot{m}c_p$ δεν είναι ούτε η ολική παράγωγος $d\dot{H}/dT$, ούτε είναι σταθερό για έναν εναλλάκτη μάζας και θερμότητας, ο Narayan κ.α.. [17], έχουν προτείνει έναν

τροποποιημένο λόγο ρυθμών θερμικών χωρητικότητας. Ο τροποποιημένος λόγος ρυθμού θερμοχωρητικότητας HCR, ορίζεται σαν ο λόγος του μέγιστου ρυθμού ενθαλπίας του ψυχρού ρεύματος, προς αυτόν του θερμού ρεύματος:

$$HCR = \frac{\Delta\dot{H}_{max,C}}{\Delta\dot{H}_{max,H}} \quad (9.8.1)$$

Προχωρώντας με τρόπο ανάλογο με του εξισορροπημένου εναλλάκτη θερμότητας αντιρροής, οι συγκεκριμένοι ερευνητές έχουν δείξει αναλυτικά ότι, για δεδομένες θερμοκρασίες εισόδου και βαθμούς απόδοσης, η κανονικοποιημένη παραγωγή



Σχήμα 9.8.1,[5A]: Η Ελαχιστοποίηση της τυπικής απόκλισης στην κινούσα διαφορά μερικών πυκνοτήτων οδηγεί σε ένα συνολικό ελάχιστο στο ρυθμό παραγωγής εντροπίας. Οι μπάρες σφάλματος που δείχνονται βασίζονται στην διάδοση μίας κατά μέγιστο 5% αβεβαιότητας στο διαστατοποιημένο \dot{S}_{gen} προς τις κανονικοποιημένες τιμές του \dot{S}_{gen}^+

εντροπίας για τον εναλλάκτη μάζας και θερμότητας ελαχιστοποιείται, όταν το HCR είναι μονάδα. Στην περίπτωση ενός συμπυκνωτή, η έκφραση για το HCR είναι:

$$HCR = \frac{\dot{m}_c c_{p,c} (T_o - T_{b,c,in})}{\dot{m} (h_{b,in} - h_{b,out}^{ideal}) - \int_0^L n_{v,w} h_{v,w} 2\pi R dz} \quad (9.8.2)$$

Όπου ο δείκτης *ideal* καθορίζει, ότι ειδικά αυτή η συγκεκριμένη ενθαλπία, θα πρέπει να υπολογιστεί στην θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού μέσου. Η μέγιστη αλλαγή στον ρυθμό ενθαλπίας ορίζεται, ουσιαστικά, από ένα θερμοκρασιακό όριο: η ελάχιστη θερμοκρασία εξόδου που ο αέρας μπορεί να φτάσει είναι η θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού μέσου. Παρομοίως, η υψηλότερη θερμοκρασία που το νερό (ψυκτικό μέσο) μπορεί να φτάσει, είναι η θερμοκρασία εισόδου του αέρα.

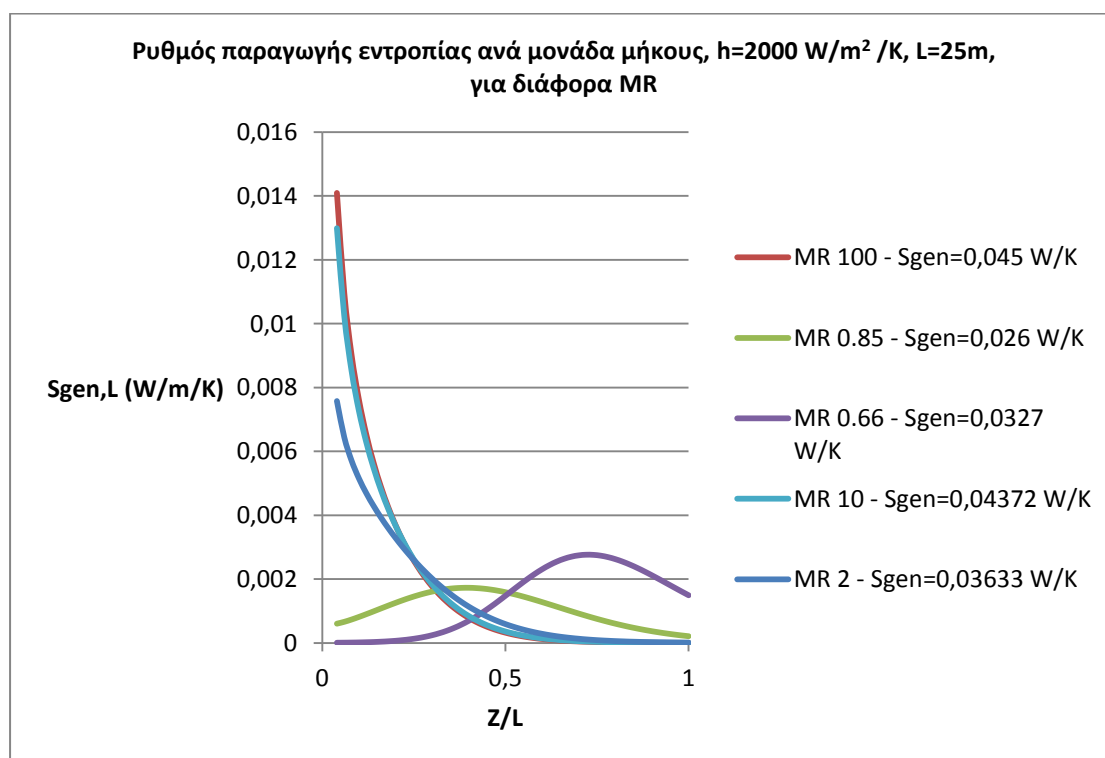
Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 9.8.2, ο HCR μπορεί εύκολα να υπολογιστεί για τις παρούσες διαμορφώσεις. Βρέθηκε, ότι οι διαμορφώσεις που είχαν σαν αποτέλεσμα την μεγαλύτερη ισοκατανομή του \dot{S}'_{gen} έδιναν επίσης, τιμή του HCR περίπου μονάδα. Αναφερόμενοι ξανά στα σχήματα 9.5.1 και 9.5.2, μπορεί να βρεθεί ότι η τιμή του HCR που είναι πιο κοντά στη μονάδα, αντιστοιχεί με τη πιο ίση χωρικά κατανομή του \dot{S}'_{gen} . Μία τιμή του HCR περίπου ίση με μονάδα είναι συμβατή με το κριτήριο ομοιόμορφου ρυθμού παραγωγής εντροπίας για επίτευξη ελάχιστου συνολικού ρυθμού παραγωγής εντροπίας.

9.9 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε πρόγραμμα σε Η/Υ επίλυσης των εξισώσεων ροής σε οριακό στρώμα εντός σωλήνα, σε εναλλάκτη θερμότητας και μάζας, σύμφωνα με τη μέθοδο που εκτέθηκε στο κεφάλαιο 7 και τον αλγόριθμο που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 8.

Α) Για ίδιες συνθήκες ($\phi = 1$) με εκείνες από τις οποίες προήλθε το σχήμα 9.5.1 ,και ίδιο συντελεστή συναγωγής $h=2000 \text{ W/m}^2/\text{K}$, παίρνουμε ίδια θερμοκρασία εισόδου

του κορεσμένου αέρα (40 °C) και πτώση θερμοκρασίας αυτού στον εναλλάκτη (30 K). Επιπλέον, για να προσεγγίσουμε την περίπτωση του σχήματος 9.5.1, βασιζόμαστε μεθοδολογικά στις αρχές της ομοιότητας της ροής, λαμβάνοντας τον ίδιο αριθμό Reynolds ($Re = 1073$). Επιπλέον, για να προσεγγίσουμε ακόμη περαιτέρω την εξεταζόμενη περίπτωση, θεωρούμε την ίδια σχέση μήκους ανάπτυξης της ροής, ως προς το ολικό μήκος, με εκείνον που έχουμε για το σχήμα 9.5.1 για διάμετρο εσωτερικού σωλήνα 0.2 m ($Le=0,06 * Re * D$), οπότε, προκύπτει μήκος σωλήνα 25 m ενώ, για το σχήμα 9.5.1 είχαμε διάμετρο σωλήνα 0,02 m και μήκος σωλήνα 2,5 m. Κατόπιν, με αυτά τα δεδομένα που έχουμε πάρει, κάνουμε τα γραφήματα του ρυθμού παραγωγής εντροπίας από το πρόγραμμα τα οποία φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 9.9.1: Παραγωγή εντροπίας ανά μονάδα μήκους αγωγού συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης, για διάφορες τιμές του MR, και $h=2000 \text{ W/m}^2/\text{K}$. Παρατηρούμε ότι ο μικρότερος ρυθμός παραγωγής εντροπίας αντιστοιχεί στην καμπύλη με την μικρότερη διασπορά στις τιμές της

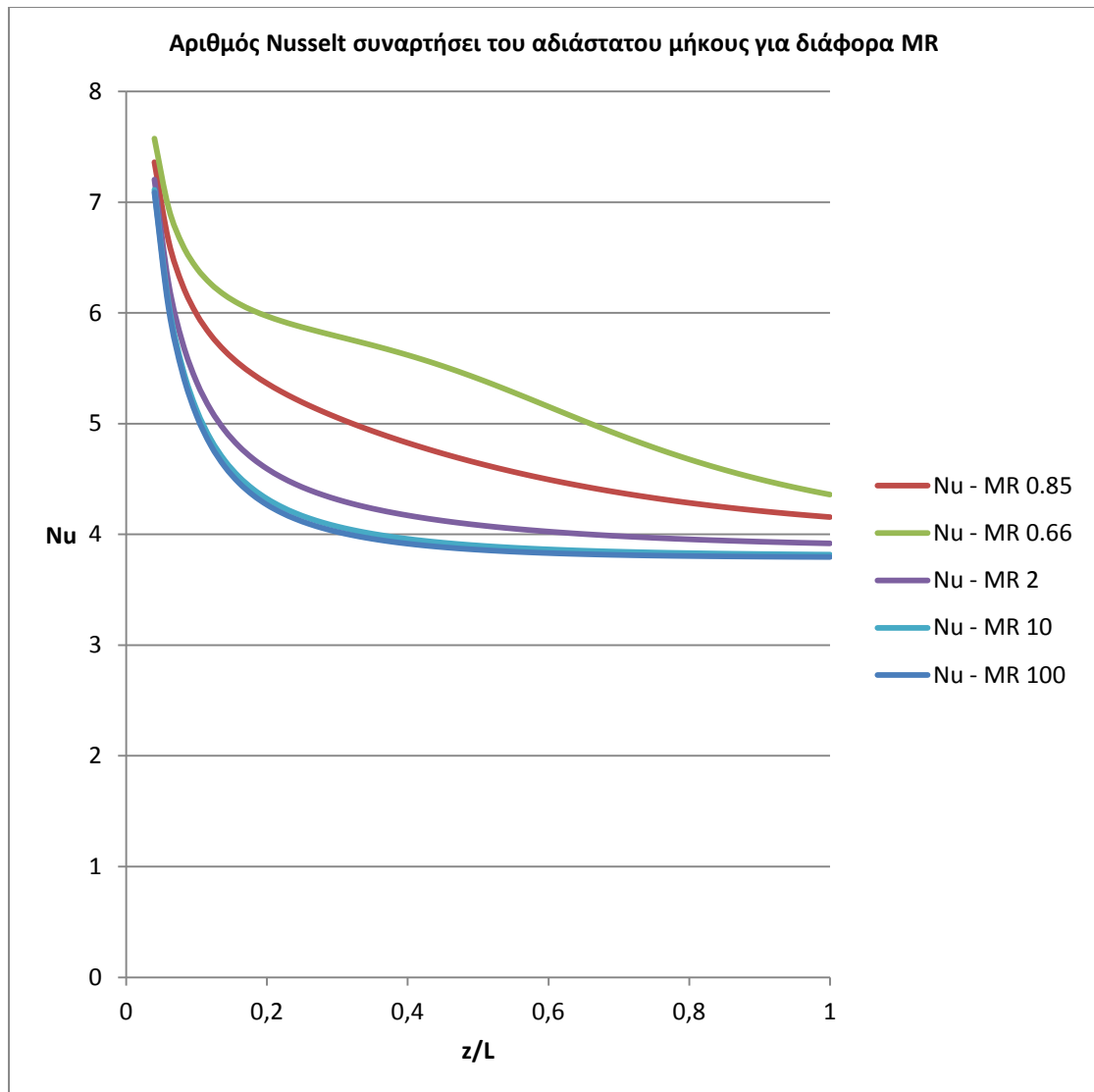
Παρατηρούμε την ομοιότητα που υπάρχει μεταξύ της μορφής των καμπυλών του σχήματος μας και του σχήματος 9.5.1.

Επιπλέον, όπως αναμένεται, στην περίπτωση μας λόγω των διαστάσεων που έχουμε θεωρήσει, έχουμε κινούσες δυνάμεις προς την διάμετρο του σωλήνα της τάξης του 1/10 από εκείνες που είχαμε στο σχήμα 9.5.1 της βιβλιογραφίας, οπότε, το τετράγωνο των όρων $\frac{\partial T}{\partial r}, \frac{\partial \rho_v}{\partial r}$ που μπαίνει στον υπολογισμό του ρυθμού παραγωγής εντροπίας, ανά μονάδα μήκους, είναι σε τάξη μεγέθους, 100 φορές μικρότερο από εκείνα που έχουμε για το σχήμα 9.5.1. Όμως, η επιφάνεια ολοκλήρωσης στην περίπτωση μας είναι 100 φορές μεγαλύτερη από ότι είχαμε για το σχήμα 9.5.1. και άρα, οι ρυθμοί παραγωγής εντροπίας ανά μονάδα μήκους έχουν την ίδια τάξη μεγέθους με του σχήματος 9.5.1. Το μήκος του σωλήνα στην περίπτωση μας είναι 10 φορές μεγαλύτερο από του σχήματος 9.5.1, οπότε, ο συνολικός ρυθμός παραγωγής εντροπίας για τους υπολογισμούς μας θα είναι, σε τάξη μεγέθους, 10 φορές μεγαλύτερος από ότι στο σχήμα 9.5.1.

Τα αποτελέσματα όπως φαίνονται στο σχήμα επιβεβαιώνουν τους ανωτέρω συλλογισμούς.

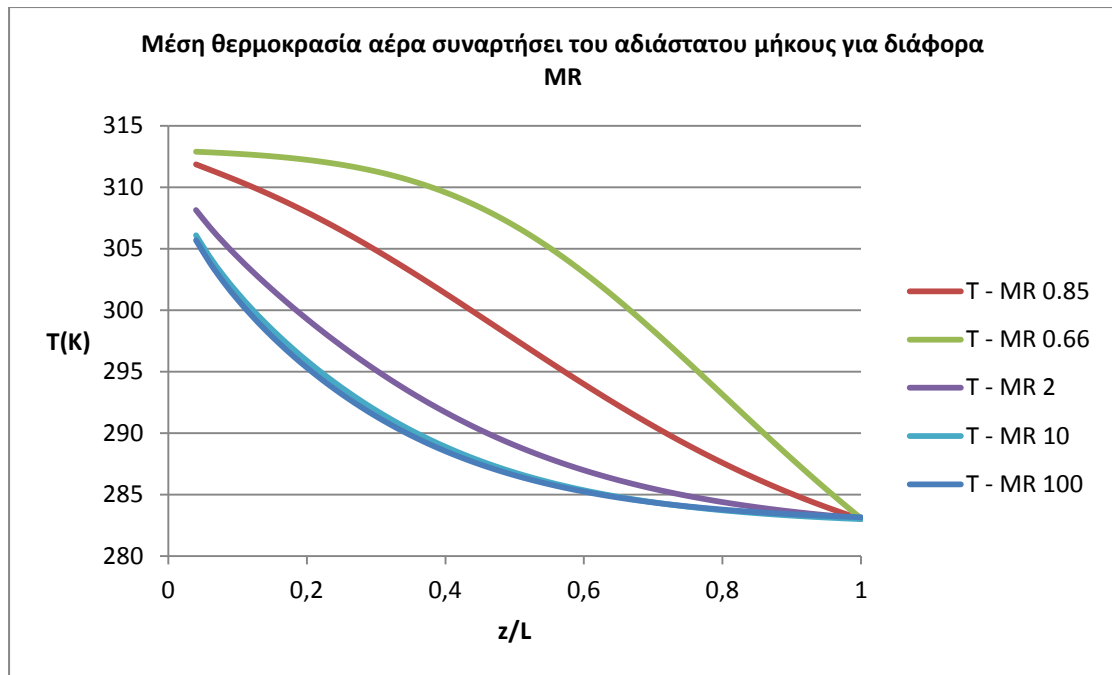
Επιπλέον, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν το θεώρημα ισοκατανομής του ρυθμού παραγωγής εντροπίας, δηλαδή, ο χαμηλότερος ρυθμός εντροπίας αντιστοιχεί στην πιο «επίπεδη» καμπύλη που, όπως και στο σχήμα 9.5.1, είναι η περίπτωση με $MR=0.85$.

Ακολουθούν, για λόγους πληρότητας της εμφάνισης των αποτελεσμάτων, τα διαγράμματα των μεγεθών της ροής, συναρτήσεως του αδιάστατου μήκους, για διάφορες τιμές του MR .



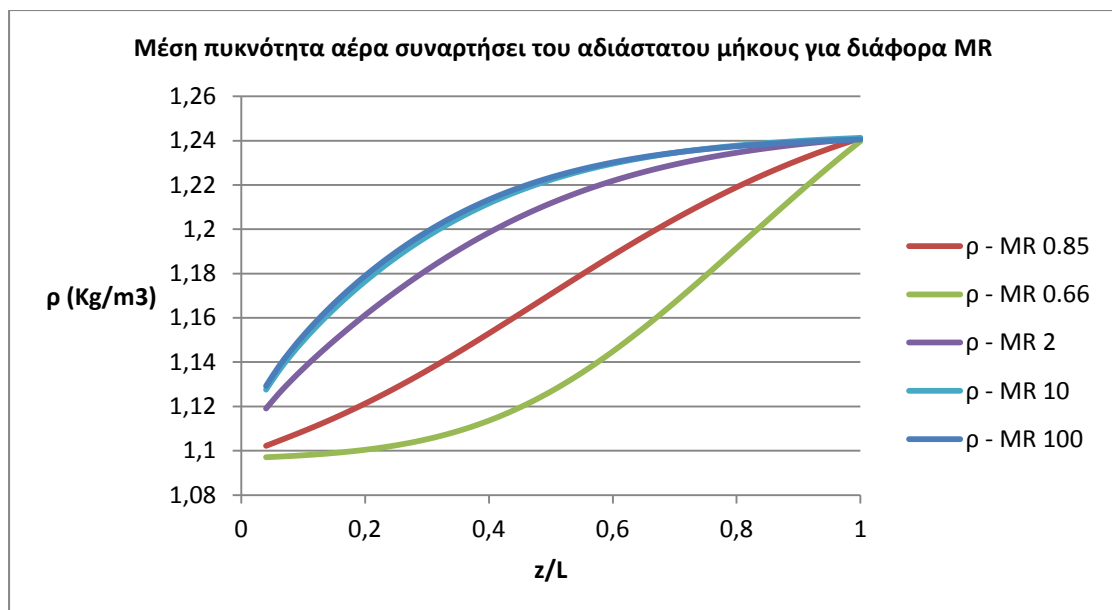
Σχήμα 9.9.2: Αριθμός Nusselt συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης για διάφορες τιμές του MR και $h=2000 \text{ W/m}^2/\text{K}$.

Από το ανωτέρω σχήμα παρατηρούμε την ταύτιση σχεδόν των αποτελεσμάτων, για $MR= 10$ και $MR= 100$. Επίσης, παρατηρούμε την διαφορετική μορφή που παίρνει η καμπύλη του Nusselt καθώς το MR ελαττώνεται.



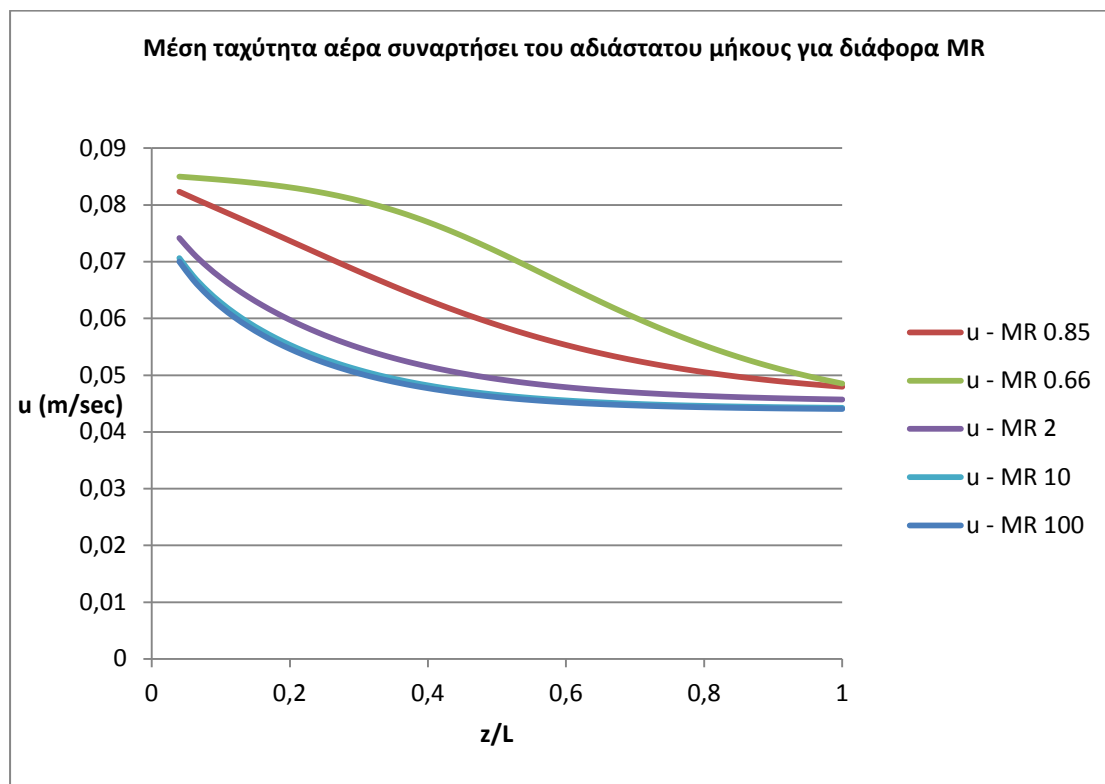
Σχήμα 9.9.3: Μέση θερμοκρασία αέρα συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης για διάφορες τιμές του MR και $h=2000 \text{ W/m}^2/\text{K}$.

Από το ανωτέρω σχήμα παρατηρούμε την σχεδόν ταύτιση των αποτελεσμάτων για $MR=10$ και $MR=100$. Επίσης παρατηρούμε την διαφορετική μορφή που παίρνει η καμπύλη της μέσης θερμοκρασίας του αέρα καθώς το MR ελαττώνεται.



Σχήμα 9.9.4: Μέση πυκνότητα συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης για διάφορες τιμές του MR και $h=2000 \text{ W/m}^2/\text{K}$.

Από το ανωτέρω σχήμα παρατηρούμε την σχεδόν ταύτιση των αποτελεσμάτων για $MR= 10$ και $MR= 100$. Επίσης παρατηρούμε την διαφορετική μορφή που παίρνει η καμπύλη της μέσης πυκνότητας του αέρα καθώς το MR ελαττώνεται.

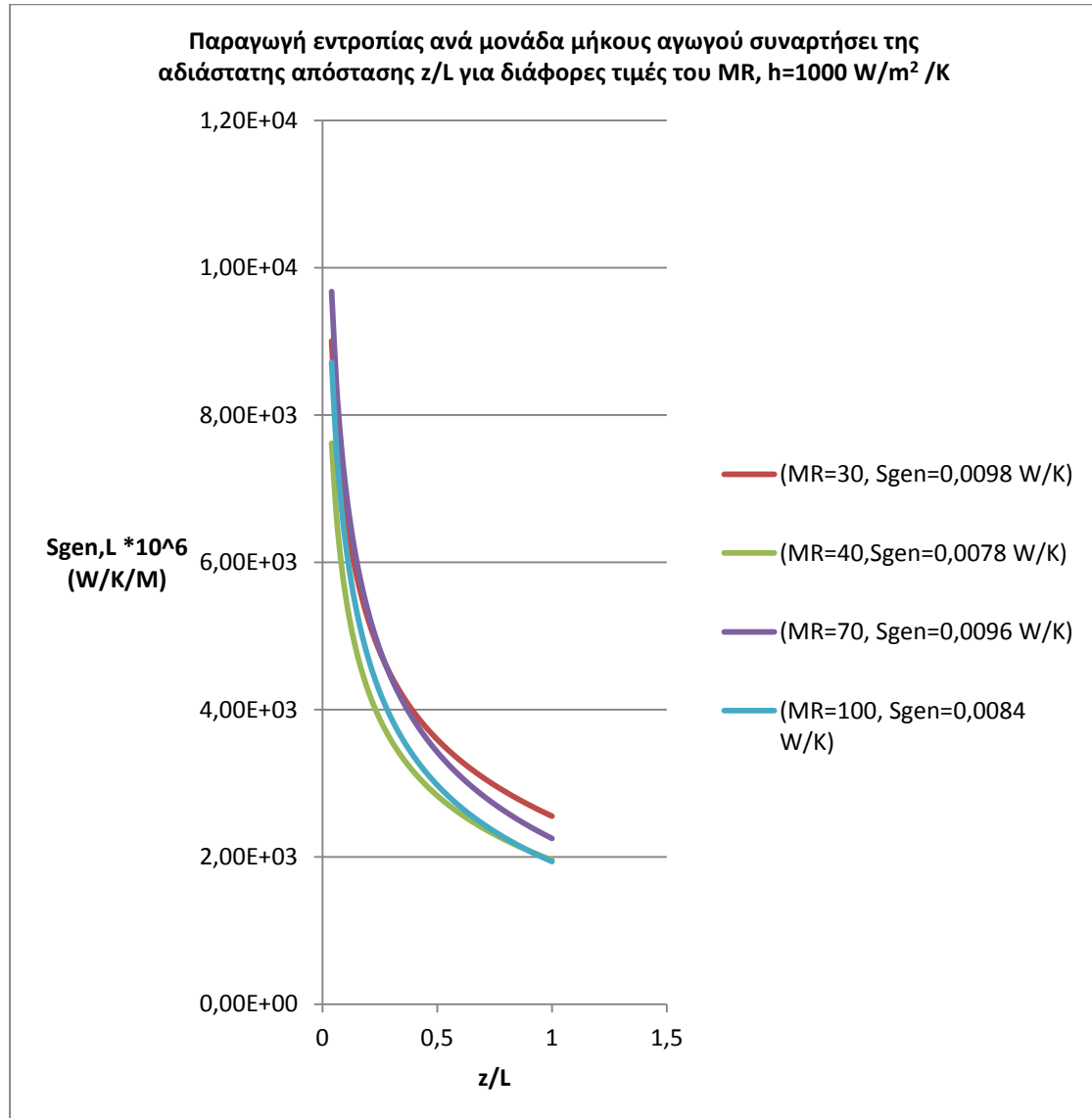


Σχήμα 9.9.5: Μέση ταχύτητα συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης για διάφορες τιμές του MR , για $h=2000 \text{ W/m}^2/\text{K}$.

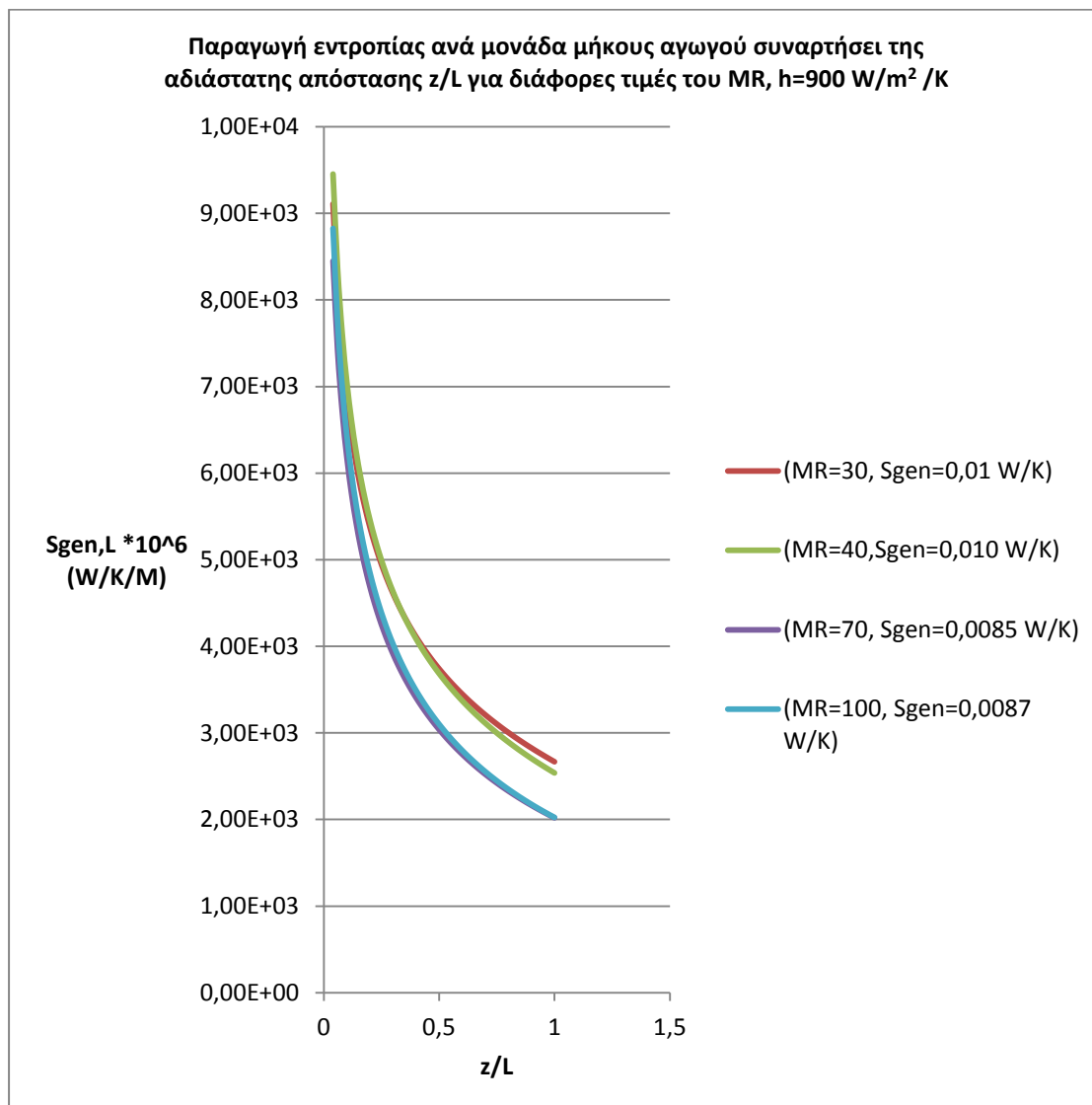
Από το ανωτέρω σχήμα παρατηρούμε την σχεδόν ταύτιση των αποτελεσμάτων για $MR= 10$ και $MR= 100$. Επίσης, παρατηρούμε την διαφορετική μορφή που παίρνει η καμπύλη της μέσης ταχύτητας του αέρα καθώς το MR ελαττώνεται.

Β) Λήφθηκε για τους υπολογισμούς εναλλάκτης με ακτίνα $R=0.1 \text{ m}$, μήκος 2.5 m , ταχύτητα αέρα στην είσοδο ίση με 0.2 m/sec , θερμοκρασία αέρα στην είσοδο 350 K και επιλέγοντας τη θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού νερού ώστε να διατηρηθεί η θερμοκρασία εξόδου του αέρα σταθερή (348.9 K) σε όλους τους υπολογισμούς, για τιμές του συντελεστή συναγωγής $h= 1000, 900, 800 \text{ W/m}^2/\text{K}$ και λόγο παροχών ρευμάτων $30, 40, 70, 100$ υπολογίστηκαν τα μεγέθη της ροής και οι ρυθμοί παραγωγής εντροπίας (συνολικός, από μεταφορά μάζας, από μεταφορά θερμότητας) και το μέγεθος Ψ , όπως και οι κινούσες δυνάμεις μεταφοράς μάζας και

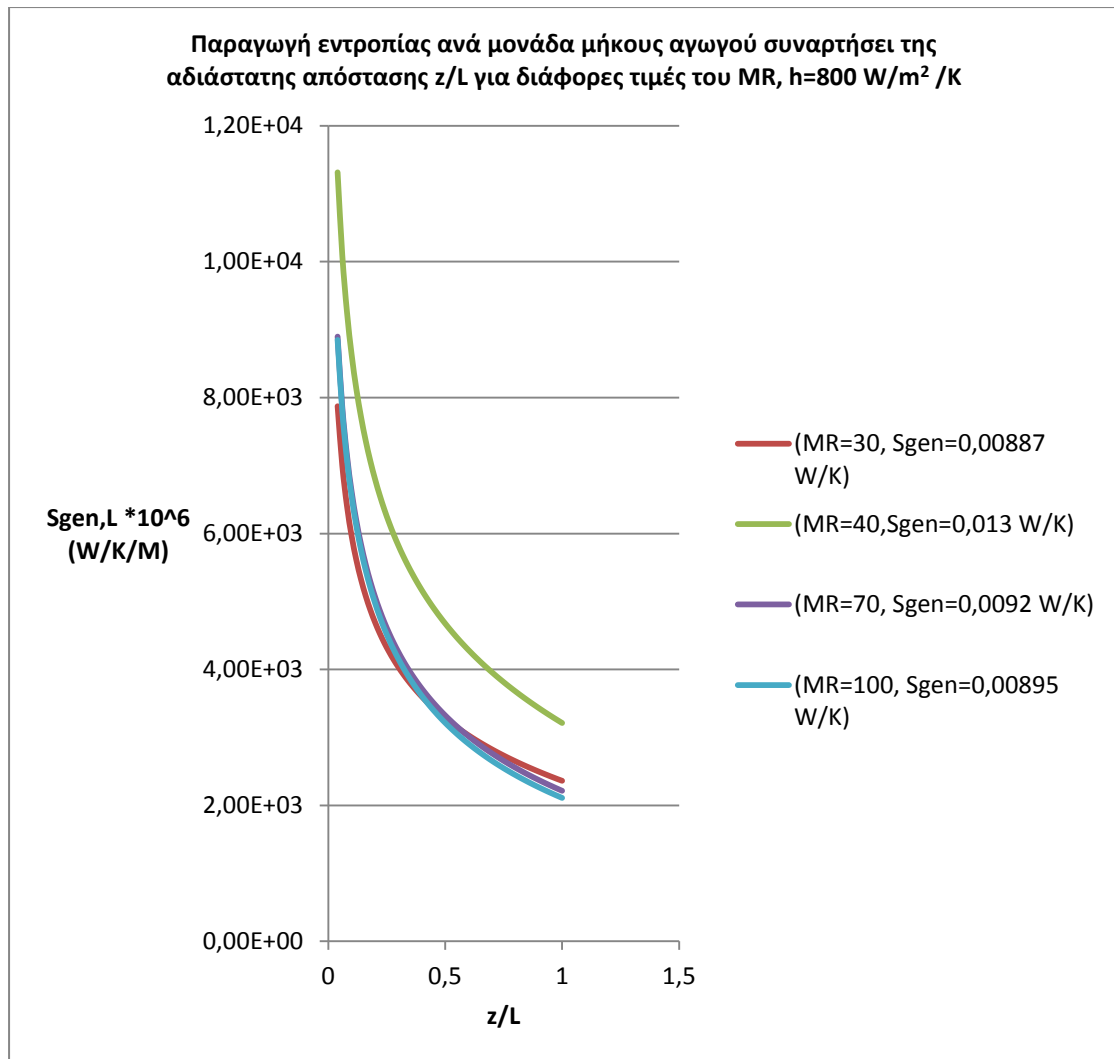
μεταφοράς θερμότητας για κάθε περίπτωση. Ακολουθεί μια παρουσίαση των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 9.9.6: Παραγωγή εντροπίας ανά μονάδα μήκους αγωγού συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης για διάφορες τιμές του MR και για $h=1000 \text{ W/m}^2/\text{K}$. Παρατηρούμε ότι ο μικρότερος ρυθμός παραγωγής εντροπίας αντιστοιχεί στην καμπύλη με την μικρότερη διασπορά στις τιμές της

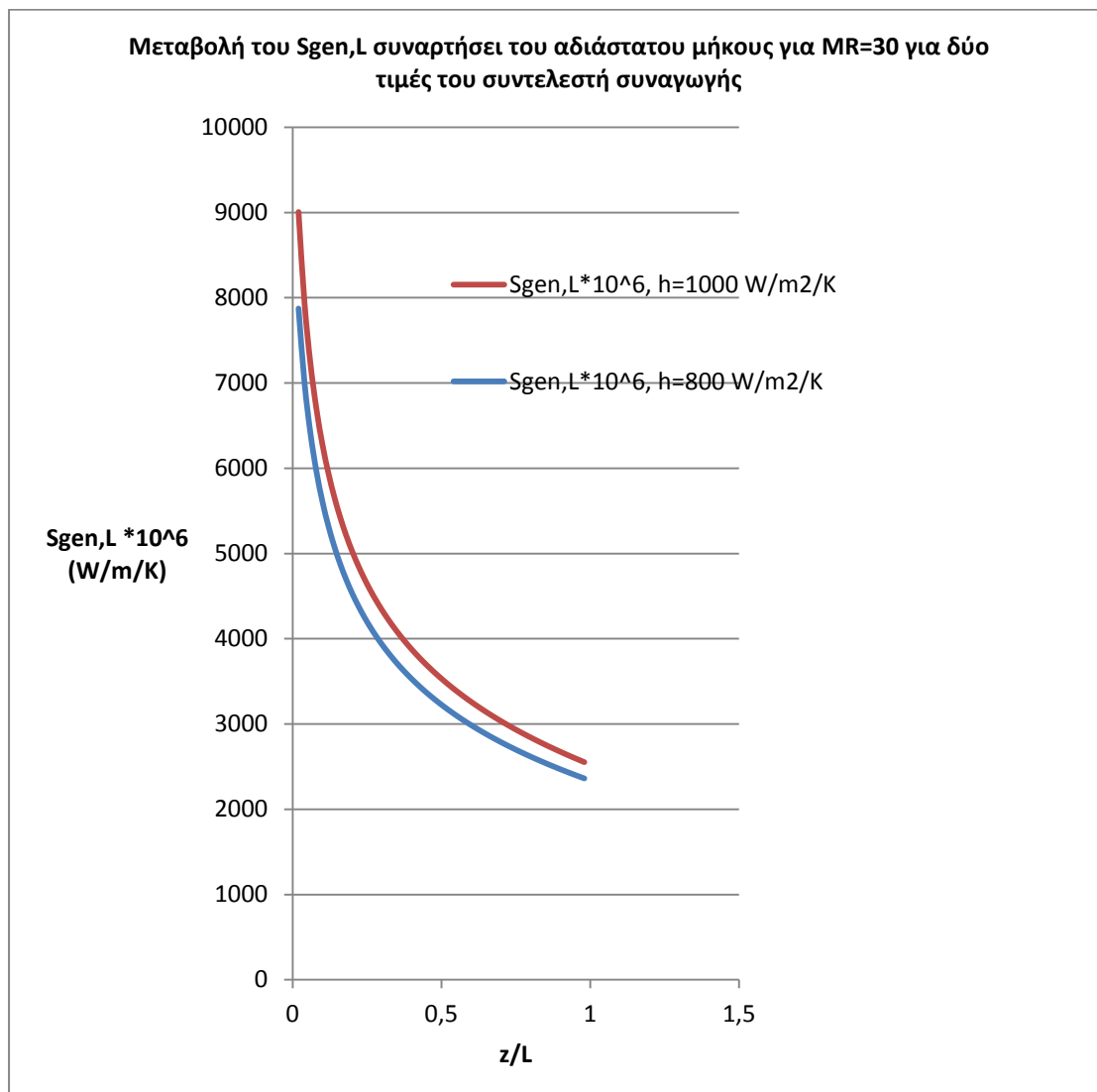


Σχήμα 9.9.7: Παραγωγή εντροπίας ανά μονάδα μήκους αγωγού συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης για διάφορες τιμές του MR , για $h=900 \text{ W/m}^2/\text{K}$. Παρατηρούμε ότι ο μικρότερος ρυθμός παραγωγής εντροπίας αντιστοιχεί στην καμπύλη με την μικρότερη διασπορά στις τιμές της.

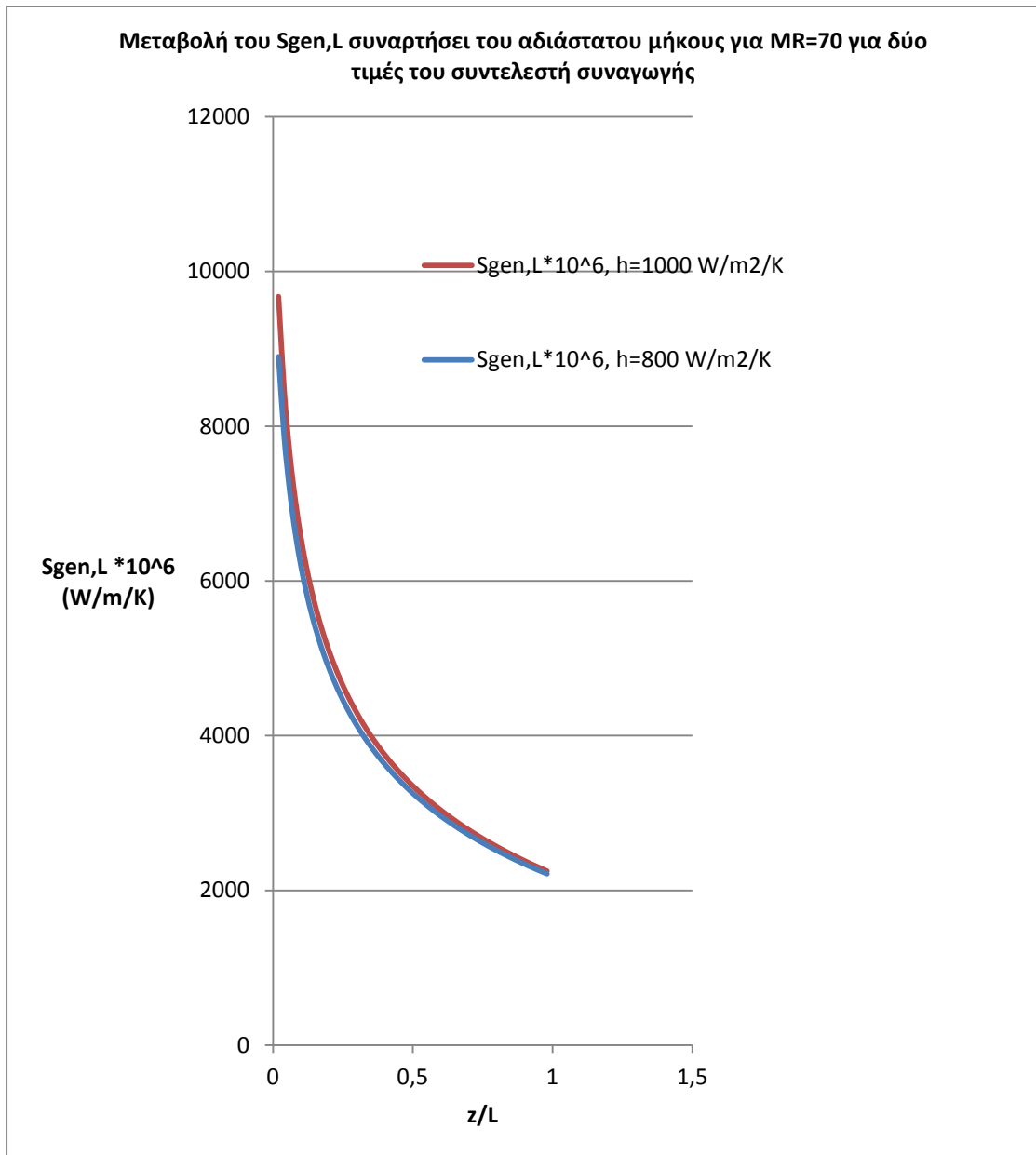


Σχήμα 9.9.8: Παραγωγή εντροπίας ανά μονάδα μήκους αγωγού συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης για διάφορες τιμές του MR για $h=800 \text{ W/m}^2/\text{K}$. Παρατηρούμε ότι ο μικρότερος ρυθμός παραγωγής εντροπίας αντιστοιχεί στην καμπύλη με την μικρότερη διασπορά στις τιμές της.

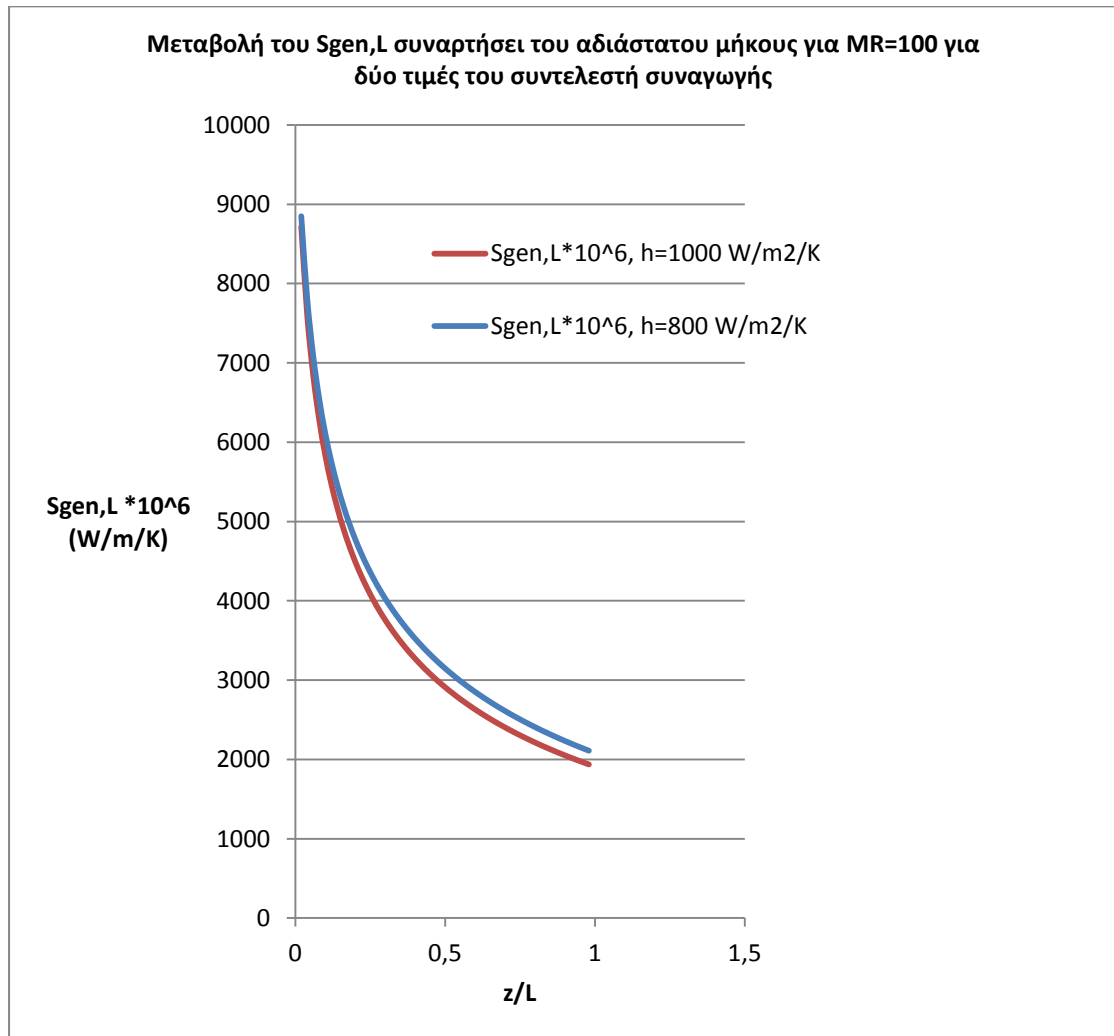
Επίσης παρατηρούμε από τα σχήματα 9.9.6, 9.9.7 και 9.9.8 ότι, από ένα MR και μετά, οι τιμές του ρυθμού παραγωγής εντροπίας για κάθε τιμή του συντελεστή συναγωγής δεν μεταβάλλονται έντονα μεταβάλλοντας το MR .



Σχήμα 9.9.9: Παραγωγή εντροπίας ανά μονάδα μήκους αγωγού συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης για δύο τιμές του συντελεστή συναγωγής h για $MR=30$. Παρατηρούμε τις μικρές διαφορές στον ρυθμό παραγωγής εντροπίας.

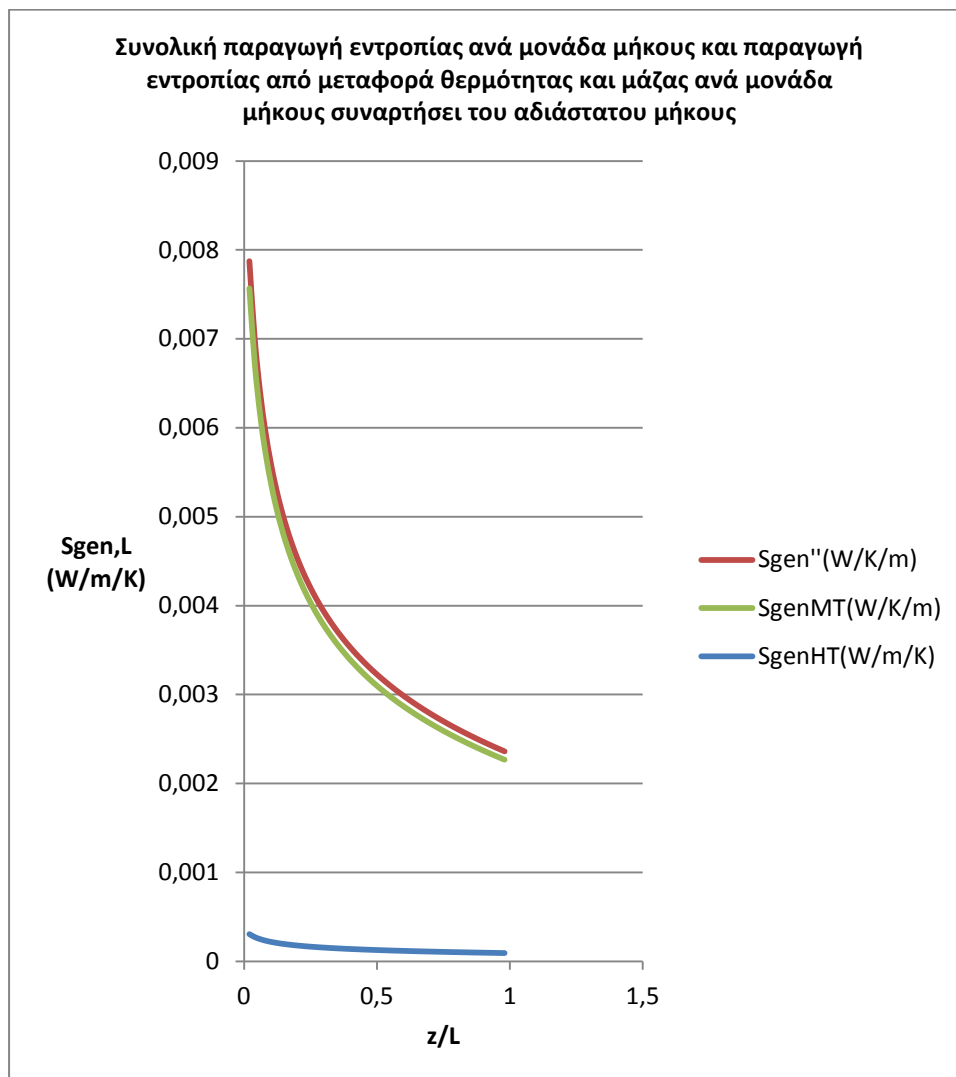


Σχήμα 9.9.10: Παραγωγή εντροπίας ανά μονάδα μήκους αγωγού συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης για δύο τιμές του συντελεστή συναγωγής h , για $MR=70$. Παρατηρούμε τις μικρές διαφορές στον ρυθμό παραγωγής εντροπίας.

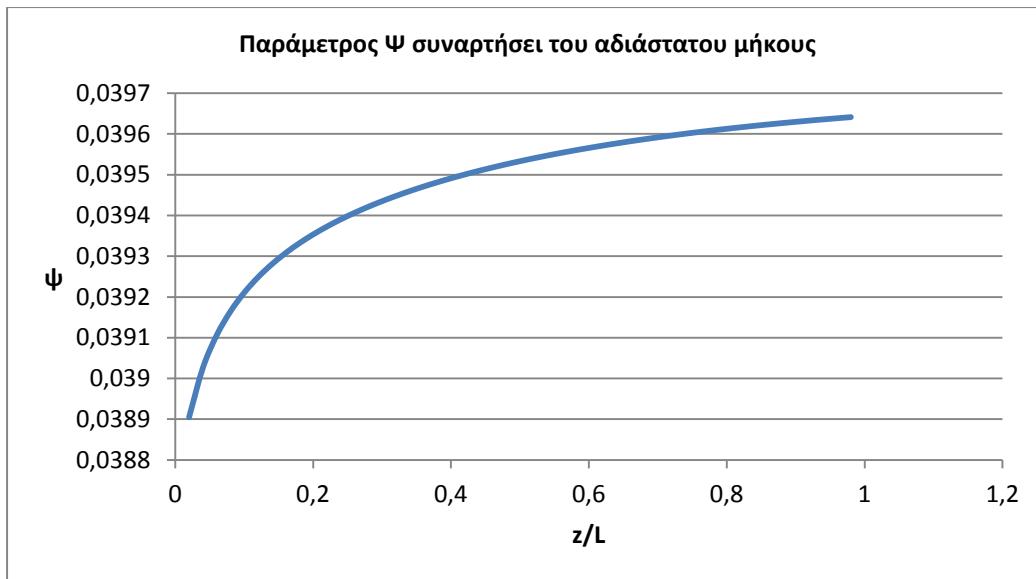


Σχήμα 9.9.11: Παραγωγή εντροπίας ανά μονάδα μήκους αγωγού συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης για δύο τιμές του συντελεστή συναγωγής h για $MR=100$. Παρατηρούμε τις μικρές διαφορές στον ρυθμό παραγωγής εντροπίας.

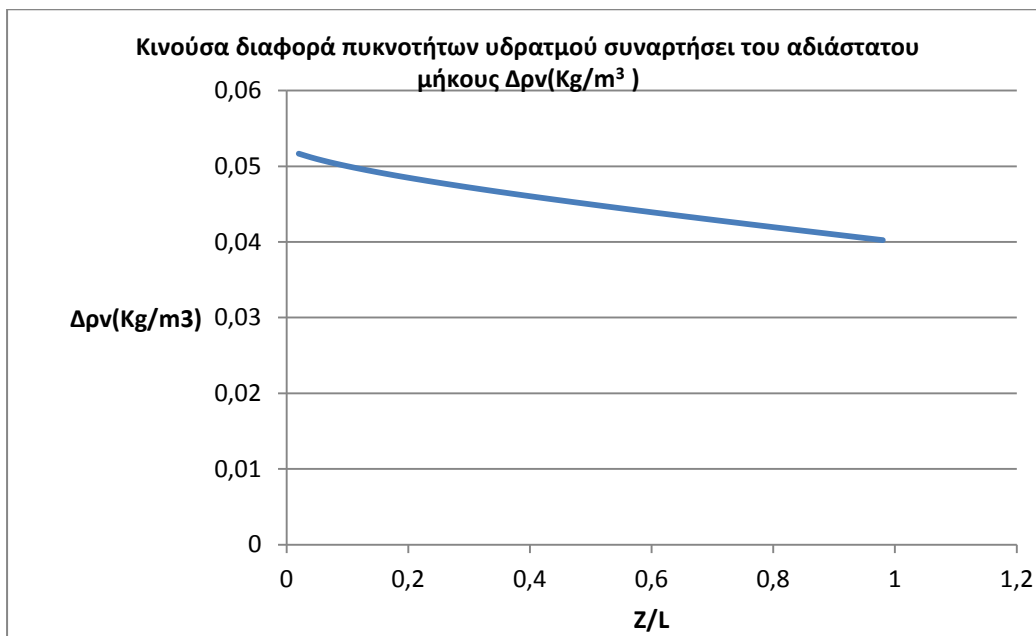
Παρατηρούμε από τα σχήματα 9.9.9, 9.9.10 και 9.9.11 ότι, από ένα MR και μετά οι τιμές του ρυθμού παραγωγής εντροπίας για κάθε τιμή του MR δεν μεταβάλλονται έντονα μεταβάλλοντας το συντελεστή συναγωγής.



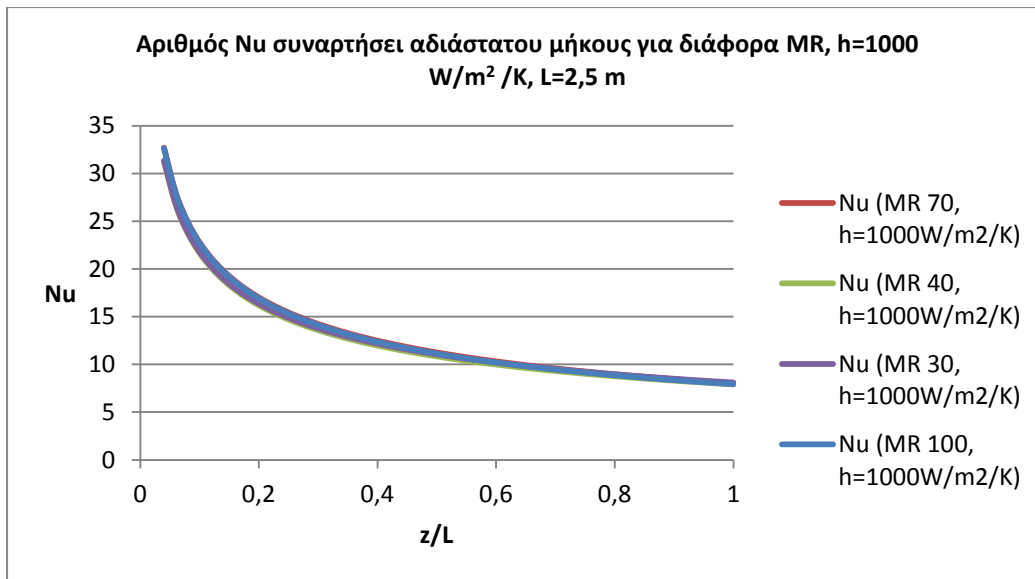
Σχήμα 9.9.12: Συνολικός ρυθμός παραγωγής εντροπίας, ρυθμός παραγωγής εντροπίας λόγω μεταφοράς μάζας και ρυθμός παραγωγής εντροπίας λόγω μεταφοράς θερμότητας, ανά μονάδα μήκους αγωγού, συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης για συντελεστή συναγωγής $h=800 \text{ W/m}^2/\text{K}$ για $MR=30$. Παρατηρούμε ότι η μεταφορά μάζας κυριαρχεί σαν μηχανισμός παραγωγής εντροπίας.



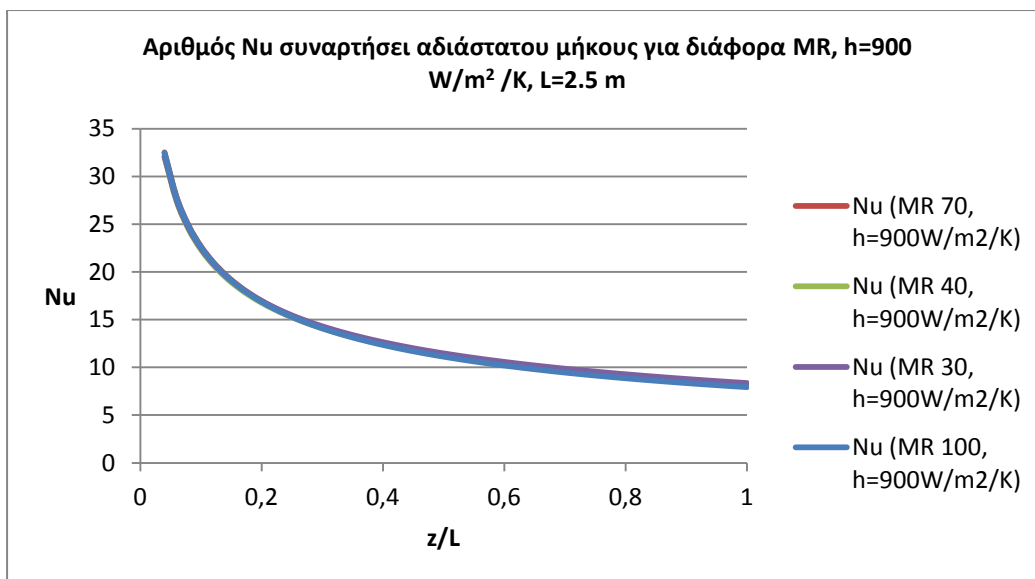
Σχήμα 9.9.13: Παράμετρος Ψ συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης για συντελεστή συναγωγής $h=800 \text{ W/m}^2/\text{K}$ και $MR=30$. Παρατηρούμε ότι ενώ κυριαρχεί η μεταφορά μάζας σαν μηχανισμός παραγωγής εντροπίας, η συμμετοχή της μεταφοράς θερμότητας γίνεται πιο ενεργή, καθώς το αδιάστατο μήκος μεγαλώνει.



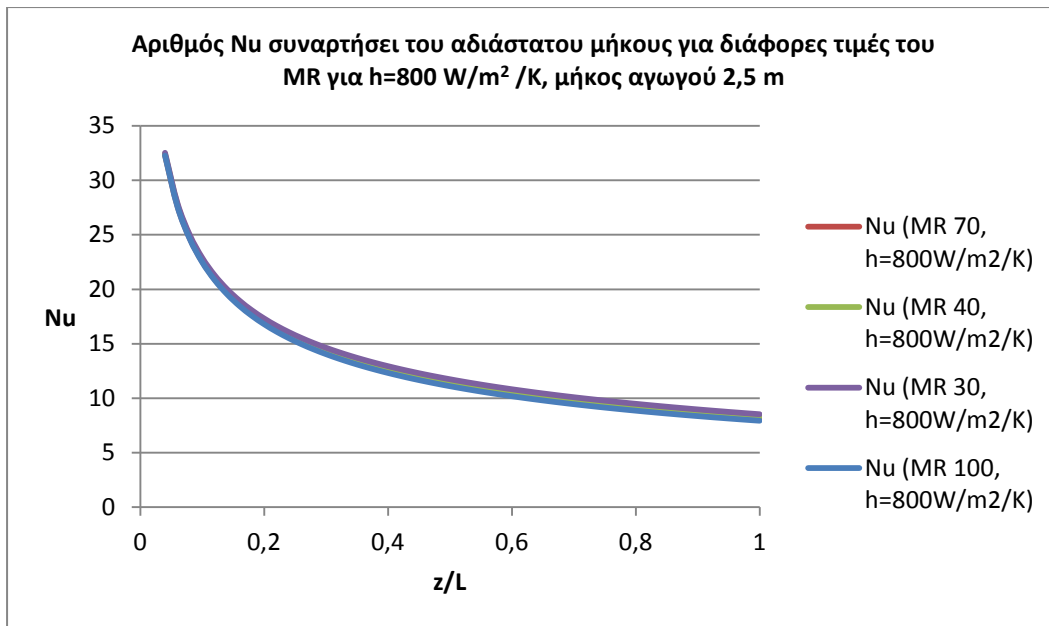
Σχήμα 9.9.14: Κινούσα διαφορά πυκνοτήτων υδρατμού συναρτήσει του αδιάστατου μήκους για συντελεστή συναγωγής $h=800 \text{ W/m}^2/\text{K}$ για $MR=30$. Επειδή υπάρχει μεταβολή και από το σχήμα 9.9.13 έχουμε ότι κυριαρχεί η μεταφορά μάζας, προκύπτει ότι ο εναλλάκτης με $MR=30$ δεν είναι πλήρως εξισορροπημένος.



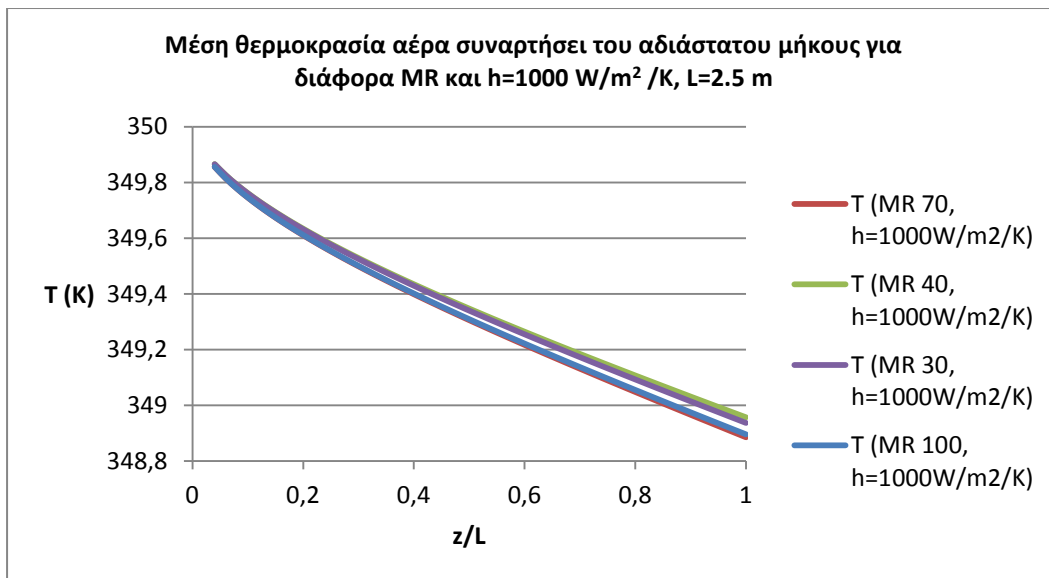
Σχήμα 9.9.15: Αριθμός Nusselt συναρτήσει του αδιάστατου μήκους για συντελεστή συναγωγής $h=1000$ $W/m^2/K$ για διάφορα $MR \geq 30$. Παρατηρούμε την ταύτιση των καμπυλών.



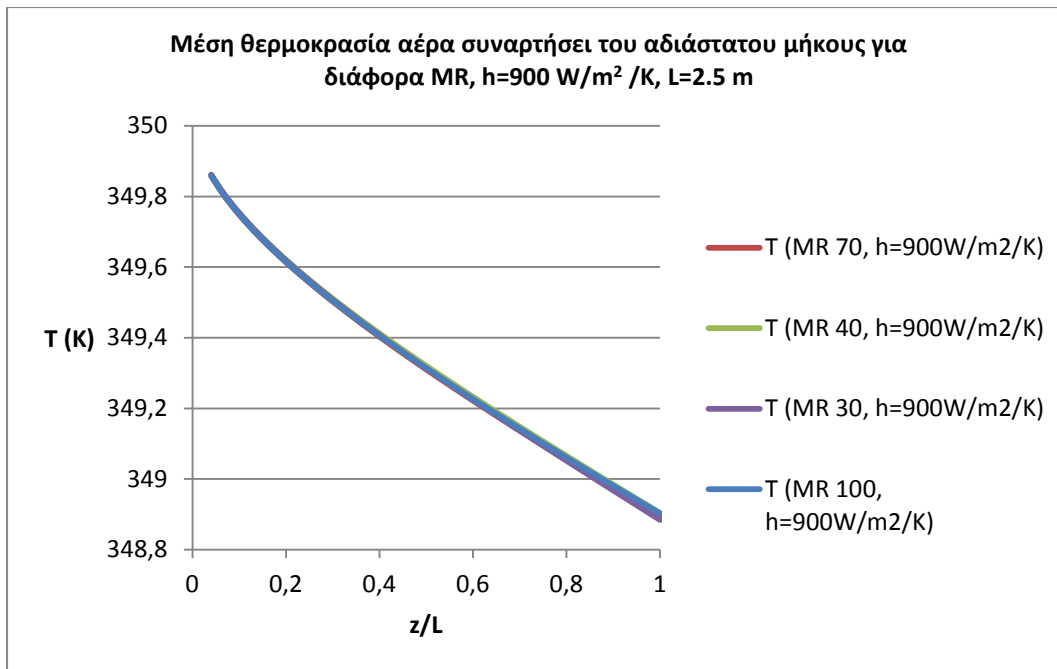
Σχήμα 9.9.16: Αριθμός Nusselt συναρτήσει του αδιάστατου μήκους για συντελεστή συναγωγής $h=900$ $W/m^2/K$ για διάφορα $MR \geq 30$. Παρατηρούμε την ταύτιση των καμπυλών.



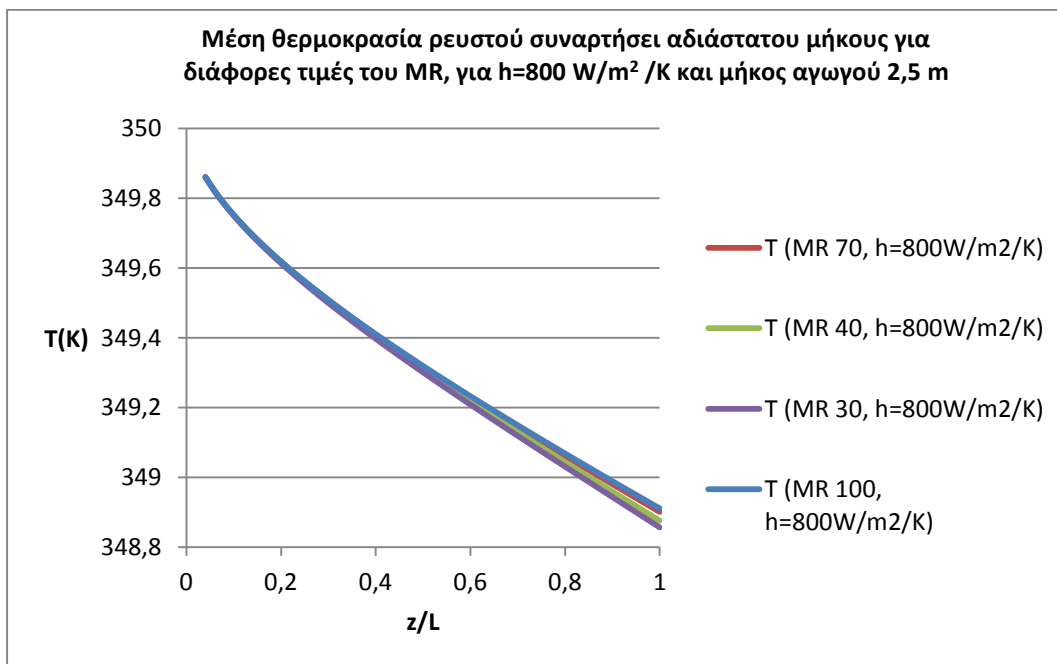
Σχήμα 9.9.17: Αριθμός Nusselt συναρτήσει του αδιάστατου μήκους για συντελεστή συναγωγής $h=800 \text{ W/m}^2/\text{K}$ για διάφορα $MR \geq 30$. Παρατηρούμε την ταύτιση των καμπυλών.



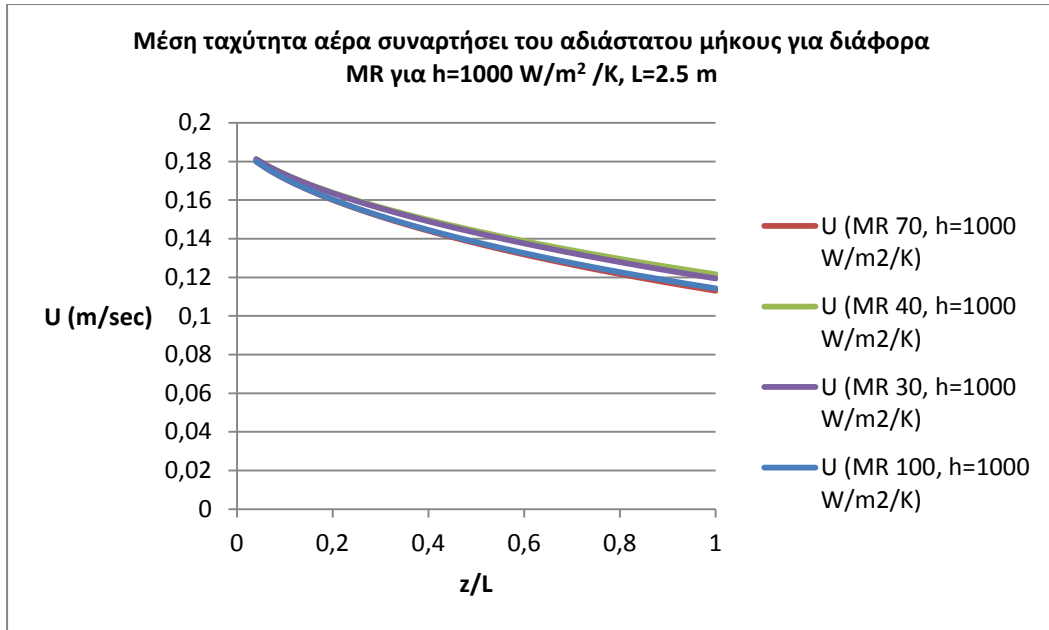
Σχήμα 9.9.18: Μέση θερμοκρασία αέρα συναρτήσει του αδιάστατου μήκους για συντελεστή συναγωγής $h=1000 \text{ W/m}^2/\text{K}$ για διάφορα $MR \geq 30$. Παρατηρούμε την ταύτιση των καμπυλών.



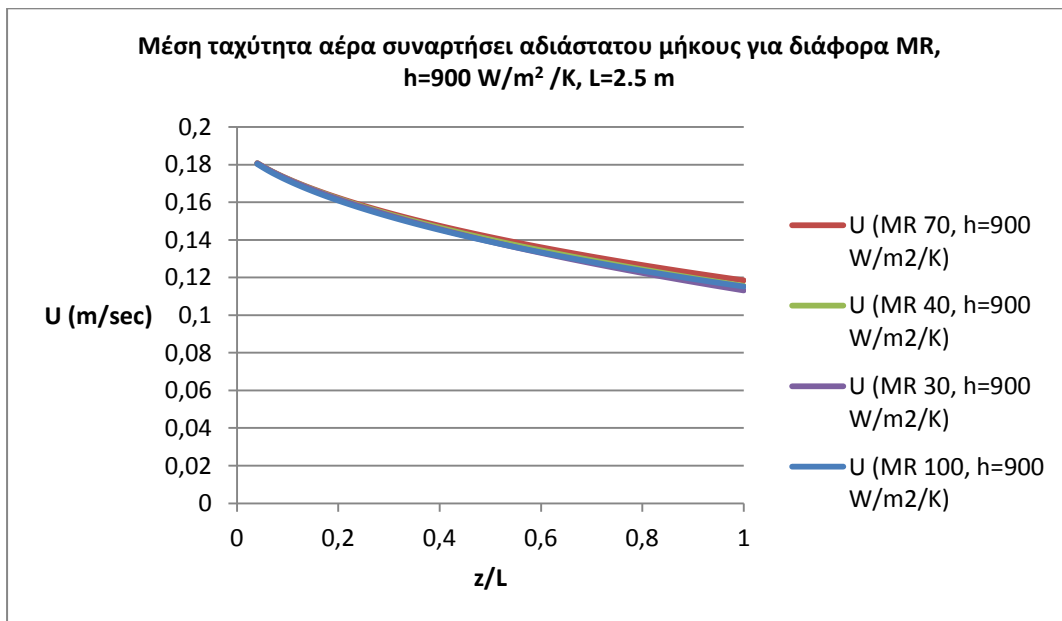
Σχήμα 9.9.19: Μέση θερμοκρασία αέρα συναρτήσει του αδιάστατου μήκους για συντελεστή συναγωγής $h=900 \text{ W/m}^2/\text{K}$ για διάφορα $MR \geq 30$. Παρατηρούμε την ταύτιση των καμπυλών.



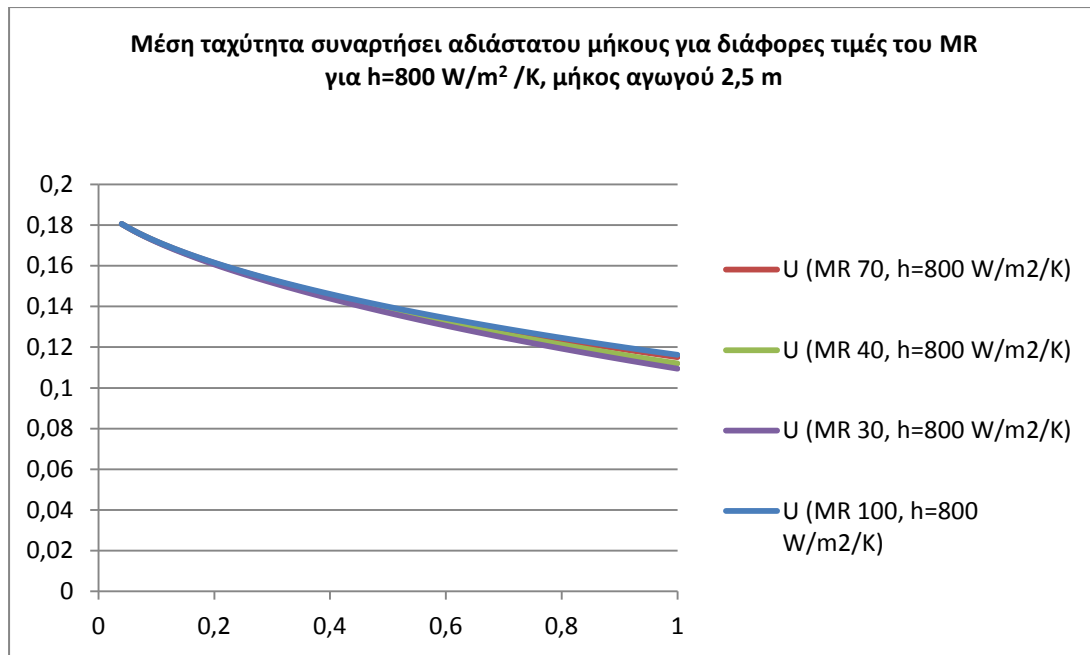
Σχήμα 9.9.20: Μέση θερμοκρασία αέρα συναρτήσει του αδιάστατου μήκους για συντελεστή συναγωγής $h=800 \text{ W/m}^2/\text{K}$ για διάφορα $MR \geq 30$. Παρατηρούμε την ταύτιση των καμπυλών.



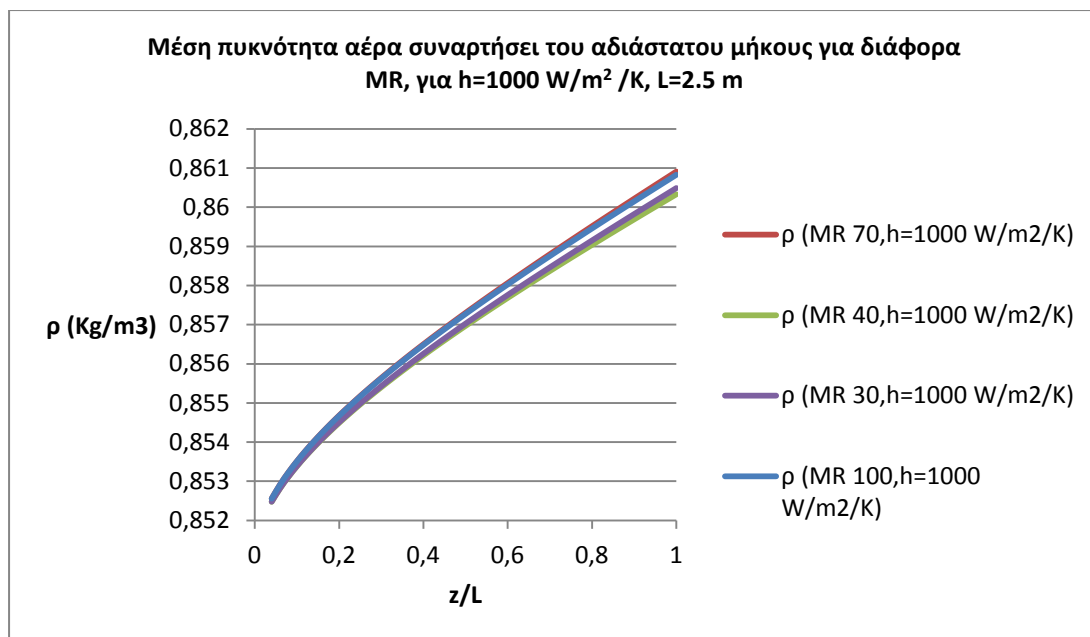
Σχήμα 9.9.21: Μέση ταχύτητα αέρα συναρτήσει του αδιάστατου μήκους για συντελεστή συναγωγής $h=1000 \text{ W/m}^2/\text{K}$ για διάφορα $MR \geq 30$. Παρατηρούμε την ταύτιση των καμπυλών.



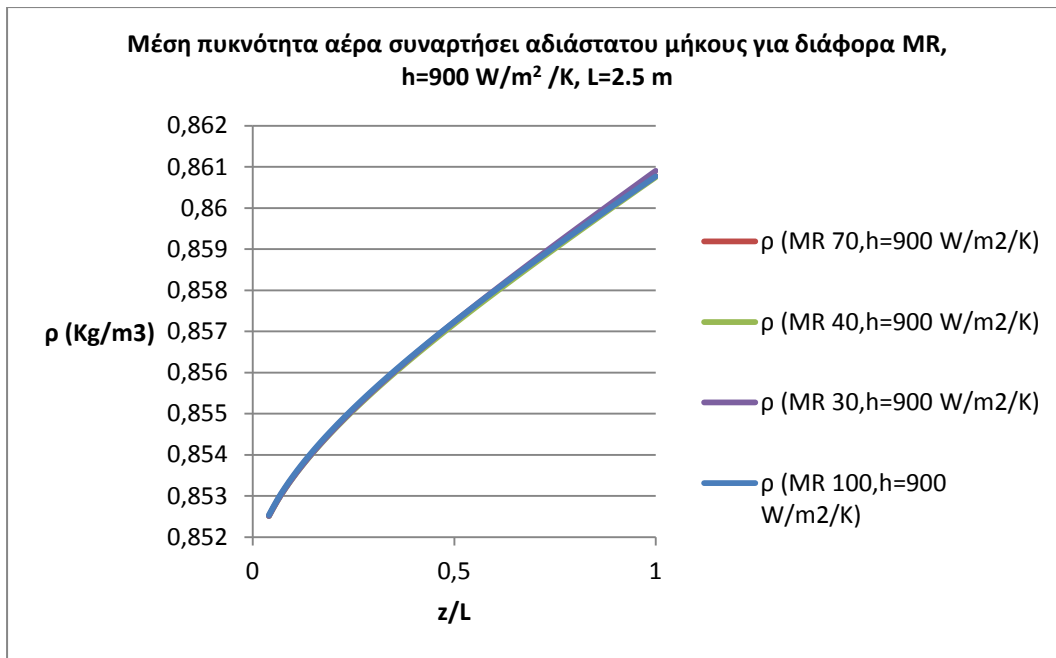
Σχήμα 9.9.22: Μέση ταχύτητα αέρα συναρτήσει του αδιάστατου μήκους για συντελεστή συναγωγής $h=900 \text{ W/m}^2/\text{K}$ για διάφορα $MR \geq 30$. Παρατηρούμε την ταύτιση των καμπυλών.



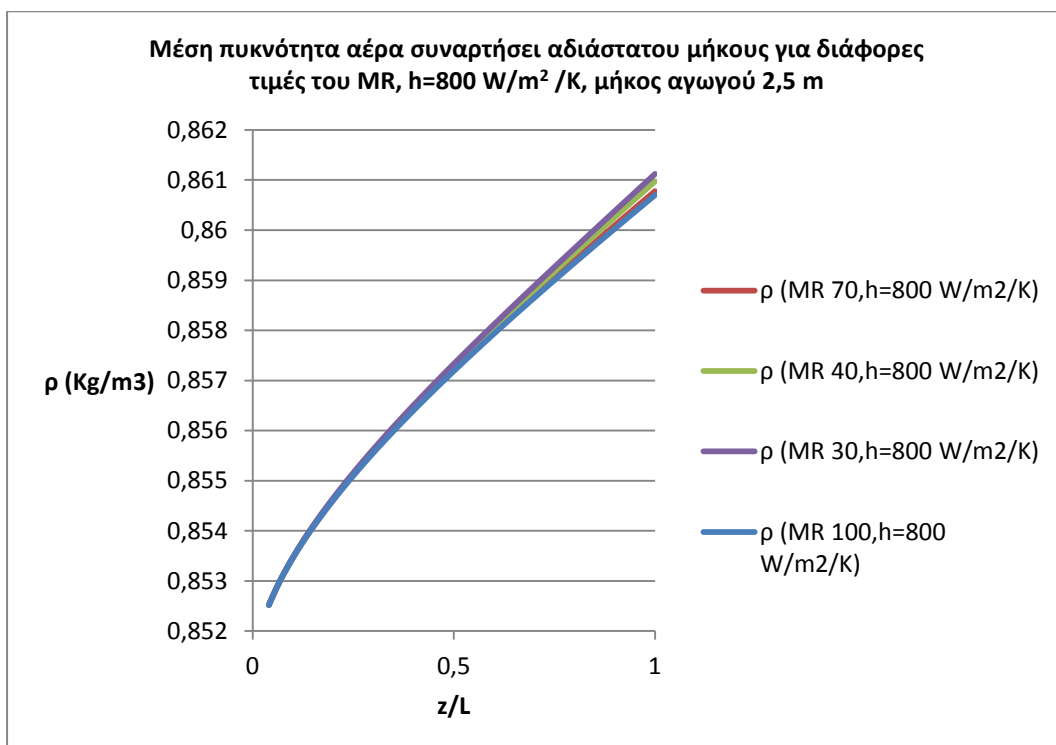
Σχήμα 9.9.23: Μέση ταχύτητα αέρα συναρτήσει του αδιάστατου μήκους για συντελεστή συναγωγής $h=800 \text{ W/m}^2/\text{K}$ για διάφορα $MR \geq 30$. Παρατηρούμε την ταύτιση των καμπυλών.



Σχήμα 9.9.24: Μέση πυκνότητα αέρα συναρτήσει του αδιάστατου μήκους για συντελεστή συναγωγής $h=1000 \text{ W/m}^2/\text{K}$ για διάφορα $MR \geq 30$. Παρατηρούμε την ταύτιση των καμπυλών.

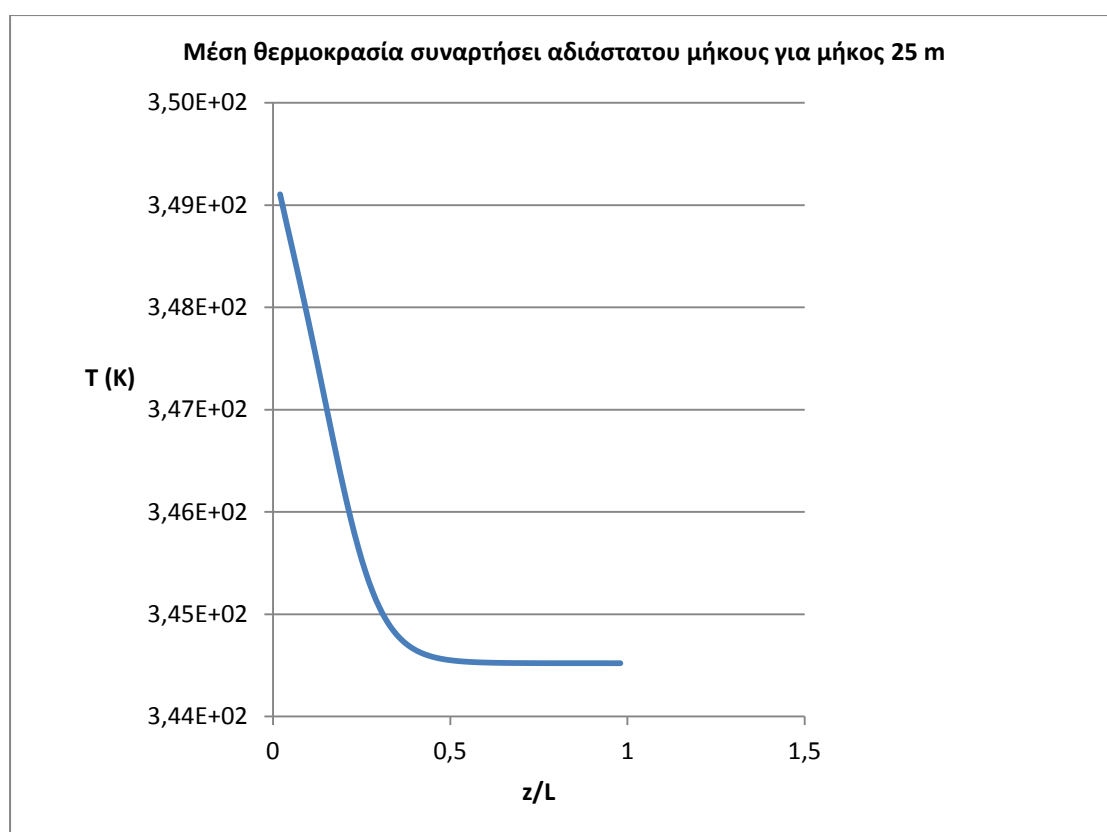


Σχήμα 9.9.25: Μέση πυκνότητα αέρα συναρτήσει του αδιάστατου μήκους για συντελεστή συναγωγής $h=900 \text{ W/m}^2/\text{K}$ για διάφορα $MR \geq 30$. Παρατηρούμε την ταύτιση των καμπυλών.

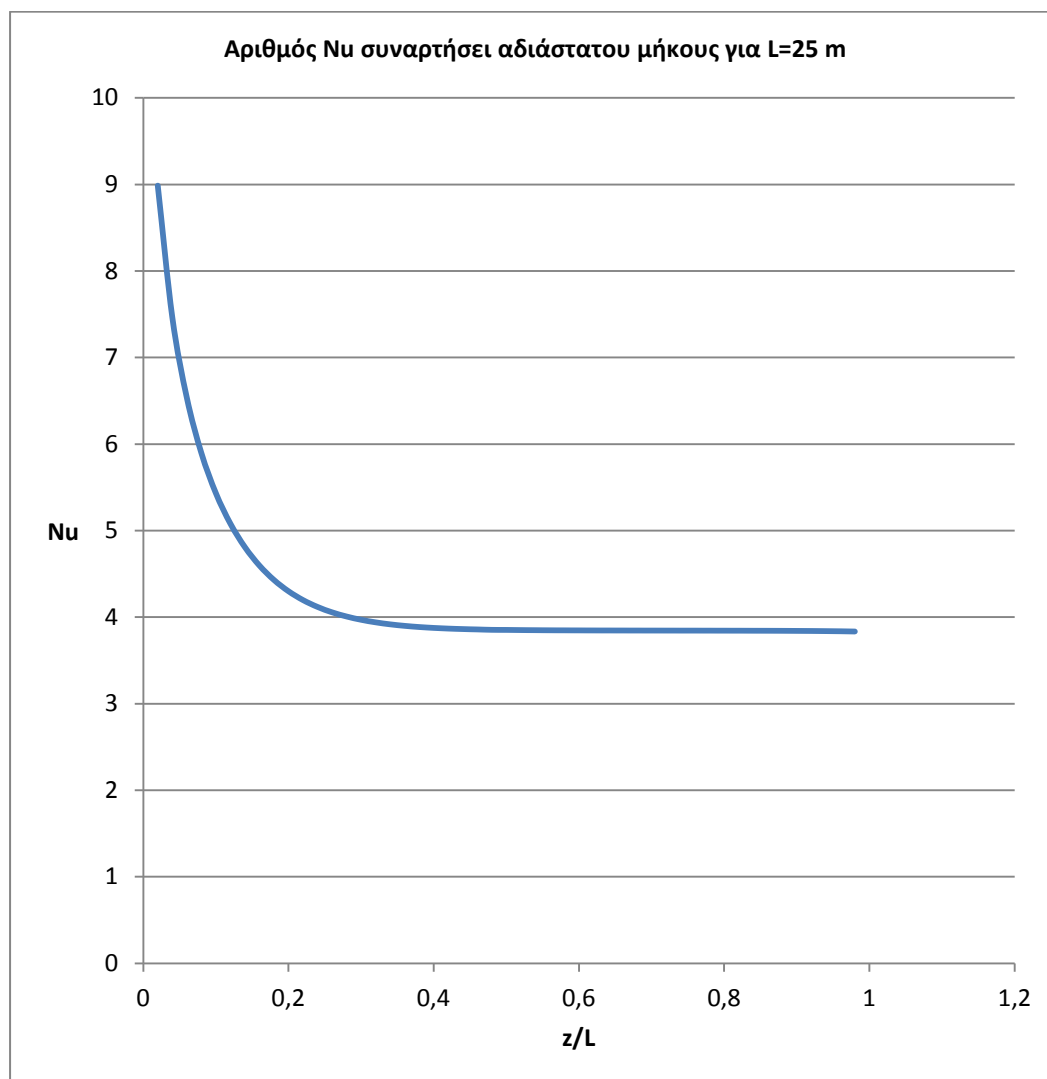


Σχήμα 9.9.26: Μέση πυκνότητα αέρα συναρτήσει του αδιάστατου μήκους για συντελεστή συναγωγής $h=800 \text{ W/m}^2/\text{K}$ για διάφορα $MR \geq 30$. Παρατηρούμε την ταύτιση των καμπυλών.

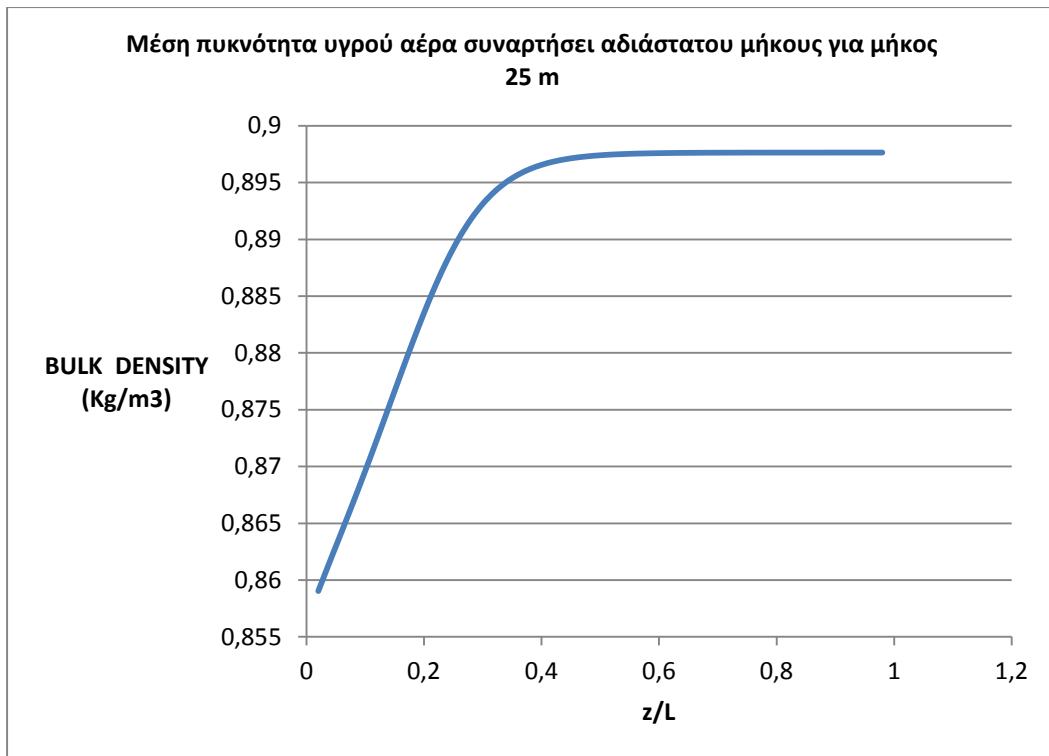
Γ) Λήφθηκε για τους υπολογισμούς εναλλάκτης με ακτίνα $R=0.1$ m, μήκος 25 m, ταχύτητα αέρα στην είσοδο ίση με 0.1 m/sec, θερμοκρασία αέρα στην είσοδο 350 K σχετική υγρασία στην είσοδο ίση με 1, και επιλέγοντας τη θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού νερού ίση με 346 K, το βήμα υπολογισμού $\Delta x = 5$ mm, για τιμή του συντελεστή συναγωγής $h= 800$ W/m²/K και λόγο παροχών ρευμάτων ίσο με 30, υπολογίστηκαν τα μεγέθη της ροής και ο συνολικός ρυθμός παραγωγής εντροπίας. Ακολουθεί μια παρουσίαση των αποτελεσμάτων.



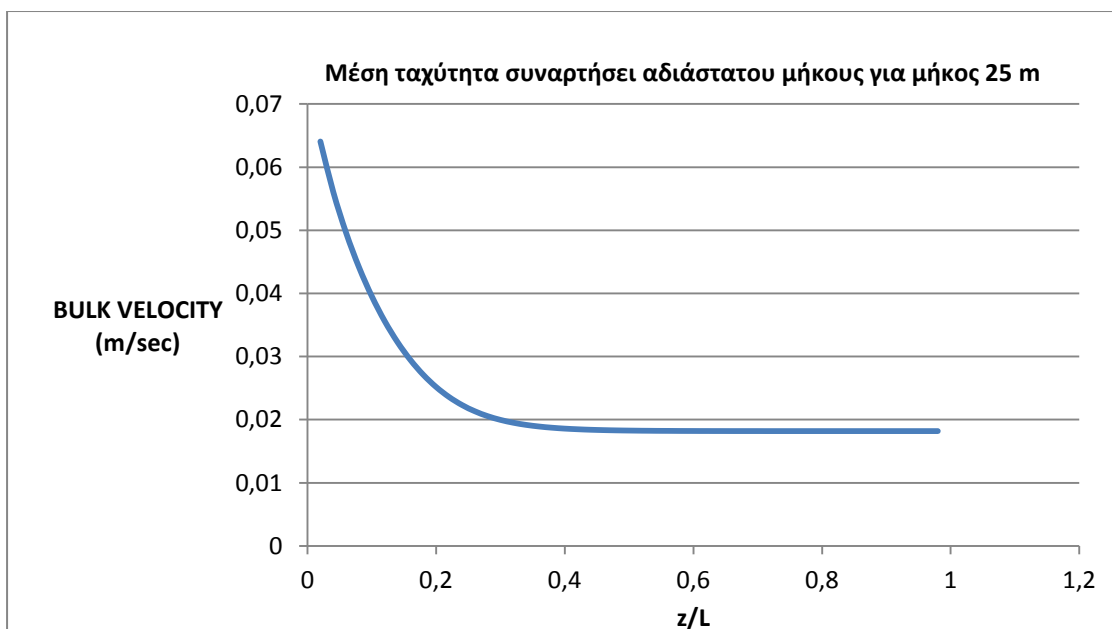
Σχήμα 9.9.27: Μέση θερμοκρασία μίγματος συναρτήσει του αδιάστατου μήκους για συντελεστή συναγωγής $h=800$ W/m²/K για $MR=30$. Παρατηρούμε από ένα μήκος και μετά στον εναλλάκτη, όταν η ροή έχει αναπτυχθεί, η θερμοκρασία παραμένει περίπου σταθερή καθώς είναι σχεδόν ίση με τη θερμοκρασία του ψυκτικού ρευστού.



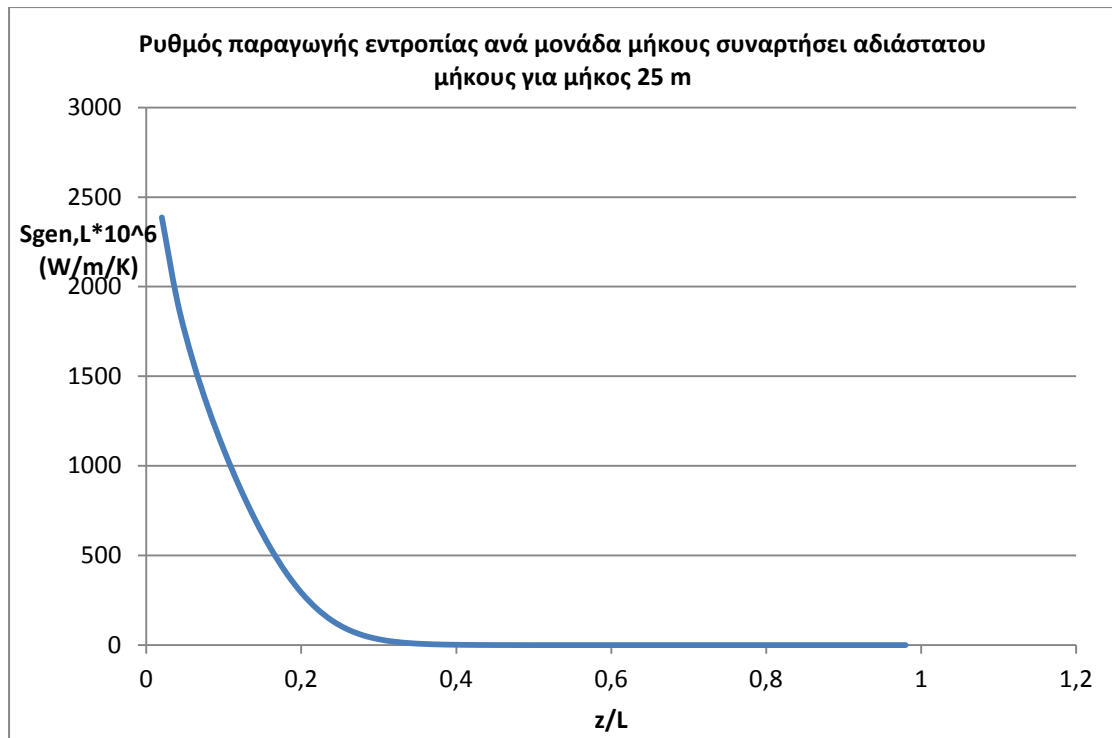
Σχήμα 9.9.28: Αριθμός Nu συναρτήσει του αδιάστατου μήκους για συντελεστή συναγωγής $h=800 \text{ W/m}^2/\text{K}$ για $MR=30$. Παρατηρούμε ότι, όταν η ροή έχει αναπτυχθεί, ο Nu προσεγγίζει την θεωρητική τιμή 3.66.



Σχήμα 9.9.29: Πυκνότητα του μίγματος συναρτήσει του αδιάστατου μήκους για συντελεστή συναγωγής $h=800 \text{ W/m}^2/\text{K}$ για $MR=30$. Παρατηρούμε ότι, όταν η ροή έχει αναπτυχθεί, η πυκνότητα είναι περίπου σταθερή.



Σχήμα 9.9.30: Μέση ταχύτητα του μίγματος συναρτήσει του αδιάστατου μήκους για συντελεστή συναγωγής $h=800 \text{ W/m}^2/\text{K}$ για $MR=30$. Παρατηρούμε ότι όταν η ροή έχει αναπτυχθεί η μέση ταχύτητα είναι περίπου σταθερή.



Σχήμα 9.9.31: Ρυθμός παραγωγής εντροπίας ανά μονάδα μήκους στο μίγμα συναρτήσει του αδιάστατου μήκους για συντελεστή συναγωγής $h=800 \text{ W/m}^2/\text{K}$ για $MR=30$. Παρατηρούμε ότι όταν η ροή έχει αναπτυχθεί οι τιμές του ρυθμού παραγωγής εντροπίας είναι πολύ χαμηλές.

9.10. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΓΑΣΙΑ

Υπάρχουν περιπτώσεις που το πρόγραμμα αστοχεί στο να βγάλει αποτέλεσμα. Αυτό συμβαίνει κυρίως όταν έχουμε μικρό L , μεγάλο h , και μικρή παροχή ψυκτικού μέσου. Ο λόγος που πιστεύουμε ότι συμβαίνει αυτό είναι ο τρόπος εύρεσης της κατάντι θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου. Αυτός στην εργασία μας γίνεται με την εφαρμογή του τύπου

$$T_{coolant}(x) = T_{coolant}(x - \Delta x) - h * (T(wall_{x-\Delta x}) - T_{coolant}(x - \Delta x))2\pi R\Delta x / (\dot{m}_w * 4180)$$

(9.10.1)

Ο οποίος προκύπτει από την άμεση ολοκλήρωση (μέθοδος Euler) της διαφορικής εξίσωσης

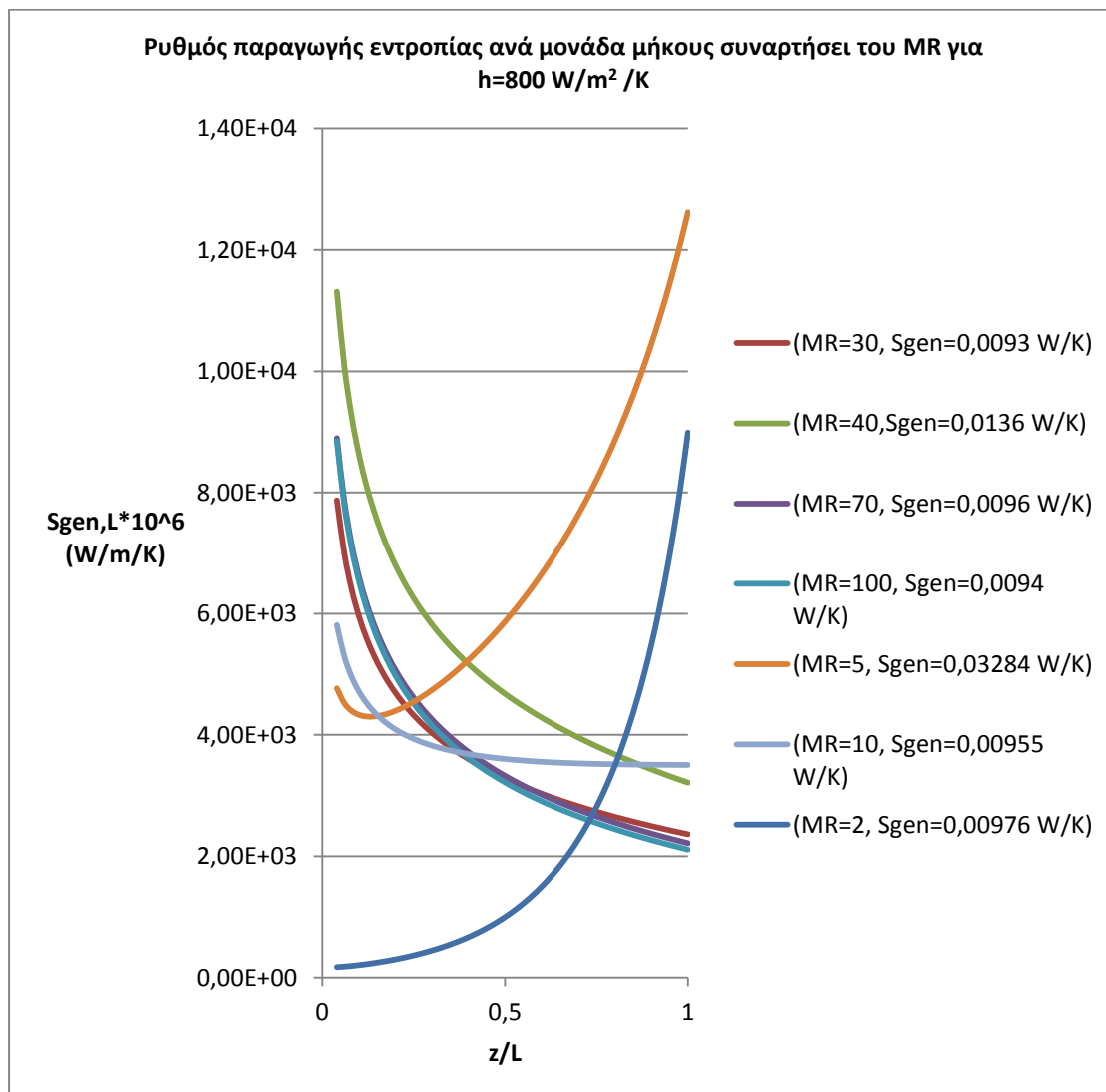
$$\dot{m}_w * c_{p,w} * \frac{dT_{coolant}}{dx} = 2\pi R h (T_{wall} - T_{coolant}) \quad (9.10.2)$$

Όμως αυτή η μέθοδος, όπως είναι γνωστό, εισάγει αστάθεια στον αλγόριθμο, η οποία γίνεται εμφανής όταν το L είναι μικρό, το h είναι μεγάλο και η παροχή ψυκτικού μέσου είναι μικρή.

Ένας τρόπος αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος είναι, να παίρνουμε αρκετά μικρό βήμα υπολογισμών Δx. Σε αυτήν όμως την περίπτωση, συσσωρεύονται σφάλματα στρογγύλευσης που μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία την εκτέλεση του προγράμματος από έναν μεγάλο αριθμό βημάτων και μετά. Επιπλέον, ο χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος θα αυξηθεί αρκετά, αν το βήμα υπολογισμού Δx ελαττωθεί αρκετά.

Σε κάθε περίπτωση, ο χρήστης του προγράμματος θα πρέπει να κάνει για κάθε περίπτωση μία διερεύνηση της συμπεριφοράς (αποτελεσμάτων) του αλγόριθμου μεταβάλλοντας το βήμα υπολογισμού Δx.

Στο κατωτέρω σχήμα, έχουμε για θερμοκρασία αέρα στην είσοδο 350 K, θερμοκρασία στην έξοδο 348,9 K, μήκος σωλήνα 2,5 m και συντελεστή συναγωγής $h=800 \text{ W/m}^2/\text{K}$ αποτελέσματα για τον ρυθμό παραγωγής εντροπίας για διάφορες τιμές του MR. Για μεγάλα MR λήφθηκε $\Delta x=0.5 \text{ mm}$ ενώ, για $MR=2$ χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι το Δx είχε την τιμή 0.003125 mm. Για αυτή τη περίπτωση, ο χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος έφτασε τα 30 min, ενώ για τα μεγάλα MR όπου το $\Delta x = 0,5 \text{ mm}$ ο χρόνος εκτέλεσης ήταν λιγότερο από 20 sec.



Σχήμα 9.10.1: Ρυθμός παραγωγής εντροπίας ανά μονάδα μήκους στο μίγμα συναρτήσει του αδιάστατου μήκους για συντελεστή συναγωγής $h=800 \text{ W/m}^2/\text{K}$ για διάφορα MR.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την εργασία, έχουν διερευνηθεί κάποια προσεγγιστικά μοντέλα και μέθοδοι, για τη κατανόηση των μηχανισμών και των ποσοτήτων της παραγωγής εντροπίας σε εναλλάκτες μάζας και θερμότητας με σκοπό, να παραχθεί ένα εύχρηστο σύνολο κριτηρίων, χρήσιμων σε μηχανολογικές αναλύσεις, για την ποιοτικότερη σχεδίαση του τρόπου ελαχιστοποίησης του ρυθμού παραγωγής εντροπίας. Αυτό το κεφάλαιο πρώτα αναφέρει τα σημαντικά συμπεράσματα που βρέθηκαν στις παρούσες αναλύσεις, και μετά καταλήγει με μια σύντομη έκθεση για μελλοντική εργασία και στόχους για το project.

10.1 ΚΥΡΙΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση που έγινε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξάγονται τα ακόλουθα κύρια συμπεράσματα που έρχονται σε συμφωνία με τα συμπεράσματα της βιβλιογραφίας [5A]:

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ [5A]

1. Μέσω μιας εξέτασης των μεθόδων όγκου ελέγχου για την ελαχιστοποίηση της παραγωγής εντροπίας, δείχθηκε ότι τα κριτήρια για έναν εξισορροπημένο εναλλάκτη θερμότητας δεν είναι επαρκή, για να ορίσουν έναν εξισορροπημένο εναλλάκτη θερμότητας και μάζας. Δηλαδή, ο παραδοσιακά χρησιμοποιούμενος λόγος ρυθμών θερμοχωρητικότητας, δεν είναι μια χρήσιμη παράμετρος για τον καθορισμό της ελαχιστοποίησης της παραγωγής εντροπίας σε έναν εναλλάκτη θερμότητας και μάζας. Οι αδυναμίες των μεθόδων όγκου ελέγχου για την κατανόηση του πως παράγεται η εντροπία, και το γιατί η εξισορρόπηση οδηγεί σε

ένα ελάχιστο ρυθμό παραγωγής εντροπίας, παρουσιάστηκαν επίσης. Ως αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης, έγινε η εισαγωγή ενός πιο σύνθετου και πιο γενικευμένου μοντέλου προσέγγισης.

2. Το πιο σύνθετο μοντέλο οριακού στρώματος παρείχε σημαντικά περισσότερη πληροφορία για τις διαδικασίες μεταφοράς που δημιουργούν εντροπία. Αν και το μοντέλο οριακού στρώματος είναι αρκετά γενικό, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση κάθε διμερούς ιδανικού μίγματος με ένα συστατικό που συμπυκνώνεται, το παράδειγμα ενός συμπυκνωτή ατμού με υψηλά κλάσματα μη συμπυκνώσιμου αερίου επιλέχθηκε, για την τρέχουσα σχέση του με τα συστήματα αφαλάτωσης που έχουμε ύγρανση – αφύγρανση. Μέσα από την ανάλυση οριακού στρώματος, τα ακόλουθα κύρια συμπεράσματα παρουσιάστηκαν.

3. Από άποψη εντροπίας, η εξισορρόπηση για κάθε εναλλάκτη μάζας και θερμότητας συνίσταται κυρίως στη χειραγώγηση του (1) ρυθμού ενθαλπίας ενός ρεύματος και (2), των συντελεστών μεταφοράς μάζας και θερμότητας ενός ρεύματος ώστε να δημιουργηθεί μια ίση κατανομή του ρυθμού παραγωγής εντροπίας στο χώρο. Έτσι, οι καλούμενες παραμένουσες μη αναστρεψιμότητες, ή οι μη αναστρεψιμότητες λόγω των ανισορροπιών (διαταραχών) ροής, δεν είναι τίποτα άλλο από ανισότητες στη διανομή του τοπικού ρυθμού παραγωγής εντροπίας. Η εμφάνιση αυτών των μη αναστρεψιμοτήτων είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα της συναρτησιακής μορφής της εξίσωσης για τους τοπικούς ρυθμούς παραγωγής εντροπίας.

4. Για κάθε σύνολο αφυγραντών, με δεδομένο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας, ρυθμό συμπύκνωσης, και μέγεθος, η παραγωγή εντροπίας λόγω μεταφερόμενης θερμότητας, πλησιάζει ένα ελάχιστο όταν, ο ρυθμός παραγωγής εντροπίας πλησιάζει την ομοιομορφία στο χώρο ή, όταν η μεταβολή στον ρυθμό παραγωγής εντροπίας ελαχιστοποιείται. Αυτό είναι μια επιβεβαίωση του θεωρήματος της ισοκατανομής της παραγωγής εντροπίας (EoEP).[5A]

5. Για κάθε σύνολο αφυγραντών με δεδομένο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας, ρυθμό συμπύκνωσης και μέγεθος, η παραγωγή εντροπίας λόγω μεταφοράς θερμότητας πλησιάζει ένα προσεγγιστικά ελάχιστο όταν, η μεταβολή στην κινούσα

θερμοκρασιακή διαφορά ελαχιστοποιείται. Παρόμοια, η παραγωγή εντροπίας λόγω διάχυσης πλησιάζει ένα προσεγγιστικό ελάχιστο όταν, η μεταβολή στη κινούσα διαφορά μερικής πυκνότητας ατμού (ή συγκέντρωσης) ελαχιστοποιείται. Όμως, μία διαμόρφωση που ελαχιστοποιεί και τα δύο ταυτόχρονα, δεν μπορεί να επιτευχθεί, εκτός από την περίπτωση πολύ μικρών κινουσών δυνάμεων μεταφοράς θερμότητας και μάζας.

6. Στην πράξη, για πολλούς συμπυκνωτές με υψηλά κλάσματα μη συμπυκνώσιμων αερίων, η θερμική αντίσταση του ψυκτικού μέσου και η διαφορά θερμοκρασίας από το ρεύμα στο τοίχωμα, είναι χαμηλές και η κυρίαρχη πηγή παραγωγής εντροπίας είναι στο οριακό στρώμα ατμού – αερίου. Αυτό το αποτέλεσμα σημαίνει ότι κάθε προσπάθεια για την ελαχιστοποίηση της παραγωγής εντροπίας, πρέπει να επικεντρωθεί στο οριακό στρώμα ατμού – αερίου. Επιπλέον, έχει δειχθεί ότι για ένα μίγμα ατμού – αερίου, ο φυσικός μηχανισμός που έχει τη μεγαλύτερη σχετική συνεισφορά για την παραγωγή εντροπίας είναι η διάχυση.

7. Σαν αποτέλεσμα των συμπερασμάτων που εμφανίστηκαν στις τρεις ανωτέρω παραγράφους, μία καλή προσέγγιση για τη διαμόρφωση/διάταξη που ελαχιστοποιεί τον ρυθμό παραγωγής εντροπίας, σε συμπυκνωτές με υψηλές συγκεντρώσεις μη συμπυκνώσιμων αερίων, είναι μία σταθερή κινούσα διαφορά συγκέντρωσης.

8. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και χαμηλές τιμές των κινουσών δυνάμεων μεταφοράς θερμότητας και μάζας, οι διαμορφώσεις που εξισορροπούν τη θερμοκρασία και τη διάχυση έχουν, σχεδόν, επουσιώδεις διαφορές στον ρυθμό παραγωγής εντροπίας. Αυτό συμβαίνει λόγω της εκθετικής καμπυλότητας της γραμμής της πίεσης ατμού.

9. Όταν οι επιδράσεις από την αναπτυσσόμενη ροή είναι σημαντικές ή, όταν οι διαφορές στο χώρο των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας και μάζας είναι σημαντικές, η ελαχιστοποίηση της μεταβολής στην κινούσα διαφορά συγκέντρωσης αντιστοιχεί στον ελάχιστο ρυθμό παραγωγής εντροπίας αλλά, δεν αντιστοιχεί σε μία σταθερή τιμή στην κινούσα διαφορά συγκεντρώσεων.

ΕΙΔΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΞΗΧΘΗΣΑΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΑΣ

1. Έπειτα από διερεύνηση στα αποτελέσματα που έχουμε από το πρόγραμμα υπολογισμού μας, προκύπτει, ότι από μία τιμή του MR και άνω, ο ρυθμός παραγωγής εντροπίας μεταβάλλεται ελάχιστα με τη μεταβολή του MR και με τη μεταβολή του συντελεστή συναγωγής h . Έτσι, αν κάποιος θελήσει να κάνει μία διερεύνηση σε ένα πρόβλημα εξισορρόπησης εναλλάκτη ταυτόχρονης μεταφοράς θερμότητας και μάζας, δεν χρειάζεται να πάρει πολλές τιμές του MR ή, πολλές τιμές του h . Αρκούν οι τιμές 0.66, 0.85, 2, 5, 10, 100 για το MR και δύο ή, τρεις το πολύ, τιμές για το h . Με αυτές μόνο τις τιμές του MR και του h , μπορεί να εξαχθούν χρήσιμα αποτελέσματα για την ανάλυση του.
2. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι μετά το μήκος διαμόρφωσης της ροής, ο ανά μονάδα μήκους ρυθμός παραγωγής εντροπίας παρουσιάζει πολύ μικρές μεταβολές. Μάλιστα, παρατηρούμε ότι όσο πιο μεγάλες είναι οι τιμές του MR, τόσο πιο μικρές μεταβολές παρουσιάζονται και αυτό γίνεται γιατί καθώς η τιμή του MR αυξάνεται, για δεδομένη παροχή υγρού αέρα η διεργασία της συμπύκνωσης του γίνεται πιο γρήγορα.
3. Επιπρόσθετα, στην εργασία μας έγιναν οι γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της ροής, συναρτήσεως του αδιάστατου μήκους για διάφορες τιμές του MR, για μήκος αγωγού μεγαλύτερο από το μήκος ανάπτυξης της ροής. Παρατηρήθηκε ότι, όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του MR, τόσο πιο γρήγορα αποκαθίστανται τα μεγέθη της ροής. Αυτό συμβαίνει, γιατί για δεδομένη παροχή υγρού αέρα, καθώς το MR αυξάνεται, η διεργασία που ο αέρας υφίσταται (συμπύκνωση) γίνεται πιο γρήγορα.
4. Επίσης, από τα αποτελέσματα μας, για μήκος αγωγού μεγαλύτερο από το μήκος ανάπτυξης της ροής, παρατηρήθηκε ότι η καμπύλη του ανά μονάδα μήκους ρυθμού παραγωγής εντροπίας αποκτά την τελική της τιμή πιο γρήγορα, όσο το MR αυξάνει. Αυτό γίνεται, γιατί καθώς το MR αυξάνεται, η διεργασία της μεταβολής της κατάστασης δεδομένης παροχής υγρού αέρα γίνεται πιο γρήγορα, οπότε η συμβολή της διαδικασίας μεταφοράς μάζας στην παραγωγή εντροπίας, γίνεται ολοένα και πιο μικρή κατά το μήκος ανάπτυξης της ροής.

5. Στην περίπτωση των αποτελεσμάτων που αναφέρονται σε μικρό μήκος αγωγού, παρατηρήθηκε ότι τα μεγέθη δεν έχουν αποκατασταθεί πλήρως και αυτό, διότι το λαμβανόμενο μήκος του αγωγού είναι μικρότερο από το μήκος ανάπτυξης της ροής.

6. Οι γραφικές παραστάσεις του, ανά μονάδα μήκους, ρυθμού παραγωγής εντροπίας είναι οι αναμενόμενες. Για μικρές τιμές του λόγου παροχών μάζας MR, λόγω της μικρής παροχής του ψυκτικού μέσου, η θερμοκρασιακή μεταβολή που αυτό υφίσταται θα είναι συγκριτικά μεγαλύτερη οπότε, η θερμοκρασία της εξόδου του ψυκτικού μέσου θα προσεγγίζει τη θερμοκρασία εισόδου του αέρα. Επομένως, η κινούσα δύναμη σε διατομές κοντά στη διατομή εισόδου του αέρα, θα έχει μικρές τιμές οπότε, ανάλογα μικρές τιμές κοντά στην είσοδο θα έχει και ο ανά μονάδα μήκους ρυθμός παραγωγής εντροπίας. Αντίθετα, για μεγάλες τιμές του λόγου MR, η παροχή του ψυκτικού μέσου θα έχει μεγάλες σχετικά τιμές, οπότε η έξοδος του ψυκτικού θα παρουσιάζει μικρή διαφορά στη θερμοκρασία, από τη θερμοκρασία εισόδου του στον εναλλάκτη. Έτσι, η θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού μέσου δεν θα προσεγγίζει αρκετά τη θερμοκρασία εισόδου του αέρα και επομένως, η κινούσα δύναμη για την παραγωγή εντροπίας θα έχει μεγάλες τιμές στις διατομές πλησίον της διατομής εισόδου του αέρα. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα, να εμφανίζονται μεγάλες τιμές του ανά μονάδα μήκους ρυθμού παραγωγής εντροπίας, κοντά στη διατομή εισόδου του αέρα, για μεγάλες τιμές του MR.

7. Στην εργασία μας λήφθηκε δεδομένος συντελεστής συναγωγής από τη πλευρά του ψυκτικού μέσου, ο οποίος λάμβανε μεγάλες τιμές. Θα ήταν δυνατό, για δεδομένη γεωμετρία εναλλάκτη, ο συντελεστής συναγωγής από τον εσωτερικό σωλήνα προς το ψυκτικό μέσο να υπολογίζεται, σύμφωνα με τα αναφερόμενα στο Παράρτημα Β και να μην εισάγεται ο συντελεστής συναγωγής ως δεδομένο στους υπολογισμούς. Με τον τρόπο αυτόν, για στρωτή ροή στο ψυκτικό μέσο, ο συντελεστής συναγωγής θα είναι συνάρτηση της γεωμετρίας του εναλλάκτη και υπάρχουν περιπτώσεις που δεν θα λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές. Στη περίπτωση αυτή, βέβαια, πρέπει να αλλάξουν ή, να τροποποιηθούν ορισμένες από τις παραδοχές της παρούσας μελέτης.

10.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πρώτον και πιο σημαντικό, η πειραματική αξιολόγηση θα ωφελήσει στην επικυροποίηση των θεωρητικών συμπερασμάτων που παρουσιάστηκαν σε αυτή την εργασία. Ειδικότερα, είναι επιθυμητό να λάβουμε μετρήσεις από προφίλ θερμοκρασίας και συγκέντρωσης για έναν αφυγραντή δεδομένου μεγέθους, ρυθμού μεταφοράς θερμότητας, και ρυθμού συμπύκνωσης και για μερικές τιμές του λόγου των ρυθμών παροχής μάζας. Για κάθε τιμή του λόγου ρυθμών παροχής μάζας, κατάλληλες παράμετροι που ποσοτικοποιούν τη διανομή των κινουσών δυνάμεων θα μπορούσαν να συσχετισθούν με τον συνολικό ρυθμό παραγωγής εντροπίας και να συγκριθούν με τα γραφήματα του κεφαλαίου 9.[5A]

Σε μερικά σημεία αυτής της εργασίας, συζητήθηκε η σημαντικότητα ενός συνεχώς μεταβλητού λόγου ρυθμών παροχής μάζας στη διαμόρφωση μιας πιο ίσης κατανομής του τοπικού ρυθμού παραγωγής εντροπίας. Αν και είναι δύσκολο να επιτευχθεί στην πράξη ένας διαρκώς μεταβλητός λόγος ρυθμών παροχής μάζας, έχει προταθεί να χρησιμοποιηθούν διακεκριμένες απομαστεύσεις ή εγχύσεις ψυκτικού μέσου ή υγρού αέρα, σαν μια μέθοδος εξισορρόπησης HDH συστημάτων. Η πρόσφατη βιβλιογραφία [55 – 57] έχει δείξει σημαντικές αυξήσεις στον GOR από μία τέτοια απαγωγή (απομάστευση) ή έγχυση. Η υιοθέτηση απαγωγών μάζας ή εγχύσεων, στο παρόν μοντέλο, θα μπορούσε να δώσει επιπλέον επισκόπηση σε αυτά τα λειτουργικά κέρδη, όσον αφορά την καλύτερη απόδοση του συστήματος.[5A]

Διάφορα ακόμα, πιθανώς λιγότερο σημαντικά, σημεία που θα μπορούσαν να αναφερθούν είναι ως ακολούθως. Εδώ, έχει υποτεθεί ότι η παραγωγή εντροπίας στο ψυκτικό μέσο είναι αμελητέα σε σύγκριση με αυτή στο μίγμα ατμού/αερίου. Κάποιοι σχεδιασμοί συμπυκνωτών μπορούν να διαψεύσουν αυτή την υπόθεση. Σαν αποτέλεσμα, μπορεί να είναι χρήσιμο να ερευνηθεί η επίδραση της – λογιζόμενης πλέον, παραγωγής εντροπίας στο ψυκτικό μέσο - στο κριτήριο βελτιστοποίησης εξισορροπημένης μεταφοράς μάζας. Εδώ, το ψυκτικό ρεύμα μοντελοποιείται σαν καθαρό νερό. Σε πραγματικά συστήματα HDH, το ψυκτικό μέσο μπορεί να είναι θαλασσινό νερό, και επομένως, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν οι ιδιότητες

του θαλασσινού νερού. Τελικά, η συζήτηση εδώ έχει περιοριστεί σε μεγάλο μέρος στην εφαρμογή σε συστήματα αφαλάτωσης ύγρανσης – αφύγρανσης. Παρόλα αυτά, το μοντέλο και οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν εδώ είναι αρκετά γενικές, για να εφαρμοστούν σε παρόμοια συστήματα, όπως σε ψυκτικούς πύργους, όπου η παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων μη συμπτυκνώσιμων αερίων μπορεί να έχει μεγάλη επίδραση στην παραγωγή εντροπίας.[5A]

Επιπλέον, όσον αφορά το πρόγραμμα υπολογισμού που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας θα μπορούσε, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, για δεδομένη γεωμετρία εναλλάκτη, να τροποποιηθεί το πρόγραμμα υπολογισμού ώστε ο συντελεστής συναγωγής από τον εσωτερικό σωλήνα προς το ψυκτικό ρευστό, να γίνεται σύμφωνα με τα αναφερόμενα στο Παράρτημα Β και να μην εισάγεται ο συντελεστής συναγωγής σαν δεδομένο στους υπολογισμούς. Τέλος, η εξέταση διαφορετικών μεθόδων αριθμητικής ανάλυσης και προσέγγισης, για την επίλυση των εξισώσεων του οριακού στρώματος, κρίνεται πρόσφορη.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄

Ο ΚΩΔΙΚΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

Κατωτέρω παρατίθεται για λόγους πληρότητας ο κώδικας υπολογισμού του προγράμματος που έγινε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας

!*****

!* PROGRAM HM EXCHANGER

!* BOUNDARY LAYER SOLUTION CODE AND ENTROPY GENERATION CALCULATION

!* FOR A CONCENTRIC TUBE HEAT AND MASS EXCHANGER AIR TO WATER (WATER AS COOLANT IN OUTER PIPE)

!*****

Dim R, T1, TIN, UBAR, RHB, HCONV, MR, TB1, RD, L, PH, P1 As Double

Dim IN1, JN1 As Integer

Dim TUP(41), UUP(41), WUP(41), RO1(41), VUP(41), T(41), U(41), W(41), R1(41), V(41) As Double

Dim CP1, MD1, KD1, CPA1, CPV1, D1, DRR, MAIR, MCOOL, MWATER, RR(41), RRC(41), RR1(41) As Double

Dim PSI(41), PSIC(41), OMEGA(41), OMEGAC(41) As Double

Dim PSIEUP, PSIEIUP, MDOTB, PX, PXSTAR, TWUP, TBULK1, XBULK1, WBULK1, REYNOLDS As Double

Dim RNMN(41), PCN(41), ANU(41), RSMS(41), PCS(41), ASU(41), AUU(41), APU(41), DV(41), DU(41) As Double

Dim AA(41), AB(41), AC(41), AR(41), DEN(41), EF(41), GI(41), ST(41), ANT(41),
AST(41), AUT(41), APT(41) As Double

Dim AAD(41), ACD(41), ANW(41), ASW(41), AUW(41), APW(41), ANV(41), ASV(41),
AUV(41), APV(41) As Double

Dim GIOTA(41), GIOTAC(41), SGENL(50), SGEN, SGENHT(50), SGENMT(50), NU(50),
TBULK(50), WBULK(50), PSIEN(50) As Double

Private Sub CommandButton1_Click()

Call INPUTDATA

Call INFLOWCALC

Call FLOWCALC

'Call OUTPUT

End Sub

Private Sub INPUTDATA()

' INPUT OF DATA

T1 = Cells(5, 2)

UBAR = Cells(5, 3)

RHB = Cells(5, 4)

PH = Cells(5, 5)

HCONV = Cells(5, 6)

MR = Cells(7, 2)

TB1 = Cells(7, 3)

RD = Cells(7, 4)

L = Cells(7, 5)

IN1 = 5001

JN1 = 41

P1 = PH

MWATER = 0

End Sub

Private Sub FINDTW(T11, T2, W2, TB11, MDOT, P1, DRR)

T11 = (TB11 + T2) / 2

Do

T1STAR = T11

HFG1 = HFG(T1STAR)

X11 = X(1, P1, T1STAR)

W11 = X11 / (1 + X11)

F1 = 1 / (-1 + W11) * D1 * (W11 - W2) / DRR * HFG1 * RO(X11, P1, T1STAR) - KD1 *
(T1STAR - T2) / DRR - HCONV * (T1STAR - TB11)

T1STARR = T1STAR + 0.01

HFG1 = HFG(T1STARR)

X11 = X(1, P1, T1STARR)

W11 = X11 / (1 + X11)

F2 = 1 / (-1 + W11) * D1 * (W11 - W2) / DRR * HFG1 * RO(X11, P1, T1STARR) - KD1 *
(T1STARR - T2) / DRR - HCONV * (T1STARR - TB11)

DFF = (F2 - F1) / 0.01

T11 = T1STAR - F1 / DFF

```

If T11 < 0 Then

    T13 = T11

End If

Loop Until Abs(T11 - T1STAR) < 0.00001

X11 = X(1, P1, T11)

W11 = X11 / (1 + X11)

MDOT = 1 / (-1 + W11) * RO(X11, P1, T11) * D1 * (W11 - W2) / DRR / RD

End Sub

Private Sub INFLOWCALC()

X1 = X(RHB, PH, T1)

TIN = T1

MWATER = 0

For J = 1 To (JN1 - 1)

    TUP(J) = T1

    UUP(J) = UBAR

    WUP(J) = X1 / (1 + X1)

    RO1(J) = RO(X1, PH, TIN)

    VUP(J) = 0

Next J

CP1 = CP(X1, T1)

MD1 = MD(T1, X1)

KD1 = KD(T1, X1)

```

$$\text{REYNOLDS} = \text{UBAR} * 2 * \text{RD} * \text{RO}(\text{X1}, \text{PH}, \text{TIN}) / \text{MD1}$$

$$\text{Cells}(8, 10) = \text{REYNOLDS}$$

$$\text{CPA1} = \text{CPA}(\text{T1})$$

$$\text{CPV1} = \text{CPV}(\text{T1})$$

$$\text{D1} = \text{D}(\text{PH}, \text{T1})$$

$$\text{DRR} = \text{RD} / (\text{JN1} - 1)$$

$$\text{T2} = \text{TUP}(\text{JN1} - 1)$$

$$\text{W2} = \text{WUP}(\text{JN1} - 1)$$

$$\text{Call FINDTW}(\text{TWUP}, \text{T2}, \text{W2}, \text{TB1}, \text{MDOTB}, \text{PH}, \text{DRR})$$

$$\text{T}(\text{JN1}) = \text{TWUP}$$

$$\text{U}(\text{JN1}) = 0$$

$$\text{X1} = \text{X}(1, \text{PH}, \text{TWUP})$$

$$\text{W}(\text{JN1}) = \text{X1} / (1 + \text{X1})$$

$$\text{MAIR} = \text{RO}(\text{X1}, \text{PH}, \text{TIN}) * 3.14 * \text{RD}^2 * \text{UBAR}$$

$$\text{MCOOL} = \text{MR} * \text{MAIR}$$

$$\text{RO1}(\text{JN1}) = \text{RO}(\text{X1}, \text{PH}, \text{TWUP})$$

$$\text{V}(\text{JN1}) = \text{MDOTB} / \text{RO1}(\text{JN1})$$

$$\text{MWATER} = \text{MWATER} + \text{MDOTB} * 6.28 * \text{L} / (\text{IN1} - 1) * \text{RD}$$

$$\text{RR}(1) = 0$$

$$\text{RRC}(1) = 0$$

For J = 2 To JN1

$$\text{RR}(\text{J}) = \text{RR}(\text{J} - 1) + \text{RD} / (\text{JN1} - 1)$$

$$RRC(J) = 0.5 * (RR(J) + RR(J - 1))$$

Next J

$$PSI(1) = 0$$

$$PSIC(1) = 0$$

For J = 2 To JN1

$$PSI(J) = PSI(J - 1) + 0.5 * (RO1(J) * RR(J) * UUP(J) + RO1(J - 1) * RR(J - 1) * UUP(J - 1)) * (RR(J) - RR(J - 1))$$

$$PSIC(J) = PSIC(J - 1) + 0.5 * (RO1(J - 1) * RR(J - 1) * UUP(J - 1) + RO1(J) * RR(J) * UUP(J)) * (RRC(J) - RRC(J - 1))$$

Next J

$$OMEGA(1) = 0$$

$$OMEGAC(1) = 0$$

For J = 2 To JN1

$$OMEGA(J) = (PSI(J) - PSI(1)) / (PSI(JN1) - PSI(1))$$

$$OMEGAC(J) = (PSIC(J) - PSI(1)) / (PSI(JN1) - PSI(1))$$

Next J

$$PSIEUP = PSI(JN1)$$

$$PSIEIUP = PSI(JN1) - PSI(1)$$

End Sub

Private Sub FLOWCALC()

$$TB = TB1$$

PNEW = PH

For I = 2 To IN1

$XD = (I - 1) * L / (IN1 - 1)$

For J = 1 To JN1

RR1(J) = RO1(J)

Next J

P1 = PNEW

PSIED = PSIEUP - RD * MDOTB * L / (IN1 - 1)

PSIEID = PSIED - PSI(1)

MDOTI = 0

MDOTE = MDOTB

TBUP = TB

' CALCULATE U EQUATION COEFFICIENTS

For J = 2 To JN1 - 1

RNMN(J) = OMEGAC(J + 1) * RD * MDOTE

PCN(J) = RNMN(J) / RRC(J + 1) / MD1 * (RR(J + 1) - RR(J))

ANU(J) = RNMN(J) * L / (IN1 - 1) / (Exp(PCN(J)) - 1)

RSMS(J) = OMEGAC(J) * RD * MDOTE

PCS(J) = RSMS(J) / RRC(J) / MD1 * (RR(J) - RR(J - 1))

ASU(J) = RSMS(J) * L / (IN1 - 1) * Exp(PCS(J)) / (Exp(PCS(J)) - 1)

$$AUU(J) = PSIEID * (OMEGAC(J + 1) - OMEGAC(J))$$

$$APU(J) = AUU(J) + ASU(J) + ANU(J)$$

$$DV(J) = (RRC(J + 1) - RRC(J)) * RR(J) * L / (IN1 - 1)$$

$$DU(J) = AUU(J) * UUP(J)$$

Next J

' CALCULATION OF PRESSURE GRADIENT

$$AA(1) = 1$$

$$AB(1) = 0$$

$$AR(1) = 0$$

$$AA(2) = ANU(2) / (APU(2) - ASU(2))$$

$$AB(2) = DU(2) / (APU(2) - ASU(2))$$

$$AR(2) = DV(2) / (APU(2) - ASU(2))$$

For J = 3 To JN1 - 1

$$DEN(J) = APU(J) - ASU(J) * AA(J - 1)$$

$$AA(J) = ANU(J) / DEN(J)$$

$$AB(J) = (ASU(J) * AB(J - 1) + DU(J)) / DEN(J)$$

$$AR(J) = (ASU(J) * AR(J - 1) + DV(J)) / DEN(J)$$

Next J

$$EF(JN1) = 0$$

$$GI(JN1) = 0$$

$$AA(JN1) = 0$$

$$EF(JN1 - 1) = AB(JN1 - 1)$$

$GI(JN1 - 1) = AR(JN1 - 1)$

For J = JN1 - 2 To 2 Step -1

$EF(J) = AA(J) * EF(J + 1) + AB(J)$

$GI(J) = AA(J) * GI(J + 1) + AR(J)$

Next J

$C1 = RD ^ 2 / 2 / PSIEID$

$EF(1) = EF(2)$

$GI(1) = GI(2)$

$PX = 0$

Do

$S1 = 0$

$S2 = 0$

$PXSTAR = PX$

For J = 1 To JN1 - 1

$S1 = S1 + (OMEGA(J + 1) - OMEGA(J)) / RR1(J) / (EF(J) - GI(J) * PXSTAR)$

$S2 = S2 + (OMEGA(J + 1) - OMEGA(J)) / RR1(J) / (EF(J) - GI(J) * PXSTAR) ^ 2 * GI(J)$

Next J

$PX = PXSTAR + (C1 - S1) / S2$

Loop Until $Abs(C1 - S1) < C1 / 10000$

For J = 2 To JN1 - 1

$$U(J) = EF(J) - GI(J) * PX$$

Next J

$$U(1) = U(2)$$

$$P1 = PNEW + PX * L / (IN1 - 1)$$

' SOLVE FOR OTHER VARIABLES

' START WITH TEMPERATURE

$$T1 = TWUP$$

Do

$$TW = T1$$

$$T(JN1) = TW$$

' CALCULATE T EQUATION COEFFICIENTS

For J = 2 To JN1 - 1

$$RNMN(J) = OMEGAC(J + 1) * RD * MDOTE$$

$$PCN(J) = RNMN(J) / RRC(J + 1) / (KD1 / CP1) * (RR(J + 1) - RR(J))$$

$$ANT(J) = RNMN(J) * L / (IN1 - 1) / (\text{Exp}(PCN(J)) - 1)$$

$$RSMS(J) = OMEGAC(J) * RD * MDOTE$$

$$PCS(J) = RSMS(J) / RRC(J) / (KD1 / CP1) * (RR(J) - RR(J - 1))$$

$$AST(J) = RSMS(J) * L / (IN1 - 1) * \text{Exp}(PCS(J)) / (\text{Exp}(PCS(J)) - 1)$$

$$AUT(J) = PSIEID * (OMEGAC(J + 1) - OMEGAC(J))$$

$$APT(J) = AUT(J) + AST(J) + ANT(J)$$

$$ST(J) = U(J) * PX / CP1 + D1 / CP1 * (CPV1 - CPA1) * (TUP(J) - TUP(J - 1)) / (RR(J) - RR(J - 1)) * (RR1(J) * WUP(J) - RR1(J - 1) * WUP(J - 1)) / (RR(J) - RR(J - 1))$$

Next J

'SOLVE FOR T WITH TDMA

$$AA(1) = 1$$

$$AB(1) = 0$$

$$AC(1) = 0$$

$$AA(JN1) = 0$$

For J = 2 To JN1 - 1

$$AA(J) = ANT(J) / APT(J)$$

$$AB(J) = AST(J) / APT(J)$$

$$AC(J) = (AUT(J) * TUP(J) + ST(J) * DV(J)) / APT(J)$$

Next J

$$AAD(1) = 1$$

$$ACD(1) = 0$$

For J = 2 To JN1 - 1

$$AAD(J) = AA(J) / (1 - AAD(J - 1) * AB(J))$$

$$ACD(J) = (AC(J) + ACD(J - 1) * AB(J)) / (1 - AAD(J - 1) * AB(J))$$

Next J

For J = JN1 - 1 To 2 Step -1

$$T(J) = AAD(J) * T(J + 1) + ACD(J)$$

Next J

$$T(1) = T(2)$$

If $T(JN1 - 1) < 0$ Then

$$T13 = T(JN1 - 1)$$

$$K1 = I$$

End If

' CALCULATION FOR W

$$X1 = X(1, P1, TW)$$

$$W(JN1) = X1 / (1 + X1)$$

' CALCULATE W EQUATION COEFFICIENTS

For J = 2 To JN1 - 1

$$RNMN(J) = OMEGAC(J + 1) * RD * MDOE$$

$$PCN(J) = RNMN(J) / RRC(J + 1) * ((RRC(J + 1) - RR(J)) / D1 / RR1(J) + (RR(J + 1) - RRC(J + 1)) / D1 / RR1(J + 1))$$

$$ANW(J) = RNMN(J) * L / (IN1 - 1) / (\text{Exp}(PCN(J)) - 1)$$

$$RSMS(J) = OMEGAC(J) * RD * MDOE$$

$$PCS(J) = RSMS(J) / RRC(J) * ((RRC(J) - RR(J - 1)) / D1 / RR1(J - 1) + (RR(J) - RRC(J)) / D1 / RR1(J))$$

$$ASW(J) = RSMS(J) * L / (IN1 - 1) * \text{Exp}(PCS(J)) / (\text{Exp}(PCS(J)) - 1)$$

$$AUW(J) = PSIEID * (OMEGAC(J + 1) - OMEGAC(J))$$

$$APW(J) = AUW(J) + ASW(J) + ANW(J)$$

Next J

' SOLVE FOR W WITH TDMA

$$AA(1) = 1$$

$$AB(1) = 0$$

$$AC(1) = 0$$

$$AA(JN1) = 0$$

For J = 2 To JN1 - 1

$$AA(J) = ANW(J) / APW(J)$$

$$AB(J) = ASW(J) / APW(J)$$

$$AC(J) = AUW(J) * WUP(J) / APW(J)$$

Next J

$$AAD(1) = 1$$

$$ACD(1) = 0$$

For J = 2 To JN1 - 1

$$AAD(J) = AA(J) / (1 - AAD(J - 1) * AB(J))$$

$$ACD(J) = (AC(J) + ACD(J - 1) * AB(J)) / (1 - AAD(J - 1) * AB(J))$$

Next J

For J = JN1 - 1 To 2 Step -1

$$W(J) = AAD(J) * W(J + 1) + ACD(J)$$

Next J

$$W(1) = W(2)$$

' CALCULATION FOR V VELOCITY

$$RBMB = 1 / (W(JN1) - 1) * RR1(JN1) * D1 * (W(JN1) - W(JN1 - 1)) / (RR(JN1) - RR(JN1 - 1))$$

$$V(JN1) = RBMB / RR1(JN1) / RD$$

'CALCULATE V EQUATION COEFFICIENTS

For J = 2 To JN1 - 1

$$RNMN(J) = OMEGAC(J + 1) * RD * MDOTE$$

$$PCN(J) = RNMN(J) / RRC(J + 1) / MD1 * (RR(J + 1) - RR(J))$$

$$ANV(J) = RNMN(J) * L / (IN1 - 1) / (\text{Exp}(PCN(J)) - 1)$$

$$RSMS(J) = OMEGAC(J) * RD * MDOTE$$

$$PCS(J) = RSMS(J) / RRC(J) / MD1 * (RR(J) - RR(J - 1))$$

$$ASV(J) = RSMS(J) * L / (IN1 - 1) * \text{Exp}(PCS(J)) / (\text{Exp}(PCS(J)) - 1)$$

$$AUV(J) = PSIEID * (OMEGAC(J + 1) - OMEGAC(J))$$

$$APV(J) = AUV(J) + ASV(J) + ANV(J)$$

Next J

' SOLVE FOR V WITH TDMA

$$AA(1) = 1$$

$$AB(1) = 0$$

$$AC(1) = 0$$

$$AA(JN1) = 0$$

For J = 2 To JN1 - 1

$$AA(J) = ANV(J) / APV(J)$$

$$AB(J) = ASV(J) / APV(J)$$

$$AC(J) = AUV(J) * VUP(J) / APV(J)$$

Next J

AAD(1) = 1

ACD(1) = 0

For J = 2 To JN1 - 1

AAD(J) = AA(J) / (1 - AAD(J - 1) * AB(J))

ACD(J) = (AC(J) + ACD(J - 1) * AB(J)) / (1 - AAD(J - 1) * AB(J))

Next J

For J = JN1 - 1 To 2 Step -1

V(J) = AAD(J) * V(J + 1) + ACD(J)

Next J

V(1) = 0

' CHECK FOR TW

TB = TBUP - HCONV * (TWUP - TBUP) * 6.28 * RD * L / (IN1 - 1) / MCOOL / 4180

Call FINDTW(T1, T(JN1 - 1), W(JN1 - 1), TB, MDOTB, P1, DRR)

Loop Until Abs(T1 - TW) < 1 / 100000

' UPDATE VALUES FOR NEW STEP

SUM4 = 0

SUM5 = 0

SUM6 = 0

For J = 1 To 40

SUM4 = SUM4 + 6.28 * RR(J) * (RR(J + 1) - RR(J)) * U(J) * T(J)

SUM5 = SUM5 + 6.28 * RR(J) * (RR(J + 1) - RR(J)) * W(J) * U(J)

$$\text{SUM6} = \text{SUM6} + 6.28 * \text{RR}(J) * (\text{RR}(J + 1) - \text{RR}(J)) * \text{U}(J)$$

Next J

$$\text{TBULK1} = \text{SUM4} / \text{SUM6}$$

$$\text{WBULK1} = \text{SUM5} / \text{SUM6}$$

$$\text{XBULK1} = \text{WBULK1} / (1 - \text{WBULK1})$$

For J = 1 To JN1

$$\text{RO1}(J) = \text{RO}(\text{XBULK1}, \text{P1}, \text{TBULK1})$$

Next J

$$\text{ROBULK} = \text{RO1}(1)$$

$$\text{GIOTA}(1) = 0$$

$$\text{GIOTAC}(1) = 0$$

For J = 2 To JN1

$$\text{GIOTA}(J) = \text{GIOTA}(J - 1) + \text{PSIEID} * (\text{OMEGA}(J) - \text{OMEGA}(J - 1)) / (\text{RR1}(J - 1) * \text{U}(J - 1))$$

$$\text{GIOTAC}(J) = \text{GIOTAC}(J - 1) + \text{PSIEID} * (\text{OMEGAC}(J) - \text{OMEGAC}(J - 1)) / (\text{RR1}(J - 1) * \text{U}(J - 1))$$

Next J

$$\text{RR}(1) = 0$$

$$\text{RRC}(1) = 0$$

For J = 2 To JN1 - 1

$$\text{RR}(J) = (2 * \text{GIOTA}(J)) ^ 0.5$$

$$\text{RRC}(J) = (2 * \text{GIOTAC}(J)) ^ 0.5$$

Next J

RR(JN1) = RD

RRC(JN1) = (2 * GIOTAC(JN1)) ^ 0.5

MWATER = MWATER + MDOTB * 6.28 * RD * L / (IN1 - 1)

PSIEUP = PSIED

PSIEIUP = PSIEUP

For J = 1 To JN1

TUP(J) = T(J)

UUP(J) = U(J)

VUP(J) = V(J)

WUP(J) = W(J)

Next J

PNEW = P1

TBUP = TB

TWUP = T1

DRR = RR(JN1) - RR(JN1 - 1)

'PRESENTATION OF RESULTS

If I = 500 Then

For J = 1 To JN1

Cells(11 + J, 1) = RR(J)

Cells(11 + J, 2) = U(J)

Cells(11 + J, 3) = V(J)

Cells(11 + J, 4) = W(J)

Cells(11 + J, 5) = T(J)

Next J

Elseif I = 2500 Then

For J = 1 To 41

Cells(54 + J, 1) = RR(J)

Cells(54 + J, 2) = U(J)

Cells(54 + J, 3) = V(J)

Cells(54 + J, 4) = W(J)

Cells(54 + J, 5) = T(J)

Next J

Elseif I = 5000 Then

For J = 1 To 41

Cells(97 + J, 1) = RR(J)

Cells(97 + J, 2) = U(J)

Cells(97 + J, 3) = V(J)

Cells(97 + J, 4) = W(J)

Cells(97 + J, 5) = T(J)

Next J

End If

'CALCULATION OF SGENL

SGENL(1) = 0

If $(I / 100 - \text{Int}(I / 100)) = 0$ Then

SUM1 = 0 'FOR SGENL

SUM2 = 0 'FOR SGENHT

SUM3 = 0 'FOR SGENMT

SUM4 = 0 'FOR TBULK

SUM5 = 0 'FOR WBULK

SUM6 = 0

For J = 1 To 40

X11 = WBULK1 / (1 - WBULK1)

RO11 = RO(X11, P1, TBULK1)

ROV1 = W(J) * RO11

ROG1 = (1 - W(J)) * RO11

X12 = W(J + 1) / (1 - W(J + 1))

RO12 = RO11

ROV2 = W(J + 1) * RO12

CA1 = CA(X11, T(J), P1)

CV1 = CV(X11, T(J), P1)

CC = (ROV1 / 18 + ROG1 / 29)

$$\text{SUM1} = \text{SUM1} + (\text{RR}(\text{J} + 1) - \text{RR}(\text{J})) * 6.28 * \text{RR}(\text{J}) * (\text{KD1} / (\text{T}(\text{J}) ^ 2) * ((\text{T}(\text{J} + 1) - \text{T}(\text{J})) / (\text{RR}(\text{J} + 1) - \text{RR}(\text{J}))) ^ 2 + (\text{RO11}) ^ 2 * 8314 * \text{D1} / 29 / 18 / \text{ROV1} / \text{ROG1} / \text{CC} * ((\text{ROV2} - \text{ROV1}) / (\text{RR}(\text{J} + 1) - \text{RR}(\text{J}))) ^ 2)$$

$$\text{SUM2} = \text{SUM2} + (\text{RR}(\text{J} + 1) - \text{RR}(\text{J})) * 6.28 * \text{RR}(\text{J}) * (\text{KD1} / (\text{T}(\text{J}) ^ 2) * ((\text{T}(\text{J} + 1) - \text{T}(\text{J})) / (\text{RR}(\text{J} + 1) - \text{RR}(\text{J}))) ^ 2)$$

$$\text{SUM3} = \text{SUM1} - \text{SUM2} + \text{SUM3} + (\text{RR}(\text{J} + 1) - \text{RR}(\text{J})) * 6.28 * \text{RR}(\text{J}) * \text{RO11} * \text{RO11} * 8314 * \text{D1} / 29 / 18 / \text{ROV1} / \text{ROG1} / \text{CC} * ((\text{ROV2} - \text{ROV1}) / (\text{RR}(\text{J} + 1) - \text{RR}(\text{J}))) ^ 2$$

$$\text{SUM4} = \text{SUM4} + 6.28 * \text{RR}(\text{J}) * (\text{RR}(\text{J} + 1) - \text{RR}(\text{J})) * \text{U}(\text{J}) * \text{T}(\text{J}) * \text{RO11}$$

$$\text{SUM5} = \text{SUM5} + 6.28 * \text{RR}(\text{J}) * (\text{RR}(\text{J} + 1) - \text{RR}(\text{J})) * \text{W}(\text{J}) * \text{U}(\text{J}) * \text{RO11}$$

$$\text{SUM6} = \text{SUM6} + 6.28 * \text{RR}(\text{J}) * (\text{RR}(\text{J} + 1) - \text{RR}(\text{J})) * \text{U}(\text{J}) * \text{RO11}$$

Next J

$$\text{K1} = \text{I} / 100$$

$$\text{SGENL}(\text{K1}) = \text{SUM1}$$

$$\text{SGENHT}(\text{K1}) = \text{SUM2}$$

$$\text{SGENMT}(\text{K1}) = \text{SUM3}$$

$$\text{TBULK}(\text{K1}) = \text{SUM4} / \text{SUM6}$$

$$\text{WBULK}(\text{K1}) = \text{SUM5} / \text{SUM6}$$

$$\text{NU}(\text{K1}) = 2 * \text{RD} * (\text{T}(\text{JN1} - 1) - \text{T}(\text{JN1})) / (\text{TBULK}(\text{K1}) - \text{T}(\text{JN1})) / (\text{RR}(\text{JN1}) - \text{RR}(\text{JN1} - 1))$$

$$\text{PSIEN}(\text{K1}) = \text{SGENHT}(\text{K1}) / (\text{SGENHT}(\text{K1}) + \text{SGENMT}(\text{K1}))$$

End If

$$\text{CP1} = \text{CP}(\text{XBULK1}, \text{TBULK1})$$

$$\text{MD1} = \text{MD}(\text{TBULK1}, \text{XBULK1})$$

$$\text{KD1} = \text{KD}(\text{TBULK1}, \text{XBULK1})$$

Next I

'CALCULATION OF SGEN

SUM1 = 0

For J = 2 To 50

SUM1 = SUM1 + (SGENL(J) + SGENL(J - 1)) * 0.5 * 100 * L / (IN1 - 1)

Next J

SGEN = SUM1

'PRESENTATION OF ENTROPY RESULTS

For J = 1 To 49

Cells(11 + J, 7) = 100 * L * J / (IN1 - 1)

Cells(11 + J, 8) = SGENL(J + 1)

Cells(11 + J, 9) = NU(J + 1)

Cells(11 + J, 10) = SGENHT(J + 1)

Cells(11 + J, 11) = SGENMT(J + 1)

Cells(11 + J, 12) = PSIEN(J + 1)

Cells(11 + J, 13) = TBULK(J + 1)

Cells(11 + J, 14) = TBULK(J + 1) - T(JN1)

Cells(11 + J, 15) = WBULK(J + 1) * RO11

Cells(11 + J, 16) = (WBULK(J + 1) - W(JN1)) * RO11

Next J

Cells(9, 10) = SGEN

Cells(7, 6) = TB

Cells(8, 7) = MWATER

End Sub

Function PVS(T1)

$PVS = 1000 * \text{Exp}(49.2 - 6643 / T1 - 4.522 * \text{Log}(T1))$

End Function

Function HFG(T1)

$T2 = T1 - 273.15$

$HFG = 1000 * (2503 - 2.386 * T2)$

End Function

Function X(RH, P1, T1)

$PVSAT = PVS(T1)$

$PV1 = RH * PVSAT$

$X = 0.622 * PV1 / (P1 - PV1)$

End Function

Function CP(X1, T1)

$T2 = T1 - 273.15$

$CP = 1000 * (1.0029 + 5.4 / 10^5 * T2 + X1 * (1.856 + 2 / 10^4 * T2))$

End Function

Function RO(X1, P1, T1)

$$RO = (1 + X1) * P1 / 461.56 / (0.62198 + X1) / T1$$

End Function

Function MD(T1, X1)

$$MA = 1 / 10 ^ 6 * (0.40401 + 0.074582 * T1 - 5.7171 / 10 ^ 5 * T1 ^ 2 + 2.9998 / 10 ^ 8 * T1 ^ 3 - 6.2525 / 10 ^ 12 * T1 ^ 4)$$

$$MV = 1 / 10 ^ 6 * (\text{Sqr}(T1 / 647.27) / (0.0181583 + 0.0177624 * 647.27 / T1 + 0.0105287 * (647.27 / T1) ^ 2 - 0.0036744 * (647.27 / T1) ^ 3))$$

$$XM = 1.61 * X1$$

$$MAA = 29$$

$$MVV = 18$$

$$FAV = (1 + (MA / MV) ^ 0.5 * (MVV / MAA) ^ 0.25) ^ 2 / (2 * \text{Sqr}(2)) / (1 + MAA / MVV) ^ 0.5$$

$$FVA = (1 + (MV / MA) ^ 0.5 * (MAA / MVV) ^ 0.25) ^ 2 / (2 * \text{Sqr}(2)) / (1 + MVV / MAA) ^ 0.5$$

$$MD = MA / (1 + FAV * XM) + MV / (1 + FVA / XM)$$

End Function

Function KD(T1, X1)

$$T2 = T1 - 273.15$$

$$KA = 2.43714 / 100 + 7.83035 / 100000 * T2 - 1.94021 / 10^8 * T2^2 + 2.85943 / 10^{12} * T2^3 - 2.6142 / 10^{14} * T2^4$$

$$KV = 1.74822 / 100 + 7.69127 / 10^5 * T2 - 3.23464 / 10^7 * T2^2 + 2.59524 / 10^9 * T2^3 - 3.1765 / 10^{12} * T2^4$$

$$SA = 111$$

$$SV = 961$$

$$SAV = 0.733 * \text{Sqr}(SA * SV)$$

$$XM = 1.61 * X1$$

$$MAA = 29$$

$$MVV = 18$$

$$MA = 1 / 10^6 * (0.40401 + 0.074582 * T1 - 5.7171 / 10^5 * T1^2 + 2.9998 / 10^8 * T1^3 - 6.2525 / 10^{12} * T1^4)$$

$$MV = 1 / 10^6 * (\text{Sqr}(T1 / 647.27) / (0.0181583 + 0.0177624 * 647.27 / T1 + 0.0105287 * (647.27 / T1)^2 - 0.0036744 * (647.27 / T1)^3))$$

$$BAV = (1 + SAV / T1) / (1 + SA / T1)$$

$$BVA = (1 + SAV / T1) / (1 + SV / T1)$$

$$AAV = (MA / MV) * (MVV / MAA)^{0.75} * (1 + SA / T1) / (1 + SV / T1)$$

$$AVA = (MV / MA) * (MAA / MVV)^{0.75} * (1 + SV / T1) / (1 + SA / T1)$$

$$ACAV = 0.25 * AAV^{0.5} * BAV$$

$$ACVA = 0.25 * AVA^{0.5} * BVA$$

$$KD = KA / (1 + ACAV * CM) + KV / (1 + ACVA / XM)$$

End Function

Function CPA(T1)

$$T2 = T1 - 273.15$$

$$CPA = 1000 * (1.0029 + 5.4 / 10 ^ 5 * T2)$$

End Function

Function CPV(T1)

$$T2 = T1 - 273.15$$

$$CPV = 1000 * (1.856 + 2 / 10 ^ 4 * T2)$$

End Function

Function CV(X1, T1, P1)

$$ROO = RO(X1, P1, T1)$$

$$W1 = X1 / (1 + X1)$$

$$CV = W1 * ROO / 18$$

End Function

Function CA(X1, T1, P1)

$$ROO = RO(X1, P1, T1)$$

$$A1 = 1 - X1 / (1 + X1)$$

$$CA = A1 * ROO / 29$$

End Function

Function D(P1, T1)

$$D = 1 / P1 * T1 ^ (3 / 2) * (0.26 / 10000) * (1.013 * 10 ^ 5) / (298 ^ (3 / 2))$$

End Function

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β΄

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΑΝΤΙΡΡΟΗΣ ΔΥΟ ΣΥΓΚΕΝΤΡΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ [7Α]

Σε αρκετές περιπτώσεις εσωτερικών ροών έχουμε μεταφορά θερμότητας σε εναλλάκτη αντιρροής δύο συγκεντρικών σωλήνων (CONCENTRIC TUBE ANNULUS). Το ρευστό, διέρχεται από το κενό που σχηματίζεται από τους δύο συγκεντρικούς σωλήνες, και μεταφορά θερμότητας με συναγωγή μπορεί να εμφανιστεί προς ή από τις επιφάνειες των δύο σωλήνων. Είναι δυνατόν να καθοριστούν ανεξάρτητα η ροή θερμότητας ή η θερμοκρασία, δηλαδή οι θερμικές συνθήκες, σε κάθε επιφάνεια. Σε κάθε περίπτωση η ροή θερμότητας από κάθε επιφάνεια μπορεί να υπολογιστεί με εκφράσεις της μορφής

$$q_i'' = h_i(T_{s,i} - T_m) \quad (\text{B.1})$$

$$q_o'' = h_o(T_{s,o} - T_m) \quad (\text{B.2})$$

Όπου h_i είναι ο συντελεστής συναγωγής από τον εσωτερικό σωλήνα προς το ρευστό που ρέει ανάμεσα στους δύο σωλήνες και h_o είναι ο συντελεστής συναγωγής από τον εξωτερικό σωλήνα προς το ρευστό που ρέει ανάμεσα στους δύο σωλήνες.

Έχουμε διαφορετικούς συντελεστές συναγωγής που συνδέονται με την εσωτερική και την εξωτερική επιφάνεια. Οι αντίστοιχοι αριθμοί Nusselt είναι της μορφής

$$Nu_i = \frac{h_i D_h}{k} \quad (\text{B.3})$$

$$Nu_o = \frac{h_o D_h}{k} \quad (\text{B.4})$$

Όπου για τις ανωτέρω εξισώσεις η υδραυλική διάμετρος $D_h = D_o - D_i$.

Για την περίπτωση της πλήρως ανεπτυγμένης στρωτής ροής, με τη μία επιφάνεια μονωμένη και την άλλη, σε σταθερή θερμοκρασία, οι Nu_i και Nu_o μπορούν να λαμβάνονται από τον ακόλουθο πίνακα. Σε αυτή την περίπτωση ενδιαφερόμαστε μόνο για τον συντελεστή συναγωγής που συνδέεται με την μη αδιαβατική επιφάνεια.

D_i/D_o	Nu_i	Nu_o
0	-	3.66
0.05	17.46	4.06
0.1	11.56	4.11
0.25	7.37	4.23
0.5	5.74	4.43
1	4.86	4.86

Σε συνθήκες ομοιόμορφης θερμικής ροής και στις δύο επιφάνειες, οι αριθμοί Nusselt μπορούν να υπολογιστούν από τις ακόλουθες εξισώσεις

$$Nu_i = \frac{Nu_{ii}}{1 - (q_o''/q_i'')\theta_i^*} \quad (B.5)$$

$$Nu_o = \frac{Nu_{oo}}{1 - (q_i''/q_o'')\theta_o^*} \quad (B.6)$$

Οι συντελεστές επιρροής Nu_{ii} , Nu_{oo} , θ_i^* , θ_o^* που εμφανίζονται σε αυτές τις εξισώσεις μπορούν να ληφθούν από τον ακόλουθο πίνακα

D_i/D_o	Nu_{ii}	Nu_{oo}	θ_i^*	θ_o^*
0	-	4.364	oo	0
0.05	17.81	4.792	2.18	0.0294
0.1	11.91	4.834	1.383	0.0562
0.2	8.499	4.833	0.905	0.1041
0.4	6.583	4.979	0.603	0.1823
0.6	5.912	5.099	0.473	0.2455
0.8	5.58	5.24	0.401	0.299
1	5.385	5.385	0.346	0.346

Πρέπει να έχουμε υπόψη ότι τα q_i'' και q_o'' μπορεί να είναι θετικά ή αρνητικά και αυτό εξαρτάται από το αν η θερμική ροή είναι προς ή από το ρευστό αντίστοιχα. Επιπλέον, υπάρχουν περιπτώσεις για τις οποίες οι τιμές των h_i και h_o είναι αρνητικές. Αυτά τα αποτελέσματα όταν χρησιμοποιηθούν με τις εξισώσεις B.1 και B.2 φανερώνουν τα σχετικά μεγέθη των T_s και T_m .

Για πλήρως ανεπτυγμένες τυρβώδεις ροές, οι συντελεστές επιρροής είναι συνάρτηση των αριθμών Re και Pr. Παρόλα αυτά σαν μια πρώτη προσέγγιση ο εσωτερικός και ο εξωτερικός συντελεστής συναγωγής μπορούν να θεωρηθούν ίσοι και να υπολογιστούν με την εξίσωση Dittus – Boelter.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1Α. Δρ. Δαγκαλίδης Αθανάσιος, «Αφαλάτωση Νερού», Κλαδική Μελέτη, Ιανουάριος 2009, Τράπεζα Πειραιώς.
- 2Α. Πασίσης Β. Ιωάννης, «Αφαλάτωση νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας» Μεταπτυχιακή Εργασία υποβληθείσα στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών για το Πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών «ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ», Αθήνα 2001
- 3Α. Desalination in the kingdom of Saudi Arabia: CURRENT PRACTICE AND FUTURE TRENDS Dr Ahmed Alarifi Saline Water Conversion Corporation Monday, 17 June 2013.
- 4Α. Σαχτούρη Δ. Καλλιόπη, «Μελέτη σκοπιμότητας μονάδας αφαλάτωσης με αιολική ενέργεια». Πτυχιακή Εργασία υποβληθείσα στο Τ.Ε.Ι. Κρήτης στη Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολογίας, Ηράκλειο, Ιούνιος 2008.
- 5Α. Gregory P. Thiel, “Entropy Generation Minimization of a Heat and Mass Exchanger for Use In a Humidification – Dehumidification Desalination System”, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, JUNE 2012.
- 6Α. Anil W. Date. “Introduction to Computational Fluid Dynamics”. Cambridge University Press.
- 7Α. Frank P. Incropera, David P. De Witt. “Fundamentals of Heat and Mass Transfer – Third Edition”. John Wiley & Sons
- 8Α. Κίμων Α. Αντωνόπουλος. «Υπολογιστικές Μέθοδοι Φαινομένων Μεταφοράς»
- 9Α. Zoran K. Morvay and Dusan D. Gvozdenac © John Wiley & Sons, Ltd. “Toolbox 6. THERMODYNAMIC AND TRANSPORT PROPERTIES OF MOIST AIR”.
- 10Α. Wilton Pereira da Silva, Cleide Maria Diniz Pereira da Silva e Silva, Fernando Jose de Almeida Gama, Josivanda Palmeira Gomes. Federal University of Campina Grande, Brazil. “An empiric equation for the latent heat of vaporization of moisture in bananas during its isothermal drying”

1. United Nations Development Program, "Human Development Report 2006, Beyond scarcity: power, poverty, and the global water crisis," 2006
2. World Health Organization and the United Nations Children's Fund, "Global Water Supply and Sanitation Assessment 2000 Report," 2000.
3. T. Gardner – Outlaw and R. Engelman, "Sustaining Water, Easing Scarcity: A Second Update," 1997.
4. K. Brown, "Water scarcity: Forecasting the future with spotty data," *Science*, vol. 297, no. 5583, pp. 926 – 927, 2002.
5. WWAP (World Water Assessment Programme), "The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk." Paris, UNESCO, 2012.
6. UNICEF and the World Health Organization, "Progress on Drinking Water and Sanitation: 2012 Update," 2012
7. C. K. Prahalad and A. Hammond, "Serving the world's poor, profitably," *Harvard Business Review*, September 2002.
8. M. A. Shannon, P. W. Bohn, M. Elimelech, J. G. Georgiadis, B. J. Marias, and A. M. Mayes, "Science and technology for water purification in the coming decades," *Nature*, vol. 452, pp. 301 – 310, 2008.
9. M. Elimelech and W. A. Phillip, "The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment," *Science*, vol. 333, pp. 712 – 717, 2011.
10. International Desalination Association, "IDA Desalination Yearbook 2011 – 2012," 2011.
11. G. P. Narayan, M. H. Sharqawy, and J. H. Lienhard V, "Thermodynamic analysis of humidification dehumidification desalination cycles," *Desalination and Water Treatment*, vol. 16, no. 1 -3, pp. 339 – 353, 2010.
12. G. P. Narayan, M. H. Sharqawy, E. K. Summers, J. H. Lienhard V, S. M. Zubair, and M. A. Antar, "The potential of solar – driven humidification – dehumidification desalination for small – scale decentralized water production," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 1187 – 1201, May 2010.

13. S. O. Liburd, "Solar – driven humidification dehumidification desalination for potable use in Haiti," Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2010.
14. G. P. Narayan, G. P. Thiel, M. H. Sharqawy, R. K. McGovern, and J. H. Lienhard V, "Multi – stage bubble column dehumidifier." US Patent Application No. 13/241, 907, Unpublished (filing date 23 Sept. 2011).
15. K. H. Mistry, G. P. Narayan, A. Mitsos, and J. H. L. V. "Optimization of multi-pressure humidification- dehumidification desalination using thermal vapor compression and hybridization," in Proceedings of the 21st National & 10th National ISHMT – ASME Heat and Mass Transfer Conference, December 2011.
16. K. H. Mistry, R. K. McGovern, G. P. Thiel, E. K. Summers, S. M. Zubair, J. H. Lienhard V, "Entropy generation analysis of desalination technologies," *Entropy*, vol. 13, no. 10, pp. 1829 – 1864, 2011.
17. G. P. Narayan, J. H. Lienhard V, and S. M. Zubair, "Entropy generation minimization of combined heat and mass transfer devices," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 49, no. 10, pp. 2057 – 2066, 2010.
18. G. P. Narayan, K. H. Mistry, M. H. Sharqawy, S. M. Zubair, and J. H. Lienhard V, "Energy effectiveness of simultaneous heat and mass exchange devices," *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, vol. 1, no. 2, pp. 1 – 13, 2010.
19. K. H. Mistry, J. H. Lienhard V, and S. M. Zubair, "Effect of entropy generation on the performance of humidification – dehumidification desalination cycles," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 49, no. 9, pp. 1837 – 1847, 2010.
20. K. H. Mistry, A. Mitsos, and J. H. Lienhard V, "Optimal operating conditions and configurations for humidification – dehumidification desalination cycles," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 50, no. 5, pp. 779 – 789, 2011.
21. A. P. Colburn and O. A. Hougen, "Design of cooler condensers for mixtures of vapors with noncondensing gases," *Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 26, pp. 1178 – 1182, November 1934.
22. W. Nußelt, "Die oberflächenkondensation des wasserdampfes," *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, vol. 60, pp. 541 – 546, 1916.

23. E. M. Sparrow and E. Eckert, "Effects of superheated vapor and noncondensable gases on laminar film condensation," *AIChE Journal*, vol. 7, no. 3, pp. 473 – 477, 1961.
24. W. J. Minkowycz and E. M. Sparrow, "Condensation heat transfer in the presence of noncondensables, interfacial resistance, superheating, variable properties, and diffusion," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 9, no. 10, pp. 1125 – 1144, 1966.
25. E. M. Sparrow, W. J. Minkowycz, and M. Saddy, "Forced convection condensation in the presence of noncondensables and interfacial resistance," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 10, no. 12, pp. 1829 – 1845, 1967.
26. V. E. Denny, A. F. Mills, and V. J. Jusionis, "Laminar film condensation from a steam-air mixture undergoing forced flow down a vertical surface," *Journal of Heat Transfer*, vol. 93, no. 3, pp. 297 – 304, 1971.
27. V. E. Denny, and V. J. Jusionis, "Effects of noncondensable gas and forced flow on laminar film condensation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 15, no. 2, pp. 315 – 326, 1972.
28. C. Y. Wang and C. J. Tu, "Effects of non-condensable gas on laminar film condensation in a vertical tube," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 31, no. 11, pp. 2330 – 2345, 1988.
29. T. Kageyama, P. F. Peterson, and V. E. Schrock, "Diffusion layer modeling for condensation in vertical tubes with noncondensable gases," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 141, no. 1 – 2, pp. 289 – 302, 1993.
30. H. A. Hasanein, M. S. Kazimi, and M. W. Golay, "Forced convection in – tube steam condensation in the presence of noncondensable gases," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 39, no. 13, pp. 2625 – 2639, 1996.
31. S. Z. Kuhn, V. E. Schrock, and P. F. Peterson, " An investigation of condensation from steam – gas mixtures flowing downward inside a vertical tube," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 177, no. 1 – 3, pp. 53 – 69, 1997.
32. V. D. Rao, V. M. Krishna, K. V. Sharma, and P. M. Rao, "Convective condensation of vapor in the presence of a non – condensable gas of high

- concentration in laminar flow in a vertical pipe,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, no. 25 - 26, pp. 6090 – 6101, 2008.
33. A. Bejan, *Advanced engineering thermodynamics*. John Wiley & Sons, 2006.
 34. D. Tondeur and E. Kvaalen, “Equipartition of entropy production. An optimality criterion for transfer and separation processes,” *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 26, no. 1, pp. 50 – 56, 1987.
 35. L. Onsager, “Reciprocal relations in irreversible processes. i.,” *Physical Review*, vol. 37, pp. 405 – 426, Feb 1931.
 36. L. Onsager, “Reciprocal relations in irreversible processes. ii.,” *Physical Review*, vol. 38, pp. 2265 – 2279, Dec 1931.
 37. E. Johannessen, L. Nummendam, and S. Kjeistrup, “Minimizing the entropy production in heat exchange,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, no. 13, pp. 2649 – 2654, 2002.
 38. F. Balkan, “Comparison of entropy minimization principles in heat exchange and a short – cut principle: Eotd,” *International Journal of Energy Research*, vol. 27, no. 11, pp. 1003 – 1014, 2003.
 39. J. Y. San, W. M. Worek, and Z. Lavan, “ Entropy generation in combined heat and mass transfer,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 30, no. 7, pp. 1359 – 1369, 1987.
 40. A. F. Mills, “The use of diffusion velocity in conservation equations for multicomponent gas mixtures,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 41, no. 13, pp. 1955 – 1968, 1998.
 41. A. Bejan, “General criterion for rating heat – exchanger performance,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 21, no. 5 , pp. 655 – 658, 1978.
 42. C. G. Carrington and Z. F. Sun, “Second law analysis of combined heat and mass transfer phenomena,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 34, no. 11, pp. 2767 – 2773, 1991.
 43. T. R. Marrero and E. A. Mason, “Gaseous diffusion coefficients,” *Journal of Physics and Chemical Reference Data*, vol. 1, pp. 3 – 118, 1972.
 44. W. Wagner and A. Pruß, “ The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and

- scientific use,” *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, vol. 31, no. 2, pp. 387 – 535, 2002.
45. J. Krestin, J. V. Sengers, B. Kamgar – Parsi, and J. M. H. Levelt Sengers, “Thermophysical properties of fluid H₂O,” *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, vol. 13, no. 1, pp. 175 – 183, 1984.
46. E. W. Lemmon, R. T. Jacobsen, S. G. Penoncello, and D. G. Friend, “Thermodynamic properties of air and mixtures of nitrogen, argon, and oxygen from 60 to 2000 K at pressures to 2000 MPa,” *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, vol. 29, no. 3, pp. 331 – 385, 2000.
47. S. A. Klein, *Engineering Equation Solver. F –Chart Software, LLC*.
48. J. R. Sellars, M. Tribus, and J. S. Klein, “Heat transfer to laminar flow in a round tube or flat conduit – The Graetz problem extended,” *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, vol. 78, pp. 441 – 448, 1956.
49. R. Manohar, “Analysis of laminar – flow heat transfer in the entrance region of circular tubes,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 12, no. 1, pp. 15 – 22, 1969.
50. R. W. Hornbeck, “An all- numerical method for heat transfer in the inlet of a tube,” No. 65-WA/HT-36, *American Society of Mechanical Engineers Winter Annual Meeting*, 1965.
51. R. K. Shah and L. London, *Advances in Heat Transfer Supplement 1: Laminar Flow Forced Convection in Ducts*. Academic Press, Inc., 1978
52. S. W. Churchill and H. Ozoe, “Correlations for laminar forced convection in flow over an isothermal flat plate and in developing and fully developed flow in an isothermal tube,” *Journal of Heat Transfer*, vol. 95, no. 3, pp. 416 – 419, 1973.
53. J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, *A Heat Transfer Textbook*. Dover Publications, Inc., 4th ed., 2011.
54. A. F. Mills, *Mass Transfer*, Prentice Hall, 1st ed., May 2001.
55. R. K. McGovern, G. P. Thiel, G. P. Narayan, S. M. Zubair, and J. H. Lienhard V, “Evaluation of the performance limits of humidification dehumidification desalination systems via a saturation curve analysis,” Under review.

56. G. P. Narayan, K. Chehayeb, R. K. McGovern, G. P. Thiel, S. M. Zubair, and J. H. Lienhard V, "Thermodynamic balancing of the humidification dehumidification desalination system by mass extraction and injection." Under review.
57. J. A. Miller, "Numerical balancing in a humidification dehumidification desalination system," Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2011.