



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΕΧΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ**

υπό  
**ΚΑΤΣΕΛΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ**  
**ΤΣΙΓΚΟΥ ΙΣΙΔΩΡΟΥ**  
**ΦΩΤΗ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ**

**Διπλωματική Εργασία**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για  
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2020





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΕΧΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ**

υπό  
**ΚΑΤΣΕΛΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ  
ΤΣΙΓΚΟΥ ΙΣΙΔΩΡΟΥ  
ΦΩΤΗ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ**

**Διπλωματική Εργασία**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για  
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2020

© 2020 Κατσέλης Κωνσταντίνος, Τσίγκος Ισίδωρος, Φώτης Δημήτριος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Μποντόζογλου Βασίλειος  
(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Πελεκάσης Νικόλαος  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ειλικρινείς ευχαριστίες μας στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μας, Καθηγητή κ. Μποντόζογλου Βασίλειο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας μας.

Επίσης, είμαστε ευγνώμονες στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μας, Καθηγητές κκ. Ανδρίτσο Νικόλαο και Πελεκάση Νικόλαο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μας και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Τέλος, είμαστε ευγνώμονες στους γονείς και τους φίλους μας, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>Κεφάλαιο 1</b> .....	11
Εισαγωγή .....	11
<b>Κεφάλαιο 2</b> .....	14
Ανάπτυξη Σχεδιασμός Διεργασιών .....	14
2.1 Διαδικασία Σχεδιασμού.....	14
2.1.1 Τύποι Σχεδιασμού .....	14
2.1.2 Έρευνα Εφικτότητας.....	15
2.1.3 Ανάπτυξη Διεργασίας .....	16
2.1.4 Σχεδιασμός.....	17
2.1.5 Διαγράμματα Ροής .....	18
2.2 Σύγκριση Διαφορετικών Διαδικασιών .....	19
2.3 Περιβάλλον και Διάταξη-Τοποθεσία Εργοστασίου.....	23
2.3.1 Περιβάλλον .....	23
2.3.2 Τοποθεσία-Διάταξη Εργοστασίου .....	26
<b>Κεφάλαιο 3</b> .....	29
Υπολογισμός Κόστους-Οικονομικά Κριτήρια .....	29
3.1 Επένδυση κεφαλαίου-Υπολογισμός Επένδυσης Κεφαλαίου .....	29
3.1.1 Άμεσα-Έμμεσα Κόστη .....	29
3.1.2 Τύποι Υπολογισμού Κόστους Κεφαλαίου.....	32
3.1.3 Δείκτες Κόστους .....	34
3.1.4 Τύποι Σχεδιασμού .....	35
3.2 Μέθοδοι για τον Υπολογισμό της Επένδυσης Κεφαλαίου .....	38
3.3 Υπολογισμός Ολικού Κόστους Παραγωγής .....	41
<b>Κεφάλαιο 4</b> .....	46
Εξοπλισμός Μεταφοράς και Επεξεργασίας Υλικών .....	46
4.1 Τριβή .....	46
4.2 Σωληνώσεις.....	48
4.2.1 Γενικά για τις Σωληνώσεις και τα Εξαρτήματα .....	48

4.2.2 Σχεδιασμός των συστημάτων σωληνώσεων.....	51
4.2.3 Μέγεθος Σωληνώσεων και Βέλτιστη Διάμετρος.....	52
4.2.4 Κόστος Σωληνώσεων .....	53
4.3 Αντλίες .....	54
4.3.1 Ιστορική Ανασκόπηση.....	54
4.3.2 Βασικές Ένοιες .....	55
4.3.3 Τύποι Αντλιών .....	57
4.3.4 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Επιλογή Αντλίας .....	64
4.3.5 Παλινδρομικές Αντλίες.....	65
4.3.6 Περιτροφικές Αντλίες Θετικής Εκτόπισης.....	68
4.3.7 Περιτροφικές Φυγοκεντρικές Αντλίες.....	69
4.3.8 Συστήματα Εκτόπισης Αέρα.....	71
4.3.9 Συμπιεστές Αερίων .....	74
4.4 Όργανα Μέτρησης της Ροής.....	80
4.5 Κοστολόγιο Συσκευών Άντλισης .....	85
<b>Κεφάλαιο 5.....</b>	<b>93</b>
Εξοπλισμός Μεταφοράς Θερμότητας Σχεδιασμός και Κόστος .....	93
5.1 Βασική Θεωρία Μεταφοράς Θερμότητας .....	94
5.1.1 Αγωγή .....	94
5.1.2 Συναγωγή.....	95
5.1.3 Ακτινοβολία .....	95
5.2 Ολικοί Συντελεστές Μεταφοράς Θερμότητας.....	98
5.3 Μέση Διαφορά Θερμοκρασίας που δρα ως Κινητήρια Δύναμη ..	101
5.3.1 Σταθερός Συντελεστής Μεταφοράς θερμότητας .....	101
5.3.2 Συντελεστές Διόρθωσης για Εναλλάκτες Πολύπλοκης Γεωμετρίας .....	103
5.3.3 Μεταβλητός Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας .....	105
5.4 Υπολογισμός Συντελεστών Μεταφοράς Θερμότητας .....	105
5.4.1 Συντελεστές Μεταφοράς θερμότητας για Ρευστά σε Σωλήνες και Αυλούς .....	106



5.4.2 Συντελεστές Μεταφοράς θερμότητας για Ρευστά που Ρέουν έξω από Σωλήνες και Αυλούς.....	108
5.4.3 Συντελεστές Μεταφοράς Θερμότητας για Διάφορες Περιπτώσεις .. .....	109
5.5 Θεωρήσεις κατά την Επιλογή των Συσκευών Μεταφοράς Θερμότητας.....	112
5.5.1 Μέγεθος και Βήμα Αυλών.....	112
5.5.2 Μέγεθος Κελύφους .....	114
5.5.3 Θερμικές Καταπονήσεις .....	114
5.5.4 Καθαρισμός και Συντήρηση .....	116
5.5.5 Ανακλαστήρες.....	116
5.5.6 Ταχύτητες και Θέση των Ρευστών .....	118
5.5.7 Ανενεργή Επιφάνεια .....	118
5.5.8 Χρησιμοποίηση του Νερού στους Εναλλάκτες Θερμότητας ....	119
5.5.9 Χρήση του Υδρατμού στους Εναλλάκτες Θερμότητας.....	120
5.6 Κόστη Εναλλακτών Θερμότητας Ανάλογα με το Είδος τους .....	121
5.6.1 Μαθηματικό Πρότυπο Ψυκτήρα.....	122
5.6.2 Μαθηματικό Πρότυπο Θερμαντήρα .....	127
5.6.3 Παραδείγματα Εφαρμογής.....	131
<b>Κεφάλαιο 6</b> .....	140
Εξοπλισμός Μεταφοράς Μάζας Σχεδιασμός και Κόστος.....	140
6.1 Βασικές Ένοιες και Ορισμοί .....	140
6.2 Συσκευές Επαφής Πεπερασμένων Βαθμίδων .....	141
6.2.1 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα .....	144
6.2.2 Βασικοί Παράγοντες Σχεδιασμού.....	145
6.2.3 Μέγιστες Επιτρεπόμενες Ταχύτητες Ατμού .....	146
6.2.4 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Απόδοση των Δίσκων και της Στήλης .....	148
6.2.5 Πτώση Πίεσης .....	150

6.3 Συσκευές Συνεχούς Επαφής-Πύργοι με Πληρωτικό Υλικό.....	158
6.3.1 Χαρακτηριστικά Είδη Πληρωτικών Υλικών .....	159
6.3.2 Πτώση Πίεσης στις Συσκευές Συνεχούς Επαφής .....	166
6.3.3 Μέγιστες Επιτρεπόμενες Ταχύτητες Ατμου .....	171
6.4 Σύγκριση Πύργων με Δίσκους και Πύργων με Πληρωτικό Υλικό	172
6.5 Εκτίμηση Κόστους Εξοπλισμού.....	175
6.5.1 Εκτίμηση Κόστους σε Συσκευές Βαθμίδων Επαφής .....	175
6.5.2 Εκτίμηση Κόστους σε Συσκευές Συνεχούς Επαφής.....	179
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>181</b>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γεγονός ότι από τις μέρες της Βιομηχανικής Επανάστασης η βιομηχανία αποτελεί κύριο τομέα παραγωγής και εργασίας στις ευρωπαϊκές και βορειοαμερικανικές χώρες. Η οικονομική και πολιτική ισχύς κάθε χώρας επηρεάζεται καθοριστικά από το μέγεθος και τον όγκο της βιομηχανικής της παραγωγής. Άλλωστε, το ένα τρίτο της παγκόσμιας οικονομικής παραγωγής προέρχεται από τις κατασκευαστικές βιομηχανίες. Επιπλέον, για να αντιληφθούμε τη σημασία της βιομηχανίας από μία κοινωνική σκοπιά, αρκεί να παρατηρήσουμε τόσο τον όγκο των προϊόντων που καταναλώνουμε και παράγεται σε βιομηχανική κλίμακα, όσο και τον αριθμό των ανθρώπων που απασχολούνται στον τομέα αυτό. Συνεπώς, ο σχεδιασμός μίας παραγωγικής μονάδας αποτελεί εργασιακό αντικείμενο για ένα μεγάλο κομμάτι των μηχανικών παγκοσμίως.

Σκοπός της εργασίας αυτής, έχοντας ως επίκεντρο ένα χημικό εργοστάσιο, είναι αρχικά η ανάλυση των παραγόντων που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν για τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός εργοστασίου. Δευτερευόντως, γίνεται εκτενέστερη ανάλυση των κύριων συσκευών που συνθέτουν αυτές τις μονάδες μέσω βιβλιογραφικών δεδομένων που αφορούν τον τρόπο λειτουργίας αλλά και επιλογής των συσκευών ανάλογα με τα δεδομένα και τους περιορισμούς που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε σε κάθε διαφορετική περίπτωση.

Το Κεφάλαιο 2 αφορά τη διαδικασία που ακολουθείται για το σχεδιασμό μίας μονάδας, τους τύπους σχεδιασμού και την έρευνα εφικτότητας που γίνεται, την ανάπτυξη της διεργασίας την οποία θα πραγματοποιεί η μονάδα, τα διαγράμματα ροής που απεικονίζουν τη διεργασία και τον εξοπλισμό που απαιτείται για τη διεργασία που επιλέχθηκε. Γίνεται αναφορά στους παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία του σχεδιασμού και ανάλυση της

περιβαλλοντικής προστασίας και της τοποθεσίας του εργοστασίου ως πολύ σημαντικών παραγόντων που πρέπει να δοθεί επιπλέον βαρύτητα.

Στο Κεφάλαιο 3 εισάγονται δεδομένα κόστους, περιγράφονται δηλαδή οι οικονομικές μελέτες που χρειάζεται να γίνουν όταν ένας μηχανικός προετοιμάζει εκτιμήσεις για το κόστος της επένδυσης κεφαλαίου ή το ολικό κόστος προϊόντος για μια καινούρια επιχείρηση. Εισάγονται σαν έννοια οι δείκτες κόστους για την αποτελεσματική προσαρμογή στα ήδη υπάρχοντα δεδομένα από την πλευρά του χρόνου και της κλίμακας μεγέθους με σκοπό τον καλύτερο δυνατό υπολογισμό της επένδυσης κεφαλαίου. Επίσης γίνεται αναφορά και ανάλυση της έννοιας του ολικού κόστους παραγωγής, μία έννοια που «στεγάζει» την απαιτούμενη επένδυση κεφαλαίου και τον υπολογισμό του κόστους για τη λειτουργία της μονάδας και την πώληση των προϊόντων.

Στο Κεφάλαιο 4 ξεκινά η ανάλυση των σημαντικών συσκευών που συνθέτουν μία διάταξη παραγωγής με τον εξοπλισμό μεταφοράς και επεξεργασίας υλικών. Αρχικά γίνονται σαφείς οι επιδράσεις της τριβής και η σημασία τους σε διεργασίες ροής. Έπειτα αναλύονται οι σωληνώσεις ως προς την αντοχή τους, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους, τα βοηθητικά τους εξαρτήματα, τον σχεδιασμό τους, το κόστος τους και την ονομαστική τους διάμετρο. Οι αντλίες είναι το επόμενο σκέλος του εξοπλισμού που εξετάζεται. Γίνεται η κατηγοριοποίησή τους και περιγράφονται οι κυριότεροι τύποι τους καθώς και οι παράγοντες που κρίνουν ποια προτιμάται στην κάθε περίπτωση. Ακολουθεί μία αναφορά στα όργανα μέτρησης της ροής και το κεφάλαιο κλείνει με μία διεξοδική παρουσίαση των δεδομένων κόστους για τις συσκευές άντλησης.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο μεταβαίνουμε στον εξοπλισμό μεταφοράς θερμότητας. Ξεκινώντας, επεξηγούνται οι τρόποι με τους οποίους μεταδίδεται η θερμότητα και πλαισιώνονται από σημαντικές σχέσεις. Στη συνέχεια εισάγεται η έννοια του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και αφού γίνει αναφορά του ολικού συντελεστή, οι επιμέρους συντελεστές διαχωρίζονται μεταξύ τους και υπολογίζονται ανάλογα με το που λαμβάνει χώρα η μεταφορά. Παρακάτω

παρατίθενται οι παράγοντες που οδηγούν στην επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται μία αναφορά κοστολογικού χαρακτήρα με χρήση βοηθητικών παραδειγμάτων.

Το Κεφάλαιο 6 έχει ως κεντρικό άξονα τον εξοπλισμό μεταφοράς μάζας με το εισαγωγικό σκέλος να περιγράφει τη διεργασία αυτή. Γίνεται η γενική κατηγοριοποίηση ανάμεσα σε συσκευές βαθμίδων επαφής και συσκευές συνεχούς επαφής και ξεκινά η ανάλυση των πρώτων. Έπειτα παρατίθενται αναφορές σχετικά με τον επιπλέον διαχωρισμό τους, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, τους βασικούς παράγοντες σχεδιασμού, τις επιτρεπόμενες ταχύτητες ατμού, τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή τους και την πτώση πίεσης. Μεταφερόμενοι στις συσκευές συνεχούς επαφής αναλύονται εκτενώς τα χρησιμοποιούμενα πληρωτικά υλικά καθώς και η πτώση πίεσης και η επιτρεπόμενη ταχύτητα ατμού σε παραλληλισμό με τις συσκευές πεπερασμένων βαθμίδων. Ο παραλληλισμός αυτός οδηγεί σε μία σύγκριση μεταξύ των δύο και κλείνοντας γίνεται μία ανάλυση κόστους μέσω παραδειγμάτων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΑΝΑΠΤΥΞΗ-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

#### 2.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Η ανάπτυξη ενός σχεδιασμού ξεκινάει πάντα με μια αρχική ιδέα ή σχέδιο. Αυτή η αρχική ιδέα πρέπει να παρουσιασθεί όσο το δυνατόν πιο καθαρά και περιεκτικά προκειμένου να οριστεί ο σκοπός του έργου. Μαζί με την αρχική ιδέα πρέπει να παρουσιασθούν επίσης οι γενικές προδιαγραφές και τα εργαστηριακά δεδομένα ή τα δεδομένα χημικής μηχανικής.

##### 2.1.1 ΤΥΠΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Σύμφωνα με τους Peters και Timmerhaus οι μέθοδοι για την εκτέλεση ενός σχεδιαστικού έργου μπορούν να διαχωρισθούν στις παρακάτω κατηγορίες, ανάλογα με την ακρίβεια και λεπτομέρεια που απαιτούν:

1. Προκαταρκτικός σχεδιασμός ή σχεδιασμός με γρήγορους υπολογισμούς.
2. Λεπτομερής σχεδιασμός
3. Τελικός σχεδιασμός

Οι προκαταρκτικοί σχεδιασμοί χρησιμοποιούνται συνήθως ως η βάση για να καθορισθεί εάν θα πρέπει να γίνει περαιτέρω εργασία σε μια προτεινόμενη διεργασία. Αν τα αποτελέσματα του προκαταρκτικού σχεδιασμού δείξουν ότι δικαιολογείται περαιτέρω εργασία, τότε θα πρέπει να αναπτυχθεί ένας λεπτομερής σχεδιασμός. Όταν ο σχεδιασμός λεπτομερούς υπολογισμού υποδείξει ότι το προτεινόμενο έργο μπορεί να έχει εμπορική επιτυχία, το τελευταίο βήμα που πρέπει να γίνει πριν ξεκινήσουν τα κατασκευαστικά σχέδια είναι η προετοιμασία ενός τελικού σχεδιασμού.

## 2.1.2 ΕΡΕΥΝΑ ΕΦΙΚΤΟΤΗΤΑΣ

Πριν γίνει οποιαδήποτε λεπτομερής εργασία στο σχεδιασμό, θα πρέπει να εξετασθούν οι τεχνικοί και οι οικονομικοί παράγοντες της προτεινόμενης διαδικασίας. Πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι ποικίλες αντιδράσεις και φυσικές διεργασίες που παίρνουν μέρος, μαζί με τις υπάρχουσες και μελλοντικές συνθήκες αγοράς για το συγκεκριμένο προϊόν. Μια αρχική έρευνα αυτού του τύπου προσφέρει μια ένδειξη της πιθανής επιτυχίας του έργου και δείχνει επίσης ποιες επιπρόσθετες πληροφορίες πιθανόν να χρειασθούν για να γίνει μια ολοκληρωμένη εκτίμηση. Ακολουθεί μια λίστα παραγόντων που θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν σε μια έρευνα εφικτότητας.

1. Πρώτες ύλες (διαθεσιμότητα, ποσότητα, ποιότητα, κόστος)
2. Θερμοδυναμική και κινητική των χημικών αντιδράσεων που παίρνουν μέρος (ισορροπία, αποδόσεις, ρυθμοί, βέλτιστες συνθήκες).
3. Εγκαταστάσεις και εξοπλισμός που διατίθενται σήμερα.
4. Εγκαταστάσεις και εξοπλισμός που θα πρέπει να αγοραστούν,
5. Υπολογισμός των κόστους παραγωγής και της ολικής επένδυσης.
6. Κέρδη (πιθανά και μέγιστα, ανά μονάδα προϊόντος και ανά έτος, απόδοση της επένδυσης).
7. Κατασκευαστικά υλικά.
8. Παράγοντες ασφαλείας.
9. Αγορά (παρούσα και μελλοντική προσφορά και ζήτηση, παρούσες χρήσεις, νέες χρήσεις, υπάρχουσες αγοραστικές συνήθειες, διακύμανση τιμών προϊόντων και παραπροϊόντων, χαρακτήρας, τοποθεσία και αριθμός των πιθανών πελατών).
10. Ανταγωνισμός (στατιστικά παραγωγής, σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων παραγωγής, προδιαγραφές προϊόντων ανταγωνιστών).

- 11.Ιδιότητες των προϊόντων (χημικές και φυσικές ιδιότητες, προδιαγραφές, προσμίξεις, επιδράσεις αποθήκευσης).
- 12.Πωλήσεις και υπηρεσίες πωλήσεων (μέθοδος πώλησης και διανομής, απαιτήσεις διαφήμισης, απαιτούμενες τεχνικές υπηρεσίες).
- 13.Περιορισμοί φόρτωσης και δεξαμενές.
- 14.Τοποθεσία εργοστασίου.
- 15.Πατέντες και νομικοί περιορισμοί.

### 2.1.3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σε πολλές περιπτώσεις, η προκαταρκτική έρευνα εφικτότητας φανερώνει ότι χρειάζονται και άλλες πληροφορίες από έρευνες, εργαστήρια, ή πιλοτικές μονάδες και θα πρέπει να τεθεί σε λειτουργία ένα πρόγραμμα για να επιτευχθεί αυτή η πληροφόρηση. Προκειμένου να συλλεγούν ακριβείς σχεδιαστικές πληροφορίες είναι συνήθως επιθυμητή η ανάπτυξη της διαδικασίας σε μια πιλοτική μονάδα ή σε ημιβιομηχανικής κλίμακας μονάδα. Μπορούν να συλλεγούν αξιολογες πληροφορίες για τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας, και μπορούν να εξετασθούν οι συνθήκες διεργασίας για να δώσουν πληροφορίες για την μεταβολή της θερμοκρασίας και της πίεσης, για τις αποδόσεις, τους ρυθμούς, την ποιότητα πρώτων υλών και προϊόντων, τα πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα της ασυνεχούς λειτουργίας σε σχέση με τη συνεχή, τα κατασκευαστικά υλικά, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά και άλλες μεταβλητές σχεδιασμού.



## 2.1.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Αν υπάρχουν διαθέσιμες αρκετές πληροφορίες, θα πρέπει να αναπτυχθεί ένα αρχικό σχέδιο, σε συνδυασμό με την αρχική έρευνα εφικτότητα (πραγμάτωσης). Οι προδιαγραφές του εξοπλισμού δίνονται περιληπτικά με την μορφή πινάκων και περιλαμβάνονται στην τελική αναφορά σχεδιασμού. Οι πίνακες αυτοί συνήθως συμπεριλαμβάνουν τα ακόλουθα:

1. Στήλες (απόσταξη). Επιπρόσθετα με τον αριθμό των δίσκων και των συνθηκών λειτουργίας είναι επίσης απαραίτητο να προσδιορισθεί και η διάμετρος της στήλης, τα υλικά κατασκευής, η διάταξη του δίσκου, κ.λπ.
2. Δοχεία. Επιπρόσθετα με το μέγεθος, το οποίο υπαγορεύεται συχνά απ' τον επιθυμητό χρόνο κατακράτησης, θα πρέπει να προσδιορισθούν τα υλικά κατασκευής και οποιοδήποτε πληρωτικό υλικό ή ανακλαστήρες.
3. Αντιδραστήρες. Θα πρέπει να προσδιορισθούν ο τύπος και το μέγεθος του καταλύτη, η διάμετρος και το πάχος της κλίνης, ο εξοπλισμός για την ανταλλαγή θερμότητας, οι ρυθμίσεις κύκλου και αναγέννησης, τα υλικά κατασκευής, κ.λπ.
4. Εναλλάκτες θερμότητας και φούρνοι. Οι κατασκευαστές συνήθως διαθέτουν στοιχεία για το φορτίο της διορθωμένης μέσης λογαριθμικής διαφοράς θερμοκρασίας, το ποσοστό του υγρού που εξατμίζεται, την επιθυμητή πτώση πίεσης και τα υλικά κατασκευής.
5. Αντλίες και συμπιεστές. Προσδιορισμός του τύπου, των απαιτήσεων σε ισχύ, της διαφοράς πίεσης, των ειδικών βαρών, του ιξώδους και των πιέσεων λειτουργίας.
6. Όργανα. Καθορισμός λειτουργίας και οποιασδήποτε συγκεκριμένης απαίτησης.
7. Ειδικός εξοπλισμός. Προδιαγραφές των μηχανικών διαχωριστών, των συσκευών ανάμιξης, των ξηραντήρων, κ.λπ.

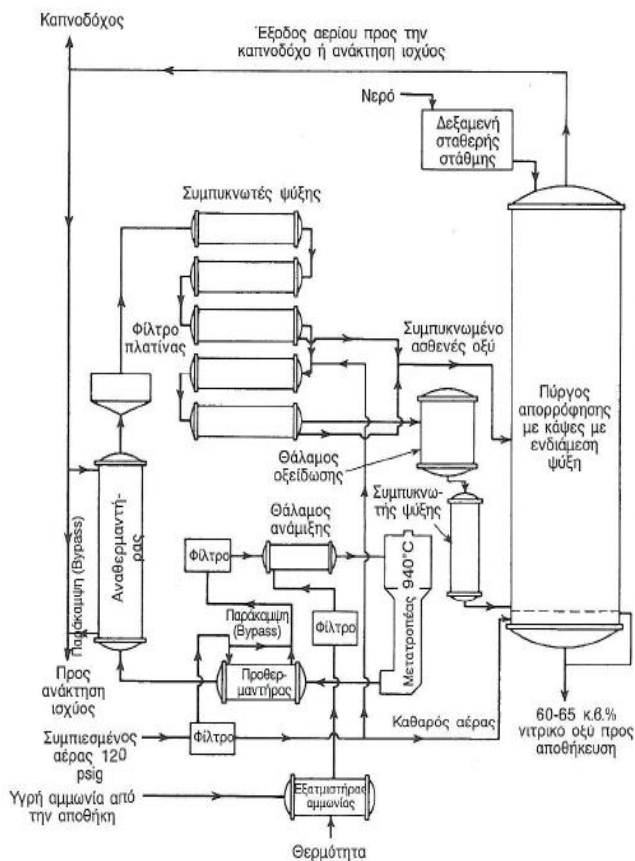
Τα ανωτέρω δεν θεωρούνται ένας πλήρης κατάλογος ελέγχου, αλλά αποτελούν περισσότερο ένα παράδειγμα του τύπου της αναφοράς που θα χρειασθεί. Η επιλογή των υλικών, οι ρυθμοί ροής, οι συνθήκες των ρευμάτων, η θερμοκρασία, η πίεση και η σύσταση κάθε ρεύματος της διεργασίας έχουν άμεση σχέση με το σχεδιασμό και την επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού.

## 2.1.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΡΟΗΣ

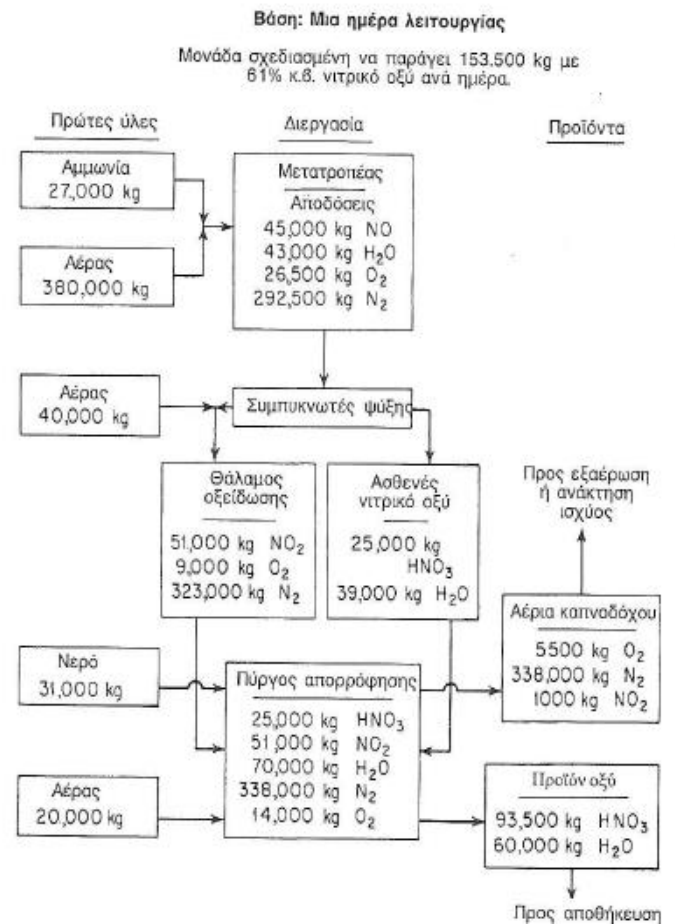
Ο μηχανικός χρησιμοποιεί διάγραμμα ροής για να δείξει την αλληλουχία του εξοπλισμού και των λειτουργικών μονάδων στην τελική διαδικασία, να απλοποιήσει την απεικόνιση των διεργασιών παραγωγής και να παρουσιάσει τις ποσότητες των υλικών και της ενέργειας που μεταφέρεται. Τα διαγράμματα αυτά μπορούν να χωρισθούν σε τρεις γενικούς τύπους:

- 1) Ποιοτικά
- 2) Ποσοτικά
- 3) Συνδυασμένα - Λεπτομερή.

Ένα ποιοτικό διάγραμμα ροής παρουσιάζει τη ροή των υλικών, τις βασικές χημικές διεργασίες, τον απαραίτητο εξοπλισμό και τις ειδικές πληροφορίες για τις θερμοκρασίες και πιέσεις λειτουργίας. Ένα ποσοτικό διάγραμμα ροής παρουσιάζει τις ποσότητες των υλικών που θα χρειαστούν για την διεργασία. Ένα παράδειγμα ποιοτικού διαγράμματος ροής για την παραγωγή νιτρικού οξέος παρουσιάζεται στο Σχ. 2.1. Το Σχ. 2.2 παρουσιάζει ένα ποσοτικά διάγραμμα ροής για την ίδια διαδικασία. Τα προκαταρκτικά διαγράμματα ροής γίνονται κατά τη διάρκεια των αρχικών φάσεων του σχεδιασμού. Καθώς ο σχεδιασμός προχωρεί προς την ολοκλήρωση, προκύπτουν λεπτομερείς πληροφορίες όσον αφορά στις ποσότητες ροής και τις προδιαγραφές του εξοπλισμού και μπορούν να ετοιμαστούν λεπτομερή διαγράμματα ροής.



**ΣΧΗΜΑ 2.1:** Ποιοτικό διάγραμμα ροής για την παρασκευή νιτρικού οξέος με διαδικασίας οξείδωσης αμμωνίας.



**ΣΧΗΜΑ 2.2:** Ποσοτικό διάγραμμα ροής για την παρασκευή νιτρικού οξέος με διαδικασίας οξείδωσης αμμωνίας.

## 2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

Στην πορεία μιας διαδικασίας σχεδιασμού είναι απαραίτητο να προσδιορισθεί η πιο κατάλληλη διαδικασία για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος. Πιθανόν να υπάρχουν ποικίλες μέθοδοι για την παραγωγή του ίδιου προϊόντος, οπότε θα πρέπει να συγκριθούν διάφορες διαδικασίες, προκειμένου να επιλεγεί η πιο κατάλληλη για τις υπάρχουσες συνθήκες.

Η σύγκριση μπορεί να γίνει μέσω της ανάπτυξης ολοκληρωμένων σχεδίων. Παρόλα αυτά σε πολλές περιπτώσεις όλες οι πιθανές διαδικασίες, εκτός από

μια ή δύο, μπορούν να απορριφθούν με μια ισορροπημένη σύγκριση των βασικών μεταβλητών στοιχείων και πιθανόν να μην χρειάζονται λεπτομερείς υπολογισμοί για κάθε διαδικασία. Για μια τέτοιου είδους σύγκριση θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη τα ακόλουθα:

### **1. Τεχνικοί παράγοντες**

- α. Ενελιξία διεργασίας
- β. Συνεχής λειτουργία
- γ. Σχετικές ειδικές ρυθμίσεις
- δ. Εμπορικές αποδόσεις
- ε. Εγγενείς τεχνικές δυσκολίες
- στ. Απαιτήσεις σε ενέργεια
- ζ. Απαιτούμενα ειδικά βοηθητικά εξαρτήματα
- η. Πιθανότητα μελλοντικής εξέλιξης
- θ. Πιθανοί κίνδυνοι υγείας και ασφαλείας

### **2. Πρώτες ύλες**

- α. Παρούσα κατ μέλλουσα διαθεσιμότητα
- β. Απαιτούμενη διαδικασία
- γ. Απαιτήσεις σε αποθήκευση
- δ. Προβλήματα διαχείρισης υλικών

### **3. Απόβλητα και παραπροϊόντα**

- α. Παραγόμενη ποσότητα
- β. Αξία
- γ. Πιθανές αγορές και χρήσεις
- δ. Τρόπος απόρριψης
- ε. Περιβαλλοντικές Θεωρήσεις

**4. Εξοπλισμός**

- α. Διαθεσιμότητα ,
- β. Κατασκευαστικά υλικά
- γ. Αρχικό κόστος
- δ. Κόστος συντήρησης και εγκατάστασης
- ε. Απαιτήσεις σε αντικατάσταση
- στ. Ειδικά σχέδια

**5. Τοποθεσία εργοστασίου**

- α. Έκταση της απαιτούμενης γης
- β. Δυνατότητες μεταφοράς
- γ. Προσέγγιση σε αγορές και πηγές πρώτων υλών
- δ. Διαθεσιμότητα εγκαταστάσεων υπηρεσιών και ενέργειας .
- ε. Διαθεσιμότητα εργατικού δυναμικού
- στ. Κλίμα
- ζ. Νομικοί περιορισμοί κατ φόροι

**6. Κόστος**

- α. Πρώτες ύλες
- β. Ενέργεια
- γ. Υποτίμηση
- δ. Άλλες πάγιες χρεώσεις
- ε. Διεργασία και άλλα έξοδα
- στ. Ειδικές απαιτήσεις ειδικού προσωπικού
- ζ. Οικόπεδο
- η. Πατέντες
- θ. Περιβαλλοντικοί έλεγχοι

**7. Χρονικός παράγοντας**

- α. Ημερομηνία ολοκλήρωσης προγράμματος
- β. Απαιτούμενη ανάπτυξη διεργασίας
- γ. Διαχρονικότητα αγοράς
- δ. Αξία χρημάτων

**8.Μελέτη διαδικασίας**

- α. Διαθέσιμη τεχνολογία
- β. Πρώτες ύλες κοινές με άλλες διεργασίες
- γ. Συμβατότητα του προϊόντος μέσα στην εταιρία
- δ. Γενικοί στόχοι της εταιρίας

## 2.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗ-ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟΥ

Η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου σχεδιασμού εργοστασίου περιλαμβάνει τη μελέτη πολλών διαφορετικών θεμάτων. Η ολική οικονομική εικόνα συνήθως καθορίζει εάν ο προτεινόμενος σχεδιασμός θα λάβει την έγκριση της διοίκησης ή όχι. Παρ'όλα αυτά, η εφαρμογή αρχών της μηχανικής στο σχεδιασμό τέτοιων εγκαταστάσεων με ασφαλή και περιβαλλοντικά αποδεκτό τρόπο μαζί με κάποιες γενικές σχεδιαστικές αντιλήψεις θα καθορίσουν τελικά εάν θα επιτευχθούν αυτοί οι οικονομικοί στόχοι. Πριν αναπτυχθεί ο σχεδιασμός μιας μονάδας και πριν γίνουν οι σχετικοί οικονομικοί υπολογισμοί θα πρέπει να μελετηθεί η ολική εικόνα των ποικίλων λειτουργιών που σχετίζονται με τον τελικό σχεδιασμό τον εργοστασίου. Θα πρέπει να δοθεί έμφαση σε θέματα υγείας, ασφάλειας, πρόληψης απωλειών και ιδιαίτερα σε θέματα που αφορούν τόσο τη τοποθεσία και τη διάταξη του εργοστασίου όσο και το περιβάλλον.

### 2.3.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

#### ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

Λόγω του μεγάλου ενδιαφέροντος για το συνεχή υποβιβασμό τον περιβάλλοντος, η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency—EPA) αναθεωρεί συστηματικά πολιτικές και κανονισμούς χρησιμοποιώντας όλο και αυστηρότερα κριτήρια. Η EPA έχει ενθαρρύνει κρατικές και τοπικές αρχές καθώς και βιομηχανίες να λάβουν έναν πιο ενεργό ρόλο στα περιβαλλοντικά θέματα. Κάποια από τα βασικά θέματα περιλαμβάνουν τη διάθεση αποβλήτων, επικίνδυνων και μη, τον έλεγχο της εκροής των υδατικών αποβλήτων και του νερού της βροχής και τον έλεγχο των εκπομπών των υδρογονανθράκων στην ατμόσφαιρα. Η EPA επίσης ενθαρρύνει τις εταιρίες να διενεργούν περιβαλλοντικούς ελέγχους.

### ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Η ανάπτυξη ενός συστήματος ελέγχου της ρύπανσης περιλαμβάνει μια μηχανική εκτίμηση των ποικίλων παραγόντων οι οποίοι σχετίζονται με ένα ολόκληρο σύστημα. Οι παράγοντες αυτοί συμπεριλαμβάνουν την έρευνα για την εύρεση των πηγών ρύπανσης, τον καθαρισμό των ιδιοτήτων των ρυπαντικών εκπομπών, το σχεδιασμό των συστημάτων συλλογής και μεταφοράς, την επιλογή του μηχανισμού ελέγχου και διασποράς των εκπομπών, ώστε να πληρούν τις ισχύουσες ρυθμίσεις.

Μια βασική ευθύνη του μηχανικού σχεδιασμού είναι να ερευνήσει τα ρυπαντικά στοιχεία και τον ολικό όγκο που διασκορπίζεται. Αξιοματικά ισχύει ότι το μέγεθος τον εξοπλισμού σχετίζεται άμεσα με τον όγκο που υφίσταται επεξεργασία και επομένως το κόστος του εξοπλισμού μπορεί να μειωθεί, μειώνοντας τον όγκο των εκπομπών. Αντίστοιχα, τα στάδια της επεξεργασίας σχετίζονται με την ποσότητα των ρυπαντικών στοιχείων τα οποία πρέπει να απομακρυνθούν. Οποιαδήποτε αλλαγή στη διεργασία η οποία μεταβάλλει ευνοϊκά τις συγκεντρώσεις θα έχει ως αποτέλεσμα εξοικονόμηση χρημάτων. Επιπλέον για να μπορεί να επιτευχθεί μια σημαντική μείωση των πηγών ρυπαντικών στοιχείων θα πρέπει να εξεταστεί το ενδεχόμενο να γίνουν κάποιες αλλαγές στις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται καθώς και στις λειτουργίες της διεργασίας. Ο βαθμός στον οποίο δικαιολογείται η διόρθωση μιας πηγής εξαρτάται από το κόστος του προτεινόμενου εργοστασίου.

### ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Οι δυνάμεις διαχωρισμού σ' έναν κυκλώνα είναι οι φυγόκεντρες δυνάμεις και οι δυνάμεις πρόσκρουσης, οι οποίες μεταδίδονται σε μεμονωμένα σωματίδια. Όμοιες δυνάμεις προκαλούν τη συλλογή των σωματιδίων με μηχανικούς συλλέκτες, όπως διαχωριστές πρόσκρουσης και δυναμικοί διαχωριστές. Σε θαλάμους κατακάθισης ο διαχωρισμός οφείλεται κυρίως στη δράση των δυνάμεων της βαρύτητας που ασκούνται στα σωματίδια. Ο μηχανισμός σ' έναν υγρό συλλέκτη βασίζεται στην επαφή ανάμεσα σ' έναν ψεκαστήρα νερού και σε ένα ρεύμα αερίων ρυπαντικών στοιχείων. Ο διαχωρισμός δημιουργείται κυρίως από μια σύγκρουση ανάμεσα στα



σωματίδια και τις σταγόνες του νερού. Ο διαχωρισμός οφείλεται επίσης στις δυνάμεις της βαρύτητας που ασκούνται στα μεγάλα σωματίδια, ή στις ηλεκτροστατικές και θερμικές δυνάμεις που ασκούνται στα μικρά σωματίδια. Οι κύριες δυνάμεις διαχωρισμού σε ένα φίλτρο με σάκο είναι παρόμοιες μ' αυτές που περιγράφηκαν στον υγρό συλλέκτη, δηλαδή σύγκρουση ή έλξη ανάμεσα στα σωματίδια και το φίλτρο. Τέλος, τα βασικά συστατικά μιας ηλεκτροστατικής καθίζησης είναι μία πλάκα φορτίσεως και μια επιφάνεια συλλογής. Ο διαχωρισμός ενεργοποιείται φορτίζοντας τα σωματίδια με υψηλή τάση και αφήνοντας τα φορτισμένα σωματίδια να δεχθούν την έλξη των αντίθετα φορτισμένων πλακών συλλογής.

Για να επιτευχθεί η μεγαλύτερη απόδοση στην απομάκρυνση των μεμονωμένων σωματιδίων, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη διάμετρο των σωματιδίων και την ταχύτητα του αέρα. Το μέγεθος του σωματιδίου καθορίζει την απαιτούμενη δύναμη διαχωρισμού, ενώ η αποτελεσματικότητα τον εξοπλισμού ελέγχου σχετίζεται με την ταχύτητα του ρεύματος. Γενικά όσο πιο μεγάλη είναι η σχετική ταχύτητα ανάμεσα στο ρεύμα του αέρα και του συγκρουόμενου σωματιδίου, τόσο πιο αποτελεσματικός είναι ο μηχανισμός διαχωρισμού. Η ηλεκτροστατική καθίζηση είναι η εξαίρεση σ' αυτόν τον κανόνα, επειδή στην περίπτωση αυτή η διάμετρος του σωματιδίου επηρεάζει την ταχύτητα απομάκρυνσης και η ενέργεια που χρειάζεται προκειμένου να διατηρηθεί το ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζει την απόδοση του εξοπλισμού.

### ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΒΛΑΒΕΡΩΝ ΑΕΡΙΩΝ

Τα αέρια ρυπαντικά στοιχεία μπορούν να απομακρυνθούν από τα ρεύματα αέρα με απορρόφηση, προσρόφηση, συμπύκνωση ή καύση. Γενικά, η συμπύκνωση δεν χρησιμοποιείται ως μέθοδος για την απομάκρυνση του ατμού ενός διαλύτη από τον αέρα ή άλλα φέροντα αέρια, εκτός εάν η συγκέντρωση του διαλύτη στο αέριο είναι

υψηλή και ο διαλύτης αξίζει να ανακτηθεί. Επειδή η συμπύκνωση δεν μπορεί να απομακρύνει όλο το διαλύτη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για να μειώσει τη συγκέντρωση του διαλύτη στο φέρον αέριο. Οι διαδικασίες απορρόφησης αέριου-υγρού συνήθως γίνονται μέσα σε κατακόρυφους πύργους με πληρωτικό υλικό ή με δίσκους που λειτουργούν κατ' αντιρροή ή πύργους με ψεκασμό. Για την απορρόφηση αέριων ρευμάτων, είναι σημαντική η καλή επαφή υγρού-αέριου, η οποία είναι εν μέρει συνάρτηση της κατάλληλης επιλογής εξοπλισμού.

## 2.3.2 ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ-ΔΙΑΤΑΞΗ

### ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟΥ

Η γεωγραφική θέση του εργοστασίου παίζει σημαντικό ρόλο στην επιτυχία ενός βιομηχανικού εγχειρήματος. Θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή της τοποθεσίας του εργοστασίου και να μελετηθούν πολλοί και διάφοροι παράγοντες. Βασικά, το εργοστάσιο θα πρέπει να εγκατασταθεί όπου μπορεί να επιτευχθεί το μικρότερο κόστος παραγωγής και διανομής. Άλλοι παράγοντες, όπως επαρκής χώρος για επέκταση και ασφαλείς συνθήκες για τη λειτουργία του εργοστασίου καθώς και τις γειτονικές κοινότητες, είναι επίσης σημαντικοί.

Για την τοποθεσία του εργοστασίου θα πρέπει να επιτευχθεί μια κοινή συμφωνία πριν τον λεπτομερή σχεδιασμό και θα πρέπει να επιλεγεί η κατάλληλη τοποθεσία για την ολοκλήρωση του λεπτομερούς σχεδιασμού. Η επιλογή της τελικής τοποθεσίας θα πρέπει πρώτα να βασίζεται σε μια ολοκληρωμένη έρευνα των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων διαφόρων γεωγραφικών περιοχών και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της διαθέσιμης γης.

Κατά την επιλογή της τοποθεσίας ενός εργοστασίου θα πρέπει να μελετηθούν οι ακόλουθοι παράγοντες:

1. Διαθεσιμότητα πρώτων υλών
2. Αγορές
3. Διαθεσιμότητα ενέργειας
4. Κλίμα
5. Τρόποι μεταφοράς
6. Προμήθεια νερού
7. Διάθεση αποβλήτων
8. Προσωπικό
9. Φορολογία και νομικοί περιορισμοί
10. Χαρακτηριστικά τοποθεσίας
11. Προστασία από πλημμύρα και πυρκαγιά
12. Κοινωνικοί παράγοντες

#### ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟΥ

Αφού ολοκληρωθούν τα διαγράμματα ροής και πριν ξεκινήσουν τα λεπτομερή σχέδια των σωληνώσεων, της κατασκευής και των ηλεκτρικών, πρέπει να σχεδιαστεί η διάταξη των μονάδων επεξεργασίας στο εργοστάσιο και τον εξοπλισμού σ'αυτές τις μονάδες επεξεργασίας. Η διάταξη μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό του κόστους κατασκευής και παραγωγής και επομένως πρέπει να μελετηθεί αρκετά προσεκτικά, επικεντρώνοντας την προσοχή στα μελλοντικά προβλήματα που πιθανόν να προκύψουν. Επειδή κάθε εργοστάσιο έχει τις δικές του ιδιαιτερότητες και δε μπορούν να βρεθούν δύο ακριβώς όμοιες εγκαταστάσεις, δεν υπάρχει κάποιο ιδανικό και γενικό σχεδιάγραμμα εργοστασίου. Παρόλα αυτά σε κάθε περίπτωση, το κατάλληλο σχεδιάγραμμα θα πρέπει να περιλαμβάνει τη διάταξη των μονάδων, των περιοχών αποθήκευσης και των περιοχών διαχείρισης με επιτυχή συντονισμό και σε σχέση με παράγοντες όπως:

1. Ανάπτυξη σε νέα τοποθεσία ή επέκταση σε ήδη υπάρχουσα.
2. Τύπος και ποιότητα των προϊόντων που θα παραχθούν
3. Τύπος διεργασίας και ελέγχου προϊόντων
4. Ευκολία λειτουργίας και πρόσβασης
5. Οικονομική διανομή των βοηθητικών παροχών και υπηρεσιών
6. Τύπος των κτιρίων και απαιτήσεις κτιριακού κανονισμού
7. Μελέτες υγείας και ασφάλειας
8. Απαιτήσεις διάθεσης αποβλήτων
9. Βοηθητικός εξοπλισμός
10. Διαθεσιμότητα χώρων και απαιτήσεις σε χώρο
11. Δρόμοι και σιδηρόδρομοι
12. Πιθανή μελλοντική επέκταση

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

#### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει τις οικονομικές μελέτες που χρειάζεται να γίνουν όταν ένας μηχανικός προετοιμάζει εκτιμήσεις για το κόστος της επένδυσης κεφαλαίου ή το ολικό κόστος προϊόντος για μια καινούρια επιχείρηση. Ωστόσο ο μηχανικός θα πρέπει να θυμάται, ότι οι προκαταρκτικοί υπολογισμοί βασίζονται συχνά εν μέρει σε προσεγγιστικά ποσοστά ή συντελεστές που εφαρμόζονται σε μια συγκεκριμένη μονάδα ή διεργασία. Τα ποσοστά που χρησιμοποιούνται για το κόστος επένδυσης κεφαλαίου και το ολικό κόστος κεφαλαίου αναφέρονται στους παρακάτω πίνακες 3.1 και 3.7. Τα ποσοστά που παρατίθενται και στους 2 πίνακες παρουσιάζουν τις περιοχές που συναντώνται σε τυπικές χημικές μονάδες. Λόγω των πολλών και διαφορετικών μονάδων που υπάρχουν, οι συντελεστές που παρουσιάζονται θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μόνο όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα ακριβή δεδομένα.

#### 3.1 ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ-ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

##### 3.1.1 ΑΜΕΣΑ-ΕΜΜΕΣΑ ΚΟΣΤΗ

Σύμφωνα με τους Peters και Timmerhaus ο πιο σημαντικός από τους παράγοντες που οδηγούν σε κακούς υπολογισμούς επένδυσης κεφαλαίων είναι συνήθως αυτός που περιλαμβάνει σημαντικές παραλείψεις στον εξοπλισμό, στις υπηρεσίες ή στις βοηθητικές εγκαταστάσεις και όχι τα χονδροειδή λάθη του υπολογισμού του κόστους. Όταν γίνονται ολοκληρωμένοι υπολογισμοί για την επένδυση πάγιου κεφαλαίου, μια λίστα ελέγχου των αντικειμένων που καλύπτουν μια καινούρια εγκατάσταση προσφέρει ανεκτίμητη βοήθεια. Παρακάτω παρουσιάζεται μια

τυπική λίστα τέτοιων αντικειμένων καθώς και τυπικά ποσοστά τιμών επένδυσης πάγιου κεφαλαίου για άμεσα και έμμεσα κόστη για μονάδες αυτοδύναμες ή μεγάλες προσθήκες σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1: Ανάλυση συστατικών στοιχείων επένδυσης πάγιου κεφαλαίου για μια χημική διεργασία.

### Άμεσα Κόστη

1. Αγορασμένος εξοπλισμός (15-40%)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Όλος ο εξοπλισμός που υπάρχει σε ένα ολοκληρωμένο διάγραμμα ροής Ανταλλακτικά και μη εγκατεστημένα ανταλλακτικά εξοπλισμού</li> <li>• Πλεόνασμα εξοπλισμού, προμήθειες και περιθώρια προμήθειας εξοπλισμού Χρέωση κόστους πληθωρισμού</li> <li>• Χρεώσεις μεταφοράς φορτίων</li> <li>• Φόροι, ασφάλειες, Τελωνειακά Τέλη</li> <li>• Περιθώριο για τροποποιήσεις κατά τη διάρκεια έναρξης</li> </ul>	
2. Εγκατάσταση αγορασμένου εξοπλισμού (6-14%)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εγκατάσταση όλου του εξοπλισμού που υπάρχει σε ένα ολοκληρωμένο διάγραμμα ροής</li> <li>• Κατασκευαστικές στηρίξεις, μόνωση, βαφή</li> </ul>	
3. Συστήματα μέτρησης και ρύθμισης (2-8%)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αγορά, εγκατάσταση, βαθμονόμηση, και σύνδεση με υπολογιστές</li> </ul>	
4. Σωληνώσεις (3-20%)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Σωληνώσεις διεργασιών-χάλυβας, κράματα, χυτοσίδηρος, μόλυβδος, επενδεδυμένες, αργίλιο, χαλκός, κεραμεικός, πλαστικός, ελαστικός, οπλισμένο σκυρόδεμα.</li> <li>• Άγκιστρα, συνδέσεις, εξαρτήματα, βάνες</li> <li>• Μόνωση-σωλήνωση, εξοπλισμός</li> </ul>	
5. Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός και υλικά (2-10%)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός: διακόπτες, κινητήρες, σωλήνες, καλώδια, εξαρτήματα τροφοδοτικά, γείωση, καλωδίωση οργάνων και ρυθμιστών, φωτισμός, κονσόλα</li> <li>• Ηλεκτρολογικά υλικά και εργατικά</li> </ul>	
6. Κατασκευή κτιρίων: (συμπεριλαμβανομένων των υπηρεσιών) (3-18%)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Κτίρια διεργασιών: υπόγειες και υπέργειες κατασκευές, πλατφόρμες, στηρίγματα, σκάλες, δίοδοι πρόσβασης, γερανοί, σιδηρόδρομοι, ανυψωτήρες, ανελκυστήρες.</li> <li>• Βοηθητικά κτίρια: κτίρια διοίκησης και γραφεία, ιατρεία ή κλινικές, καφετέρια, γκαράζ, αποθήκη προϊόντων, αποθήκη εξαρτημάτων,</li> </ul>	

<p>τιμήματα φύλαξης και ασφάλειας, πυροσβεστικός σταθμός, αποδυτήρια, κτίριο προσωπικού, γραφείο φόρτωσης και πλατφόρμα, εργαστήρια ερευνών, εργαστήρια ελέγχου.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Χώροι συντήρησης: ηλεκτρικά, σωληνώσεις, φύλλα μετάλλου, μηχανολογικά, συγκόλληση, ξυλουργική, ενοργάνωση</li> <li>• Υπηρεσίες κτιρίων: υδραυλικά, θέρμανση, κλιματισμός, συλλογή σκόνης, εξαερισμός, φωτισμός κτιρίου, ανελκυστήρες, κυλιόμενες σκάλες, τηλέφωνα, συστήματα ενδοεπικοινωνίας, βαφή, σύστημα ψεκασμού, συναγερμός φωτιάς.</li> </ul>
<p>7.Βελτιώσεις περιβάλλοντα χώρου (2-5%)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ανάπτυξη τοποθεσίας: καθαρισμός τοποθεσίας, ισοπέδωση εδάφους, δρόμοι, πεζόδρομοι, σιδηρόδρομοι, περίφραξη, περιοχές πάρκινγκ, εκφορτωτές και αποβάθρες, εγκαταστάσεις ψυχαγωγίας, διαμόρφωση τοπίου.</li> </ul>
<p>8.Εγκαταστάσεις Υπηρεσιών (8-20%)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Βοηθητικές παροχές: υδρατμός, νερό, ενέργεια, ψύξη, συμπιεσμένος αέρας, καύσιμο, διάθεση αποβλήτων.</li> <li>• Εγκαταστάσεις: κλίβανος λέβητα μονάδας, φρεάτια, εισαγωγή ποταμού, επεξεργασία νερού, ψυκτικοί πύργοι, αποθήκευση νερού, ηλεκτρικός υποσταθμός, μονάδα ψύξης, μονάδα αέρα, αποθήκευση καυσίμου, μονάδα διάθεσης αποβλήτων, περιβαλλοντικοί έλεγχοι, προστασία από πυρκαγιά.</li> <li>• Εξοπλισμός που δεν σχετίζεται άμεσα με τη διεργασία: έπιπλα και εξοπλισμός γραφείου, εξοπλισμός καφετέριας, ιατρικός εξοπλισμός κατ'εξοπλισμός ασφάλειας, εξοπλισμός μηχανουργείου, αυτοκινούμενος εξοπλισμός, εξοπλισμός επεξεργασίας υλικού ακάλυπτων χώρων, εργαστηριακός εξοπλισμός, εξοπλισμός αποδυτηρίων, εξοπλισμός γκαράζ, ράφια, δεξαμενές, παλέτες, χειροκίνητα καροτσάκια, οικιακός εξοπλισμός, πυροσβεστήρες, μάνικες, πυροσβεστικές μηχανές, σταθμοί φόρτωσης.</li> <li>• Διανομή και συσκευασία: αποθήκη πρώτων υλών κατ' προϊόντων, εξοπλισμός χειρισμού υλικών, εξοπλισμός συσκευασίας προϊόντος, εγκαταστάσεις ανάμιξης, σταθμοί φόρτωσης.</li> </ul>
<p>9. Γη (1-2%)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Έρευνες και αμοιβές</li> <li>• Κόστος ιδιοκτησίας</li> </ul>

## Έμμεσα Κόστη

<b>1. Μηχανική και επίβλεψη (4-21%)</b>
Κόστη υπηρεσιών μηχανικών: διοικητικά, διεργασία, σχεδιασμός και γενική μηχανική, προσχεδιασμός, μηχανική κόστους, προμήθεια, εκτυπώσεις, επικοινωνίες, μοντέλα κλίμακας, αμοιβές συμβούλων, ταξίδια, επίσκεψη και επιθεώρηση από μηχανικούς
<b>2. Έξοδα κατασκευής (4-16%)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση προσωρινών εγκαταστάσεων, γραφείων, δρόμων, θέσεων πάρκινγκ, σιδηροδρόμων, ηλεκτρικών, σωληνώσεων, επικοινωνιών, φραχτών</li> <li>• Εργαλεία και εξοπλισμός κατασκευής</li> <li>• Επίβλεψη κατασκευής, λογαριασμοί, τήρηση χρονοδιαγράμματος, αγορές, αποστολές</li> <li>• Προσωπικό αποθηκών και δαπάνες, φύλακες</li> <li>• Ασφάλεια, ιατρική κάλυψη, πρόσθετες αμοιβές</li> <li>• Άδειες, δοκιμές στο πεδίο, ειδικές άδειες</li> <li>• Φόροι, ασφάλεια, τόκοι</li> </ul>
<b>3. Αμοιβή εργολάβου (2-6%)</b>
<b>4. Απρόβλεπτα (5-15%)</b>

### 3.1.2 ΤΥΠΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Ο υπολογισμός της επένδυσης κεφαλαίου μιας διεργασίας μπορεί να ποικίλει από έναν προσχεδιαστικό υπολογισμό, ο οποίος βασίζεται σε λίγες πληροφορίες εκτός από το μέγεθος τον προτεινόμενου έργου, έως ένα λεπτομερή υπολογισμό ο οποίος βασίστηκε σε ολοκληρωμένα σχεδιαγράμματα και προδιαγραφές. Ανάμεσα σ' αυτά τα δύο άκρα μπορεί να υπάρξουν πολυάριθμοι άλλοι υπολογισμοί, των οποίων η ακρίβεια ποικίλει ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης του έργου. Οι υπολογισμοί αυτοί έχουν διάφορα ονόματα, αλλά οι ακόλουθες πέντε κατηγορίες αντιπροσωπεύουν



την περιοχή ακρίβειας και το συμβολισμό που χρησιμοποιείται συνήθως για το σχεδιασμό.

1. Υπολογισμός τάξης μεγέθους (υπολογισμός αναλογίας), ο οποίος βασίζεται σε παρόμοια δεδομένα προηγούμενων κοστολογήσεων. Η πιθανή ακρίβεια του υπολογισμού είναι μεγαλύτερη από  $\pm 30\%$ .

2. Υπολογισμός μελέτης (υπολογισμός παράγοντα) ο οποίος βασίζεται στη γνώση των βασικών συστατικών στοιχείων του εξοπλισμού. Η πιθανή ακρίβεια του υπολογισμού είναι μέχρι  $\pm 30\%$ .

3. Προκαταρκτικός υπολογισμός (υπολογισμός εξουσιοδότησης προϋπολογισμού, υπολογισμός σκοπού) ο οποίος βασίζεται σε επαρκή δεδομένα που επιτρέπουν την εκτίμηση του προϋπολογισμού. Η πιθανή ακρίβεια είναι  $\pm 20\%$ .

4. Οριστικός υπολογισμός (υπολογισμός ελέγχου έργου), ο οποίος βασίζεται σχεδόν σε ολοκληρωμένα δεδομένα (αλλά πριν την ολοκλήρωση σχεδιαγραμμάτων και προδιαγραφών). Η πιθανή ακρίβεια του υπολογισμού είναι  $\pm 10\%$ .

5. Λεπτομερής υπολογισμός (υπολογισμός εργολάβου), που βασίζεται σε πλήρη μηχανικά σχέδια, σε προδιαγραφές και σε επιθεωρήσεις χώρου. Η πιθανή ακρίβεια του υπολογισμού είναι  $\pm 5\%$ .

Κόστος προϊόντος	0-2000000\$	2000000-10000000\$	10000000-100000000\$
Υπολογισμός τάξης μεγέθους	3000\$	6000\$	13000\$
Υπολογισμός μελέτης	20000\$	40000\$	60000\$
Προκαταρκτικός υπολογισμός	50000\$	80000\$	130000\$
Οριστικός υπολογισμός	80000\$	160000\$	320000\$
Λεπτομερής υπολογισμός	200000\$	520000\$	1000000\$

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2: Τυπικό μέσο κόστος για υπολογισμούς.

### 3.1.3 ΔΕΙΚΤΕΣ ΚΟΣΤΟΥΣ

Τα περισσότερα δεδομένα κόστους που είναι διαθέσιμα σε ένα προκαταρκτικό ή προσχεδιαστικό υπολογισμό βασίζονται σε συνθήκες που αναφέρονται σε κάποιο χρονικό διάστημα στο παρελθόν. Επειδή οι τιμές μπορούν να αλλάξουν αισθητά εξαιτίας αλλαγών σε οικονομικές συνθήκες, πρέπει να χρησιμοποιούνται κάποιες μέθοδοι για την αναθεώρηση των δεδομένων κόστους του παρελθόντος σε κόστη αντιπροσωπευτικά των συνθηκών του παρόντος. Αυτό μπορεί να γίνει με την χρήση δεικτών κόστους.

Ένας δείκτης κόστους είναι απλά ένας δείκτης αξίας για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή και παρουσιάζει το κόστος για κάποια χρονική στιγμή του παρελθόντος, το ισοδύναμο κόστος για το παρόν μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας το αρχικό κόστος με το λόγο του παρόντος δείκτη αξίας προς το δείκτη αξίας που αντιστοιχεί στο αρχικό κόστος.

$$\text{παρόν κόστος} = \text{αρχικό κόστος} \cdot \frac{\text{δείκτης αξίας στον παρόντα χρόνο}}{\text{δείκτης αξίας κατά τον χρόνο που επιτεύχθηκε το αρχικό κόστος}} \quad (3.1)$$

Οι δείκτες κόστους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ένα γενικό υπολογισμό, αλλά κανένας δείκτης δεν μπορεί να συμπεριλάβει όλους τους παράγοντες, όπως οι ειδικές τεχνολογικές εξελίξεις ή οι τοπικές συνθήκες. Οι συνηθισμένοι δείκτες επιτρέπουν κάπως ακριβείς υπολογισμούς αν η χρονική περίοδος είναι μικρότερη από 10 χρόνια.

Συχνά δημοσιεύονται πολλοί διαφορετικοί τύποι δεικτών κόστους. Κάποιοι από αυτούς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του κόστους του εξοπλισμού. Κάποιοι άλλοι εφαρμόζονται στο κόστος των εργατικών, της κατασκευής, των υλικών ή σε άλλους εξειδικευμένους τομείς. Οι πιο συνηθισμένοι δείκτες είναι:

- οι δείκτες κόστους εξοπλισμού Marshall και Swift, για τη συνολική βιομηχανία και τη βιομηχανία διεργασιών
- ο δείκτης κόστους εγκαταστάσεων Engineering News-Record
- δείκτης κόστους παραγωγής διωλιστηρίου Nelson-Farrar
- δείκτης κόστους τον περιοδικού Chemical Engineering.

### 3.1.4 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΓΙΑ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

#### **Υπολογισμός Κόστους Εξοπλισμού με Κλιμάκωση Μεγέθους**

Πολλές φορές είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του κόστους ενός στοιχείου εξοπλισμού ακόμη και όταν δεν υπάρχουν δεδομένα κόστους για το συγκεκριμένο μέγεθος της δυναμικότητας λειτουργίας. Καλά αποτελέσματα μπορούν να ληφθούν χρησιμοποιώντας τη λογαριθμική σχέση που είναι γνωστή ως κανόνας συντελεστή έξι δεκάτων, αν το καινούργιο τμήμα του εξοπλισμού είναι όμοιο με ένα άλλο διαφορετικής δυναμικότητας για το οποίο υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα. Σύμφωνα με αυτόν τον κανόνα, αν είναι γνωστό το κόστος για μια δεδομένη μονάδα με συγκεκριμένη δυναμικότητα, το κόστος μιας παρόμοιας μονάδας με δυναμικότητα ίση με  $X$  φορές τη δυναμικότητα της πρώτης είναι περίπου  $(X)^{0.5}$  φορές το κόστος της αρχικής μονάδας.

$$\text{κόστος εξοπλισμού } a = \text{κόστος εξοπλισμού } b \cdot \left( \frac{\text{δυναμικότητα εξοπλισμού } a}{\text{δυναμικότητα εξοπλισμού } b} \right)^{0.6} \quad (3.2)$$

Η παραπάνω εξίσωση υποδεικνύει ότι η λογαριθμική γραφική παράσταση της δυναμικότητας ως προς το κόστος του εξοπλισμού για ένα δεδομένο τύπο εξοπλισμού θα πρέπει να είναι ευθεία γραμμή με κλίση ίση με 0.6. Η εφαρμογή του εμπειρικού κανόνα 0.6 για την πλειοψηφία των αγορασμένου εξοπλισμού, είναι

μια υπεραπλοποίηση, επειδή οι πραγματικές τιμές του συντελεστή κόστους δυναμικότητας ποικίλουν από 0.2 (ή λιγότερο) έως 1.0 (ή περισσότερο). Για αυτό το λόγο, ο συντελεστής 0.6 θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο όταν δεν υπάρχει καμία πληροφορία. Γενικά, η έννοια της δυναμικότητας κόστους δε θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί πέρα από μια περιοχή δεκαπλάσιας δυναμικότητας και θα πρέπει να δοθεί προσοχή προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι τα δύο τμήματα τον εξοπλισμού είναι όμοια ως προς τον τύπο της κατασκευής, τα κατασκευαστικά υλικά, την περιοχή θερμοκρασίας και πίεσης λειτουργίας και τις άλλες σχετικές μεταβλητές.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3: Τυπικοί εκθέτες για το κόστος εξοπλισμού ως προς τη δυναμικότητα.

Εξοπλισμός	Περιοχή μεγέθους	Εκθέτης
Εναλλάκτης θερμότητας αυλών-κελύφους κινητής κεφαλής	10-40 m <sup>2</sup>	0.6
Αντλία, παλινδρομική, οριζόντια, χυτοσίδηρος	0.5-20 m <sup>3</sup> /h	0.34
Αντιδραστήρας, με γυάλινη επένδυση, με μανδύα	0.2-2.5 m <sup>3</sup>	0.54
Συμπιεστής, περιστροφικός, μιας βαθμίδας	30-350 kg/s	0.79
Ανεμιστήρας, φυγόκεντρος	300-3000 kg/s	0.44
Δίσκος με οπές, χάλυβας	1-3 m (διάμετρος)	0.86

### Παράδειγμα

Υπολογισμός του κόστους εξοπλισμού χρησιμοποιώντας συντελεστές κλιμάκωσης μεγέθους και δείκτες κόστους. Το κόστος αγοράς για έναν αντιδραστήρα με μανδύα με γυάλινη επένδυση χωρητικότητας 50 gal (χωρίς κινητήρα) ήταν \$8350 το 1981. Να υπολογιστεί το κόστος ενός όμοιου αντιδραστήρα 300 gal με γυάλινη επένδυση με μανδύα (χωρίς κινητήρα) το 2016. Να χρησιμοποιηθεί ο ετήσιος μέσος όρος του δείκτη κόστους εξοπλισμού Marshall και Swift (για όλη τη βιομηχανία) για να βρεθεί το κόστος αγοράς του αντιδραστήρα το 2016.

**Λύση**

Δείκτης κόστους εξοπλισμού Marshall και Swift (για όλη τη βιομηχανία):

Για το 1981: 721

Για το 2016: 1582

Ο εκθέτης του εξοπλισμού έναντι της δυναμικότητας είναι 0.54.

$$\text{Το 2016 το κόστος του αντιδραστήρα είναι } = (8350\$) \left( \frac{1582}{721} \right) \left( \frac{300}{50} \right)^{0.54} = 48212\$$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4: Ενδεικτικές τιμές συντελεστών κόστους κάθε έτους.

ΕΤΟΣ	MARSHALL-SWIFT (ΚΟΣΤΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ)	CHEMICAL ENGINEERING (ΚΟΣΤΟΣ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟΥ)	ΕΤΟΣ	MARSHALL-SWIFT (ΚΟΣΤΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ)	CHEMICAL ENGINEERING (ΚΟΣΤΟΣ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟΥ)
1996	1036	382	2007	1354	525
1997	1053	387	2008	1393	575
1998	1062	390	2009	1487	521
1999	1062	391	2010	1447	551
2000	1070	394	2011	1477	586
2001	1095	394	2012	1537	585
2002	1096	396	2013	1553	567
2003	1113	402	2014	1567	576
2004	1133	444	2015	1598	557
2005	1218	468	2016	1582	542
2006	1275	500			

Το κόστος αγοράς εξοπλισμού για δοχεία, δεξαμενές και εξοπλισμό χειρισμού υλικών και διεργασιών μπορεί συχνά να υπολογισθεί με βάση το βάρος. Το γεγονός ότι πολλοί τύποι εξοπλισμού έχουν περίπου το ίδιο κόστος ανά μονάδα βάρους είναι κάπως χρήσιμο, ιδιαίτερα όταν δεν υπάρχει κάποιο άλλο δεδομένο κόστους. Γενικά,

τα δεδομένα κόστους που προκύπτουν με τη μέθοδο αυτή είναι αρκετά αξιόπιστα, ώστε να επιτρέπουν υπολογισμούς τάξης μεγέθους.

## 3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Για τον υπολογισμό της επένδυσης κεφαλαίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ποικίλες μέθοδοι. Η επιλογή οποιασδήποτε μεθόδου εξαρτάται από την ποσότητα των διαθέσιμων λεπτομερών πληροφοριών και την απαιτούμενη ακρίβεια. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται επτά μέθοδοι, κάθε μια από τις οποίες χρειάζεται όλο και λιγότερες λεπτομερείς πληροφορίες και μικρότερο χρόνο προετοιμασίας. Συνεπώς, ο βαθμός ακρίβειας μειώνεται από τη μια μέθοδο στην επόμενη. Για παράδειγμα, με την πρώτη μέθοδο μπορεί να επιτευχθεί μια μέγιστη ακρίβεια της τάξης  $\pm 5\%$  της πραγματικής επένδυσης κεφαλαίου.

Αναφορικά οι μέθοδοι υπολογισμού επένδυσης κεφαλαίου είναι:

- Μέθοδος Λεπτομερούς Υπολογισμού
- Μέθοδος Υπολογισμού Κόστους Μονάδας
- Μέθοδος Ποσοστού Κόστους Παραδομένου Εξοπλισμού
- Μέθοδος Συντελεστών “Lang” για Προσέγγιση της Επένδυσης Κεφαλαίου
- Μέθοδος Εκθετικού Συντελεστή
- Μέθοδος Κόστους Επένδυσης ανά Μονάδα Δυναμικότητας
- Μέθοδος Λόγων Απόδοσης

### **Ποσοστό Κόστους Παραδομένου Εξοπλισμού**

Η μέθοδος αυτή για τον υπολογισμό του πάγιου ή ολικού κεφαλαίου επένδυσης απαιτεί προσδιορισμό του κόστους του παραδομένου εξοπλισμού. Τα άλλα στοιχεία που περιλαμβάνονται στο ολικό άμεσο κόστος μονάδας υπολογίζονται στη συνέχεια ως ποσοστά του κόστους παραδομένου εξοπλισμού. Τα επιπλέον συστατικά της επένδυσης κεφαλαίου βασίζονται σε μέσα ποσοστά του ολικού

άμεσου κόστους μονάδας, ολικού άμεσου και έμμεσου κόστους μονάδας, ή ολικής επένδυσης κεφαλαίου. Αυτό παρουσιάζεται περιληπτικά στην ακόλουθη εξίσωση κόστους:

$$C_n = \left[ \sum E + \sum (f_1 E + f_2 E + f_3 E + \dots) \right] (f_t) \quad (3.3)$$

όπου  $f_1, f_2, \dots =$  πολλαπλασιαστικοί συντελεστές για σωληνώσεις, ηλεκτρικά, ενοργάνωση κ.λπ.

$f_1 =$  συντελεστής έμμεσου κόστους πάντα μεγαλύτερος από 1.

Τα ποσοστά που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους υπολογισμούς πρέπει να προσδιορίζονται με βάση τον τύπο διεργασίας, την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού, τα απαιτούμενα υλικά κατασκευής, τη θέση της μονάδας, την εμπειρία του παρελθόντος και άλλα στοιχεία που εξαρτώνται από την υπό μελέτη μονάδα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των ποσοστών για τυπικές χημικές μονάδες ποσοστών.

Ο υπολογισμός με ποσοστό κόστους παραδομένου εξοπλισμού χρησιμοποιείται συνήθως για προκαταρκτικούς υπολογισμούς και υπολογισμούς μελετών. Δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα όταν εφαρμόζεται σε έργα παρόμοια σε διαμόρφωση με πρόσφατα κατασκευασμένες μονάδες. Για συγκρίσεις μονάδων διαφορετικής δυναμικότητας η μέθοδος αυτή έχει παρουσιάσει κάποιες φορές ακρίβειες οριστικού υπολογισμού.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5:** Συντελεστές αναλογίας για τον υπολογισμό αντικειμένων επένδυσης κεφαλαίου βασισμένοι σε κόστος παραδομένου εξοπλισμού.

Άμεσα κόστη			
Αντικείμενο	Ποσοστό κόστους παραδοθέντος εξοπλισμού για μονάδα διεργασίας		
	Στερεών	Στερεών-Υγρών	Ρευστών
Αγορασμένος και παραδομένος εξοπλισμός	100	100	100
Εγκατάσταση παραδομένου εξοπλισμού	45	39	47
Ενοργάνωση και έλεγχοι (εγκατεστημένα)	9	28	18
Σωληνώσεις (εγκατεστημένα)	16	31	66
Ηλεκτρικά (εγκατεστημένα)	10	10	11
Κτίρια και υπηρεσίες	25	22	18
Βελτιώσεις γης	13	10	10
Βοηθητικές υπηρεσίες (εγκατεστημένα)	40	55	70
Γη (αν χρειάζεται αγορά)	6	6	6
<b>Ολικό άμεσο κόστος μονάδας</b>	<b>264</b>	<b>293</b>	<b>346</b>
Έμμεσα κόστη			
Υπηρεσίες μηχανικής και επίβλεψη	33	32	33
Κατασκευαστικά έξοδα	39	34	41
<b>Ολικά άμεσα και έμμεσα κόστη μονάδας</b>	<b>336</b>	<b>359</b>	<b>420</b>
Αμοιβή εργολάβου	17	18	21
Απρόβλεπτα	34	36	42
Επένδυση πάγιου κεφαλαίου	387	413	483
Κεφάλαιο κίνησης	68	74	86
<b>Ολική επένδυση κεφαλαίου</b>	<b>455</b>	<b>487</b>	<b>596</b>

**Παράδειγμα:** Υπολογισμός επένδυσης πάγιου κεφαλαίου με ποσοστό κόστους παραδομένου εξοπλισμού.

Να γίνει μια μελέτη υπολογισμού επένδυσης πάγιου κεφαλαίου για τη μονάδα διεργασίας στερεών-ρευστών, αν το κόστος τον παραδοθέντος εξοπλισμού είναι \$100,000.



### Λύση

Θα χρησιμοποιηθούν οι συντελεστές αναλογίας που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα με τροποποιήσεις για ενοργάνωση και εξωτερική λειτουργία.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6 Υπολογισμοί παραδείγματος.

Στοιχεία	Ποσοστό	Κόστος (\$)
Αγορασμένος και παραδομένος εξοπλισμός ( <b>E</b> )		100000
Εγκατάσταση παραδομένου εξοπλισμού	0.39E	39000
Ενοργάνωση και έλεγχοι (εγκατεστημένα)	0.28E	28000
Σωληνώσεις (εγκατεστημένα)	0.31E	31000
Ηλεκτρικά (εγκατεστημένα)	0.1E	10000
Κτίρια και υπηρεσίες	0.22E	22000
Βελτιώσεις γης	0.1E	100000
Βοηθητικές υπηρεσίες (εγκατεστημένα)	0.55E	55000
Γη (αν χρειάζεται αγορά)	0.06E	6000
<b>Ολικό άμεσο κόστος μονάδας (D)</b>		<b>301000</b>
Υπηρεσίες μηχανικής και επίβλεψη ( <b>I1</b> )	0.32E	32000
Κατασκευαστικά έξοδα ( <b>I2</b> )	0.34E	34000
<b>Ολικά άμεσα και έμμεσα κόστη μονάδας (D+I1+I2)</b>		<b>367000</b>
Αμοιβή εργολάβου	0.05(D+I1+I2)	18000
Απρόβλεπτα	0.1(D+I1+I2)	37000
<b>Επένδυση πάγιου κεφαλαίου</b>		<b>422000</b>

### 3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Οι μέθοδοι για τον υπολογισμό της ολικής επένδυσης κεφαλαίου που χρειάζονται για μια συγκεκριμένη μονάδα παρουσιάζονται στο πρώτο μέρος αυτού του κεφαλαίου. Ο καθορισμός της απαιτούμενης επένδυσης κεφαλαίου αποτελεί μόνο ένα μέρος ενός πλήρους υπολογισμού κόστους. Ένα άλλο ισοδύναμο σημαντικό μέρος είναι ο υπολογισμός του κόστους για τη λειτουργία της μονάδας και την πώληση των προϊόντων. Τα κόστη αυτά μπορούν να ομαδοποιηθούν κάτω από τη

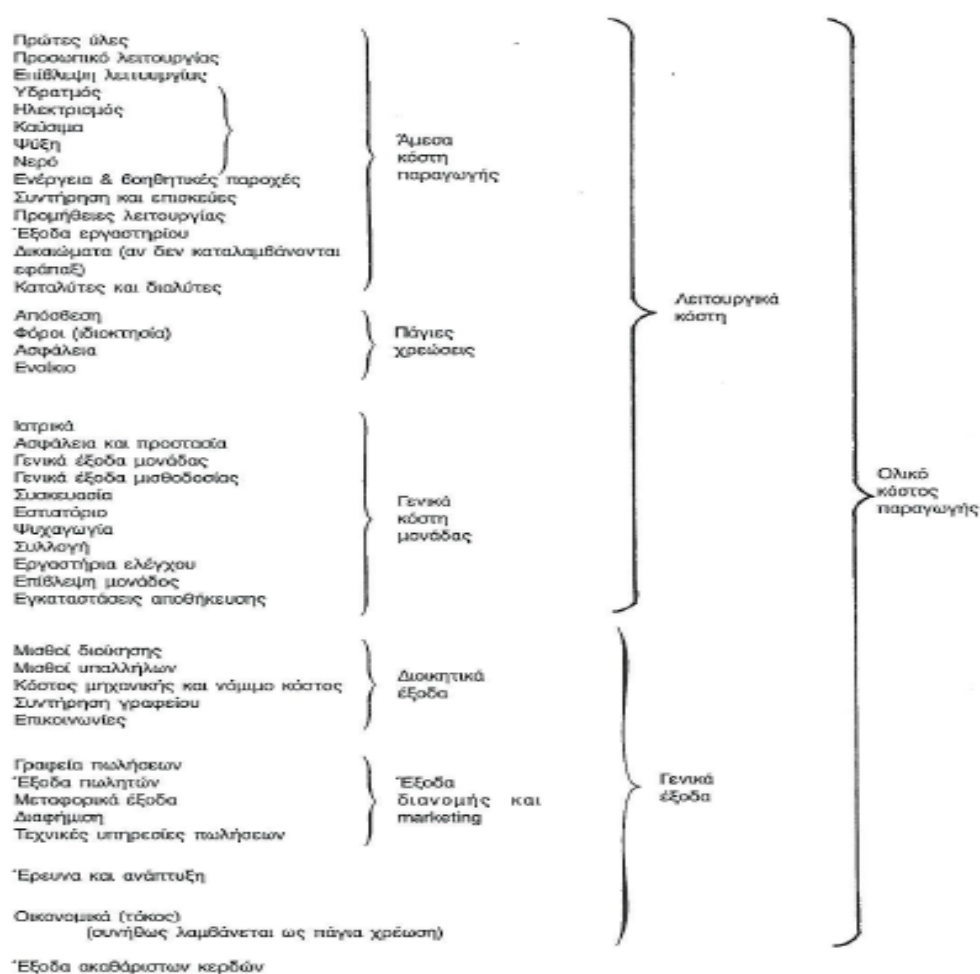
γενική επικεφαλίδα ολικό κόστος προϊόντος. Το τελευταίο, με την σειρά του, διαιρείται γενικά σε δύο κατηγορίες: κόστος παραγωγής και γενικά έξοδα. Το κόστος παραγωγής είναι επίσης γνωστό ως λειτουργικό κόστος ή κόστος προϊόντος. Η περαιτέρω υποδιαίρεση του κόστους παραγωγής εξαρτάται κάπως από την ερμηνεία του άμεσου και έμμεσου κόστους.

Η ακρίβεια στον υπολογισμό του ολικού κόστους παραγωγής είναι τόσο σημαντική όσο και στον υπολογισμό των κόστους της επένδυσης κεφαλαίου. Οι μεγαλύτερες πηγές σφάλματος στον υπολογισμό ολικού κόστους προϊόντος είναι αυτές που παραβλέπουν στοιχεία κόστους. Για τον υπολογισμό του ολικού κόστους είναι πολύ χρήσιμη μια λίστα ελέγχου σε μορφή πίνακα για να μην παραλειφθεί τίποτα. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει μια προτεινόμενη λίστα ελέγχου η οποία είναι χαρακτηριστική του κόστους που σχετίζεται με μονάδες χημικών διεργασιών. Το ολικό κόστος παραγωγής υπολογίζεται συνήθως σε μια από τις ακόλουθες βάσεις: ημερήσια βάση, βάση μονάδας προϊόντος ή ετήσια βάση. Η ετήσια βάση κόστους είναι πιθανόν η καλύτερη επιλογή για τον υπολογισμό του ολικού κόστους γιατί (1) οι επιδράσεις εποχιακών μεταβολών εξομαλύνονται, (2) λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος που το προϊόν υφίσταται επεξεργασία ή ο συντελεστής λειτουργίας του εξοπλισμού, (3) επιτρέπει πιο γρήγορο υπολογισμό του κόστους λειτουργίας σε λιγότερη από πλήρη δυναμικότητα και (4) προσφέρει μια εύχρηστη μέθοδο να ληφθούν υπ'όψιν μεγάλα αλλά σπάνια έξοδα όπως το κόστος της ετήσιας διακοπής λειτουργίας για συντήρηση (turnaround) σε ένα διύλιστήριο.

Η καλύτερη πηγή πληροφορίας για υπολογισμούς ολικού κόστους παραγωγής είναι τα δεδομένα παρόμοιων ή ίδιων μονάδων. Οι περισσότερες εταιρίες καταγράφουν συστηματικά την καθημερινή λειτουργία τους, οπότε από τις υπάρχουσες καταγραφές μπορεί να υπολογιστεί γρήγορα, και αξιόπιστα το λειτουργικό κόστος και των γενικών εξόδων. Θα πρέπει να γίνουν τροποποιήσεις για την αύξηση του κόστους ως αποτέλεσμα του πληθωρισμού και θα πρέπει να μελετηθούν οι διαφορές στην τοποθεσία της μονάδας και στη γεωγραφική θέση.

Στις παρακάτω παραγράφους παρουσιάζονται μέθοδοι για τον υπολογισμό του ολικού κόστους παραγωγής κατά την απουσία συγκεκριμένων πληροφοριών. Τα

διάφορα κόστη παρουσιάζονται με τη σειρά που εμφανίζονται στο παρακάτω σχήμα.



**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.7:** Υπολογισμός του συνολικού κόστους παραγωγής (περιλαμβάνει ξεχωριστά συστατικά στοιχεία).

<b>I. Κόστος παραγωγής = άμεσο κόστος παραγωγής + πάγιες χρεώσεις + γενικά κόστη μονάδας.</b>
<b>A. Άμεσα κόστη παραγωγής (περίπου 60% του ολικού κόστους προϊόντος)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Πρώτες ύλες (10-50% τον ολικού κόστους προϊόντος)</li> <li>• Προσωπικό λειτουργίας (10-20% τον ολικού κόστους προϊόντος)</li> <li>• Προσωπικό άμεσης επίβλεψης και γραφείου (10-25% του κόστους προσωπικού λειτουργίας)</li> <li>• Βοηθητικές παροχές (10-20% του ολικού κόστους προϊόντος)</li> <li>• Συντήρηση και επιδιορθώσεις (2-10% της επένδυσης πάγιου κεφαλαίου)</li> <li>• Προμήθειες λειτουργίας (10-20% τον κόστους συντήρησης και επισκευών ή 0.5-4% της επένδυσης πάγιου κεφαλαίου)</li> <li>• Εργαστηριακές χρεώσεις (10-20% κόστους προσωπικού λειτουργίας)</li> <li>• Πατέντες και δικαιώματα ευρεσιτεχνίας (0-6% του ολικού κόστους προϊόντος)</li> </ul>
<b>B. Πάγιες χρεώσεις (10-20% τον ολικού κόστους προϊόντος)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Απόσβεση (εξαρτάται από την περίοδο ζωής, την αξία εκποίησης και τη μέθοδο υπολογισμού - περίπου 10% της επένδυσης πάγιου κεφαλαίου για τα μηχανήματα και τον εξοπλισμό και 2-3% της αξίας των κτιρίων για τα κτίρια)</li> <li>• Τοπικοί φόροι (1-4% της επένδυσης πάγιου κεφαλαίου)</li> <li>• Ασφάλεια (0.4-1% της επένδυσης πάγιου κεφαλαίου)</li> <li>• Ενοίκιο (8-12% της αξίας της ενοικιασμένης γης και των κτιρίων)</li> </ul>
<b>Γ. Γενικά κόστη μονάδος (50-70% τον κόστους τον προσωπικού λειτουργίας, της επίβλεψης και της συντήρησης ή 5-15% του ολικού κόστους προϊόντος).</b>
<p>Περιλαμβάνει κόστος για τα παρακάτω: γενική συντήρηση μονάδας, γενικά έξοδα μισθοδοσίας, συσκευασία, ιατρικές υπηρεσίες, ασφάλεια και προστασία, εστιατόρια, ψυχαγωγία, εργαστήρια και εγκαταστάσεις αποθήκευσης.</p>
<b>II. Γενικά έξοδα = διοικητικό κόστος + κόστος διανομής και πώλησης + κόστος έρευνας και ανάπτυξης.</b>
<b>A. Διοικητικό κόστος (περίπου 15% τον κόστους τον προσωπικού λειτουργίας, της επίβλεψης και της συντήρησης ή 2-6% τον ολικού κόστους παραγωγής).</b>
<p>Περιλαμβάνει κόστος για μισθούς διοικητικών υπαλλήλων, μισθούς υπαλλήλων γραφείου, αμοιβές νομικών, προμήθειες γραφείου και επικοινωνίες</p>
<b>B. Κόστος διανομής και πωλήσεων (2-20% τον ολικού κόστους προϊόντος).</b>
<p>Περιλαμβάνει κόστος για γραφεία πωλήσεων, πωλητές, μεταφορικά και</p>

διαφήμιση
Γ. Κόστος έρευνας και ανάπτυξης (2-5% για κάθε δολλάριο που προέρχεται από τις πωλήσεις ή περίπου 5% του ολικού κόστους προϊόντος)
Δ. Χρηματοδότηση τόκου* (0-10% της ολικής επένδυσης κεφαλαίου).
<b>III. Ολικό κόστος προϊόντος** = κόστος παραγωγής + γενικά έξοδα.</b>
<b>IV. Κόστος ακαθάριστων εσόδων (ακαθάριστα έσοδα = ολικό εισόδημα — ολικό κόστος προϊόντος).</b>
Το κόστος των ακαθάριστων εσόδων εξαρτάται από το ποσό των ακαθάριστων εσόδων για ολόκληρη την εταιρία και τις ρυθμίσεις φόρου εισοδήματος. Μια γενική περιοχή του κόστους ακαθάριστων εσόδων είναι 30-40% των ακαθάριστων εσόδων.

\*Ο τόκος δανεισμένων χρημάτων θεωρείται συχνά ως μια πάγια χρέωση.

\*\*Αν χρειαστεί, μπορεί να συμπεριληφθεί ένας συντελεστής απρόβλεπτων αυξάνοντας το ολικό κόστος προϊόντος κατά 1-5%.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

#### 4.1 ΤΡΙΒΗ

Σύμφωνα τους Peters και Timmerhaus (2002) επιδράσεις της τριβής είναι αρκετά σημαντικές σε διεργασίες ροής. Σε πολλές περιπτώσεις, η τριβή μπορεί να αποτελεί την κύρια αιτία αντίστασης στη ροή ενός ρευστού σε ένα συγκεκριμένο σύστημα. Στο σημείο αυτό θα εξεταστεί το κοινό παράδειγμα του νερού που περνάει μέσα από ένα σωλήνα.

Όταν ένα ρευστό ρέει μέσα σε ένα αγωγό, το ποσό της ενέργειας που χάνεται εξαιτίας της τριβής εξαρτάται από τις ιδιότητες του ρευστού που ρέει και την έκταση του συστήματος των αγωγών. Για την περίπτωση μιας σταθερής ροής μέσω μεγάλων ευθείων σωλήνων με ομοιόμορφη διάμετρο, οι μεταβλητές που επηρεάζουν το ποσό των απωλειών τριβής είναι η ταχύτητα με την οποία ρέει το ρευστό ( $V$ ), η πυκνότητα του ρευστού ( $\rho$ ), το ιξώδες του ρευστού ( $\mu$ ), η διάμετρος του σωλήνα ( $D$ ), το μήκος του σωλήνα ( $L$ ) και η ισοδύναμη τραχύτητα του σωλήνα ( $\epsilon$ ). Εφαρμόζοντας τη μέθοδο της διαστατικής ανάλυσης σε αυτές τις μεταβλητές, μπορεί να ληφθεί η παρακάτω έκφραση για την επίδραση της τριβής στο σύστημα, γνωστή ως εξίσωση Fanning:

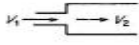
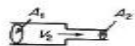
$$dF = \frac{-dp_f}{\rho} = \frac{2fV^2 dL}{g_c D} \xrightarrow{\text{ολοκληρώνοντας}} F = \frac{-\Delta p_f}{\rho} = \frac{2fV^2 L}{g_c D} \quad (4.1)$$


Επίδραση της τριβής που οφείλονται σε απώλειες άκρων, εξαρτημάτων, στομιών.

Αν το εμβαδό της διατομής ενός σωλήνα αλλάζει σταδιακά, οι διαταραχές στον τύπο της ροής μπορεί να είναι τόσο μικρές, ώστε η μηχανική ενέργεια που χάνεται με τη μορφή τριβής λόγω της αλλαγής της διατομής να είναι αμελητέα. Παρόλα αυτά αν η αλλαγή συμβεί απότομα, μπορεί να χαθεί ως τριβή ένα αξιόλογο ποσό μηχανικής ενέργειας. Αντίστοιχα, η παρουσία συνδέσμων, βανών, στομιών ή άλλων

εξαρτημάτων που διαταράσσουν τον τύπο της ροής μπορούν να προκαλέσουν απώλειες λόγω τριβής. Όλες αυτές οι επιδράσεις πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στον όρο της τριβής που εμφανίζεται στο ολικό ισοζύγιο μηχανικής ενέργειας. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται προτεινόμενες εκφράσεις για τον υπολογισμό των σημαντικών τύπων απωλειών λόγω τριβής.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 :** Εκφράσεις για τον υπολογισμό απωλειών λόγω τριβής κατά τη ροή των ρευστών μέσω αγωγών.

Τριβή προκαλούμενη από	Γενική έκφραση για απώλειες λόγω τριβής	Περιορισμένη έκφραση και παρατηρήσεις
Ροή μέσα ευθέων σωλήνων μεγάλου μήκους και σταθερής διατομής	$dF = \frac{2fV^2 dL}{g_c D}$	Για περίπτωση κατά την οποία το ρευστό είναι ουσιαστικά μη συμπιεστό και η θερμοκρασία είναι σταθερή $F = \frac{2fV^2 L}{g_c D}$
Απότομη αύξηση διατομής	$F_e = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2ag_c}$	Οι παρακάτω τιμές του α μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υπολογισμούς σχεδιασμού. Τυρβώδης ροή, α = 1, στρωτή ροή, α = 0.5 
Απότομη μείωση διατομής	$F_c = \frac{K_c V_2^2}{2ag_c}$	Οι παρακάτω τιμές του α μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υπολογισμούς σχεδιασμού. Τυρβώδης ροή, α = 1, στρωτή ροή, α = 0.5  Για $\frac{A_2}{A_1} < 0.715$ , $K_c = 0.4 \left( 1.25 - \frac{A_2}{A_1} \right)$ Για $\frac{A_2}{A_1} > 0.715$ , $K_c = 0.75 \left( 1 - \frac{A_2}{A_1} \right)$ Για κωνικό ή κυκλικό σχήμα, $K_c = 0.05$ $L/D$ ανά εξάρτημα (αδιάστατο)
Εξαρτήματα, βάνες κ.λπ.	$F = \frac{2fV^2 L_e}{g_c D}$	Γωνία 45° 15 Γωνία 90°, σταθερής ακτίνας 32 Γωνία 90°, μέσης ακτίνας 26 Γωνία 90°, μεγάλης καμπύλης 20 Τετράγωνη γωνία 90° 60 Κλειστή καμπή 180° 75

Εξαρτήματα, βάνες κ.λπ.	$F = \frac{2fV^2 L_e}{g_c D}$	$L_e/D$ ανά εξάρτημα (αδιάστατο) 180° σύνδεσμος επιστροφής μέσης ακτίνας 50 Ταυ (χρησιμοποιείται ως γωνία, εισάγεται στη ροή) 60 Ταυ (χρησιμοποιείται ως γωνία, εισάγεται στη διακλάδωση) 90 Σύνδεσμος Αμελητέα Ενώσεις Αμελητέα Συρταρωτές βάνες, ανοικτές 7 Σφαιροειδείς βάνες, ανοικτές 300 Γωνιακές βάνες, ανοικτές 170 Μετρητές νερού, δίσκος 400 Μετρητές νερού, πιστόνι 600 Μετρητές νερού, ωστικός τροχός 300
Στόμιο (όριφης) με οξεία άκρη	$-\Delta p_f = Fp$	$\frac{D_0}{D}$ $\frac{\Delta p_f(100)}{\Delta p \text{ στο στόμιο (όριφης)}} = \%$ 0.8 40 0.7 52 0.6 63 0.5 73 0.4 81 0.3 89 0.2 95 Μετρημένο $\Delta p$ στο στόμιο 
Στρογγυλοποιημένο στόμιο	$F = \frac{(V_0 - V_2)^2}{2ag_c}$	Οι παρακάτω τιμές του α μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υπολογισμούς σχεδιασμού, Τυρβώδης ροή, α=1, ροή στην περιοχή των ροϊκών γραμμών, α=0.5 $V_0 \leftarrow V_2 \rightarrow$
Venturi	$-\Delta p_f = Fp$	$-\Delta p_f = 1/8$ έως $1/10$ της ολικής πτώσης πίεσης από το άνω τμήμα ροής έως το λαιμό του Venturi

## 4.2 ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ

Η σημασία των σωληνώσεων για τη μεταφορά ύλης και ενέργειας είναι πολύ μεγάλη διότι με αυτούς γίνεται η διακίνηση ρευστών, υγρών αερίων κ.λπ. Μια σωλήνωση εκτός από τα ευθύγραμμα τμήματα σωλήνων αποτελείται και από διάφορα εξαρτήματα σύνδεσης σωλήνων όπως, (συστολές, διαστολές, ειδικές κατασκευές, κ.λπ.), ρύθμισης της κατεύθυνσης με καμπύλες, γωνίες, ταυ, σταυροί, κ.λπ. με εξοπλισμό ρύθμισης της παροχής όπως βάνες, επιστόμια, φίλτρα, και άλλες πολλές διατάξεις που παρεμβάλλονται στο δίκτυο με σκοπό να εξυπηρετούν την εγκατάσταση. Ανάλογα με την εφαρμογή και εγκατάσταση τα υλικά επιλέγονται ώστε να είναι ανθεκτικά στις διάφορες θερμοκρασίες, πιέσεις και ιδιότητες του ρευστού. Οι σωληνώσεις και τα διάφορα εξαρτήματα που αποτελούν μια εγκατάσταση χαρακτηρίζονται από το είδος του μεταφερόμενου ρευστού και από την πίεση έτσι ώστε ανάλογα με τη χρήση τους κατασκευάζονται από διάφορα υλικά όπως ο χυτοσίδηρος ο χάλυβας ο ορείχαλκος ο μόλυβδος ο το αλουμίνιο κ.λπ

### 4.2.1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ

#### ΠΡΟΤΥΠΑ ΣΩΛΗΝΩΝ

Οι σωλήνες σιδήρου και οι σωλήνες χάλυβα ταξινομήθηκαν με βάση το πάχος του τοιχώματος, ως κανονικοί, πολύ ισχυροί και διπλά ισχυροί. Οι σύγχρονες βιομηχανικές απαιτήσεις για πιο ακριβείς προδιαγραφές έχουν καταστήσει αυτές τις τρεις ταξινομήσεις απαρχαιωμένες. Οι σωλήνες πλέον ταξινομούνται σύμφωνα με το πάχος του τοιχώματος με βάση μια πρότυπη φόρμουλα (schedule number) όπως ορίζεται από την American Standards Association. Η πίεση διάρρηξης ενός κυλίνδρου με λεπτά τοιχώματα μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_b = \frac{2S_T t_m}{D_m} (4.2)$$



$P_b$  = πίεση διάρρηξης (διαφορά μεταξύ εσωτερικής-εξωτερικής πίεσης) ,psi

$S_T$  = αντοχή εφελκυσμού, psi

$t_m$  = ελάχιστο πάχος τοιχώματος, in.

$D_m$  = μέση διάμετρος, in.

Μια ασφαλής πίεση λειτουργίας  $P_s$  μπορεί να υπολογιστεί από την Εξ. (4.3.1) αν η αντοχή εφελκυσμού αντικατασταθεί από την ασφαλή τάση λειτουργίας,  $S_s$ .

$$P_s = \frac{2S_s t_m}{D_m} \quad (4.3)$$

Ο χαρακτηριστικός αριθμός (schedule number) που περιγράφει τους σωλήνες ορίζεται από την American Standards Association ως η προσεγγιστική τιμή του όρου

$$1000 \frac{P_s}{S_s} = \text{αριθμός schedule} \quad (4.4)$$

Για θερμοκρασίες μέχρι 250°F η προτεινόμενη ασφαλής τάση λειτουργίας είναι 9000 psi για χαλύβδινους σωλήνες συγκολλημένους με επαλληλία και 6500 psi για χαλύβδινους σωλήνες με ηλεκτροσυγκόλληση στα άκρα. Αν είναι γνωστός ο αριθμός schedule η ασφαλής πίεση λειτουργίας μπορεί να υπολογιστεί κατευθείαν από την Εξ. (5.4). Σήμερα χρησιμοποιούνται δέκα αριθμοί schedule. Αυτοί είναι 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140 και 160. Για σωλήνες με διάμετρο μέχρι 10 in. ο αριθμός schedule 40 αντιστοιχεί στον προηγούμενο "κανονικό" σωλήνα και ο αριθμός schedule 80 αντιστοιχεί στον παλαιότερο "πολύ ισχυρό" σωλήνα. Ο παλαιότερος "διπλά ισχυρός" σωλήνας δεν αντιπροσωπεύεται από έναν καθορισμένο αριθμό schedule.

## ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΩΛΗΝΑ

Τα μεγέθη των σωλήνων βασίζονται στην προσεγγιστική διάμετρο και αναφέρονται ως ονομαστικά μεγέθη σωλήνων. αρόλο που το πάχος τον τοιχώματος ποικίλει ανάλογα με τον αριθμό schedule, η εξωτερική διάμετρος οποιουδήποτε σωλήνα με συγκεκριμένο ονομαστικό μέγεθος είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τον αριθμό schedule. Έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν πρότυπα εξαρτήματα και εργαλεία χάραξης σπειρωμάτων σε σωλήνες με διαφορετικούς αριθμούς schedule. Στο Παράρτημα παρουσιάζεται ένας πίνακας με εξωτερικές διαμέτρους, εσωτερικές διαμέτρους και άλλες διαστάσεις για σωλήνες με διαφορετικές διαμέτρους και αριθμούς schedule.



ΣΧΗΜΑ 4.1: Φωτογραφική απεικόνιση εξαρτημάτων.

## ΑΓΩΓΟΙ

Οι χάλκινοι και οι μπρούντζινοι αγωγοί χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανικές διεργασίες. Άλλα υλικά κατασκευής αγωγών είναι το νικέλιο και ο ανοξείδωτος χάλυβας. Παρόλο που οι προδιαγραφές των σωλήνων βασίζονται σε πρότυπα ονομαστικά μεγέθη, οι προδιαγραφές των αγωγών βασίζονται στην πραγματική εξωτερική διάμετρο, με ένα καθορισμένο πάχος τοιχώματος. Για τον προσδιορισμό του πάχους τον τοιχώματος χρησιμοποιούνται συμβατά συστήματα, όπως το Birmingham Wire Gauge (BWO).

## ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ

Σε συστήματα σωληνώσεων χρησιμοποιούνται εξαρτήματα με σπειρώματα, φλάντζες, βάνες, μετρητές ροής, ατμοπαγίδες και πολλά άλλα βοηθητικά εξαρτήματα για τη σύνδεση των τμημάτων της σωληνώσης, την αλλαγή της κατεύθυνσης της ροής, τη ρύθμιση της ροής ή τη δημιουργία των επιθυμητών συνθηκών σε ένα σύστημα ροής. Συνήθως σε συνδέσεις σωληνώσεων

χρησιμοποιούνται φλάντζες, όταν η διάμετρος του σωλήνα είναι 3 in. ή μεγαλύτερη, ενώ για μικρότερα μεγέθη χρησιμοποιούνται βιδωτά εξαρτήματα. Στην περίπτωση ενός σωλήνα από χυτοσίδηρο που χρησιμοποιείται ως υπόγεια γραμμή νερού, χρησιμοποιούνται περισσότερο φορετές ενώσεις παρά φλάντζες (οι φορετές ενώσεις γίνονται με την τοποθέτηση του άκρου του ενός σωλήνα μέσα στο πεπλατισμένο άκρο του άλλου).

Τα βοηθητικά εξαρτήματα σε συστήματα σωληνώσεων πρέπει να έχουν κατασκευαστική αντοχή ώστε να αντισταθούν στην πίεση ή σε άλλες καταπονήσεις που παρουσιάζονται κατά τη λειτουργία. Ο μηχανικός σχεδιασμού όταν καθορίζει τις ιδιότητες αυτών των εξαρτημάτων θα πρέπει να χρησιμοποιεί ένα περιθώριο ασφαλείας. Τα εξαρτήματα, οι βάνες, οι ατμοπαγίδες κ.λ.π. ταξινομούνται συνήθως με βάση την ασφαλή πίεση λειτουργίας ως (α) χαμηλής πίεσης (25 psi), (β) κανονικής πίεσης (125 psi), (γ) πολύ μεγάλης πίεσης (250 psi) ή (δ) υδραυλικής πίεσης (300 έως 10,000 psi).

#### 4.2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ

Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος σωληνώσεων ένας μηχανικός πρέπει να μελετά τα παρακάτω θέματα:

1. Επιλογή των υλικών και των μεγεθών.
2. Επιδράσεις της θερμοκρασίας και των μεταβολών της.
  - α. Μόνωση
  - β. Θερμική διαστολή
  - γ. Ψύξη
3. Ελαστικότητα του συστήματος σε φυσικά ή θερμικά σοκ
4. Επαρκής υποστήριξη και στερέωση
5. Μεταβολές στο σύστημα και στη λειτουργία
6. Συντήρηση και επίβλεψη
7. Ευκολία στην εγκατάσταση
8. Βοηθητικές ή εφεδρικές αντλίες και γραμμές

## 9. Ασφάλεια

α. Συντελεστές σχεδιασμού

β. Βαλβίδες ανακούφισης και συστήματα επικοινωνίας με πυρσούς

### 4.2.3 ΜΕΓΕΘΟΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ-ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ

Ο μηχανικός σχεδιασμού πρέπει να προσδιορίσει τη διάμετρο των σωλήνων που θα χρησιμοποιηθούν σε ένα συγκεκριμένο σύστημα σωληνώσεων και θα πρέπει να μελετήσει τους οικονομικούς παράγοντες για τον καθορισμό της βέλτιστης διαμέτρου σωλήνα. Θεωρητικά, η άριστη διάμετρος σωλήνα είναι αυτή η οποία έχει το ελάχιστο ολικό κόστος για δεδομένη ετήσια ενέργεια άντλησης και πάγιες χρεώσεις για το συγκεκριμένο σύστημα σωληνώσεων. Για τον υπολογισμό των βέλτιστων διαμέτρων σωλήνα έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι και στη πορεία παρουσιάζονται κάποιοι εμπειρικοί κανόνες για τον υπολογισμό της διαμέτρου του σωλήνα.

Για τυρβώδη ροή ( $N_{Re} > 2100$ ) σε χαλύβδινους σωλήνες

$$D_{i,opt} = 3.9q_f^{0.45} \rho^{0.13} \quad (4.5)$$

Για στρωτή ροή ( $N_{Re} < 2100$ ) σε χαλύβδινους σωλήνες

$$D_{i,opt} = 3q_f^{0.45} \mu_c^{0.18} \quad (4.6)$$

$D_{i,opt}$  = βέλτιστη εσωτερική διάμετρος σωλήνα, in.

$q_f$  = ρυθμός ροής ρευστού, ft<sup>3</sup>/s

$\rho$  = πυκνότητα ρευστού, lb/ft<sup>3</sup>

$\mu_c$  = ιξώδες ρευστού, centipoises

#### 4.2.4 ΚΟΣΤΟΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ

Οι σωληνώσεις αποτελούν ένα σημαντικό μέρος του κόστους των μονάδων χημικών διεργασιών. Αυτό το κόστος σε μια μονάδα διεργασίας ρευστού μπορεί να είναι έως το 80% του κόστους αγοράς εξοπλισμού ή το 20% της επένδυσης κεφαλαίου.

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι για τον υπολογισμό κόστους σωληνώσεων

1. μέθοδος ποσοστού του εγκατεστημένου εξοπλισμού
2. μέθοδος αποτίμησης του υλικού και των εργατικών

##### Μέθοδος 1

Η μέθοδος ποσοστού του εγκατεστημένου εξοπλισμού όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 3 είναι μια γρήγορη διαδικασία για ένα προκαταρκτικό υπολογισμό της τάξης μεγέθους του κόστους. Για τους έμπειρους μελετητές η μέθοδος αυτή είναι μια μέθοδος λογικής ακρίβειας, ιδιαίτερα σε μονάδες επαναληπτικού τύπου. Ωστόσο δε συνιστάται η χρησιμοποίησή της σε εργασίες μετατροπής ή σε έργα όπου το ολικό κόστος εγκαταστημένου εξοπλισμού είναι μικρότερο από \$100,000.

##### Μέθοδος 2

Η μέθοδος αποτίμησης υλικού και εργατικών είναι η μέθοδος που προτιμάται για οριστικούς υπολογισμούς, όπου απαιτείται ακρίβεια περίπου 10%. Για να γίνει ένας υπολογισμός κόστους με αυτή τη μέθοδο απαιτούνται συνήθως τα σχεδιαγράμματα και οι προδιαγραφές των σωληνώσεων, το κόστος των υλικών, το κόστος των εργατικών για την κατασκευή και για την ανέγερση, το κόστος των δοκιμών, το κόστος των βοηθητικών εξαρτημάτων, των στηριγμάτων και των βαφών. Η αποτίμηση από τα σχεδιαγράμματα πρέπει να γίνει με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, επειδή αποτελεί τη βάση για τον καθορισμό του κόστους των υλικών και των εργατικών. Στην περίπτωση των μετατροπών σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις, απαιτείται επί τόπου μελέτη προκειμένου να καθορισθούν οι συνθήκες εργασίας και οι πιθανές τους επιδράσεις.

## 4.3 ΑΝΤΛΙΕΣ

### 4.3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Σύμφωνα με τον Οικονόμου (2004) οι αντλίες για την άντληση του νερού επινοήθηκαν πριν από τις κινητήριες μηχανές. Τα βασικά εξαρτήματα των αντλιών αυτών ήταν δοχεία, τα οποία βυθιζόταν μέσα στο νερό και μετά ανυψωνόταν με τη βοήθεια απλών μηχανών.

Η επινοήση του ανυψωτικού τροχού πρέπει να θεωρηθεί σαν ένα σημαντικό βήμα προόδου στην άντληση του νερού για άρδευση. Στην περιφέρεια ενός μεγάλου τροχού ήταν τοποθετημένα δοχεία, που βυθίζονταν στο νερό, γέμιζαν και καθώς ο τροχός περιστρεφόταν, ανέρχονταν και άδειάζαν μέσα στο αυλάκι αρδύσεως. Ως ενέργεια για την περιστροφή του τροχού χρησιμοποιήθηκε η ανθρώπινη ή ζωική δύναμη και η δύναμη του ανέμου. Αργότερα ο ανυψωτικός τροχός μετατράπηκε σε «αυτοκινούμενο» με την προσθήκη πτερυγίων στην περιφέρεια του. Καθώς το νερό των ποταμών έρεε, ωθούσε τα πτερύγια και ο τροχός περιστρεφόταν για την ανύψωση των δοχείων. Άλλες διατάξεις για άντληση του νερού ήταν ο κοχλίας, η αλυσίδα με βύσματα και η χειροκίνητη παλινδρομική αντλία (τουλούμπα).

Εφευρέτης της φυγοκέντρου αντλίας θεωρείται ο Γάλλος Denis Papin, που το 1687 περιέγραψε ένα τύπο αντλίας της οποίας η αρχή λειτουργίας ήταν η ίδια με τις σημερινές φυγόκεντρους αντλίες. Στο πειραματικό μοντέλο αυτό η πτερωτή είχε δύο πλήρως ακτινικά πτερύγια. Το 1705 κατασκεύασε ο ίδιος το μοντέλο της πρώτης φυγοκέντρου αντλίας για άντληση νερού. Αργότερα κατασκευάστηκαν και άλλες φυγοκεντρικές αντλίες με μικρές βελτιώσεις, αλλά ο βαθμός απόδοσης τους ήταν πολύ μικρός. Το 1875 ο Osborne Reynolds κατασκεύασε την πρώτη στροβιλαντλία (turbine pump), που είχε σημαντικά αυξημένη απόδοση.

Από το 1840 άρχισαν να χρησιμοποιούνται οι ατμομηχανές για την κίνηση των αντλιών όταν ο H. Worthington κατασκεύασε μια παλινδρομική αντλία, της οποίας το έμβολο ήταν συνδεδεμένο απευθείας με το έμβολο της ατμομηχανής. Νέα ώθηση στην εξέλιξη των αντλιών και την επινοήση νέων τύπων έδωσε η εμφάνιση των

κινητήρων εσωτερικής καύσης. Επίσης οι αεριοστρόβιλοι (steam turbines) και οι ηλεκτροκινητήρες, που δίνουν μεγάλο αριθμό στροφών και σταθερή ροπή, συντέλεσαν στη ταχεία εξέλιξη των φυγοκεντρικών αντλιών και την εκτόπιση των παλινδρομικών, εκτός από τις περιπτώσεις που επιζητείται υψηλή πίεση και μικρή παροχή. Παράλληλα αναπτύχθηκαν οι περιστροφικές αντλίες για μικρές παροχές για μέση πίεση ιδίως για υγρά με μεγάλο ιξώδες.

### 4.3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

#### ΑΝΤΛΙΕΣ

Σύμφωνα με τους Peters και Timmerhaus (2002) οι αντλίες χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν ρευστά από ένα μέρος σε ένα άλλο. Η αντλία επιτυγχάνει αυτή τη μεταφορά αυξάνοντας την πίεση του ρευστού και, κατά συνέπεια, παρέχοντας την απαραίτητη κινητήρια δύναμη για τη ροή. Η ισχύς πρέπει να τροφοδοτείται στην αντλία από κάποια εξωτερική πηγή. Η ηλεκτρική ενέργεια ή η ενέργεια του υδρατμού μπορούν να μετατραπούν σε μηχανική ενέργεια η οποία χρησιμοποιείται για να κινήσει την αντλία. Μέρος αυτής της μηχανικής ενέργειας προστίθεται στο ρευστό ως ενέργεια έργου και το υπόλοιπο χάνεται ως τριβή εξαιτίας της αναποτελεσματικότητας της αντλίας και του κινητήρα.

Οι βασικές αρχές λειτουργίας των αντλιών αερίων και υγρών είναι παρόμοιες, όμως οι μηχανικές λεπτομέρειες είναι διαφορετικές, εξαιτίας των διαφορών στις φυσικές ιδιότητες των αερίων και των υγρών. Γενικά, οι αντλίες που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά αερίων λειτουργούν σε υψηλότερες ταχύτητες από αυτές των υγρών. Στις αντλίες αερίου χρειάζονται μικρότερα διάκενα ανάμεσα στα κινούμενα τμήματα εξαιτίας του χαμηλότερου ιξώδους των αερίων και της μεγαλύτερης τάσης που παρουσιάζουν για διαρροές.

#### ΣΩΛΗΝΑΣ ΑΝΑΡΡΟΦΙΣΕΩΣ

Είναι το τμήμα του σωλήνα, από το σημείο παραλαβής του υγρού μέχρι την είσοδο του στην αντλία.

### ΣΩΛΗΝΑΣ ΚΑΤΑΘΛΙΨΕΩΣ

Είναι το τμήμα του σωλήνα, από το σημείο εξόδου του υγρού από την αντλία μέχρι το σημείο αποστολής του.

### ΣΩΛΗΝΟΓΡΑΜΜΗ

Είναι το σύνολο των σωλήνων μέσα από τους οποίους ρέει το υγρό.

### ΑΝΤΛΙΤΙΚΟ ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑ

Είναι ένα σύνολο αντλιών (μαζί με τον κινητήρα) που συνεργάζεται για την άντληση του υγρού.



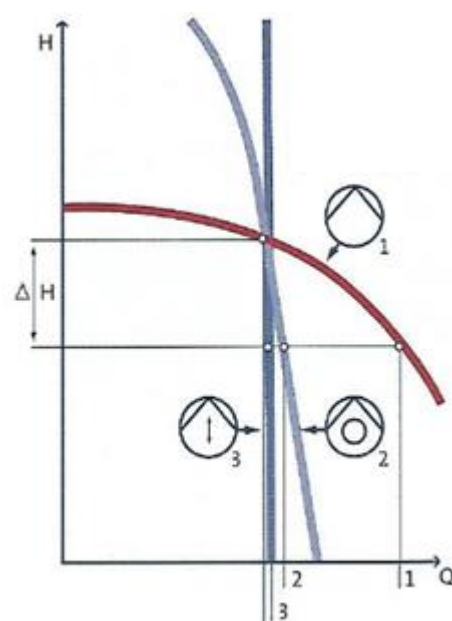
### 4.3.3 ΤΥΠΟΙ ΑΝΤΛΙΩΝ

Οι διάφοροι τύποι αντλιών που χρησιμοποιούνται συνήθως σε βιομηχανικές διεργασίες μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

#### ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ Α

Οι διάφοροι τύποι αντλιών που χρησιμοποιούνται συνήθως σε βιομηχανικές διεργασίες μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

1. **Περιστροφικές φυγοκεντρικές αντλίες χωρίς βαλβίδα:** αντλίες ανοικτού προωθητήρα, κλειστού άξονα, σπειροειδείς αντλίες, στρόβιλοι
2. **Περιστροφικές αντλίες θετικής εκτόπισης χωρίς βαλβίδα:** αντλίες με οδοντωτούς τροχούς, αντλίες με λοβούς, κοχλιωτές έκκεντρες αντλίες, μετρητικές αντλίες
3. **Παλινδρομικές αντλίες ή αντλίες θετικής εκτόπισης με βαλβίδα:** εμβολοφόρες αντλίες, αντλίες διαφράγματος, καταθλιπτικές αντλίες
4. **Συστήματα εκτόπισης αέρα:** ανυψωτήρες αέρα, δοχεία μεταφοράς διαβρωτικών υλικών με τη βοήθεια αέρα, αντλίες έγχυσης, βαρομετρικοί βραχίονες



**ΣΧΗΜΑ 4.2** Τυπική σχέση μεταξύ παροχής και πίεσης για:

1. Φυγοκεντρικές αντλίες
2. Περιστροφικές αντλίες
3. Παλινδρομικές αντλίες

#### Σχολιάζοντας το διάγραμμα

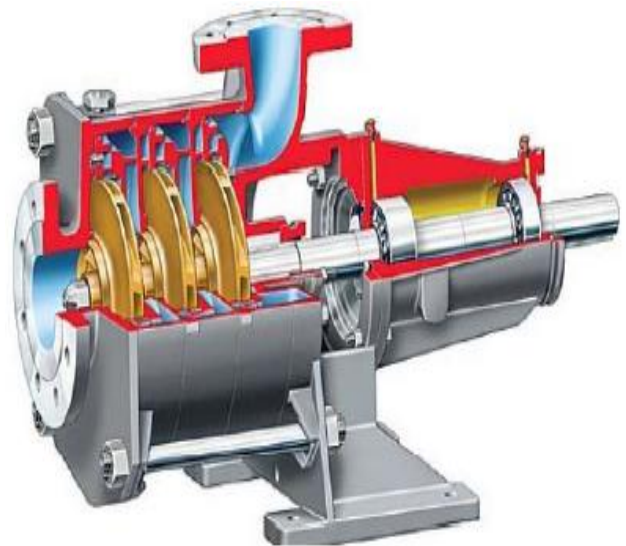
Η διαφορά απόδοσης μεταξύ μίας φυγοκεντρικής, μίας περιστροφικής και μίας παλινδρομικής αντλίας απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2. Ανάλογα με ποιον από αυτούς τους τύπους αντλιών έχουμε, μία μικρή αλλαγή στην αντίθλιψη της αντλίας καταλήγει σε διαφορές στην παροχή.

Η παροχή μίας φυγοκεντρικής αντλίας θα αλλάξει σημαντικά, η παροχή μίας περιστροφικής αντλίας, θα αλλάξει ελάχιστα ενώ η παροχή μίας παλινδρομικής

αντλίας δεν θα αλλάξει σχεδόν καθόλου. Όμως γιατί υπάρχει τελικά διαφορά μεταξύ των χαρακτηριστικών καμπυλών για τις παλινδρομικές και τις περιστροφικές αντλίες. Η πραγματική επιφάνεια στεγανοποίησης είναι μεγαλύτερη στις περιστροφικές αντλίες σε σύγκριση με τις παλινδρομικές. Έτσι, αν και οι δύο τύποι αντλιών έχουν σχεδιαστεί με τις ίδιες ανοχές, η απώλεια διάκενου της περιστροφικής αντλίας είναι μεγαλύτερη. Οι αντλίες είναι αρχικά σχεδιασμένες με τις καλύτερες δυνατές ανοχές ώστε να επιτυγχάνεται η υψηλότερη δυνατή απόδοση και ικανότητα αναρρόφησης. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι απαραίτητο να αυξήσουμε τις ανοχές, για παράδειγμα όταν οι αντλίες πρέπει να διαχειριστούν ιδιαίτερα ιξώδη υγρά, υγρά που περιέχουν σωματίδια ή έχουν υψηλή θερμοκρασία. Οι αντλίες θετικής μετατόπισης είναι παλμικές, που σημαίνει ότι ο όγκος παροχής τους στα πλαίσια ενός κύκλου δεν είναι σταθερός. Η μεταβολή στην παροχή και στην ταχύτητα προκαλεί διακυμάνσεις πίεσης λόγω της αντίστασης στο σύστημα σωληνώσεων και στις βαλβίδες.



ΣΧΗΜΑ 4.3: Φωτογραφική απεικόνιση μια τυπικής φυγοκεντρικής αντλίας η οποία χρησιμοποιείται σε δίκτυο ύδρευσης προκειμένου να αυξάνει το μανομετρικό ύψος (λειτουργία booster).



ΣΧΗΜΑ 4.4: Τομή τυπικής φυγοκεντρικής αντλίας.

## ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ Β

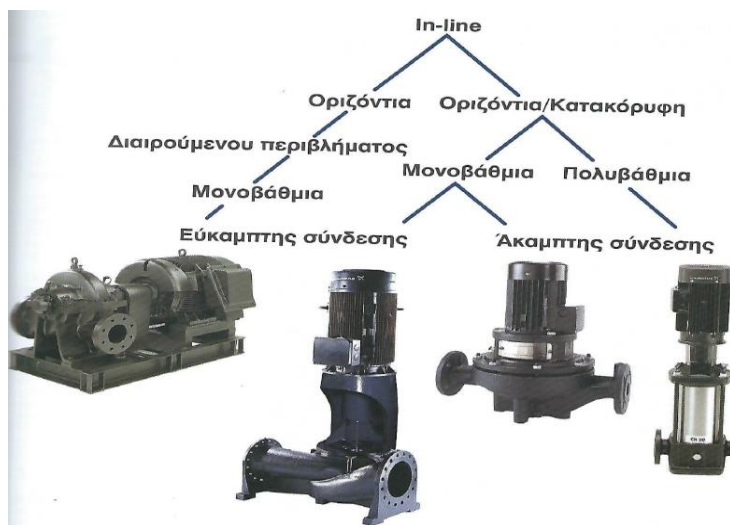
Σύμφωνα το τεχνικό εγχειρίδιο της εταιρείας Grundfos (2013) έχουμε την κατηγοριοποίηση

- α. Μονομπλοκ :** Το υγρό ρέει απευθείας μέσα στην πτερωτή. Η είσοδος και η έξοδος έχουν γωνία 90 μοίρες.



ΣΧΗΜΑ 4.5: Διαχωρισμός αντλιών τύπου μονομπλοκ.

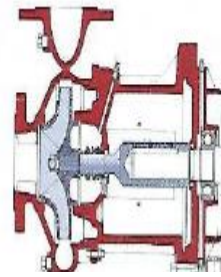
- β. In-line :** Το υγρό ρέει απευθείας μέσα στην αντλία in-line. Ο σωλήνας αναρρόφησης και ο σωλήνας κατάθλιψης είναι τοποθετημένοι ο ένας απέναντι από τον άλλο και μπορούν να συνδεθούν σε ευθεία.



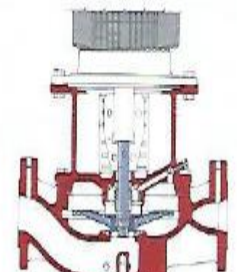
ΣΧΗΜΑ 4.6: Διαχωρισμός αντλιών τύπου in-line.

## 2. α. Μονοβάθμιες :

- Αντλία με μονή πτερωτή.
- Δίνουν χαμηλό μανομετρικό ύψος σε σχέση με την παροχή.
- Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που δεν απαιτούν συνολικό μανομετρικό ύψος μεγαλύτερο από 150m.



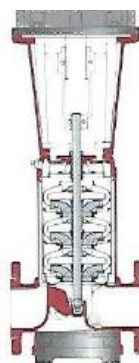
ΣΧΗΜΑ 4.7: Οριζόντια  
μονοβάθμια αντλία  
μονομπλοκ με άκαμπτο



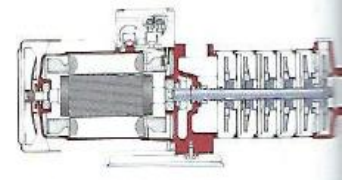
ΣΧΗΜΑ 4.8:  
Κατακόρυφη αντλία  
inline με άκαμπτο

## β. Πολυβάθμιες :

- Αντλία με βαθμίδες σε σειρά.
- Δίνουν χαμηλό μανομετρικό ύψος σε σχέση με την παροχή.
- Χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις όπου χρειάζεται υψηλό μανομετρικό ύψος.



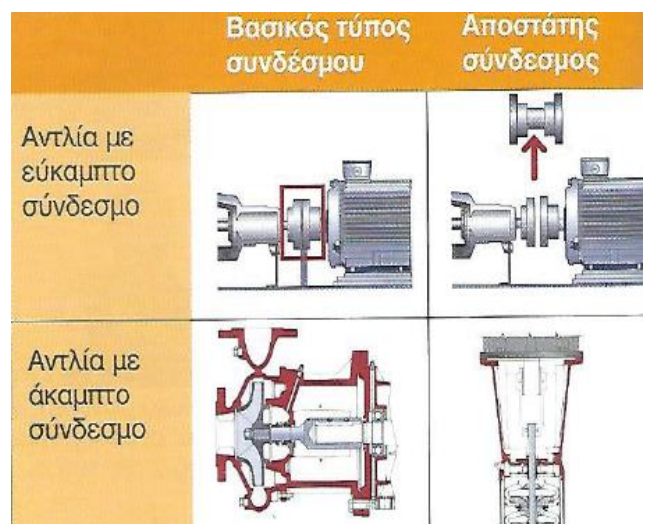
ΣΧΗΜΑ 4.9: Κατακόρυφη  
πολυβάθμια inline αντλία.



ΣΧΗΜΑ 4.10: Οριζόντια  
πολυβάθμια αντλία  
μονομπλοκ.

## 3. α. Με εύκαμπτο σύνδεσμο :

- Αντλία συνδεδεμένη στον κινητήρα μέσω ενός εύκαμπτου συνδέσμου, διατίθεται ως  
(1) βασικός σύνδεσμος κανονικού μήκους που σε περίπτωση επισκευής ή συντήρησης της αντλίας είναι απαραίτητη η μετατόπιση κινητήρα  
(2) αποστάτης σύνδεσμος με τη συντήρηση ή την επισκευή να μπορούν να πραγματοποιηθούν χωρίς να χρειαστεί το λύσιμο του κινητήρα.



ΣΧΗΜΑ 4.11: Αντλία με εύκαμπτο και άκαμπτο σύνδεσμο.

- Κινητήρας και η αντλία διαθέτουν ξεχωριστές φολιές εδράνων.

#### β. Με άκαμπτο σύνδεσμο :

Αντλία συνδεδεμένη στον κινητήρα μέσω ενός άκαμπτου συνδέσμου.

#### 4. Ερμειτικά κλειστές αντλίες :

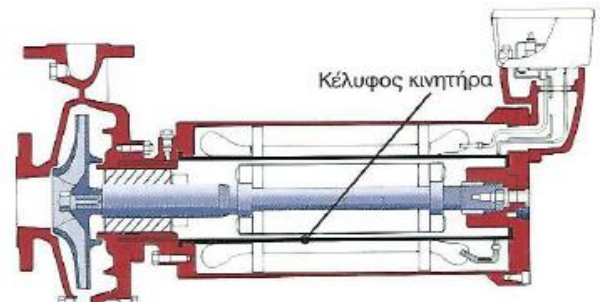
Χρησιμοποιούνται όταν πρόκειται να διαχειριστούμε τοξικά ή διαβρωτικά υγρά.



ΣΧΗΜΑ 4.12: Τυποποιημένη αντλία με μηχανικό στυπιοθλίπτη άξονα.

#### α. Αντλίες με κινητήρα κλειστού τύπου

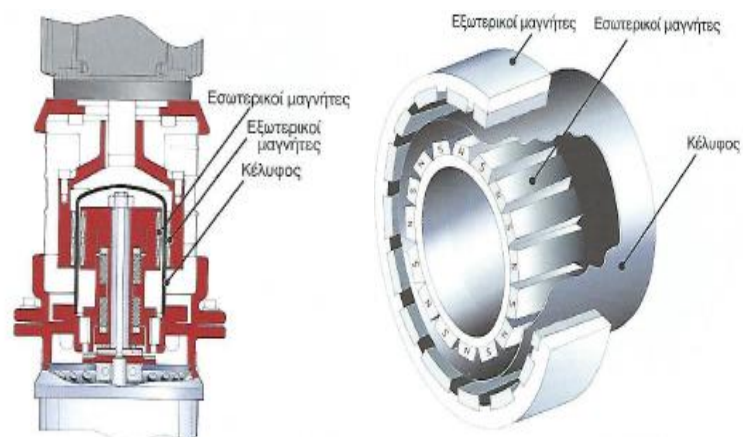
- Ο κινητήρας και η αντλία είναι ενσωματωμένα σε μια μονάδα χωρίς στεγανοποιητικό.
- Το αντλούμενο υγρό εισέρχεται στο θάλαμο του ρότορα που διαχωρίζεται από το στάτη μέσω ενός λεπτού κελύφους.
- Ο συνηθέστερος τύπος αντλίας με κινητήρα κλειστού τύπου είναι ο κυκλοφορητής στα κυκλώματα θέρμανσης.



ΣΧΗΜΑ 4.13: Αντλία χημικών με κινητήρα κλειστού τύπου.

#### β. Μαγνητικά κινούμενες αντλίες

- Ο εξωτερικός μαγνήτης συνδέεται στο σύστημα μετάδοσης κίνησης της αντλίας και ο εσωτερικός μαγνήτης συνδέεται στον άξονα της αντλίας.
- Το αντλούμενο υγρό χρησιμεύει ως λιπαντικό για τα έδρανα της αντλίας



ΣΧΗΜΑ 4.14: Πολυβάθμια αντλία με μαγνητικό σύστημα μετάδοσης κίνησης.

### 5. Αντλίες υγιεινής

- Χρησιμοποιούνται κυρίως στη βιομηχανία τροφίμων, ποτών, φαρμακευτικής και βιοτεχνολογίας.
- Τα κύρια χαρακτηριστικά τέτοιων αντλιών είναι η ευκολία καθαρισμού και η ευκολία συντήρησης.

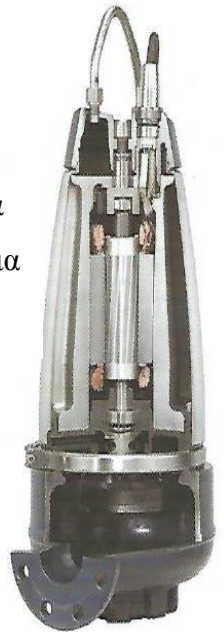


ΣΧΗΜΑ 4.15: Αντλία υγιεινής.

### 6. Αντλίες ακάθαρτων υδάτων

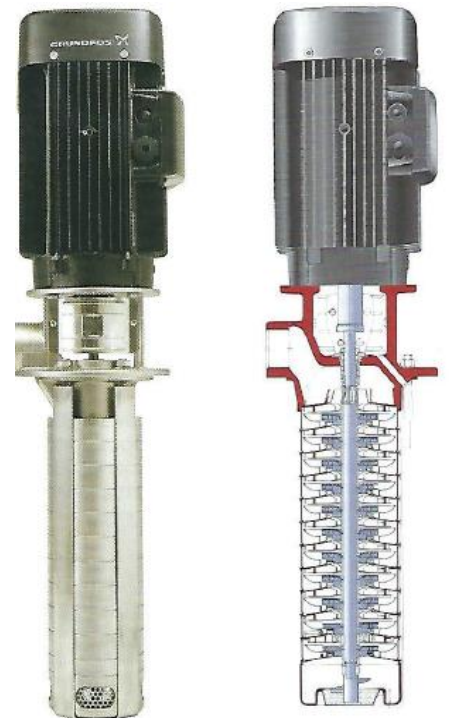
- Λόγω της κατασκευής της είναι κατάλληλη για υποβρύχια εγκατάσταση στα φρεάτια.
- Μπορούν να χειρίζονται μεγάλα σωματίδια καθώς είναι εξοπλισμένες με ειδικές πτερωτές για να αποφεύγεται το μπλοκάρισμα και η απόφραξη.
- Μπορούν να έχουν συνεχή ή διακεκομμένη λειτουργία ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή.

ΣΧΗΜΑ 4.16: Αντλία λυμάτων για υποβρύχια εγκατάσταση.



### 7. Ημιβυθιζόμενες αντλίες

- Το μέρος της αντλίας είναι βυθισμένο στο αντλούμενο υγρό και ο κινητήρας διατηρείται στεγνός.
- Χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία εργαλειομηχανών π.χ. εργαλειομηχανές συγκολλήσεων, λειάνσεων, τόνους και μονάδες ψύξης.



ΣΧΗΜΑ 4.17: Ημιβυθιζόμενη αντλία.

## 8. Αντλίες γεώτρησης

- Χρησιμοποιούνται για παροχή νερού και για άρδευση.
- Υπάρχουν δύο τύποι αντλιών γεώτρησης : α) με υποβρύχιο κινητήρα, β) πομόνα με κινητήρα ξηρού τύπου που συνδέεται με την αντλία μέσω μακριού άξονα.
- Είναι κατασκευασμένες για τοποθέτηση σε στενές γεωτρήσεις επομένως έχουν μειωμένη διάμετρος γεγονός που τις καθιστά μακρύτερες από τους άλλους τύπους αντλιών.
- Σήμερα η πομόνα έχει σχεδόν ολοκληρωτικά αντικατασταθεί από τον υποβρύχιο τύπο αντλίας καθώς ο επιμήκης άξονας της δυσχεραίνει την τοποθέτηση και τη διεξαγωγή της επιθεώρησης



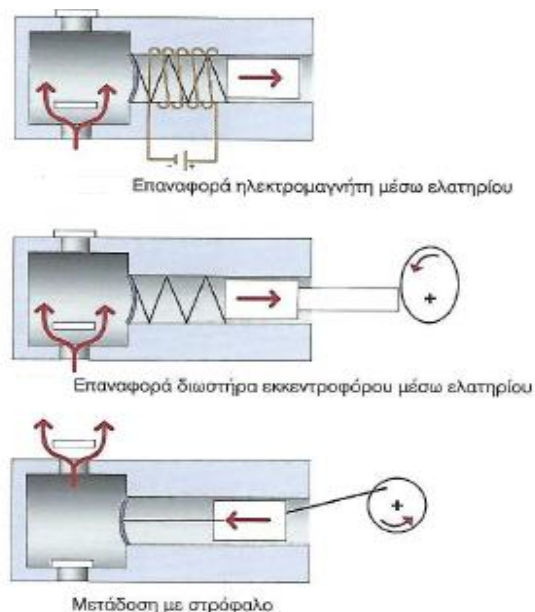
ΣΧΗΜΑ 4.18: Υποβρύχια αντλία.

## 9. Δοσομετρικές αντλίες

- Ανήκουν στην οικογένεια αντλιών θετικής εκτόπισης και είναι συνήθως αντλίες διαφράγματος.
- Οι αντλίες διαφράγματος είναι απαλλαγμένες από διαρροές καθώς το διάφραγμα αποτελεί ένα είδος στεγανοποιητικού μεταξύ υγρού και περιβάλλοντος.
- 1<sup>ο</sup> είδος : Στις μικρότερες αντλίες διαφράγματος, το διάφραγμα ενεργοποιείται από τον διωστήρα σύνδεσης, ο οποίος συνδέεται με έναν ηλεκτρομαγνήτη.
- 2<sup>ο</sup> είδος : Στις μεγαλύτερες αντλίες διαφράγματος, το διάφραγμα τοποθετείται πάνω στο διωστήρα σύνδεσης, που ενεργοποιείται από έναν εκκεντροφόρο άξονα που περιτρέφεται μέσω τυποποιημένου ασύγχρονου κινητήρα.
- 3<sup>ο</sup> είδος : Στή περίπτωση αυτή το διάφραγμα ενεργοποιείται μέσω ενός διωστήρα έκκεντρα συνδεδεμένου, που κινείται μέσω βηματικού ή σύγχρονου κινητήρα.



ΣΧΗΜΑ 4.19 Δοσομετρική αντλία.



#### 4.3.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΝΤΛΙΑΣ

Σύμφωνα με τους Peters και Timmerhaus (2002) πολλοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν την τελική επιλογή μιας αντλίας για μια συγκεκριμένη λειτουργία. Η παρακάτω λίστα περιλαμβάνει τους βασικούς παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή μιας αντλίας:

1. Το ποσό τον ρευστού που πρέπει να αντληθεί. Αυτός ο παράγοντας καθορίζει το μέγεθος της αντλίας (ή των αντλιών) που απαιτείται.
2. Οι ιδιότητες τον ρευστού. Η πυκνότητα και το ιξώδες του ρευστού επηρεάζουν την απαίτηση σε ισχύ για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Οι διαβρωτικές ιδιότητες τον ρευστού καθορίζουν τα επιτρεπτά υλικά κατασκευής. Η παρουσία αιωρού-μενων στερεών σωματιδίων στο ρευστό υπαγορεύει το μέγεθος των διάκενων και μπορεί να οδηγήσει στην απόρριψη κάποιων τύπων αντλιών.
3. Η αύξηση στην πίεση του ρευστού εξαιτίας του έργου που εισέρχεται στις αντλίες. Η μεταβολή τον μανομετρικού ύψους στην αντλία επηρεάζεται από την πίεση εισόδου κατ την πίεση στη δεξαμενή μετά την έξοδο, τη μεταβολή στο κάθετο ύψος της γραμμής και την τριβή. Αυτός ο παράγοντας είναι βασικός στον καθορισμό των απαιτήσεων σε ισχύ.
4. Τύπος κατανομής της ροής. Αν απαιτείται μη παλμική ροή, κάποιοι τύποι αντλιών, όπως οι απλές παλινδρομικές αντλίες, πιθανόν να μη μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αν η λειτουργία είναι διακοπτόμενη, πιθανόν να χρειάζονται ειδικοί τύποι αντλιών (self-priming - αυτογεμιζόμενη αντλία) και η διάβρωση να προκαλέσει ακόμα πιο σημαντικά προβλήματα.
5. Το είδος της παρεχόμενης ενέργειας. Οι περιστροφικές αντλίες θετικής εκτόπισης και οι φυγοκεντρικές αντλίες μπορούν να λειτουργήσουν με ηλεκτρικούς κινητήρες ή με μηχανές εσωτερικής καύσης. Οι παλινδρομικές αντλίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με κινητήρες υδρατμού ή αερίου.
6. Κόστος και μηχανική απόδοση της αντλίας.



### 4.3.5 ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ

#### ΟΡΙΣΜΟΣ

Μια παλινδρομική αντλία εμβόλου δίνει ενέργεια σε ένα ρευστό μέσω ενός εμβόλου το οποίο λειτουργεί με τη βοήθεια ενός κυλίνδρου. Παρόλο που ο υδρατμός χρησιμοποιείται συχνά ως πηγή ενέργειας για αυτό τον τύπο αντλίας, το έμβολο μπορεί να ενεργοποιηθεί και με άλλους τρόπους, όπως με ένα περιστρεφόμενο στροφαλοφόρο άξονα που λειτουργεί με ένα ηλεκτρικό κινητήρα.

#### ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ

Οι παλινδρομικές αντλίες εμβόλου μπορούν να ταξινομηθούν ως αντλίες υδρατμού ή αντλίες ισχύος.

Μπορούν επίσης να ταξινομηθούν ως απλής δράσης ή διπλής δράσης, ανάλογα με το εάν η ενέργεια μεταφέρεται στο ρευστό με την προς τα εμπρός και την προς τα πίσω κίνηση του εμβόλου.

#### ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ

Οι προδιαγραφές των παλινδρομικών αντλιών υδρατμού εκφράζονται συντομογραφημένες και αφορούν στη διάμετρο του κυλίνδρου υδρατμού, στη διάμετρο του κυλίνδρου νερού και στο μήκος της διαδρομής του εμβόλου σε ίντσες. Για παράδειγμα, μια αντλία (7 x 4 x 12 ) έχει διάμετρο κυλίνδρου υδρατμού 7 in., διάμετρο κυλίνδρου νερού 4 in. και μήκος διαδρομής 12 in. Γενικά, οι παλινδρομικές αντλίες υδρατμού που έχουν μήκη διαδρομής μικρότερα από 10 in. δε θα πρέπει να λειτουργούν σε παραπάνω από 100 διαδρομές (κινήσεις) ανά λεπτό, εξαιτίας της υπερβολικής φθοράς. Για μεγαλύτερα μήκη διαδρομών, οι λογικές ταχύτητες του εμβόλου είναι από 50 έως 90 ft/min.

### ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΥΔΡΑΤΜΟΥ

Στις παλινδρομικές αντλίες υδρατμού ο υδρατμός δε χρησιμοποιείται διασταλτικά (με εκτόνωση), όπως στις κοινές μηχανές ατμού. Η ολική πίεση του υδρατμού διατηρείται καθ' όλη τη διαδρομή διατηρώντας τις θυρίδες εισόδου του υδρατμού πλήρως ανοιχτές. Καθώς το έμβολο κινείται προς τα εμπρός μέσα στον κύλινδρο, το ρευστό συμπιέζεται και ωθείται έξω από τον κύλινδρο. Με ένα σύστημα βαλβίδων που ανοίγουν και κλείνουν το έμβολο μπορεί να μεταφέρει ενέργεια στο ρευστό με κάθε διαδρομή του.

Ο ρυθμός απομάκρυνσης του ρευστού από τον κύλινδρο είναι μηδενικός στην αρχή μιας διαδρομής εμβόλου και αυξάνεται σε μια μέγιστη τιμή, όταν το έμβολο αποκτήσει τη μέγιστη ταχύτητα. Αν χρησιμοποιείται ένας μόνο κύλινδρος, η ροή θα είναι παλμική. Αυτοί οι παλμοί μπορούν να μειωθούν τοποθετώντας ένα θάλαμο αέρα στη γραμμή κατάθλιψης ή χρησιμοποιώντας ένα αριθμό κυλίνδρων. Οι απλές αντλίες έχουν μόνο ένα κύλινδρο, οι διπλές αντλίες έχουν δύο κυλίνδρους και οι τριπλές αντλίες έχουν τρεις κυλίνδρους.

### ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ

Η θεωρητική μετατόπιση του ρευστού μιας αντλίας εμβόλου είναι ίση με τον ολικό όγκο που σαρώνει το έμβολο σε κάθε διαδρομή. Αυτή η θεωρητική σάρωση δε μπορεί να επιτευχθεί στην πράξη εξαιτίας των διαρροών γύρω από το έμβολο και τις βαλβίδες και της αδυναμίας των βαλβίδων να κλείνουν στιγμιαία. Η ογκομετρική απόδοση (volumetric efficiency), που ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής μετατόπισης προς τη θεωρητική μετατόπιση, είναι συνήθως από 70 έως 95%.

### ΑΠΟΔΟΣΗ ΥΔΡΑΤΜΟΥ

Όταν χρησιμοποιείται μια αντλία υδρατμού, το γινόμενο της πίεσης του υδρατμού (σε λίβρες) ανά μονάδα εμβαδού επί το εμβαδό τον εμβόλου δίνει τη μέγιστη δύναμη η οποία πρέπει να ασκηθεί στο έμβολο αν η μηχανή

λειτουργούσε τέλεια και χωρίς τριβές. Παρόλα αυτά, υπάρχει τριβή και πρέπει να μεταφερθεί έργο στο υγρό κάτω από συνθήκες όπου η πίεση του υδρατμού είναι μεγαλύτερη από την πίεση του υγρού κατά ένα πεπερασμένο ποσό. Ο λόγος της πίεσης που απαιτείται θεωρητικά στο έμβολο υδρατμού προς την πίεση που ασκείται πραγματικά από τον υδρατμό είναι γνωστός ως απόδοση πίεσης ή απόδοση υδρατμού (pressure efficiency or steam-end efficiency). Περιλαμβάνει τις επιδράσεις του εμβόλου και της τριβής της ράβδου, τις μεταβολές της ορμής στην επιτάχυνση του εμβόλου και του ρευστού και τη διαρροή του ρευστού από το έμβολο. Η απόδοση της πίεσης ποικίλει από περίπου 50% για μικρές αντλίες έως 80% για μεγάλες αντλίες.

### ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ

Στις παλινδρομικές αντλίες χρησιμοποιείται συχνά μια άλλη απόδοση, γνωστή ως υδραυλική απόδοση (hydraulic efficiency). Αυτή η απόδοση αντιπροσωπεύει τις απώλειες που οφείλονται στις αλλαγές της ταχύτητας στην είσοδο και στην έξοδο της αντλίας, στην τριβή και στις βαλβίδες. Ορίζεται ως ο λόγος του μανομετρικού ύψους στην αντλία προς το άθροισμα του μανομετρικού ύψους που αντλείται και των απωλειών στις γραμμές αναρρόφησης και κατάθλιψης.

### ΟΛΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ

Για τις αντλίες που λειτουργούν με ηλεκτρικούς κινητήρες η ολική απόδοση (overall efficiency) ορίζεται συνήθως ως ο λόγος του έργου που προσδίδεται στο ρευστό προς την ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται στον κινητήρα. Η εφαρμογή αυτού του ορισμού στην ολική απόδοση των αντλιών υδρατμού μπορεί να δώσει παραπλανητικά αποτελέσματα, επειδή ο όρος "ενέργεια που παρέχεται από τον υδρατμό" μπορεί να ενέχει πολλές έννοιες. Για υπολογισμούς σχεδιασμού η ολική απόδοση για αντλίες υδρατμού μερικές φορές ορίζεται ως ο λόγος του έργου που προσδίδεται στο ρευστό προς το ιδανικό έργο που θα μπορούσε να παραχθεί με μια ισεντροπική εκτόνωση του

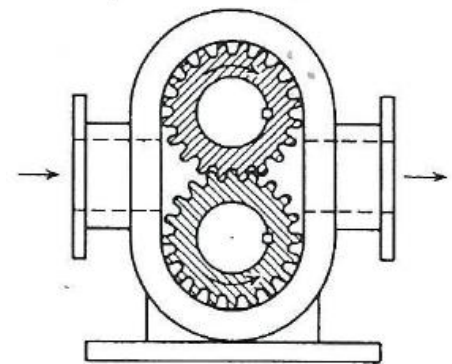
υδρατμού από την αρχική του θερμοκρασία και πίεση στην πίεση της εξόδου. Η αριθμητική τιμή αυτής της ολικής απόδοσης είναι σημαντική μόνο όταν καθορίζονται οι συνθήκες λειτουργίας για τη συγκεκριμένη αντλία.

### ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Γενικά, οι παλινδρομικές αντλίες έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι ικανές να μεταφέρουν ρευστά σε υψηλές πιέσεις και να λειτουργούν με καλή απόδοση σε μια ευρεία περιοχή συνθηκών λειτουργίας. Ένα βασικό μειονέκτημα των εμβολοφόρων και καταθλιπτικών αντλιών είναι ότι δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ρευστά τα οποία περιέχουν τραχιά (λειαντικά) στερεά. Παρόλα αυτά, οι παλινδρομικές αντλίες διαφράγματος είναι κατάλληλες για τη μεταφορά ρευστών με μεγάλες ποσότητες αιωρούμενων στερεών σε μικρά μανομετρικά ύψη.

### 4.3.6 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΤΙΚΗΣ ΕΚΤΟΠΙΣΗΣ

Οι αντλίες αυτού του τύπου συνδυάζουν την περιστροφική κίνηση με τη θετική εκτόπιση του ρευστού. Στο σχήμα 4.20 παρουσιάζεται ένας κοινός τύπος μιας περιστροφικής αντλίας με οδοντωτούς τροχούς. Δύο οδοντωτοί τροχοί είναι τοποθετημένοι μέσα σε ένα κέλυφος με ένα αρκετά στενό διάκενο για να κλείνουν σφικτά. Καθώς ο κάθε οδοντωτός τροχός περιστρέφεται σε αντίθετη κατεύθυνση από τον άλλο, το ρευστό παγιδεύεται σε κάθε διάκενο των δοντιών και μεταφέρεται στην έξοδο της αντλίας. Παρόμοια αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν χρησιμοποιώντας ένα



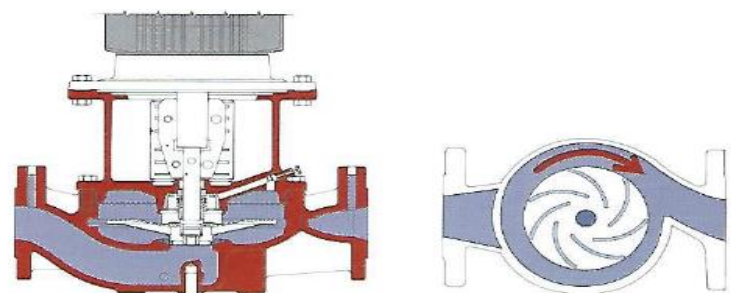
ΣΧΗΜΑ 4.20: Τομή της περιστροφικής αντλίας με εξωτερικούς οδοντωτούς τροχούς.

περιστροφικό έκκεντρο ή ξεχωριστούς ωθητήρες με πολλούς λοβούς. Στις περιστροφικές θετικές αντλίες δεν απαιτείται έγχυση. Οι αντλίες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την άντληση ρευστών μεγάλου ιξώδους. Επιτυγχάνεται ένας σταθερός ρυθμός μεταφοράς και το ρευστό μπορεί να μεταφερθεί σε υψηλές πιέσεις. Εξαιτίας του μικρού διάκενου που πρέπει να διατηρηθεί, αυτός ο τύπος αντλίας δεν πρέπει να χρησιμοποιηθεί με μη λιπαντικά ρευστά ή με ρευστά τα οποία περιέχουν στερεά σωματίδια.

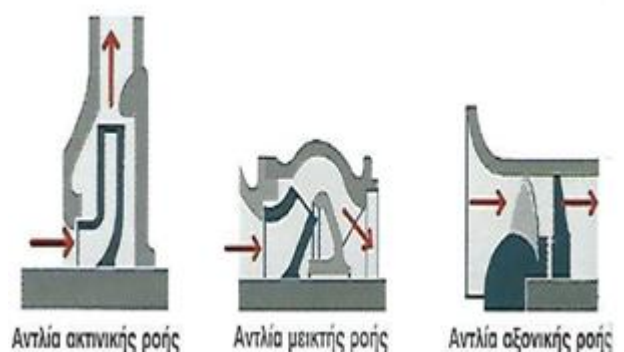
#### 4.3.7 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ

Σύμφωνα με τον Καρακατσάνη (2005) το 1689 ο φυσικός Denis Papin εφηύρε τη φυγοκεντρική αντλία και σήμερα αυτό το είδος αντλίας είναι και το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο είδος αντλίας σε όλο τον κόσμο. Η λειτουργία της φυγοκεντρικής αντλίας βασίζεται σε μία απλή αρχή : Το υγρό οδηγείται στον άξονα κίνησης της πτερωτής και μέσω της φυγόκεντρης δύναμης εκτινάσσεται προς την περιφέρεια της πτερωτής. Η όλη κατασκευή είναι σχετικά οικονομική, στιβαρή, απλή και η υψηλή ταχύτητά της καθιστά δυνατή την απευθείας σύνδεση της αντλίας σε έναν ασύγχρονο κινητήρα. Η φυγοκεντρική αντλία προσφέρει σταθερή παροχή υγρού που μπορεί εύκολα να ρυθμιστεί χωρίς να προκαλέσει κάποια βλάβη στην αντλία.

Ας ρίξουμε, τώρα, μία ματιά στο σχήμα που απεικονίζει τη ροή του υγρού στο εσωτερικό της αντλίας: Το στόμιο εισόδου της αντλίας οδηγεί το υγρό στο κέντρο της περιστρεφόμενης πτερωτής από όπου εκτινάσσεται προς την περιφέρεια. Αυτού του είδους η κατασκευή



ΣΧΗΜΑ 4.21: Η ροή του υγρού στο εσωτερικό της



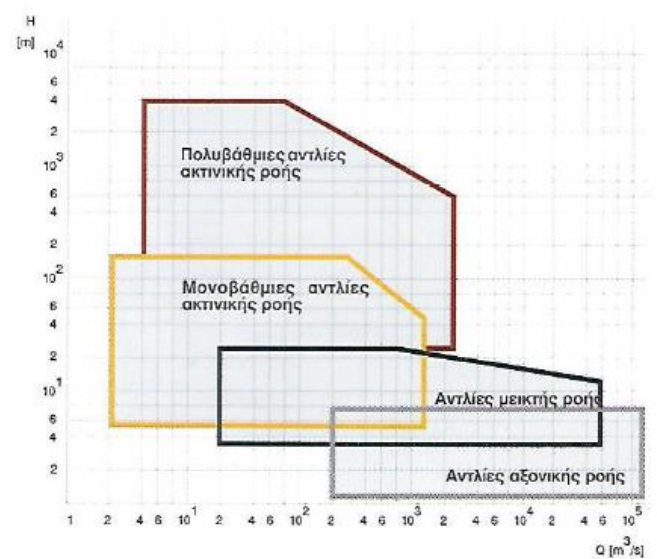
ΣΧΗΜΑ 4.22: Είδη φυγοκεντρικών αντλιών.

προσφέρει υψηλή απόδοση και είναι κατάλληλη για τη διαχείριση καθαρών υγρών. Οι αντλίες που προορίζονται να διαχειριστούν ακάθαρτα υγρά, όπως οι αντλίες ακάθαρτων υδάτων, είναι εξοπλισμένες με μία πτερωτή που είναι ειδικά κατασκευασμένη έτσι ώστε να αποφεύγεται η έμφραξη και η συσσώρευση των στερεών σωμάτων στο εσωτερικό της αντλίας.

Εάν παρουσιαστεί στο σύστημα διαφορά πίεσης όταν η φυγοκεντρική αντλία δεν λειτουργεί, το υγρό μπορεί ακόμη και στην περίπτωση αυτή να διέλθει μέσα από την αντλία λόγω της ανοικτής της σχεδίασης.

Όπως μπορούμε να δούμε και στο σχήμα 4.22, η φυγοκεντρική αντλία μπορεί να καταταχθεί σε τρεις διαφορετικές ομάδες: αντλίες ακτινικής ροής, αντλίες μεικτής ροής και αντλίες αξονικής ροής. Οι αντλίες ακτινικής ροής και οι αντλίες μεικτής ροής είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι τύποι.

Οι διαφορετικές απαιτήσεις σχετικά με την απόδοση των φυγοκεντρικών αντλιών, ειδικά εκείνες αναφορικά με το μανομετρικό ύψος, την παροχή και την εγκατάσταση, σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις για οικονομική λειτουργία είναι μόνο ορισμένοι από τους λόγους που δικαιολογούν την ύπαρξη των πολλών και διαφορετικών τύπων αντλιών. Στο σχήμα 4.23 απεικονίζονται οι διαφορετικοί τύποι αντλιών αναφορικά με την παροχή και την πίεση.



**ΣΧΗΜΑ 4.23:** Ροή και μανομετρικό ύψος για διαφορετικούς τύπους φυγοκεντρικών αντλιών.

### ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

1. Είναι απλές στην κατασκευή και φθηνές.
2. Το ρευστό μεταφέρεται σε ομοιόμορφη πίεση χωρίς κραδασμούς ή παλμούς.
3. Μπορούν να συνδεθούν κατευθείαν σε κινητήρες. Γενικά, όσο πιο ψηλή είναι η ταχύτητα, τόσο πιο μικρή είναι η αντλία και ο κινητήρας που χρειάζονται για μια συγκεκριμένη εργασία.
4. Η γραμμή κατάθλιψης μπορεί να κλείσει εν μέρει ή ολοκληρωτικά χωρίς να βλάψει την αντλία.
5. Μπορούν να μεταφέρουν υγρά με μεγάλες ποσότητες στερεών.
6. Δεν υπάρχουν στενές επαφές μεταξύ μετάλλων.
7. Δεν υπάρχουν βαλβίδες.
8. Το κόστος συντήρησης είναι χαμηλότερο σε σύγκριση με άλλους τύπους αντλιών.

### ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

1. Δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλό μανομετρικό ύψος.
2. Στο σύστημα μπορεί να εισέλθει αέρας, ο οποίος πρέπει να απομακρυνθεί.
3. Η μέγιστη απόδοση για μια συγκεκριμένη αντλία περιορίζεται από μια σχετικά στενή περιοχή συνθηκών.
4. Δεν μπορούν να χειρισθούν ρευστά μεγάλου ιξώδους με αποτελεσματικό τρόπο.

#### 4.3.8 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΤΟΠΙΣΗΣ ΑΕΡΑ

Η λειτουργία των αντλιών που περιγράφηκαν στις παραπάνω παραγράφους εξαρτάται από τη μηχανική δράση των εμβόλων, των αξόνων ή άλλων διατάξεων. Η μεταφορά των ρευστών μπορεί επίσης να επιτευχθεί με τη χρήση της πίεσης του αέρα. Για αυτό το σκοπό έχουν αναπτυχθεί πολλοί τύποι συστημάτων εκτόπισης αέρα. Τα πιο κοινά από αυτά τα συστήματα είναι οι

ανυψωτήρες αέρα, τα δοχεία μεταφοράς διαβρωτικών ρευστών και οι εγχυτήρες.

Στον απλό ανυψωτήρα αέρα ο συμπιεσμένος αέρας εισάγεται στο βυθισμένο άκρο του σωλήνα της κατάθλιψης σε απόσταση  $H_s$  ft κάτω από την επιφάνεια του υγρού. Επειδή το μίγμα αέρα-υγρού είναι ελαφρύτερο από το υγρό, το μίγμα ανεβαίνει μέσα στο σωλήνα της κατάθλιψης σε ένα υψωμένο ντεπόζιτο σε απόσταση  $H_t$  ft πάνω από την επιφάνεια του υγρού. Θεωρητικά μπορούν να αναπτυχθούν εξισώσεις για τη λειτουργία της ανύψωσης τον αέρα, όμως οι επιδράσεις της τριβής είναι τόσο περίπλοκες ώστε να χρησιμοποιείται συνήθως η παρακάτω εμπειρική εξίσωση ως βάση σχεδιασμού:

$$V_{air} = 0.8 \frac{H_t}{C_a \log \left[ \frac{H_s + 34}{34} \right]} \quad (4.7)$$

όπου  $V_{air}$  είναι τα κυβικά πόδια του ελεύθερου αέρα (δηλαδή σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες) που απαιτούνται για την ανύψωση 1 gal νερού και το  $C_a$  έχει τις παρακάτω τιμές:

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: Συγκεντρωτικός πίνακας συντελεστών σχέσης 4.7.

$H_t$ (ft)	Προτεινόμενη τιμή του $H_s/(H_s+H_t)$	$C_a$ (εξωτερική γραμμή αέρος)
20-125	0.65	348
126-250	0.6	335
251-400	0.5	296
401-650	0.4	246
651-700	0.35	216



Τα δοχεία μεταφοράς διαβρωτικών ρευστών με τη βοήθεια αέρα είναι απλά κλειστά δοχεία με γραμμές εισόδου και εξόδου και με μια σύνδεση αέρα. Ο αέρας εισάγεται στο δοχείο και ωθεί το υγρό προς τα έξω μέσω της γραμμής εξόδου. Η λειτουργία των δοχείων αυτών είναι διακοπτόμενη και η ανύψωση που επιτυγχάνουν εξαρτάται από την πίεση του αέρα. Τα συστήματα αυτά είναι φτηνά και η λειτουργία τους είναι εύκολη, όμως δεν είναι αποδοτικά. Η χρήση τους περιορίζεται σε ασυνεχείς διεργασίες με διαβρωτικά ρευστά.

Οι εγχυτήρες (jet pumps) χρησιμοποιούν ως μέσο λειτουργίας νερό, υδρατμό ή αέριο. Οι εγχυτήρες χρησιμοποιούνται συχνά για τη μεταφορά ρευστών. Το μέσο λειτουργίας ρέει γρήγορα μέσα σε ένα αποκλίνον ακροφύσιο και αποβάλλεται μέσα στο λαιμό ενός venturi. Καθώς το μέσο λειτουργίας βγαίνει από το ακροφύσιο, το μανομετρικό ύψος ταχύτητας προκαλεί τη μείωση του μανομετρικού ύψους πίεσης. Αν η προκύπτουσα πίεση είναι μικρότερη από αυτή του δεύτερου ρευστού σε αυτό το σημείο, το ρευστό θα αναρροφηθεί μέσα στο λαιμό του venturi μαζί με το μέσο λειτουργίας και θα απομακρυνθεί από την έξοδα του venturi.

Οι εγχυτήρες χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση αέρα, αερίων ή ατμών από συμπυκνωτές και μηχανήματα κενού. Οι εγχυτήρες υδρατμού μπορούν να συνδεθούν σε σειρά ή παράλληλα για να μεταφέρουν μεγαλύτερες ποσότητες αερίων ή να αναπτύξουν ένα μεγαλύτερο κενό. Η δυναμικότητα των εγχυτήρων υδρατμού εκφράζεται συνήθως σε λίβρες ανά ώρα και όχι σε μονάδες όγκου. Για λόγους σχεδιασμού, είναι συχνά απαραίτητο να γίνει ένας πρόχειρος υπολογισμός των απαιτήσεων σε υδρατμό για διάφορες δυναμικότητες και συνθήκες λειτουργίας.

### 4.3.9 ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ ΑΕΡΙΩΝ

Σύμφωνα με τον Λιοδακάκη (2013) οι αεροσυμπιεστές είναι μηχανήματα, με τα οποία επιτυγχάνουμε την παραγωγή πεπιεσμένου αέρα. Αναρροφούν τον αέρα από το περιβάλλον, τον συμπιέζουν σε πιέσεις μεγαλύτερες από την ατμοσφαιρική και τον καταθλίβουν συμπιεσμένο για αποθήκευση σε ελεγχόμενους κλειστούς χώρους, που ονομάζονται αεροφυλάκια ή αεροφιάλες και στα κατάλληλα δίκτυα για παραπέρα χρησιμοποίησή του.

#### ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Ο συμπιεστής αναρροφά το ψυκτικό αέριο από τον εξατμιστή (ψύκτη), το συμπιέζει και το καταθλίβει προς το συμπυκνωτή, εξασφαλίζοντας έτσι μια συνεχή διαφορά πίεσης μεταξύ πλευράς αναρρόφησης και τη πλευράς καταθλίψεως. Η διαφορά αυτή που η τιμή ποικίλη ανάλογα με το είδος και το σκοπό εγκατάστασης είναι απόλυτα απαραίτητη για τη συνεχή και τη σωστή λειτουργία του.

#### ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΟ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΧΩΡΙΖΟΝΤΑΙ :

- Ανεμιστήρες με λόγο συμπίεσης  $(P2/ P1)=1$  και μικρότερο. Σκοπός των ανεμιστήρων είναι η προώθηση του εργαζόμενου μέσου.
- Φυσητήρες με λόγο συμπίεσης  $(P2/ P1)=1-3$ . Σκοπός τους η αύξηση της πίεσης έως 3 bar και η προώθηση αερίων.
- Συμπιεστές με λόγο συμπίεσης  $(P2/ P1)>3$ . Αποστολή των συμπιεστών αυτών είναι η αύξηση της πίεσης του εργαζόμενου μέσου (ατμός ή αέριο).  
P2 : πίεση κατάθλιψης  
P1 : πίεση αναρρόφησης

#### ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΕΙΔΗ ΣΥΜΠΙΕΣΤΩΝ :

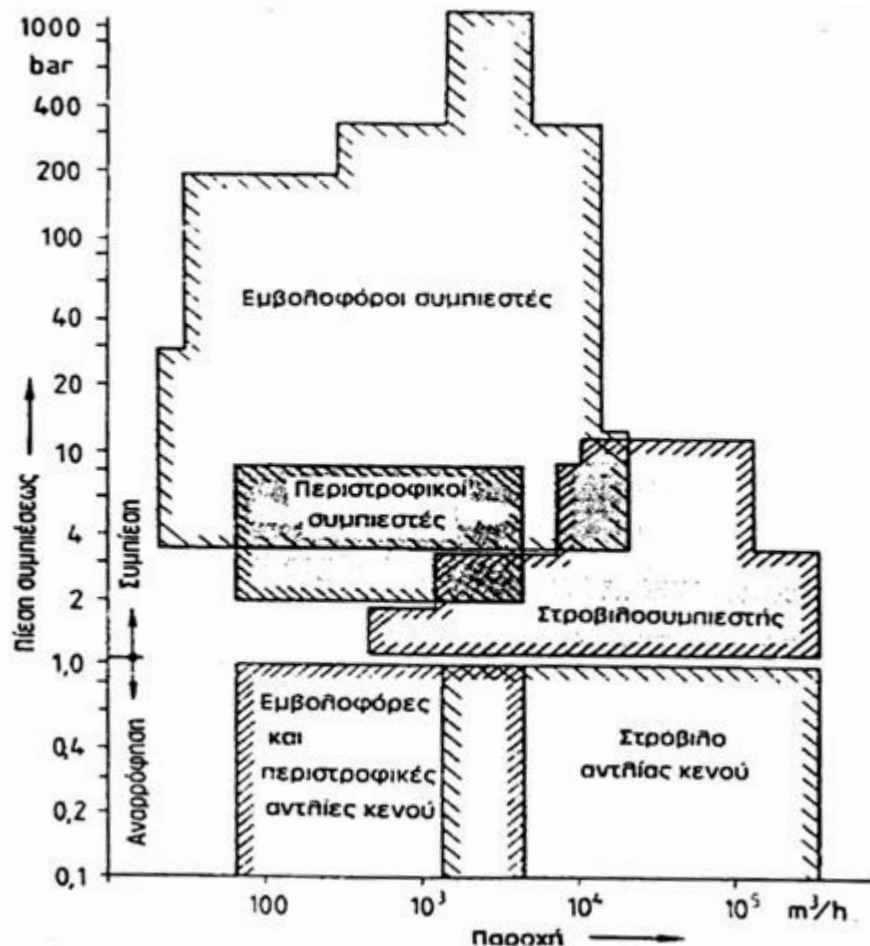
Ανάλογα με τη περιοχή πιέσεως την οποία εργάζονται διακρίνονται :

- Αντλίες κενού (για τη δημιουργία κενού).
- Φυσητήρες για αύξηση της πιέσεως έως 3 bar (υψικάμινο κτλ).

- Συμπιεστής στη περιοχή πιέσεων από 3-12 bar (βιομηχανία).
- Συμπιεστής υψηλής πίεσεως για πίεση από 12-500 bar (χυτοπρέσσα).
- Συμπιεστής πολύ υψηλής πίεσεως για τη πίεση από 500-1200 bar (χημική βιομηχανία).

ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΔΙΑΚΡΙΝΟΝΤΑΙ :

1. Παλινδρομικός συμπιεστής
2. Περιστροφικός λεπιδωτός συμπιεστής
3. Φυγοκεντρικός συμπιεστής
4. Ελικοειδές περιστροφικός συμπιεστής
5. Σπειροειδής συμπιεστής - SCROLL.
6. Αξονικός συμπιεστής



ΣΧΗΜΑ 4.24: Περιοχές λειτουργίας των διάφορων συμπιεστών.

## 1. ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΙΚΟΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ

Παλινδρομικός συμπιεστής λέγεται ο συμπιεστής που χρησιμοποιεί την παλινδρόμηση του εμβόλου του για την αναρρόφηση και τη συμπίεση των αερίων ή των ατμών. Είναι κατάλληλοι για το μικρό εκτόπισμα αερίου ή ατμού, αλλά έχουνικανοποιητική απόδοση στις εγκαταστάσεις που λειτουργούν με μεγάλες πιέσεις και μεγάλους λόγους συμπίεσης (Ρκατάθλιψης/Ραναρρόφησης). Επίσης είναι κατάλληλος για τη περιχή των χαμηλών πιέσεων αν η παροχή δεν είναι μεγάλη. Χρησιμοποιούνται κυρίως για τη παραγωγή συμπιεσμένου αέρα στο δίκτυο αέρος και την ψυκτική εγκατάσταση.

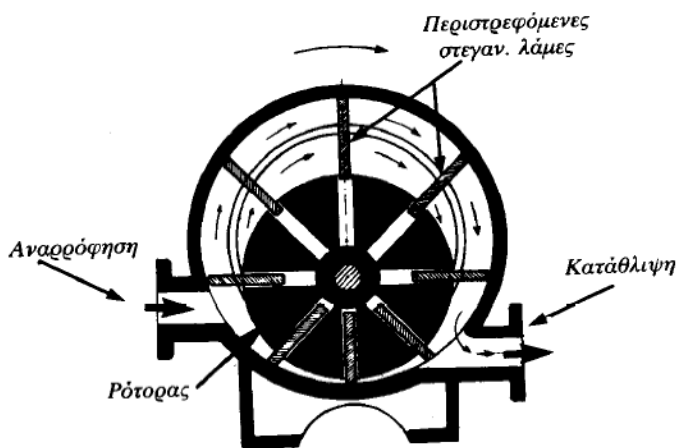


ΣΧΗΜΑ 4.25: Ερμειτικά κλειστός παλινδρομικός συμπιεστής σε τομή.

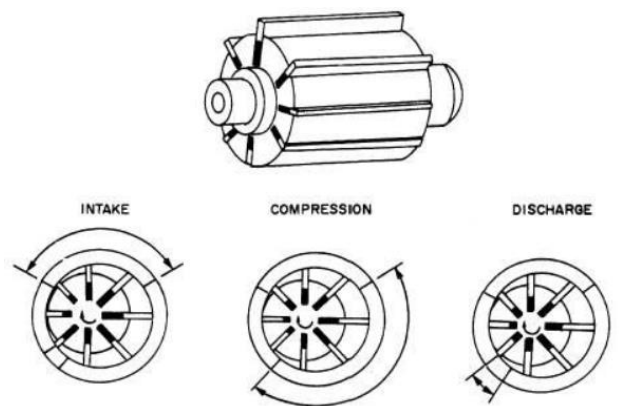
## 2. ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΛΕΠΙΔΩΤΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ

Στους περιστροφικούς συμπιεστές με περιστρεφόμενες λεπίδες (λάμες), ο ρότορας στρέφεται εκκεντρικά και φέρει ειδικές υποδοχές για τις στεγανωτικές λεπίδες. Οι λεπίδες είναι συμμετρικά τοποθετημένες στον ρότορα και περιστρέφονται μαζί του. Σε μερικούς συμπιεστές οι στεγανωτικές λεπίδες φέρουν ελατήρια που τις πιέζουν προς το εσωτερικό του κυλίνδρου, για να δημιουργούν έτσι στεγανότητα των χώρων που απομονώνουν. Σε άλλους τύπους συμπιεστών, οι περιστρεφόμενες λεπίδες πιέζονται προς το κύλινδρο από την αναπτυσσόμενη φυγοκεντρική δύναμη. Αυτού του είδους οι συμπιεστές περιστρέφονται συνήθως με τη ταχύτητα του ηλεκτροκινητήρα για να ελαττωθούν οι διαστάσεις του συμπιεστή. Όταν ένας περιστροφικός συμπιεστής σταματήσει, το ψυκτέλαιο στραγγίζει από τα τοιχώματα του κυλίνδρου. Το λεπτό στρώμα του λαδιού που παρεμβάλλεται μεταξύ

κυλίνδρου και ρότορα στεγανοποιεί τους χώρους με διαφορετικές πιέσεις. Έτσι όταν σταματήσει ο συμπιεστής δεν υπάρχει στεγανότητα μεταξύ αναρρόφησης και κατάθλιψης και επομένως ψυκτικό ρευστό υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας θα περάσει προς τον εξατμιστή. Για να αποφεύγεται η δυσάρεστη αυτή κατάσταση της επιστροφής θερμού ψυκτικού αερίου, τοποθετείται μια βαλβίδα μη επιστροφής (check valve) στη σύνδεση της γραμμής αναρρόφησης.



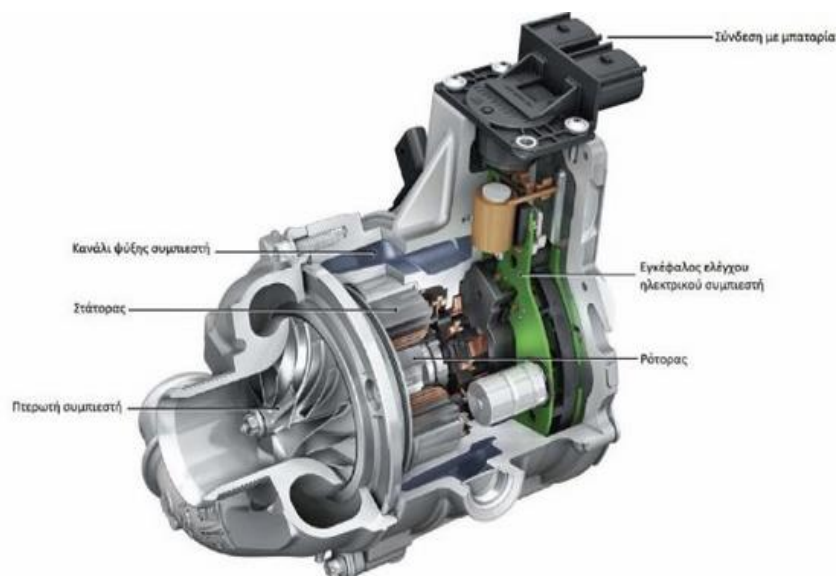
ΣΧΗΜΑ 4.26: Περιστροφικός συμπιεστής με περιστρεφόμενες λάμες.



ΣΧΗΜΑ 4.27: Στροφείο συμπιεστή στις φάσεις ενός κύκλου λειτουργίας

### 3. ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ

Οι φυγόκεντρικοί συμπιεστές αποτελούνται από τον κορμό, που είναι το κίνητο μέρος και από τον ρότορα (φτερωτή) που περιστρέφεται κινούμενος από ηλεκτροκινητήρα. Ο ρότορας φέρει πτερύγια με τα οποία πραγματοποιείται η αναρρόφηση του ψυκτικού αερίου, που κατόπιν με τη βοήθεια της αναπτυσσόμενης φυγόκεντρης

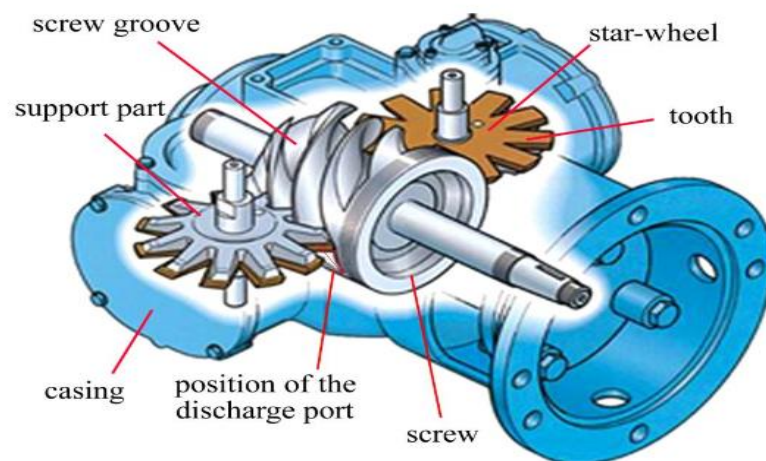


ΣΧΗΜΑ 4.28: Φυγόκεντρικός συμπιεστής

δύναμης καταθλίβεται προς συμπακνωτή της μονάδας. Η ταχύτητα περιστροφής στους φυγοκεντρικούς συμπιεστές είναι μεγάλη για να εξασφαλίζεται έτσι μεγάλη ταχύτητα στον ατμό και υψηλή πίεση. Στους μικρούς συμπιεστές η ταχύτητα κυμαίνεται από 7000 έως 8000 rpm/min, ενώ σε μεγαλύτερης ισχύος συμπιεστές η ταχύτητα πέφτει γύρω στις 4000 rpm/min.

#### 4. ΕΛΙΚΟΕΙΔΕΙΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΟΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ

Οι κοχλιόμορφοι συμπιεστές αποτελούνται από συνεργαζόμενους ελικοειδείς ρότορες, έναν αρσενικό και έναν θηλυκό. Αυτοί παγιδεύουν και συμπιέζουν τον αέρα, ή άλλο αέριο κατά τη περιστροφή τους μέσα σ' ένα κύλινδρο, μεγάλης ακρίβειας όσο αφορά τις διαστάσεις κατασκευής του. Οι ρότορες έχουν τη μορφή ατέρμονα κοχλία και περιστρέφονται από έναν ηλεκτροκινητήρα με τη βοήθεια συστήματος γραναζιών. Ο αρσενικός ρότορας παίρνει τη κίνηση από το κινητήρα και τη μεταδίδει στο θηλυκό ρότορα, πράγμα που σημαίνει ότι ο αρσενικός ρότορας έχει μικρότερους λοβούς.



ΣΧΗΜΑ 4.29: Ελικόμορφος συμπιεστής μονού στροφείου σε τομή.

## 5. ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ (ΤΥΠΟΥ SCROLL)

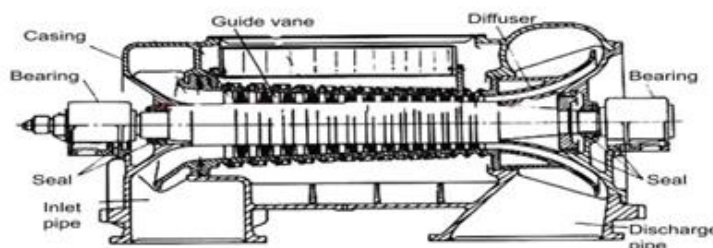
Σύμφωνα με τον Μητρούδα (2017) οι σπειροειδείς (scroll) συμπιεστές είναι και αυτοί περιστροφικοί συμπιεστές θετικής εκτοπίσεως. Ο χώρος αναρροφήσεως και καταθλίψεως του αερίου δημιουργείται μεταξύ δύο ελικοειδών σπείρων τοποθετημένες η μια μέσα στην άλλη. Η μια σπείρα είναι σταθερή, ενώ η άλλη κινείται σε μια κυκλική τροχιά. Η αναρρόφηση του ψυκτικού μέσου γίνεται από την περιφέρεια, στον χώρο που δημιουργείται ανάμεσα στις δύο σπείρες. Έπειτα η θυρίδα αναρρόφησης κλείνει καθώς η κινούμενη σπείρα κινείται και αρχίζει η συμπίεση του ψυκτικού υγρού. Καθώς ο χώρος μεταξύ των δύο σπείρων μικραίνει, το ψυκτικό υγρό συμπιέζεται ακόμα περισσότερο μέχρι την κατάθλιψη του από το κέντρο των σπείρων. Για την ολοκλήρωση της κατάθλιψης του ψυκτικού υγρού απαιτούνται συνήθως δύο ή τρεις περιστροφές της κινούμενης σπείρας.



ΣΧΗΜΑ 4.30: Ερμητικά κλειστός σπειροειδής συμπιεστής

## 6. ΑΞΟΝΙΚΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ

Οι αξονικοί συμπιεστές αποτελούνται από το σταθερό μέρος ή στάτορα και πό το κινητό μέρος το ρότορα ή στροφείο, στο οποίο πάνω έχουν τοποθετηθεί οι φτερωτές με τα πτερύγια. Όσον αφορά τη λειτουργία του ο ρότορας φέρει πτερύγια με τα οποία πραγματοποιείται η αναρρόφηση του ψυκτικού αερίου και ακολουθεί η μετατροπή της ταχύτητας του αερίου σε πίεση με σταθερή μία ή περισσότερες στεφάνες.



ΣΧΗΜΑ 4.31: Δομή αξονικού συμπιεστή.

#### 4.4 ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ

Για τον υπολογισμό του ρυθμού ροής ενός ρευστού στις βιομηχανικές μονάδες χρησι-μοποιούνται ευρέως μετρητές στομίου, μετρητές venturi, ροόμετρα, ηλεκτρομαγνητικά παροχόμετρα και μετρητές εκτόπισης. Άλλες συσκευές μέτρησης ροής όπως υπερχειλιστήρες, σωλήνες pitot, ανεμόμετρα και μετρητικά υγρών δοκιμών, χρησιμοποιούνται επίσης σε βιομηχανικές μονάδες. Γενικά οι μετρητές στομίου (orifice meters) είναι τα πιο φθηνά και πιο εύελικτα. Παρά το μειονέκτημα των μεγάλων μόνιμων πτώσεων πίεσης που έχουν οι διατάξεις στομίου, αποτελούν ένα από τους πιο συνηθισμένους τρόπους μέτρησης της ροής σε βιομηχανικές μονάδες. Οι μετρητές venturi είναι ακριβοί και πρέπει να κατασκευάζονται με προσοχή. Ωστόσο δεν προκαλούν μεγάλη μόνιμη πτώση πίεσης και επομένως είναι πολύ χρήσιμα όταν το κόστος της ισχύος είναι σημαντικό.

Οι βασικές εξισώσεις για το σχεδιασμό και τη λειτουργία των μετρητών στομίου, των μετρητών venturi και των ροομέτρων μπορούν να εξαχθούν από τα ολικά ισοζύγια ενέργειας που παρουσιάζονται στην αρχή αυτού του κεφαλαίου. Οι παρακάτω εξισώσεις ισχύουν όταν το ρευστό είναι υγρό. Οι εξισώσεις αυτές δίνουν ακριβή αποτέλεσμα για τη ροή αερίων, αν η πτώση πίεσης που προκαλείται από τη μείωση της διατομής είναι μικρότερη από το 5% της πίεσης πριν το σημείο μείωσης της διατομής του ρεύματος:

Για μετρητές στομίου και μετρητές venturi ισχύει:

$$q_f = C_d S_c \sqrt{\frac{2g_c v (p_l - p_c)}{1 - (S_c / S_l)^2}} \quad (4.8)$$

Για ροόμετρα ισχύει:

$$q_f = C_d S_c \sqrt{\frac{V_p 2g (p_p - 1/v)v}{S_p [1 - (S_c / S_l)^2]}} \quad (4.9)$$



Όπου

$q_f$  = ρυθμός ροής,  $\text{ft}^3/\text{s}$

$S_c$  = εμβαδό διατομής της ροής στο σημείο της ελάχιστης επιφάνειας διατομής της ροής,  $\text{ft}^2$

$S_i$  = εμβαδό διατομής της ροής του αγωγού πριν τη μείωση της διατομής,  $\text{ft}^2$

$g_c$  = σταθερά της βαρύτητας στο νόμο της κίνησης του Newton,  $32.17 \text{ ft X lbml}/(\text{s})(\text{s})(\text{lbf})$

$g$  = τοπική επιτάχυνση της βαρύτητας,  $\text{ft}/(\text{s})(\text{s})$

$v$  = μέσος ειδικός όγκος τον ρευστού,  $\text{ft}^3/\text{lb}$

$p_i$  = στατική πίεση στον αγωγό πριν τη μείωση της διατομής,  $\text{psf}$

$p_c$  = στατική πίεση στο σημείο τον ελάχιστου εμβαδού διατομής της ροής,  $\text{psf}$

$V_p$  = όγκος βαριδίου,  $\text{ft}^3$

$S_p$  = μέγιστο εμβαδόν διατομής του βαριδίου,  $\text{ft}^2$

$\rho_p$  = πυκνότητα του βαριδίου,  $\text{lb}/\text{ft}^3$

\* $C_d$  = συντελεστής εξόδου

\*Η τιμή του συντελεστή εξόδου  $C_d$  για τους μετρητές στομίου εξαρτάται από τις ιδιότητες του συστήματος ροής, το λόγο της διαμέτρου του στομίου προς τη διάμετρο πριν την μείωση της διατομής και τα σημεία στα οποία είναι τοποθετημένα τα στοιχεία μέτρησης της πίεσης.

## ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΑΡΟΧΟΜΕΤΡΟ

Τα παροχόμετρα έχουν ως αρχή λειτουργίας τον νόμο του FARADAY για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή βασισμένο στο παλμικό συνεχές μαγνητικό πεδίο.

Επίσης, οι μετρητές παροχής είναι σχεδιασμένοι για χαμηλή κατανάλωση (low-energy design) με αυτόματη μηδενική αντιστάθμιση (automatic zero compensation).

Ο επεξεργαστής-μετατροπέας μπορεί να είναι τοποθετημένος πάνω στο αισθητήριο (COMPACT) ή σε απόσταση από αυτό (REMOTE).

Τα Η/Μ παροχόμετρα παρέχουν απόλυτη δυνατότητα για ένταξη σε σύστημα τηλεμετρίας - τηλεδιοίκησης, αφού διαθέτουν τις παρακάτω εισόδους και εξόδους σημάτων από κατασκευής τους.



ΣΧΗΜΑ 4.32: Ηλεκτρομαγνητικό παροχόμετρο.

### Ας δούμε λοιπόν μια πραγματική προδιαγραφή ενός Η/Μ παροχόμετρου

α) Αισθητήριο

(Κυρίως μετρητής-σώμα) τύπου MAG5100W με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Προσφερόμενες διατομές: DN 25 έως DN 1200

Πίεση Λειτουργίας : Η ονομαστική πίεση λειτουργίας είναι PN 16, ενώ η πίεση δοκιμής είναι 1,5 φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής.

Εσωτερική επένδυση αισθητηρίου : ειδικό ελαστομερές κατάλληλο για χρήση σε πόσιμο νερό. (composite elastomer - ebonite )

Ηλεκτρόδια : από Hasteloy C276

Ηλεκτρόδια γείωσης : Hasteloy C276

Σώμα αισθητηρίου : από ανθρακούχο χάλυβα (carbon steel), με αντιδιαβρωτική επικάλυψη εποξεικής βαφής δύο συστατικών ελαχίστου πάχους 150μm

Σύνδεση αισθητηρίου : Με φλάντζες από τις δύο πλευρές κατά EN1092-1 , με κατάλληλη διάτρηση για τις ζητούμενες ονομαστικές πιέσεις ( υλικό carbon steel).

Προστασία : IP 67 κατά EN60529 ελεγμένο κάτω από στήλη ύδατος 1 μέτρου για 30 λεπτά, με δυνατότητα μετατροπής σε IP 68, ελεγμένο κάτω από στήλη ύδατος 10 μέτρων για 72 ώρες.

Θερμοκρασία ρευστού : - 10..+70ο C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος :- 40..+70° C

Πίεση σχεδίασης : 1,5 X PN

Μηχανική καταπόνηση : 3,17G rms, 18-1000 Ητ, σύμφωνα με EN60068-2-36

β) Ηλεκτρονικός μικροϋπολογιστικός επεξεργαστής-μετατροπέας τύπου MAG 6000 με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά

Αναλογικό σήμα εξόδου: 0-20 mA ή 4-20 mA, με γαλβανική απομόνωση για φορτίο μικρότερο από 800 Ω

Ψηφιακή έξοδος παλμών/συχνότητας :

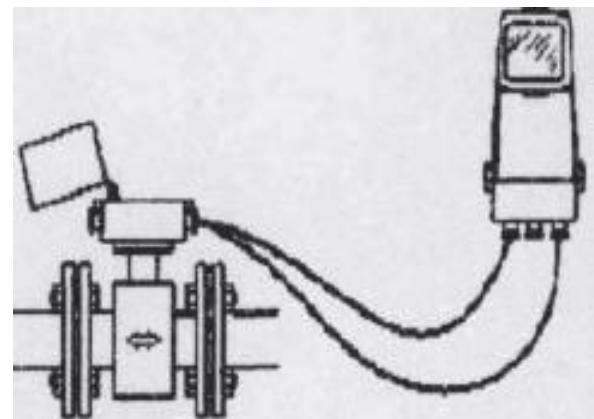
Συχνότητα : 0 -10 KHZ

α)ACTIVE

24 VDC παλμοί (active- δεν απαιτείται εξωτερική τροφοδοσία 24 VDC ) με ρυθμιζόμενο (μέσω MENU) πλάτος από 50μs έως και 5s για σύνδεση με ηλεκτρομηχανικό ή με ηλεκτρονικό COUNTER για καταγραφή της συνολικής παροχής σε απόσταση από τον μετατροπέα 24VDC, 30mA,  $1K\Omega < R_{φορτίου} < 10 K\Omega$



ΣΧΗΜΑ 4.33: Ενισχυτής ηλεκτρομαγνητικού παροχομέτρου.



ΣΧΗΜΑ 4.34: Συνδεσμολογία ηλεκτρομαγνητικού παροχομέτρου.

## β) PASSIVE

3-30 VDC παλμοί (passive - απαιτείται εξωτερική τροφοδοσία 3-30 VDC) με ρυθμιζόμενο (μέσω MENU) πλάτος από 50μs έως και 5s για σύνδεση με PLC ή με ηλεκτρονικό COUNTER για καταγραφή της συνολικής παροχής σε απόσταση από τον μετατροπέα 3 - 30VDC, 110mA,  $200\Omega < R_{φορτίου} < 10\text{ K}\Omega$

### Ψηφιακή έξοδος ρελέ

1 ζεύγος επαφών ρελέ 42 VAC, 2A - 24VDC, 1 A για σηματοδότηση τυχόν σφάλματος του μετρητού.

### Ψηφιακή είσοδος :11-30VDC, $R_i = 4.4\text{K}$

Γαλβανική απομόνωση : Όλες οι είσοδοι και οι έξοδοι είναι γαλβανικά απομονωμένες

Αθροιστής: 2 οκταψήφιοι μετρητές με δυνατότητα μέτρησης και στις δύο κατευθύνσεις ροής

### Ρύθμιση μηδενός:

αυτόματη (Συνεχώς ρυθμίζεται αυτόματα από τον μικροεπεξεργαστή)

Τροφοδοσία: 115...230Vac ή 11...30Vdc, 11...24Vac

### Ενδείξεις:

Ενσωματωμένη φωτιζόμενη αλφαριθμητική οθόνη 3 X 20 χαρακτήρων ένδειξης του συνολικού όγκου του νερού ( $\text{m}^3/\text{lt}$ ) της στιγμιαίας ροής ( $\text{m}^3/\text{h}, \text{lt}/\text{h}$ ), των ρυθμίσεων του οργάνου (settings) των σφαλμάτων κατά την λειτουργία του οργάνου (πλήρη αυτοδιάγνωση) κλπ

Μηχανική καταπόνηση : 3,17G rms, 18-1000 Ht ,EN60068-2-36

Ακρίβεια μέτρησης: +/- 0,2 % της στιγμιαίας ροής σταθερή για ταχύτητες ροής μεγαλύτερες από 0,5 m/sec.

## 4.5 ΚΟΣΤΟΛΟΓΙΟ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΑΝΤΛΗΣΗΣ



ΣΧΗΜΑ 4.35: Κατανομή κοστών κύκλου ζωής συσκευών

### Εξίσωση κόστους κύκλου ζωής:

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα επικεντρώσουμε την προσοχή μας στα στοιχεία που συνιστούν το κόστος κύκλου ζωής μίας αντλίας (ΚΚΖ) ώστε να καταλάβουμε τι ακριβώς είναι το κόστος κύκλου ζωής, πώς να το υπολογίζουμε και ποιους παράγοντες πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη όταν το υπολογίζουμε. Τέλος, θα καταδείξουμε την έννοια του κόστους κύκλου ζωής με τη βοήθεια ενός παραδείγματος. Αλλά πριν ασχοληθούμε λεπτομερώς με το κόστος κύκλου ζωής, πρέπει να κατανοήσουμε τι ακριβώς καλύπτει αυτή η έννοια.

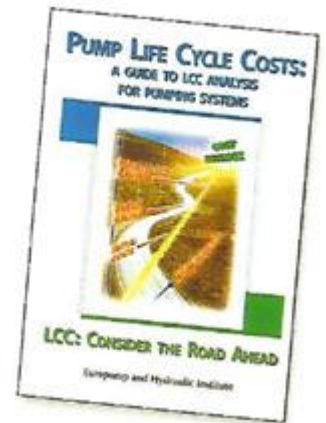
## ΟΡΙΣΜΟΣ

(ΚΚΖ) : Το κόστος κύκλου ζωής μίας αντλίας είναι η έκφραση του πόσο κοστίζει η αγορά, εγκατάσταση, λειτουργία, συντήρηση και απόρριψη μίας αντλίας καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής της.

Το ΚΚΖ υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο :

$$LCC = C_{ic} + C_{in} + C_e + C_o + C_{env} + C_m + C_s + C_d \quad (4.10)$$

Σύμφωνα με την Grundfos (2013) το Hydraulic Institute, το Europump και το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α. συνέταξαν ένα εργαλείο που ονομάζεται Κόστος Κύκλου Ζωής Αντλίας (ΚΚΖ). Αυτό το εργαλείο σχεδιάστηκε για να βοηθήσει τις εταιρίες να ελαχιστοποιήσουν τη σπατάλη και να μεγιστοποιήσουν την απόδοση ενέργειας στα διάφορα συστήματα περιλαμβανομένων και των συστημάτων αντλιών. Οι υπολογισμοί κόστους κύκλου ζωής είναι ένα εργαλείο λήψης αποφάσεων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τη σχεδίαση των καινούριων εγκαταστάσεων ή την ανακαίνιση των υπαρχουσών εγκαταστάσεων.



ΣΧΗΜΑ 4.36: Οδηγός ανάλυσης κόστους κυκλου ζωής συστημάτων άντλησης.

Το κόστος κύκλου ζωής αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

#### Αρχικό κόστος, τιμή αγοράς -- $C_{ic}$

Το αρχικό κόστος ενός συστήματος άντλησης περιλαμβάνει όλα τα εξαρτήματα και τον πρόσθετο εξοπλισμό που χρειάζονται για τη λειτουργία του συστήματος, π.χ. αντλίες, μετατροπείς συχνότητας, πίνακες ελέγχου και αισθητήρια.

Συχνά, το αρχικό κόστος και τα κόστη ενέργειας και συντήρησης αντισταθμίζονται μεταξύ τους. Δηλαδή, σε πολλές περιπτώσεις, τα ακριβά εξαρτήματα έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής ή μικρότερη κατανάλωση ενέργειας συγκριτικά με τα φθηνότερα εξαρτήματα.

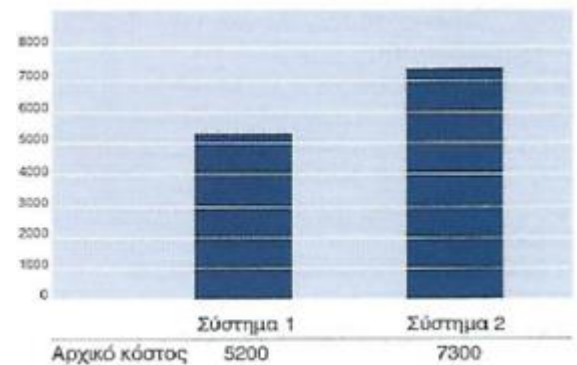


ΣΧΗΜΑ 4.37: Εξοπλισμός που αποτελεί ένα σύστημα

#### Κόστος εγκατάστασης και ξεκινήματος -- $C_{in}$

Το κόστος εγκατάστασης και ξεκινήματος περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- Εγκατάσταση των αντλιών
- Τοποθέτηση
- Σύνδεση της ηλεκτρικής καλωδίωσης και των οργάνων
- Εγκατάσταση, σύνδεση και ενεργοποίηση των συχνότητας κ.λπ
- Αξιολόγηση λειτουργίας κατά την εκκίνηση



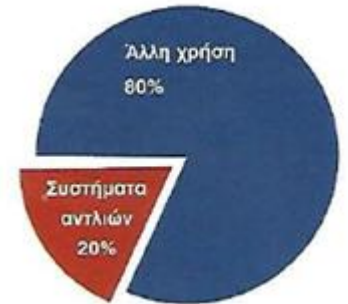
ΣΧΗΜΑ 4.38: Αρχικό κόστος ενός συστήματος μιας αντλίας σταθερής ταχύτητας (σύστημα 1) και ενός συστήματος μιας αντλίας

Όπως ίσχυε και στην περίπτωση του αρχικού κόστους, είναι σημαντικό να ελέγξουμε τις δυνατότητες αντιστάθμισης. Αναφορικά με τις αντλίες που διαθέτουν ενσωματωμένο μετατροπέα συχνότητας, πολλά από τα εξαρτήματα περιλαμβάνονται ήδη στο προϊόν. Κατά συνέπεια, αυτό το είδος αντλίας έχει

συνήθως μεγαλύτερο αρχικό κόστος και μικρότερο κόστος εγκατάστασης και ξεκινήματος.

### Κόστος ενέργειας -- $C_e$

Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, η κατανάλωση ενέργειας κατέχει και το μεγαλύτερο μερίδιο στο κόστος κύκλου ζωής ενός συστήματος αντλιών, όπου οι αντλίες συχνά λειτουργούν για περισσότερες από 2000 ώρες το χρόνο. Στην πραγματικότητα, περίπου το 20% της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για συστήματα αντλιών.



ΣΧΗΜΑ 4.39: Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας.

Ακολουθεί ένας κατάλογος ορισμένων από τους παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας ενός συστήματος άντλησης:

- Προφίλ φορτίου.
- Απόδοση αντλίας (υπολογισμός του σημείου λειτουργίας).
- Απόδοση κινητήρα (η απόδοση κινητήρα σε μερικό φορτίο μπορεί να ποικίλει σημαντικά μεταξύ των κινητήρων υψηλής απόδοσης και των κινητήρων κανονικής απόδοσης).
- Μέγεθος αντλίας (συνήθως τα περιθώρια των υπολογισμών και οι στρογγυλοποιήσεις προς τα πάνω τείνουν να προτείνουν αντλίες με μεγαλύτερο μέγεθος από ότι χρειάζεται).
- Άλλα εξαρτήματα του συστήματος, όπως σωλήνες και βαλβίδες.
- Χρήση αντλιών ελεγχόμενης ταχύτητας χρησιμοποιώντας αντλίες ελεγχόμενης ταχύτητας στη βιομηχανία, μπορούμε να μειώσουμε την κατανάλωση ενέργειας μέχρι και 50%.



### Κόστος λειτουργίας -- $C_o$

Το κόστος λειτουργίας καλύπτει το εργατικό κόστος που σχετίζεται με τη λειτουργία ενός συστήματος άντλησης. Στις περισσότερες περιπτώσεις το κόστος εργασίας που σχετίζεται με τις αντλίες είναι περιορισμένο. Σήμερα, διάφοροι τύποι εποπτικού εξοπλισμού καθιστούν δυνατή τη διασύνδεση του συστήματος άντλησης με ένα δίκτυο υπολογιστών, μειώνοντας το κόστος λειτουργίας.

### Περιβαλλοντικό κόστος -- $C_{env}$

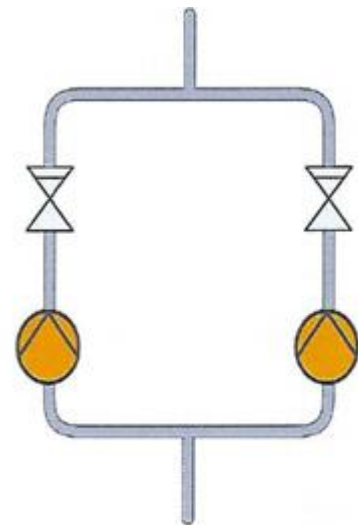
Το περιβαλλοντικό κόστος καλύπτει την απόρριψη των εξαρτημάτων και τη μόλυνση από τα αντλούμενα υγρά. Η συνεισφορά του περιβαλλοντικού παράγοντα στο κόστος κύκλου ζωής ενός συστήματος άντλησης στη βιομηχανία είναι περιορισμένο.

### Κόστος συντήρησης και επιδιόρθωσης -- $C_m$

Το κόστος συντήρησης και επιδιόρθωσης καλύπτει όπως υποδηλώνει και το όνομά του όλα τα έξοδα που έχουν σχέση με τη συντήρηση και την επισκευή του συστήματος άντλησης, για παράδειγμα: Εργατικό, ανταλλακτικά, μεταφορά και καθαρισμό. Ο καλύτερος τρόπος επίτευξης της βέλτιστης ομαλής λειτουργίας μίας αντλίας και παρεμπόδισης των σταματημάτων λειτουργίας είναι η διεξαγωγή προληπτικής συντήρησης.

### Κόστος σταματήματος, κόστος απώλειας παραγωγής -- $C_s$

Το κόστος σταματήματος είναι εξαιρετικά σημαντικό όταν πρόκειται για συστήματα αντλιών που χρησιμοποιούνται σε διαδικασίες



ΣΧΗΜΑ 4.40 Η εφεδρική αντλία εξασφαλίζει τη συνέχιση της παραγωγής σε περίπτωση σταματήματος της κύριας αντλίας.

παραγωγής. Ο λόγος είναι απλός: η διακοπή της παραγωγής κοστίζει πολλά χρήματα, ακόμη κι όταν πρόκειται για μία σύντομη χρονική περίοδο. Ακόμη κι όταν μία αντλία επαρκεί για την απαιτούμενη εφαρμογή, συνιστάται παντα η εγκατάσταση μιας εφεδρικής αντλίας που θα μπορεί να αναλάβει και θα εξασφαλίσει τη συνέχιση της παραγωγής ακόμη και σε περίπτωση που παρουσιαστεί κάποια απροσδόκητη βλάβη στο σύστημα άντλησης.

#### Κόστος σταματήματος και απόρριψης -- $C_d$

Ανάλογα με τον κατασκευαστή της αντλίας, το κόστος σταματήματος και απόρριψης ενός συστήματος άντλησης χαρακτηρίζεται από ασήμαντες αποκλίσεις. Κατά συνέπεια, αυτή η μορφή κόστους σπάνια λαμβάνεται υπόψη.

#### Υπολογισμός του κόστους κύκλου ζωής

Το κόστος κύκλου ζωής ενός συστήματος άντλησης αποτελείται από το άθροισμα όλων των παραπάνω παραγόντων καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του. Κατά κανόνα, η διάρκεια ζωής κυμαίνεται από 10 έως 20 χρόνια. Στον τομέα των αντλιών, το κόστος κύκλου ζωής κανονικά υπολογίζεται από έναν πιο απλοποιημένο τύπο που λαμβάνει υπόψη του λιγότερους παράγοντες.

Αυτός ο απλοποιημένος τύπος είναι ο :  $LCC = C_{ic} + C_e + C_m$  (4.11)

## Παράδειγμα

Τώρα ας ρίξουμε μια ματιά σε ένα παράδειγμα χρησιμοποιώντας τον απλοποιημένο τύπο που αναφέραμε προηγουμένως:

Μία βιομηχανία χρειάζεται μία νέα αντλία παροχής νερού και θα λάβουμε υπόψη μας δύο λύσεις:

- Μία φυγοκεντρική πολυβάθμια αντλία σταθερής ταχύτητας
- Μία φυγοκεντρική πολυβάθμια αντλία μεταβλητής ταχύτητας

Οι υπολογισμοί δείχνουν ότι συγκριτικά με την αντλία σταθερής ταχύτητας, η αντλία μεταβλητής ταχύτητας καταναλώνει 40% λιγότερη ενέργεια. Ωστόσο, το αρχικό κόστος  $C_{ic}$  της αντλίας μεταβλητής ταχύτητας είναι δύο φορές μεγαλύτερο από εκείνο της αντλίας σταθερής ταχύτητας.

Οι υπολογισμοί κόστους κύκλου ζωής θα μας βοηθήσουν να επιλέξουμε ποιά αντλία θα εγκαταστήσουμε στο σύστημα. Η εφαρμογή διαθέτει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

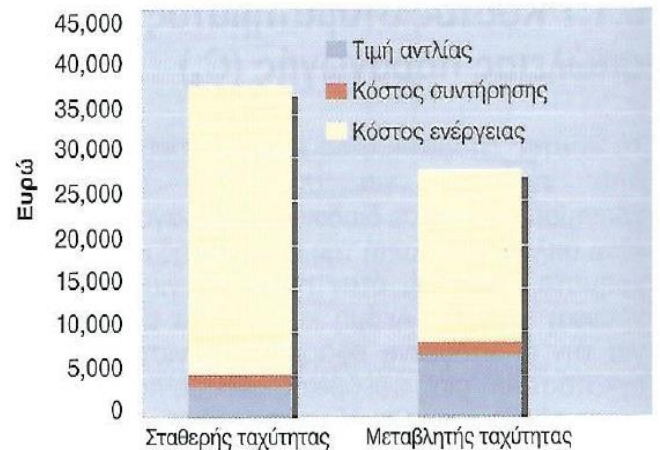
- 12 ώρες λειτουργίας την ημέρα
- 220 ημέρες λειτουργίας το χρόνο
- Διάρκεια ζωής 10 χρόνια (περίοδος υπολογισμού)

Τύποι αντλίας		Σταθερή ταχύτητα	Μεταβλητή ταχύτητα
Μέση κατανάλωση ισχύος	kW	18,76	11,31
Ώρες λειτουργίας την ημέρα	Ώρες	12	12
Ημέρες λειτουργίας το χρόνο	Ημέρες	220	220
Περίοδος υπολογισμού	Έτη	10	10
<b>Συνολική κατανάλωση ενέργειας</b>	<b>kWh</b>	<b>495,264</b>	<b>298,584</b>
Τιμή μονάδας ηλεκτρισμού	Ευρώ/kWh	0,07	0,07
Τιμή αντλίας	Ευρώ	3,602	7,204
Κόστος συντήρησης	Ευρώ	1,417	1,417
Κόστος ενέργειας	Ευρώ	33,284	20,066
<b>Συνολικό κόστος</b>	<b>Ευρώ</b>	<b>38,303</b>	<b>28,688</b>

ΣΧΗΜΑ 4.41: Συγκεντρωτικά στοιχεία παραδείγματος.

Βάσει αυτών των δεδομένων, μπορούμε να υπολογίσουμε το κόστος κύκλου ζωής των δύο λύσεων.

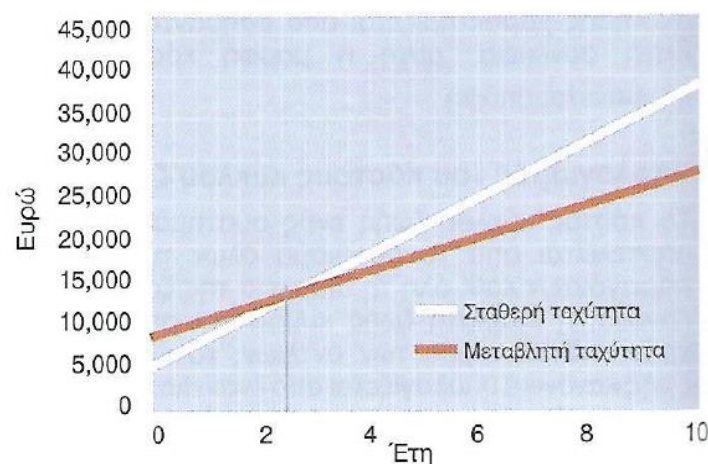
Αν και τα αρχικό κόστος της αντλίας μεταβλητής ταχύτητας είναι διπλάσιο σε σύγκριση με εκείνο της αντλίας σταθερής ταχύτητας, το συνολικό κόστος της πρώτης λύσης που αναφέραμε είναι 25% μικρότερο από εκείνο της λύσης της αντλίας σταθερής ταχύτητας μετά από 10 χρόνια.



**ΣΧΗΜΑ 4.42:** Κόστος κύκλου ζωής μιας αντλίας σταθερής ταχύτητας και μιας αντλίας μεταβλητής ταχύτητας.

Εκτός από το μικρότερο κόστος κύκλου ζωής, η αντλία μεταβλητής ταχύτητας προσφέρει, ορισμένα λειτουργικά οφέλη, π.χ. σταθερή πίεση στο σύστημα.

Ο χρόνος απόσβεσης της λύσης με την αντλία μεταβλητής ταχύτητας είναι κάπως μεγαλύτερος γιατί αυτή η αντλία είναι πιο ακριβή. Όπως μπορείτε να δείτε από το σχήμα, ο χρόνος απόσβεσης είναι δύομιση χρόνια περίπου, αλλά στις βιομηχανικές εφαρμογές αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως μία καλή επένδυση.



**ΣΧΗΜΑ 4.43:** Χρόνος απόσβεσης για μια αντλία σταθερής ταχύτητας και μια αντλίας μεταβλητής ταχύτητας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΣ

Σύμφωνα με τον Αιλαμάκη Ευάγγελο (2017), σε πολλές εγκαταστάσεις απαιτείται η μετάδοση θερμότητας μεταξύ δύο ρευστών. Οι διεργασίες αυτές πραγματοποιούνται σε συσκευές που ονομάζονται εναλλάκτες θερμότητας. Η αρχή λειτουργίας των εναλλακτών βασίζεται στη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα δυο ρευστά. Υπάρχει μεταφερόμενη ενέργεια υπό μορφή θερμότητας από το ρευστό υψηλής θερμοκρασίας προς το ρευστό χαμηλής. Η θερμότητα μεταφέρετε από το ζεστό ρευστό στο τοίχωμα μέσω συναγωγής, διαμέσου του τοιχώματος με αγωγή και από το τοίχωμα στο ψυχρό ρευστό και πάλι μέσω συναγωγής. Οι επιδράσεις της μεταφοράς με ακτινοβολία συμπεριλαμβάνονται συνήθως στους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή. Οι εναλλάκτες συναντώνται σε συστήματα θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού, σε κύκλους παραγωγής ισχύος, σε συσκευές ανάκτησης θερμότητας, σε χημικές διεργασίες και όπου αλλού χρειαζόμαστε εναλλαγή θερμότητας. Πολλοί εναλλάκτες θερμότητας μοιάζουν στο εξωτερικό. Η διαφορά είναι στο εσωτερικό τους, στις λεπτομέρειες του σχεδιασμού και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σφράγισης.

Σημαντικό σημείο που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την αξιολόγηση ενός εναλλάκτη θερμότητας, είναι οι μορφές της πτυχώσεως εντός του εναλλάκτη. Πολλοί παράγοντες μπαίνουν στον σχεδιασμό, όπως η θερμική ανάλυση, το μέγεθος, το βάρος, η κατασκευαστική αντοχή, η πτώση πίεσης και το κόστος. Κατά την αξιολόγηση ενός εναλλάκτη θερμότητας, είναι πολύ σημαντικό όχι μόνο να διερευνήσει κανείς τα στοιχεία του προϊόντος που παρέχεται, αλλά και να αναλύσει το επίπεδο της έρευνας-ανάπτυξης που πραγματοποιούνται από τον κατασκευαστή, την εξυπηρέτηση μετά την τοποθέτηση σε λειτουργία και την διαθεσιμότητα ανταλλακτικών. Στους εναλλάκτες θερμότητας δεν καταναλώνεται άμεσα καύσιμο, η βέλτιστη όμως χρήση τους και η καλή λειτουργία τους επηρεάζει άμεσα την συνολική κατανάλωση του καυσίμου-ενέργειας, για παράδειγμα σε μια βιομηχανία. Το πολύ αυξημένο ενδιαφέρον για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο τις τελευταίες δεκαετίες, σε συνδυασμό με τα οικονομικά κίνητρα που έδωσαν οι περισσότερες κυβερνήσεις σε όλο τον κόσμο, οδήγησε τις εταιρείες να αναπτύξουν τεχνολογίες αποτελεσματικότερης αξιοποίησης της ενέργειας. Σημαντικό ρόλο για την επίτευξη του παραπάνω στόχου έπαιξαν και συνεχίζουν να παίζουν οι εναλλάκτες θερμότητας.

Ανάλογα με το επιτελούμενο έργο οι εναλλάκτες θερμότητας χαρακτηρίζονται ως: (α) Εναλλάκτες: για εναλλαγή θερμότητας μεταξύ δύο ρευσμάτων

διεργασίας, (β) Θερμαντήρες: για θέρμανση ρεύματος της διεργασίας με θερμή βοηθητική παροχή, συνήθως ατμό, (γ) Ψυκτήρες: για ψύξη ρεύματος της διεργασίας με ψυχρή βοηθητική παροχή, συνήθως νερό ψύξης.

## 5.1 ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Σύμφωνα με τους Peters και Timmerhaus (2002), η μεταφορά θερμότητας μπορεί να γίνει με 3 τρόπους: αγωγή, συναγωγή ή ακτινοβολία. Σε αρκετές περιπτώσεις, η ανταλλαγή θερμότητας μπορεί να γίνει με συνδυασμό δυο ή ακόμα και τριών από τους παραπάνω τρόπους. Όταν ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι σταθερός σε σχέση με τον χρόνο, η ροή της θερμότητας ορίζεται ως ροή σε μόνιμη κατάσταση. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μεταβάλλεται τότε η κατάσταση ονομάζεται μη μόνιμη.

### 5.1.1 ΑΓΩΓΗ

Η μεταφορά θερμότητας μέσω ενός σταθερού υλικού επιτυγχάνεται με το μηχανισμό που είναι γνωστός ως αγωγή. Ο ρυθμός ροής θερμότητας με αγωγή είναι ανάλογος με το εμβαδό της επιφάνειας που διατίθεται για τη μεταφορά θερμότητας και τη διαφορική κλίση (gradient) της θερμοκρασίας στην κατεύθυνση της ροής θερμότητας. Επομένως, ο ρυθμός ροής θερμότητας σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$\frac{dQ}{d\theta} = -kA \frac{dt}{dx} \quad (5.1)$$

Όπου:

Q = θερμότητα που μεταφέρεται σε χρόνο θ h, Btu

k = σταθερά αναλογίας, γνωστή ως θερμική αγωγιμότητα που ορίζεται από την Εξ. (5.1), Btu/(h)(ft<sup>2</sup>)(°F/ft)

A = εμβαδό της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας που είναι κάθετη στην κατεύθυνση της ροής θερμότητας, ft<sup>2</sup>

t = θερμοκρασία, °F

x = μήκος της μεταφοράς με αγωγή στην κατεύθυνση της ροής θερμότητας, ft

Η θερμική αγωγιμότητα είναι ιδιότητα οποιουδήποτε συγκεκριμένου υλικού και η τιμή της πρέπει να καθορίζεται πειραματικά. Για τα στερεά η επίδραση της θερμοκρασίας στη θερμική αγωγιμότητα είναι σχετικά μικρή σε κανονικές θερμοκρασίες. Επειδή η αγωγιμότητα μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με τη θερμοκρασία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μέση τιμή της θερμικής αγωγιμότητας βασισμένη στη μέση αριθμητική τιμή της θερμοκρασίας του συγκεκριμένου υλικού για σχεδιασμό με ικανοποιητική ακρίβεια. Για τη συνηθισμένη περίπτωση της ροής θερμότητας σε μόνιμη κατάσταση, η Εξ. (5.1) μπορεί να γραφεί ως

$$\frac{Q}{\theta} = q = -kA_m \frac{\Delta t}{x} \quad (5.2)$$

Όπου:

$A_m$  = εμβαδό επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας που είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ροής θερμότητας,  $ft^2$

$q$  = ρυθμός μεταφοράς θερμότητας,  $Btu/h$

$\Delta t$  = διαφορά Θερμοκρασίας που λειτουργεί ως κινητήρια δύναμη,  $^{\circ}F$

### 5.1.2 ΣΥΝΑΓΩΓΗ

Η μεταφορά της θερμότητας με φυσική ανάμιξη μιας θερμής και μιας ψυχρής ποσότητας του ίδιου ρευστού είναι γνωστή ως μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Η ανάμιξη μπορεί να οφείλεται στη διαφορά των πυκνοτήτων, όπως στη φυσική συναγωγή (natural convection), ή να είναι αποτέλεσμα μηχανικά προκαλούμενης ανάδεύσης, όπως στην εξαναγκασμένη συναγωγή (forced convection). Η παρακάτω εξίσωση χρησιμοποιείται ως βάση για τον υπολογισμό του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή:

$$\frac{dQ}{d\theta} = hA\Delta t \quad (5.3)$$

Η σταθερά αναλογίας  $h$  είναι γνωστή ως συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και είναι συνάρτηση τον τύπου της ανάδεύσης και της φύσης του ρευστού. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, όπως και η θερμική αγωγιμότητα  $k$ , υπολογίζεται συχνά με βάση τα πειραματικά δεδομένα. Για συνθήκες μόνιμης κατάστασης, η Εξ. (5.3) γίνεται:

$$q = hA\Delta t \quad (5.4)$$

### 5.1.3 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Όταν ακτινοβολούσα ενέργεια θερμότητας μεταφέρεται από μια πηγή σε έναν δέκτη, ο μηχανισμός της μεταφοράς θερμότητας αναφέρεται ως ακτινοβολία. Ο ρυθμός με τον οποίο η ακτινοβολούσα ενέργεια θερμότητας εκπέμπεται από μια πηγή είναι:

$$\frac{dQ}{d\theta} = \sigma \varepsilon AT^4 \quad (5.5)$$

Όπου:

$\sigma =$  σταθερά Stefan-Boltzmann =  $0.173 \times 10^{-8} \text{ Btu} / (\text{h})(\text{ft}^2)(^\circ\text{R})^4$

$\varepsilon =$  ικανότητα εκπομπής της επιφάνειας

$A =$  εμβαδό επιφάνειας που εκτίθεται στη μεταφορά θερμότητας,  $\text{ft}^2$

$T =$  απόλυτη θερμοκρασία,  $^\circ\text{R}$

Η ικανότητα εκπομπής της ακτινοβολίας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της εκπέμπουσας επιφάνειας και, όπως η θερμική αγωγιμότητα και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, πρέπει να υπολογιστεί πειραματικά. Μέρος της ενέργειας ακτινοβολίας που λαμβάνεται από το δέκτη απορροφάται και τμήμα αυτής πιθανόν να ανακλαστεί. Επιπλέον, ο δέκτης, μπορεί να εκπέμψει ενέργεια, όπως η πηγή.

Συνήθως ενδοιφερόμαστε κυρίως για το συνολικό (καθαρό) ρυθμό της μεταφοράς θερμότητας ανάμεσα σε δύο σώματα. Ένα μέρος της ενέργειας που ακτινοβολείται, όπως δίνεται από την Εξ. (5.5), πιθανόν να επιστραφεί στην πηγή με ανάκλαση από το δέκτη και ο δέκτης, φυσικά, εκπέμπει ενέργεια ακτινοβολίας η οποία μπορεί να απορροφηθεί εν μέρει ή ολοκληρωτικά από την πηγή. Η Εξίσωση (5.5) επομένως μπορεί να τροποποιηθεί για να ληφθεί ο συνολικός ρυθμός της ανταλλαγής θερμότητας που ακτινοβολείται ανάμεσα σε δύο σώματα. Η γενική εξίσωση σε μόνιμη κατάσταση είναι:

$$q_{\text{απο το σώμα 1 στο σώμα 2}} = 0.171A \left[ \left[ \frac{T_1}{100} \right]^4 F_{A1} F_{E1} - \left[ \frac{T_2}{100} \right]^4 F_{A2} F_{E2} \right] \quad (5.6)$$

ή σε μια εναλλακτική μορφή

$$q_{\text{απο το σώμα 1 στο σώμα 2}} = 0.171A \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_A F_E \quad (5.7)$$

Όπου το  $A$  αντιπροσωπεύει μιας εκ των επιφανειών, το  $F_A$  είναι ένας συντελεστής διόρθωσης που βασίζεται στον σχετικό προσανατολισμό των δύο επιφανειών και την επιφάνεια που επιλέγεται για τον υπολογισμό του  $A$  και το  $F_E$  είναι ένας συντελεστής διόρθωσης που βασίζεται στις ικανότητες εκπομπής και τις απορροφητικότητες των επιφανειών.

Ο πίνακας 5.1 παρουσιάζει τις μεθόδους υπολογισμού των  $F_A$  και  $F_E$  για διάφορες περιπτώσεις προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στον τύπο 5.7



**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1:** (Παραδοχές: Η επιφάνεια της βάσης είναι λεία και η άμεση αυτοακτινοβολία δεν τέμνεται από την επιφάνεια. Το διαχωριστικό μέσο ανάμεσα στις επιφάνειες είναι μη απορροφητικό. Η ικανότητα εκπομπής είναι ίση με την απορροφητικότητα.)

Προσανατολισμός των επιφανειών	Εμβαδό επιφάνειας, $A$	$F_A$	$F_E$
Η επιφάνεια $A_1$ μικρή σε σύγκριση με τη συνολική επιφάνεια του περιβλήματος $A_2$ (για παράδειγμα, απώλεια θερμότητας από τον εξοπλισμό προς το περιβάλλον).	$A_1$	1	$\epsilon_1$
Δύο παράλληλες επίπεδες επιφάνειες με ίσο εμβαδό, όταν το μήκος και το πλάτος είναι μεγάλα σε σύγκριση με την απόσταση ανάμεσα στις δύο επίπεδες επιφάνειες.	$A_1$ ή $A_2$	1	$\frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$
Η επιφάνεια $A_1$ είναι μια σφαίρα με ακτίνα $r_1$ μέσα σε μια ομόκεντρη σφαίρα με ακτίνα $r_2$ .	$A_1$	1	$\frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)}$
Η επιφάνεια $A_1$ είναι ένας κύλινδρος με ακτίνα $r_1$ μέσα σε έναν ομόκεντρο κύλινδρο με ακτίνα $r_2$ όταν το μήκος είναι μεγάλο σε σύγκριση με τη διάμετρο.	$A_1$	1	$\frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{r_1}{r_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)}$

Όπου  $\epsilon_1$  και  $\epsilon_2$  οι ικανότητες εκπομπής των επιφανειών 1 και 2 αντιστοίχα.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας 5.2, όπου περιέχονται συνηθισμένες τιμές της ικανότητας εκπομπής για διάφορες επιφάνειες.

Επιφάνεια	Θερμοκρασία, °F	Ικανότητα εκπομπής
Αλουμίνιο, γυαλισμένη επίπεδη επιφάνεια	73	0.040
Αλουμίνιο, ανώμαλη επίπεδη επιφάνεια	78	0.055
Βαφή αλουμινίου	.....	0.3-0.6
Υλικό για οροφές με επίστρωση αλουμινίου	100	0.22
Χαρτί αμιάντου	100	0.93
Ορείχαλκος, θαμπός	120-660	0.22
Ορείχαλκος, στιλβωμένος	100-600	0.096
Τούβλο, οικοδομικό	.....	0.80-0.95
Τούβλο, πυρίμαχο	.....	0.75-0.90
Χαλκός, οξειδωμένος	77	0.78
Σίδηρος, χυτή επιφάνεια, λεία	73	0.80
Σίδηρος, οξειδωμένος	212	0.74
Σίδηρος, στιλβωμένος	800	0.14
Μόλυβδος, γκρι, οξειδωμένος	75	0.28
Νικέλιο, καθαρό, στιλβωμένο	440	0.07
	710	0.087
Λαδομπογιά (βαφή)	212	0.92-0.96
Χαρτί για οροφές	69	0.91
Άργυρος, στιλβωμένος	100	0.022
	700	0.031
Χάλυβας, στιλβωμένος	212	0.066
Φύλλο χάλυβα, οξειδωμένο	75	0.80
Νερό	32	0.95
	212	0.963
Ψευδάργυρος, γαλβανισμένο φύλλο σιδήρου, γκρι οξειδωμένο	75	0.276

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2:** Συνηθισμένες τιμές της ικανότητας εκπομπής για διάφορες επιφάνειες

Συχνά αντιμετωπίζεται η περίπτωση όπου ένα μη μέλαν σώμα είναι εκτεθειμένο σε μη απορροφητικό αέριο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο σωλήνας υδρατμού εκτεθειμένος στην ατμόσφαιρα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση προτιμάται ο τύπος 5.8 που αποτελεί μια απλοποίηση των τύπων 5.6 και 5.7

$$q_{\text{που ακτινοβολείται από σωλήνα}} = 0.171A_1\varepsilon_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (5.8)$$

Όπου ο δείκτης 1 αναφέρεται στον σωλήνα και ο δείκτης 2 αναφέρεται στο περιβάλλον. Ωστόσο ο τύπος 5.8 μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για σωλήνα που μέσα του ρέει υδρατμός και εξωτερικά υπάρχει ατμόσφαιρα ή οξυγόνο, άζωτο, υδρογόνο, χλώριο. Αντίθετα για αέρια όπως τα  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $NH_3$ , οργανικά αέρια και υδρατμό που απορροφούν ακτινοβολία δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον τύπο 5.8.

## 5.2 ΟΛΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Σε πολλές περιπτώσεις η μεταφορά Θερμότητας περιλαμβάνει τη ροή της θερμότητας από ένα ρευστό μέσω ενός στερεού τοιχώματος σε ένα άλλο ρευστό. Αυτή η Θερμότητα πρέπει να ρέει μέσω πολλών αντιστάσεων σε σειρά. Ο συνολικός ρυθμός μεταφοράς Θερμότητας μπορεί να συσχετιστεί με την ολική διαφορά θερμοκρασίας που δρα ως κινητήρια δύναμη χρησιμοποιώντας έναν ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $U$ . Επομένως σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης,

$$q = UA\Delta t_{OA} \quad (5.9)$$

όπου το  $\Delta t_{OA}$  αντιπροσωπεύει την ολική διαφορά θερμοκρασίας που δρα ως κινητήρια δύναμη. Επειδή συνήθως υπάρχουν πολλές πιθανές επιφάνειες όπου μπορεί να βασιστεί η αριθμητική τιμή του ολικού συντελεστή, οι μονάδες του  $U$  πρέπει να περιλαμβάνουν έναν συμβολισμό της επιφάνειας  $A$ . Για παράδειγμα, αν ένας συνολικός συντελεστής βασίζεται στην εσωτερική επιφάνεια ενός σωλήνα, οι μονάδες του  $U$  πρέπει να είναι  $Btu/(h)(ft^2 \text{ της εσωτερικής επιφάνειας})(^\circ F)$ .

Ο ολικός συντελεστής (περιλαμβανομένης της αντίστασης των αποθέσεων) μπορεί να συσχετιστεί με τους μερικούς συντελεστές ή τις αντιστάσεις με την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{1}{U_d} = \frac{A}{h'_d A_f} + \frac{A}{h''_d A_f} + \frac{Ax_w}{kA_{m_w}} + \frac{A}{h'_d A_f} + \frac{A}{h''_d A_f} \quad (5.10)$$

όπου το  $A$  αντιπροσωπεύει το εμβαδό της βασικής επιφάνειας που έχει επιλεγεί για τον υπολογισμό του  $U_d$  και οι τόνοι αναφέρονται στις διαφορετικές αντιστάσεις υμένα που απαντώνται.

### ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΩΝ

Με την πάροδο του χρόνου, μπορεί να συσσωρευτούν στις επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας βρωμιές ή πουρί προκαλώντας πρόσθετη αντίσταση στη ροή της θερμότητας. Για να λάβει υπόψη του αυτή την πιθανότητα, όταν καθορίζει έναν ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, ο μηχανικός σχεδιασμού μπορεί να συμπεριλάβει μια αντίσταση, που ονομάζεται συντελεστής επικαθήσεων ή ρύπανσης. Η Εξίσωση (5.10) δείχνει τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται ο συντελεστής επικαθήσεων. Σε αυτή την περίπτωση, οι συντελεστές επικαθήσεων  $h'_d$  και  $h''_d$  χρησιμοποιούνται για να δικαιολογήσουν τη δημιουργία επικαθήσεων ή τη συσσώρευση βρωμιάς επάνω στις επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας.

Οι συντελεστές επικαθήσεων, που είναι ισοδύναμοι με  $1/h_d$ , παρουσιάζονται συχνά στη βιβλιογραφία για διάφορα υλικά και συνθήκες. Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι τιμές του  $h_d$  για συνηθισμένες διεργασίες. Επειδή η αντίσταση των επικαθήσεων αυξάνεται με το χρόνο, πρέπει να επιλεγεί κάποια βάση για τις αριθμητικές τιμές των συντελεστών επικαθήσεων. Η κοινή βάση είναι μια χρονική περίοδος ενός έτους και αυτή η συνθήκη εφαρμόζεται στις τιμές του που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3. Όταν χρησιμοποιούνται οι σωστοί συντελεστές επικαθήσεων, ο εξοπλισμός μπορεί να μεταφέρει περισσότερη θερμότητα από αυτήν που απαιτείται όταν ο εξοπλισμός είναι καθαρός. Στο τέλος ενός χρόνου περίπου η δυναμικότητα θα έχει μειωθεί στην τιμή σχεδιασμού και θα χρειαστεί να διακοπεί η λειτουργία για καθαρισμό. Με αυτή την προσέγγιση δεν είναι απαραίτητο να γίνουν πολλές διακοπές για τον καθαρισμό των μεμονωμένων μονάδων. Αντίθετα, μπορούν να προγραμματισθούν ετήσιες ή περιοδικές διακοπές όλης της μονάδας, για να καθαριστεί όλος ο εξοπλισμός μεταφοράς θερμότητας και να επανέλθει στην πλήρη δυναμικότητα του.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3: Μερικοί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας για τις επικαθήσεις.

Θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου	Έως 115°C		115-204°C	
Θερμοκρασία του νερού:	50°C ή λιγότερο		Πάνω από 50°C	
Ταχύτητα του νερού, m/s	1 και λιγότερο	Πάνω από 1	1 και λιγότερο	Πάνω από 1
Απεσταγμένο	11356	11356	11356	11356
Θαλασσινό νερό	11356	11356	5678	5678
Κατεργασμένο νερό τροφοδοσίας λεβήτων	5678	11356	2839	5678
Επεξεργασμένο συμπληρωματικό νερό για πύργους ψύξης	5678	5678	2839	2839
Νερό πόλης, φρεατίων	2839	5678	1873	2839
Ποταμίσιο νερό με λάσπη	1873	2839	1419	1873
Σκληρό (πάνω από 15 grains/gal)	1873	1873	1135	1135

	$h_d$ για διάφορες διεργασίες σε $W/m^2K$
Οργανικοί ατμοί, υγρή βενζίνη	11356
Διυλισμένα κλάσματα πετρελαίου (υγρά), οργανικά ρευστά, άλμη, υδρατμός με λάδια	5678
Υπολείμματα απόσταξης (πάνω από 25° API), αέριοκαύσιμο ή υγρή νάφθα κάτω από 500°F, ατμοί ψυκτικών, αέρας (σκόνη)	2839
Αέριο καύσιμο πάνω από 500°P, φυτικό έλαιο	1873
Υγρή νάφθα πάνω από 500°P, έλαια βαφής	1419
Αργό από την κορυφή (κάτω από 25° API), καύσιμο υγρό	1135
Υπόλειμμα από πυρόλιση, αέριο από φούρνο, φωτιστικό αέριο	567

### 5.3 ΜΕΣΗ ΔΙΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΟΥ ΔΡΑ ΩΣ ΚΙΝΗΤΗΡΙΑ ΔΥΝΑΜΗ

Όταν ένας εναλλάκτης θερμότητας λειτουργεί συνέχεια, η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο θερμό και το ψυχρό ρευστό μεταβάλλεται συνήθως καθ' όλο το μήκος του εναλλάκτη. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η μεταβολή αυτή, οι Εξ. (5.4) και (5.9) μπορούν να γραφούν σε διαφορική μορφή ως εξής:

$$dq = h dA \Delta t_f \quad (5.11)$$

$$dq = U dA \Delta t_{oA} \quad (5.12)$$

Όταν ολοκληρώνονται οι Εξ. (5.11) και (5.12) πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές στο  $\Delta t$  και οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας. Κάτω από κάποιες συνθήκες, πιθανόν να είναι απαραίτητη μια γραφική ή μια βηματική ολοκλήρωση. Σε πολλές περιπτώσεις μεταφοράς θερμότητας, οι εξισώσεις μπορούν να επιλυθούν αλγεβρικά.

#### 5.3.1 ΣΤΑΘΕΡΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.

Οι ολοκληρωμένες μορφές των Εξ. (5.11) και (5.12) εκφράζονται συνήθως με τις παρακάτω απλοποιημένες μορφές:

$$q = h A \Delta t_{fm} \quad (5.13)$$

$$q = U A \Delta t_{oA_m} \quad (5.14)$$

όπου ο δείκτης  $m$  αναφέρεται σε μια μέση τιμή. Η σωστή μέση διαφορά θερμοκρασίας είναι η μέση λογαριθμική τιμή, κάτω από τις ακόλουθες συνθήκες:

1. Το  $U$  (ή  $h$ ) είναι σταθερό.
2. Ο ρυθμός ροής μάζας είναι σταθερός
3. Δεν υπάρχει μερική αλλαγή φάσης.
4. Οι ειδικές θερμότητες των ρευστών παραμένουν σταθερές.
5. Οι απώλειες θερμότητας είναι αμελητέες.
6. Ο εξοπλισμός είναι σχεδιασμένος για ροή, ή οποιοδήποτε τύπο ροής, αν η θερμοκρασία ενός από τα ρευστά παραμένει σταθερή (μπορεί να συμβεί αλλαγή φάσης) σε όλη την επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας.

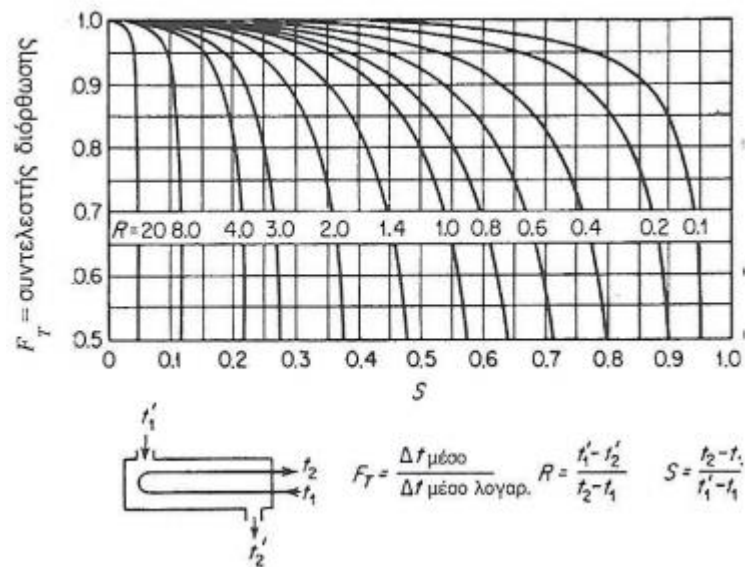
$$\Delta t_{oA_m} = \Delta t_{oA_{\text{μεση λογ.}}} = \frac{\Delta t_{oA_1} - \Delta t_{oA_2}}{\ln(\Delta t_{oA_1} / \Delta t_{oA_2})} \quad (5.15)$$

όπου τα  $\Delta t_{oA_1}$  και  $\Delta t_{oA_2}$  αντιπροσωπεύουν τις δύο ακραίες τιμές της συνολικής διαφοράς θερμοκρασίας. Για τούς υπολογισμούς σχεδιασμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μέση αριθμητική διαφορά θερμοκρασίας στη θέση της

μέσης λογαριθμικής τιμής, αν ο λόγος  $\Delta t_{oa_1} / \Delta t_{oa_2}$  (ή  $\Delta t_{oa_2} / \Delta t_{oa_1}$  αν το  $\Delta t_{oa_2}$  είναι μεγαλύτερο από το  $\Delta t_{oa_1}$ ) δεν υπερβαίνει το 2.0.

Όταν το σύστημα περιλαμβάνει εναλλάκτες πολλαπλών διαδρομών και ισχύουν οι πρώτες πέντε συνθήκες που αναφέρθηκαν παραπάνω, μπορούν να υπολογιστούν οι τιμές του  $\Delta t_{oam}$  ολοκληρώνοντας την Εξ. (5.12) ή, ακόμη πιο απλά, από τα διαγράμματα που δίνουν το σωστό  $\Delta t_{oam}$  για ποικίλους τύπους εναλλακτών πολλαπλών διαδρομών συναρτήσει της μέσης λογαριθμικής διαφοράς θερμοκρασίας για την αντιρροή. Το Σχήμα 5.1 είναι ένα διάγραμμα αυτού του τύπου για την περίπτωση ενός εναλλάκτη με μια διαδρομή κελύφους και δύο ή περισσότερες διαδρομές αυλών (ζυγός αριθμός).

**ΣΧΗΜΑ 5.1:** Διάγραμμα για τον υπολογισμό της σωστής μέσης διαφοράς θερμοκρασίας που δρα ως κινητήρια δύναμη για έναν εναλλάκτη με μια διαδρομή στο κέλυφος και δυο ή περισσότερες (ζυγός αριθμός) διαδρομές αυλών.

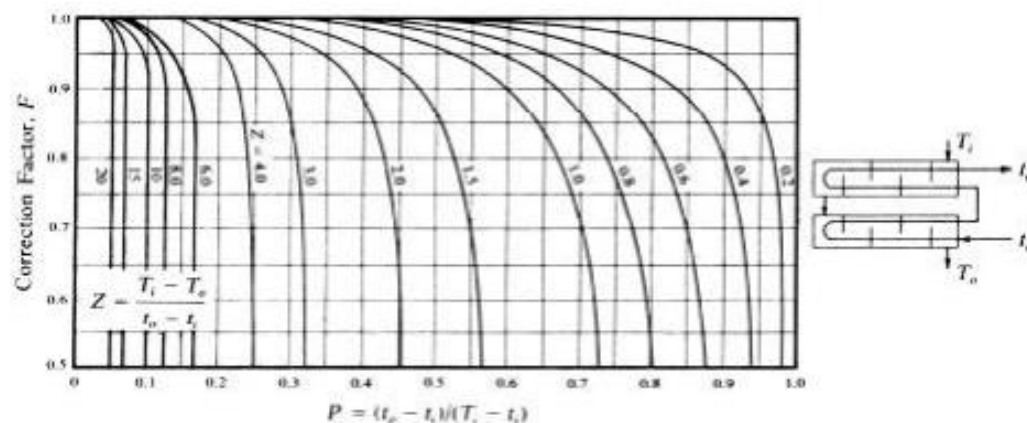


### 5.3.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΓΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΠΟΛΥΠΛΟΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

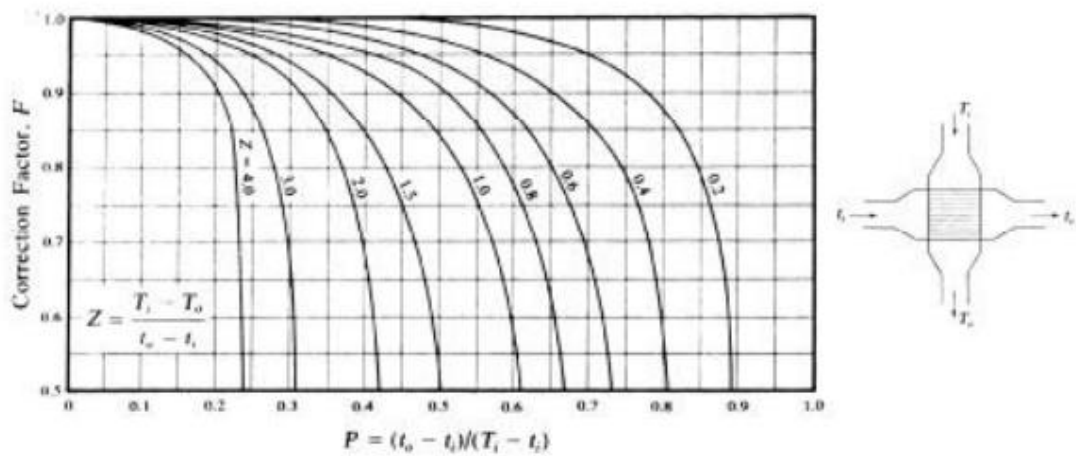
Για πολύπλοκους εναλλάκτες θερμότητας, όπως π.χ. με δέσμες σωλήνων, πολλαπλής διαδρομής ή σταυρωτής ροής, ο υπολογισμός της μέσης λογαριθμικής διαφοράς θερμοκρασίας είναι τόσο δύσκολος, που η καθιερωμένη πρακτική είναι να εισάγεται στη σχέση (5.9) ένας διορθωτικός συντελεστής (correction factor)  $F$

$$q = UAF\Delta T_{\text{οα μέση λογαρ}} \quad (5.16)$$

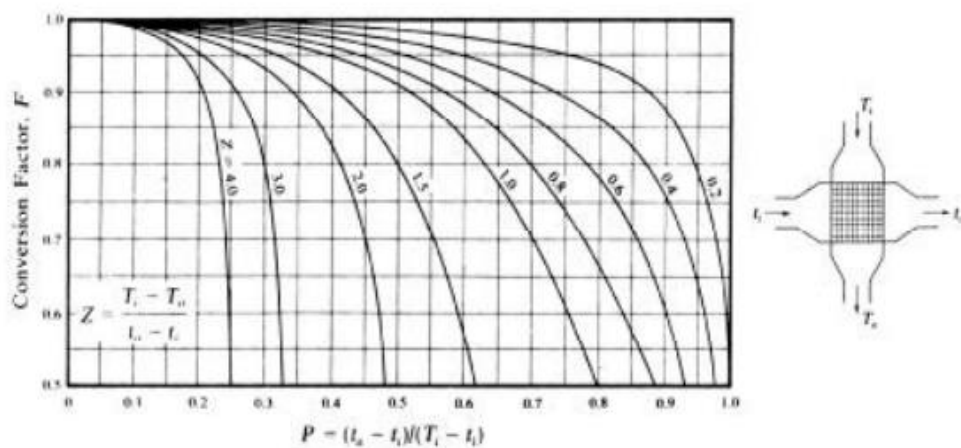
στην οποία η  $\Delta T_{\text{οα μέση λογαρ}}$  είναι η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά για εναλλάκτη διπλού σωλήνα αντιροής, με την ίδια θερμοκρασία εισόδου και εξόδου για το ρευστό, όπως και στον πιο πολύπλοκο εναλλάκτη. Διορθωτικοί συντελεστές για κάποιες κοινές περιπτώσεις δίνονται στα Σχήματα 5.2, 5.3 και 5.4. Σ' αυτά τα σχήματα χρησιμοποιείται ο συμβολισμός ( $T$ ,  $t$ ) για τις θερμοκρασίες των δύο ρευμάτων, εφόσον δεν έχει σημασία αν το θερμό ρευστό ρέει μέσα στους σωλήνες ή μέσα στο κέλυφος.



**ΣΧΗΜΑ 5.2:** Εναλλάκτης διπλής διαδρομής στο κέλυφος και δύο φορές άρτιου αριθμού διαδρόμων στους σωλήνες.



ΣΧΗΜΑ 5.3: Εναλλάκτης σταυρωτής ροής με ανάμιξη ενός από τα ρευστά .



ΣΧΗΜΑ 5.4: Εναλλάκτης σταυρωτής ροής χωρίς ανάμιξη των ρευστών.



### 5.3.3 ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.

Σύμφωνα με τους Peters και Timmerhaus (2002), αν ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, μπορεί να υποθεθεί ότι ο εναλλάκτης αποτελείται από έναν αριθμό μικρότερων εναλλακτών σε σειρά και ότι ο συντελεστής μεταβάλλεται γραμμικά με τη θερμοκρασία σε κάθε ένα από αυτούς. Όταν ισχύουν οι τελευταίες πέντε συνθήκες που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο και ο ολικός συντελεστής μεταβάλλεται γραμμικά με τη θερμοκρασία, η ολοκληρώνοντας την Εξ. (5.12) προκύπτει:

$$q = A \frac{U_1 \Delta t_{oa_2} - U_2 \Delta t_{oa_1}}{\ln(U_1 \Delta t_{oa_2} / U_2 \Delta t_{oa_1})} \quad (5.17)$$

Οι τιμές του  $q$  και του  $A$  στην Εξ. (5.17) εφαρμόζονται στο τμήμα του εξοπλισμού ανάμεσα στα όρια που υποδεικνύονται από τους δείκτες 1 και 2. Κατά συνέπεια, η συνολική τιμή του  $q$  του  $A$  για όλο τον εναλλάκτη μπορεί να υπολογιστεί προσθέτοντας τις ποσότητες για κάθε ένα από τα μεμονωμένα τμήματα.

### 5.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Οι ακριβείς τιμές των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή για μια συγκεκριμένη κατάσταση μπορούν να υπολογιστούν μόνο με πειραματικές μετρήσεις κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Παρόλα αυτά, μπορούν να ληφθούν κατά προσέγγιση τιμές για να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό από συσχετίσεις που βασίζονται σε γενικά πειραματικά δεδομένα. Στις παρακάτω παραγράφους παρουσιάζονται διάφορες συσχετίσεις οι οποίες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στο σχεδιασμό. Γενικά, οι σχέσεις που ισχύουν σε συνθήκες τυρβώδους ροής είναι πιο ακριβείς από εκείνες που ισχύουν σε συνθήκες στρωτής ροής. Οι συντελεστές υμένα που λαμβάνονται από τη σωστή χρήση των εξισώσεων στην περιοχή τυρβώδους ροής θα αποκλίνουν από την πραγματική πειραματική τιμή έως  $\pm 20\%$ , αλλά οι τιμές που αντιστοιχούν σε συνθήκες στρωτής ροής ή σε συμπύκνωση, βρασμό, φυσική κυκλοφορία και στην πλευρά κελύφους των εναλλακτών θερμότητας μπορεί να είναι λανθασμένες έως  $100\%$  ή και παραπάνω. Εξαιτίας των ανακρίβειών που ενυπάρχουν στις μεθόδους υπολογισμού των συντελεστών υμένα, κάποιοι μηχανικοί σχεδιασμού προτιμούν να χρησιμοποιούν εμπειρικούς ολικούς συντελεστές, ενώ άλλοι χρησιμοποιούν ένα μεγάλο συντελεστή ασφαλείας με τη μορφή παραγόντων ή συντελεστών αποθέσεων.

### 5.4.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΡΕΥΣΤΑ ΣΕ ΣΩΛΗΝΕΣ ΚΑΙ ΑΥΛΟΥΣ (χωρίς αλλαγή φάσης)

Οι παρακάτω εξισώσεις βασίζονται στις συσχετίσεις που παρουσιάστηκαν από τους Sieder και Tate: \*

Για στρωτή ροή ( $DG/\mu < 2100$ )

$$\frac{h_i D}{k} = 1.86 \left( \frac{DG}{\mu} \frac{C_p \mu}{k} \frac{D}{L} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right) = 1.86 \left( \frac{4wC_p}{\pi k L} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (5.18)$$

Για τυρβώδη ροή πάνω από την περιοχή μεταβολής ( $DG/\mu > 10000$ )

$$\frac{h_i D}{k} = 0.023 \left( \frac{DG}{\mu} \right)^{0.8} \left( \frac{C_p \mu}{k} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (5.19)$$

Για την μεταβατική περιοχή ( $DG/\mu = 2100$  έως  $10,000$ ), βλ. Σχ. 5.5,

Όπου:

$D$  = διάμετρος του σωλήνα ή του αυλού (εσωτερική), ft

$G$  = μαζική ταχύτητα μέσα στον αγωγό, lb/(h)(ft<sup>2</sup> του εμβαδού διατομής)

$C_p$  = ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού σε σταθερή πίεση, Btu/(lb)(°F)

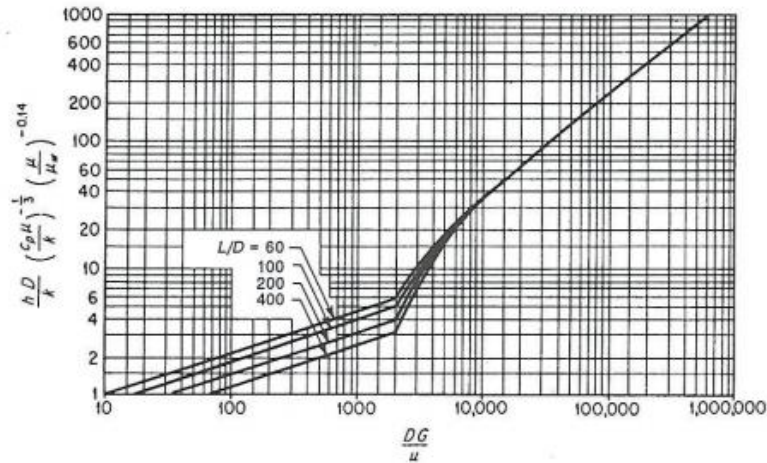
$\mu$  = ιξώδες του ρευστού (ο δείκτης  $w$  δηλώνει τον υπολογισμό σε θερμοκρασία τοιχώματος), lb/(h)(ft)

$L$  = θερμαινόμενο μήκος του ευθέως αγωγού, ft

$w$  = μαζική ροή ανά αυλό, lb/h

Τα  $k$ ,  $\mu$  και  $C_p$  είναι υπολογισμένα στη μέση θερμοκρασία του κύριου όγκου του ρευστού.

Οι εξισώσεις (5.18) και (5.19) εφαρμόζονται σε οργανικά ρευστά, σε υδατικά διαλύματα, σε νερό και σε αέρια. Οι γραφικές παραστάσεις των δύο εξισώσεων παρουσιάζονται στο Σχ. 5.5 για να διευκολυνθεί η λύση τους και να φανούν οι τιμές της περιοχής μετάβασης.



**ΣΧΗΜΑ 5.5:** Διάγραμμα για τον υπολογισμό των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας για ρευστά που ρέουν σε σωλήνες και αυλού. {Βασισμένο στις εξισώσεις (5.18) και (5.19)}

**ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ:** Για τα κοινά αέρια, η Εξ. (5.19) μπορεί να απλοποιηθεί για να δώσει την παρακάτω προσεγγιστική σχέση:

$$h_i = \frac{0.014 C_p G^{0.8}}{D^{0.2}} \quad (5.20)$$

Παρόμοια, για νερό σε συνηθισμένες θερμοκρασίες και πιέσεις ισχύει

$$h_i = \frac{150(1+0.011t_b)(V')^{0.8}}{(D')^{0.2}} \quad (5.21)$$

Οι εξισώσεις (5.20) και (5.21) είναι διαστατικές και η τιμή του  $h_i$  εκφράζεται σε  $Btu / (h)(ft^2)(^{\circ}F)$  μόνο αν χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω μονάδες για τις άλλες μεταβλητές:

$C_p$ =ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού,  $Btu / (lb)(^{\circ}F)$

$D$ =διάμετρος, ft

$D'$ =διάμετρος, in

$G$ =μαζική ταχύτητα μέσα στον αυλό,  $lb / (h)(ft^2)$

$t_b$ = μέση (δηλ. του κύριου όγκου)θερμοκρασία του νερού,  $^{\circ}F$

$V'$ =ταχύτητα του νερού, ft/s

### 5.4.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΡΕΥΣΤΑ ΠΟΥ ΡΕΟΥΝ ΕΞΩ ΑΠΟ ΣΩΛΗΝΕΣ ΚΑΙ ΑΥΛΟΥΣ (χωρίς αλλαγή φάσης)

Στους κοινούς τύπους εναλλακτών κελύφους-αυλών με ανακλαστήρες, το ρευστό που βρίσκεται στην πλευρά του κελύφους ρέει εγκάρσια των αυλών. Οι εξισώσεις για την πρόβλεψη των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας κάτω από τέτοιες συνθήκες δεν είναι ίδιες με αυτές για τη ροή των ρευστών μέσα σε σωλήνες και αυλούς. Μια προσεγγιστική τιμή των συντελεστών στην πλευρά του κελύφους σε έναν εναλλάκτη εγκάρσιας ροής με τμηματικούς ανακλαστήρες και λογικά διάκενα ανάμεσα στους ανακλαστήρες, ανάμεσα στους αυλούς και ανάμεσα στους ανακλαστήρες και στο κέλυφος μπορεί να προκύψει χρησιμοποιώντας την παρακάτω συσχέτιση:

$$\frac{h_o D_o}{k_f} = \frac{a_o}{F_s} \left( \frac{D_o G_s}{\mu_f} \right)^{0.6} \left( \frac{C_p \mu}{k} \right)_f^{1/3} \quad (5.22)$$

Όπου:

$a_o = 0.33$  αν οι αυλοί στη δέσμη των αυλών εναλλάσσονται και  $0.26$  αν οι αγωγοί βρίσκονται σε γραμμή

$F_s$ = συντελεστής ασφάλειας για να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα παράκαμψης (Ο αριθμός των παρακάμψεων στην πλευρά του κελύφους ανάμεσα στους ανακλαστήρες διατομής και στο κέλυφος, ανάμεσα στους αυλούς και στις τρύπες των αυλών στους ανακλαστήρες και ανάμεσα στους εξώτατους αγωγούς και στο κέλυφος εξαρτάται από τις κατασκευαστικές μεθόδους και τις αντοχές του εναλλάκτη. Ο αριθμός των παρακάμψεων μπορεί να ασκήσει μεγάλη επίδραση στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στην πλευρά του κελύφους. Η τιμή του  $F_s$  είναι συνήθως ανάμεσα  $1.0$  και  $1.8$  και συνήθως συνίσταται η τιμή του  $1.6$  )

$G_s$ = μαζική ταχύτητα εγκάρσια στους αυλούς, στην πλευρά του κελύφους, βασισμένη στην ελάχιστη ελεύθερη επιφάνεια ανάμεσα στους ανακλαστήρες στον άξονα του κελύφους,  $lb / (h)(ft^2)$

Ο δείκτης  $f$  δηλώνει ιδιότητες στην μέση θερμοκρασία υμένα.

Η εξ. (5.22) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσεγγιστικό υπολογισμό των συντελεστών υμένα για υδρογονάνθρακες, υδατικά διαλύματα, νερό και αέρια όταν ο αριθμός Reynolds έχει τιμή που ανήκει στην περιοχή λειτουργίας από  $2000$  έως  $32,000$ .

### 5.4.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ

Ο πίνακας 5.4 παρουσιάζει εξισώσεις υπολογισμού των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας υμένα για συμπύκνωση, βρασμό και φυσική κυκλοφορία. Στον πίνακα 5.5 παρουσιάζονται οι συνηθισμένες τιμές των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας σε διάφορες συνθήκες. Τέλος στον πίνακα 5.6 παρατίθενται οι τιμές σχεδιασμού για τους ολικούς συντελεστές μεταφοράς θερμότητας για πολλές από τις περιπτώσεις που αντιμετωπίζονται συνήθως από τους μηχανικούς σχεδιασμού.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4:** Εξισώσεις και μέθοδοι για τον υπολογισμό των συντελεστών υμένα στην μεταφορά θερμότητας για κοινές περιπτώσεις.

Τύπος μεταφοράς θερμότητας	Περιορισμοί
<p>Συμπύκνωση ατμών τύπου υμένα: Στο εξωτερικό οριζόντιων αυλών</p> $h = 0.725 \left( \frac{k_f^3 \rho_f^2 g \lambda_c}{N_V D_o \mu_f \Delta T_f} \right)^{1/4} = 0.95 \left( \frac{k_f^3 \rho_f^2 g L}{\omega \mu_f} \right)^{1/3}$ <p>Για υδρατμό, μέσο <math>h</math> σε πίεση 1 atm = <math>\frac{3100}{(N_V D_o)^{1/4} (\Delta T_f)^{1/3}}</math></p> <p>Κατακόρυφοι αυλοί</p> $h = 1.47 \left( \frac{\pi D_o k_f^3 \rho_f^2 g}{4 \omega \mu_f} \right)^{1/3}$ <p>Για υδρατμό, μέσο <math>h</math> σε πίεση 1 atm = <math>\frac{4000}{L^{1/4} (\Delta T_f)^{1/3}}</math></p>	<p>McAdams * Καθαροί κορεσμένοι ατμοί <math>\frac{2\omega}{L \mu_f} &lt; 2000</math> Οι φυσικές ιδιότητες αναφέρονται στο συμπύκνωμα McAdams * Καθαροί κορεσμένοι ατμοί <math>4\omega/\pi D_o \mu_f &lt; 2000</math> Οι φυσικές ιδιότητες αναφέρονται στο συμπύκνωμα</p>
<p>Ρευστά που βράζουν στο εξωτερικό οριζόντιων αυλών: Βρασμός υμένα (πάνω από το κρίσιμο <math>\Delta T_f</math>)</p> $h_{CO} = 0.62 \left[ \frac{k_u^3 - \rho_u (\rho_L - \rho_u) g \lambda_c}{D_o \mu_u \Delta T_f} \right]^{1/4}$ <p>Πυρηνογενής βρασμός (κάτω από το κρίσιμο <math>\Delta T_f</math>) Η τιμή του <math>h</math> εξαρτάται από το <math>\Delta T_f</math>, τον τύπο της επιφάνειας και τα υλικά που εμπλέκονται (το κρίσιμο <math>\Delta T_f</math> για το νερό ως πτώση της θερμοκρασίας από τη θερμοαντική επιφάνεια στο υγρό είναι περίπου 45°F).</p>	<p>Bromley ** Για κορεσμένα ρευστά σε βυθισμένες επιφάνειες, ο συντελεστής υμένα <math>h_{CO}</math> αναφέρεται σε αγωγή μέσω του ατμού, δεν περιλαμβάνει επίδραση ακτινοβολίας.</p>
<p>Φυσική κυκλοφορία Γενική εξίσωση</p> $\frac{h_c L}{k_f} = c_c [(N_{Gr})_f (N_{Pr})_f]^n$	<p>Perry *** Οι τιμές του <math>c_c</math> και του <math>n</math> εξαρτώνται από το <math>N_{Gr} \times N_{Pr}</math> και από τη γεωμετρία των επιφανειών.</p>
<p>Απλοποιημένες εξισώσεις για τον αέρα <math>h_c = K(\Delta T)^{0.25}</math></p>	<p>Kern **** Συνηθισμένη θερμοκρασία αέρα, ατμοσφαιρική πίεση, κανονικές συνθήκες. Για πιο ακριβείς εξισώσεις βλ. Perry***</p>
<p>Φυσική διάταξη του εξοπλισμού</p> <p>Οριζόντιοι δίσκοι στραμμένοι προς τα πάνω</p> <p>Οριζόντιοι δίσκοι στραμμένοι προς τα κάτω</p> <p>Κατακόρυφοι δίσκοι με ύψος πάνω από 2 ft</p> <p>Κατακόρυφοι δίσκοι με ύψος κάτω από 2 ft</p>	<p>K</p> <p>0.38</p> <p>0.20</p> <p>0.30</p> <p>0.28</p> <p><math>(\text{κατ. ύψος, ft})^{0.25}</math></p>

Κατακόρυφοι σωλήνες με ύψος πάνω από 1 ft	$\frac{0.22}{(D_o, ft)^{0.25}}$	
Οριζόντιοι σωλήνες	$\frac{0.27}{(D_o, ft)^{0.25}}$	
<p> <math>\lambda_c</math> = λανθάνουσα θερμότητας συμπύκνωσης, Btu/lb  <math>g</math> = τοπική επιτάχυνση της βαρύτητας, ft/(h) (h)  <math>N_V</math> = αριθμός σειρών των αυλών σε κατακόρυφη σειρά  <math>D_o</math> = εξωτερική διάμετρος του αυλού, ft  <math>\Delta t_f</math> = διαφορά θερμοκρασίας στον υμένα που δρα ως κινητήρια δύναμη, °F  <math>L</math> = θερμαινόμενο μήκος του ευθέως αγωγού ή μήκος της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας, ft  <math>w</math> = Ρυθμός μαζικής ροής συμπυκνώματος ανά αυλό από το χαμηλό σημείο της επιφάνειας συμπύκνωσης, lb/(h) (αυλός)  <math>(N_{Gr})_f</math> = αριθμός Grashof = <math>\frac{L^3 \rho_f^2 g \beta_f \Delta t_f}{\mu_f^2}</math>  <math>(N_{Pr})_f</math> = αριθμός Prandtl = <math>\left(\frac{c_p \mu}{k_f}\right) \mu_f</math>  <math>\beta</math> = συντελεστής της ογκομετρικής διαστολής, 1/° R  <math>c_p, K, n</math> = σταθερές  Ο δείκτης <math>f</math> δηλώνει "στη μέση θερμοκρασία υμένα"  Ο δείκτης <math>v</math> δηλώνει τον ατμό στη μέση θερμοκρασία ατμού  Ο δείκτης <math>L</math> δηλώνει το υγρό τη μέση θερμοκρασία υγρού </p>		

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5: Τάξη μεγέθους των μερικών συντελεστών υμένα.

Κατάσταση	$h, W/(m^2) \cdot K$
Συμπύκνωση υδρατμού σε σταγόνες	56,780-113,560
Συμπύκνωση τύπου υμένα του υδρατμού	5,678-17,034
Νερό που βράζει	1,703.4 - 51,102
Συμπύκνωση τύπου υμένα των οργανικών ατμών	1,135.6 - 2,271.2
Θέρμανση ή ψύξη του νερού	283.9 - 17,034
Θέρμανση ή ψύξη των οργανικών διαλυτών	170,34 - 2,839
Θέρμανση ή ψύξη των ελαίων	56.78 - 681.36
Υπέρθερμος ατμός	28.39 - 170.34
Θέρμανση ή ψύξη του αέρα	1.136 - 113.56
(Χαμηλή τιμή για ελεύθερη συναγωγή Υψηλή τιμή για εξαναγκασμένη συναγωγή)	

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6:** Οι παρακάτω τιμές των ολικών συντελεστών μεταφοράς θερμότητας βασίζονται κυρίως στα αποτελέσματα που λαμβάνονται στην κοινή πρακτική μηχανική. Οι τιμές είναι προσεγγιστικές επειδή κάποιιοι παράγοντες όπως η μεταβολή στις ταχύτητες των ρευστών, το ποσό των μη συμπυκνώσιμων αερίων, τα ιξώδη, η καθαρότητα των επιφανειών μεταφοράς θερμότητας, ο τύπος των ανακλαστών, η πίεση λειτουργίας κ.λ.π. μπορούν να ασκήσουν σημαντική επίδραση στους ολικούς συντελεστές μεταφοράς θερμότητας. Οι τιμές είναι χρήσιμες για προκαταρκτικούς υπολογισμούς σχεδιασμού ή για πρόχειρους ελέγχους σε υπολογισμούς μεταφοράς θερμότητας.

Θερμό ρευστό	Ψυχρό ρευστό	Συντε- λεστής επικαθή- σεων $h_d$	Ολικός συντε- λεστής $U_d$
<b>ψυκτικές</b>			
Νερό	Νερό	1000	250-500
Μεθανόλη	Νερό	1000	250-500
Αμμωνία	Νερό	1000	250-500
Υδατικά διαλύματα	Νερό	1000	250-500
Ελαφριά οργανικά - ιξώδη μικρότερα από 0.5 cP (βενζένιο, τολουένιο, ακετόνη, αιθανόλη, βενζίνη, ελαφριά κηροζίνη και νάφθα)	Νερό	300	75-150
Μέσα οργανικά - ιξώδη ανάμεσα στα 0.5 και υπόλειμα πετρελαίου 1.0 cP (κηροζίνη, φυσικό θερμό αέριο, θερμό απορροφητικό έλαιο, κάποιοι τύποι αργού πετρελαίου)	Νερό	300	50-125
Βαριά οργανικά - ιξώδη μεγαλύτερα από 1.0 cP (ψυχρό καύσιμο αέριο, λιπαντικά έλαια, υγρό καύσιμο, ανηγμένα αργά πετρέλαια, πίσσα και άσφαλτος)	Νερό	300	5-75
Αέρια	Νερό	300	2-50
Νερό	Άλμη	300	100-200
Ελαφριά οργανικά	Άλμη	300	40-100
<b>Θερμαντικές</b>			
Υδρατμός	Νερό	1000	200-700
Υδρατμός	Μεθανόλη	1000	200-700
Υδρατμός	Αμμωνία	1000	200-700
Υδρατμός	Υδατικά διαλύματα: Λιγότερο από 2.0 cP	1000	200-700
	Περισσότερο από 2.0 cP	1000	100-500
Υδρατμός	Ελαφριά οργανικά	300	100-200
Υδρατμός	Μέσα οργανικά	300	50-100
Υδρατμός	Βαριά οργανικά	300	6-60
Υδρατμός	Αέρια	300	5-50
Dowtherm	Αέρια	300	4-40
Dowtherm	Βαριά οργανικά	300	6-60
<b>Εναλλάκτες (χωρίς αλλαγή φάσης)</b>			
Νερό	Νερό	1000	250-500
Υδατικά διαλύματα	Υδατικά διαλύματα	1000	250-500
Ελαφριά οργανικά	Ελαφριά οργανικά	300	40-75
Μέσα οργανικά	Μέσα οργανικά	300	20-60
Βαριά οργανικά	Βαριά οργανικά	300	10-40
Βαριά οργανικά	Ελαφριά οργανικά	300	30-60
Ελαφριά οργανικά	Βαριά οργανικά	300	10-40

## 5.5 ΘΕΩΡΗΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Όταν ο μηχανικός σχεδιασμού επιλέγει τον εξοπλισμό μεταφοράς θερμότητας χρειάζεται να μελετήσει τις βασικές μεταβλητές σχεδιασμού διεργασίας καθώς και πολλούς άλλους παράγοντες όπως τις τάσεις λόγω θερμοκρασίας, το πάχος των αυλών και του κελύφους, τον τύπο των ανακλαστήρων, το βήμα των αυλών και τα πρότυπα μήκη των αυλών. Κάτω από συνηθισμένες συνθήκες, ο μηχανολογικός σχεδιασμός ενός εναλλάκτη θα πρέπει να πληρεί να απαιτήσεις που έχουν τεθεί από το ASME ή τους Κώδικες Ασφαλείας API-ASME. Η Tubular Exchanger Manufacturers Association (TEMA) δημοσιεύει πρότυπα για γενικές μεθόδους σχεδιασμού και κατασκευαστικά υλικά για αυλοειδείς εναλλάκτες θερμότητας.

### 5.5.1 ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΑΙ ΒΗΜΑ ΑΥΛΩΝ

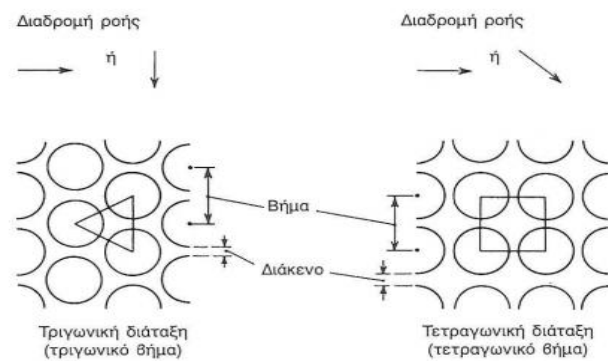
Το πρότυπο μήκος των αυλών σε έναν εναλλάκτη θερμότητας κελύφους-αυλών είναι 8, 12 ή 16 ft. Αυτά τα πρότυπα μήκη αυλών είναι διαθέσιμα σε μια ποικιλία διαφορετικών διαμέτρων και διαφορετικού πάχους τοιχώματος. Οι εναλλάκτες με αυλούς μικρής διαμέτρου έχουν μικρότερο κόστος ανά τετραγωνικό πόδι εμβαδού της επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας από τους εναλλάκτες με αυλούς μεγάλης διαμέτρου, επειδή μια συγκεκριμένη επιφάνεια μπορεί να τοποθετηθεί μέσα σε ένα κέλυφος μικρότερης διαμέτρου, Όμως, οι αυλοί μικρής διαμέτρου καθαρίζονται πιο δύσκολα. Ένας αυλός με εξωτερική διάμετρο 3/4 ή 1 in είναι ο πιο συνηθισμένος. Ωστόσο σε πολλές βιομηχανικές εγκαταστάσεις απαντώνται εξωτερικές διαμέτροι που κυμαίνονται από 5/8 έως 1,5 in.

Το πάχος του τοιχώματος του αυλού προσδιορίζεται συνήθως με τη συσκευή Birmingham και οι διακυμάνσεις από το ονομαστικό πάχος μπορεί να είναι  $\pm 10\%$  για αυλούς “μέσου τοιχώματος” και  $+22\%$  για αυλούς “ελάχιστου τοιχώματος”. Όταν καθορίζεται το πάχος πρέπει να ληφθούν υπόψη η πίεση, η θερμοκρασία, η διάβρωση και τα περιθώρια για διαστολή των μεμονωμένων αυλών.

Το βήμα των αυλών είναι η μικρότερη απόσταση ανάμεσα στα κέντρα γειτονικών αυλών, ενώ η μικρότερη απόσταση ανάμεσα σε δύο αυλούς είναι το διάκενο. Στους περισσότερους εναλλάκτες κελύφους - αυλών το βήμα είναι 1.25 έως 1.50 φορές μεγαλύτερο από τη διάμετρο του αυλού. Το διάκενο δεν πρέπει να είναι μικρότερο από το ένα τέταρτο της διαμέτρου του αυλού. Συνήθως το ελάχιστο διάκενο είναι 3/16 in.



Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.6 οι αυλοί σχεδιάζονται συνήθως με τετραγωνική ή τριγωνική διάταξη. Παρόλο που η τετραγωνική διάταξη (τετραγωνικό βήμα) έχει το πλεονέκτημα του εύκολου εξωτερικού καθαρισμού, κάποιες φορές προτιμάται η τριγωνική διάταξη, γιατί επιτρέπει τη χρήση περισσότερων αυλών σε μια συγκεκριμένη διάμετρο κελύφους. Ο Πίνακας 5.7 υποδεικνύει τον αριθμό των αυλών οι οποίοι μπορούν να τοποθετηθούν σε έναν εναλλάκτη με συμβατά μεγέθη και βήματα αυλών.



ΣΧΗΜΑ 5.6: Τυπικές διατάξεις αυλών.

Εσωτερική διάμετρος κελύφους, in.	Μια διαδρομή		Δύο διαδρομές		Τέσσερις διαδρομές	
	Τετραγωνικό βήμα	Τριγωνικό βήμα	Τετραγωνικό βήμα	Τριγωνικό βήμα	Τετραγωνικό βήμα	Τριγωνικό βήμα
Αυλοί με εξωτερική διάμετρο 3/4 in. και βήμα 1 in.						
8	32	37	26	30	20	24
12	81	92	76	82	68	76
15 1/4	137	151	124	138	116	122
21 1/4	277	316	270	302	246	278
25	413	470	394	452	370	422
31	657	745	640	728	600	678
37	934	1074	914	1044	886	1012
Αυλοί με εξωτερική διάμετρο 1 in. και βήμα (1 1/4) in.						
8	21	21	16	16	14	16
12	48	55	45	52	40	48
15 1/4	81	91	76	86	68	80
21 1/4	177	199	166	188	158	170
25	260	294	252	282	238	256
31	406	472	398	454	380	430
37	596	674	574	664	562	632

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7: Αριθμός των αυλών σε τυπικές διατάξεις.

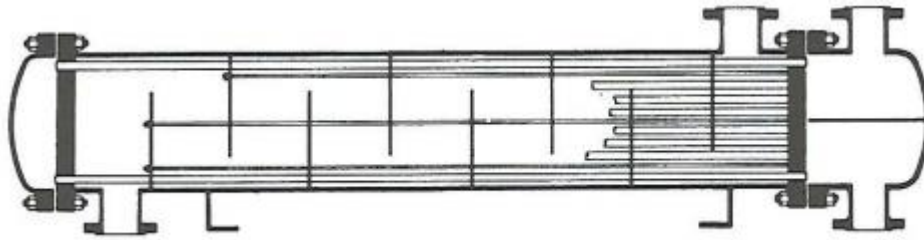
### 5.5.2 ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Για διαμέτρους κελύφους έως 24 in. το κέλυφος μπορεί να περιέχει αυλούς με ονομαστικά μεγέθη. Συνήθως δίνονται οι εσωτερικές διάμετροι και πρέπει επίσης να ορίζεται ο αριθμός Schedule ή το πάχος του τοιχώματος. Γενικά, για διαμέτρους κελύφους ανάμεσα σε 12 και 24 in. χρησιμοποιείται ένα πάχος κελύφους 3/8 in. εκτός αν τα ρευστά είναι ιδιαίτερα διαβρωτικά ή η πίεση λειτουργίας στην πλευρά του κελύφους υπερβαίνει τα 300 psig.

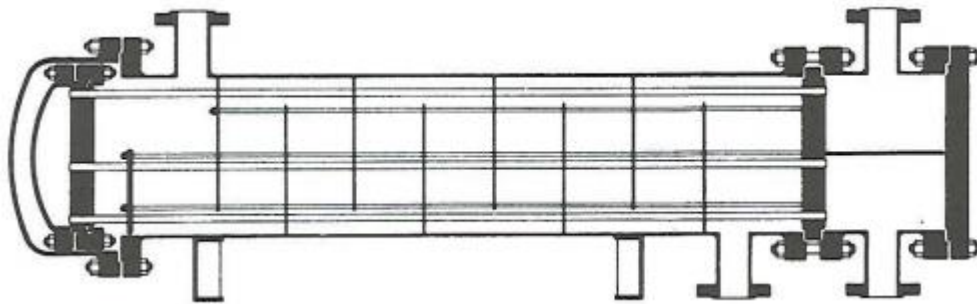
### 5.5.3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ

Η θερμική διαστολή μπορεί να συμβεί κατά τη θέρμανση διάφορων υλικών, όπως τα μεταλλικά στοιχεία ενός εναλλάκτη θερμότητας. Για παράδειγμα, σε έναν εναλλάκτη κελύφους - αυλών η θερμική διαστολή μπορεί να προκαλέσει επιμήκυνση της δέσμης των αυλών και του κελύφους καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία της μονάδας. Επειδή η δέσμη των αυλών και το κέλυφος μπορεί να διασταλούν κατά διαφορετικό βαθμό, χρειάζεται να γίνουν κάποιες ρυθμίσεις για να μειωθούν οι θερμικές καταπονήσεις. Το Σχήμα 5.7 παρουσιάζει έναν εναλλάκτη κελύφους-αυλών με σταθερούς καθρέπτες, όπου δεν υπάρχει περιθώριο για διαστολή, ενώ τα Σχήματα 5.8 και 5.9 παρουσιάζουν δύο συμβατικούς τύπους εναλλακτών με μια πλωτή κεφαλή ή μια ολισθαίνουσα σύνδεση για να απορροφηθούν οι τάσεις που προκαλούνται από τη θερμική διαστολή. Οι θερμοκρασιακές τάσεις που οφείλονται στη διαστολή του αυλού μπορούν επίσης να αποφευχθούν χρησιμοποιώντας αυλούς με σχήμα U. Κάποιοι εναλλάκτες έχουν έναν βρόχο ασκού - τύπου υ ή ένα δακτύλιο στο κέλυφος για να αντιμετωπίσουν θερμική επιμήκυνση στο κέλυφος.

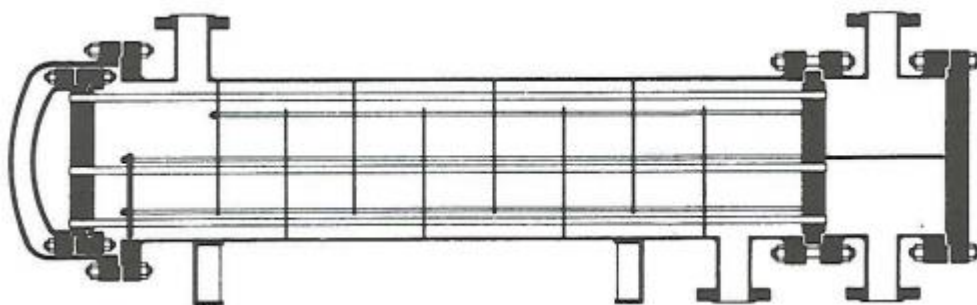
Η χρησιμοποίηση εναλλάκτη σταθερής κεφαλής θα πρέπει να περιοριστεί στους εναλλάκτες με κοντούς αυλούς ή σε περιπτώσεις όπου η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο κέλυφος και στους αυλούς είναι μικρότερη από 50°F. Γενικά για τις περισσότερες διεργασίες συνιστώνται οι εναλλάκτες πλωτής κεφαλής με δέσμες που μπορούν να μετακινηθούν.



ΣΧΗΜΑ 5.7: Εναλλάκτης θερμότητας με σταθερούς καθρέπτες, δύο διαδρομές αυλών και μια διαδρομή κελύφους.



ΣΧΗΜΑ 5.8: Εναλλάκτης θερμότητας με εσωτερική πλωτή κεφαλή, δύο διαδρομές αυλών και μια διαδρομή κελύφους.



ΣΧΗΜΑ 5.9: Εναλλάκτης θερμότητας με εξωτερική πλωτή κεφαλή, δύο διαδρομές αυλών και μια διαδρομή κελύφους.

#### 5.5.4 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ

Οι εναλλάκτες θερμότητας χρειάζονται περιοδικό καθαρισμό, αντικατάσταση των αυλών ή άλλες εργασίες συντήρησης. Το εσωτερικό των ευθέων αυλών μπορεί να καθαριστεί εύκολα περνώντας μια βούρτσα από σύρμα ή με μορφή σπείρας μέσα από τους αυλούς. Ο καθαρισμός του εξωτερικού των αγωγών απαιτεί συνήθως τη μετακίνηση όλης της δέσμης των αυλών από τον εναλλάκτη. Κατά συνέπεια, πολλοί εναλλάκτες διατίθενται με δέσμες αυλών οι οποίες μπορούν να μετακινηθούν και το βήμα και η διάταξη των αυλών υπαγορεύονται συνήθως από τη συχνότητα και το είδος του καθαρισμού που απαιτείται.

#### 5.5.5 ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΕΣ

Η παρουσία ανακλαστήρων στην πλευρά του κελύφους ενός εναλλάκτη κελύφους - αυλών αυξάνει την πτώση πίεσης στην πλευρά του κελύφους, παράλληλα όμως προκαλεί καλύτερη ανάμιξη του ρευστού και αυξημένη τύρβη γεγονός που εξισορροπεί το μειονέκτημα της πτώσης της πίεσης. Η απόσταση ανάμεσα στους ανακλαστήρες είναι γνωστή ως διάκενο των ανακλαστήρων. Γενικά, το διάκενο των ανακλαστήρων δεν είναι μεγαλύτερο από τη διάμετρο του κελύφους ούτε μικρότερο από το ένα πέμπτο της διαμέτρου του κελύφους.

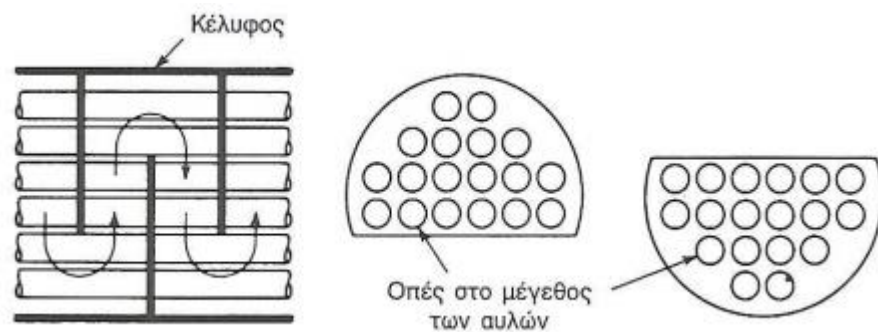
Ο πιο κοινός τύπος ανακλαστήρα που χρησιμοποιείται σε εναλλάκτες θερμότητας είναι ο τμηματικός ανακλαστήρας, που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.10. Πολλοί τμηματικοί ανακλαστήρες έχουν ύψος το οποίο είναι ίσο με το 75% της εσωτερικής διαμέτρου του κελύφους. Η διάταξη αυτή είναι γνωστή ως κοπή 25% τμηματικών ανακλαστήρων. Άλλοι τύποι ανακλαστήρων είναι οι ανακλαστήρες δίσκων-δακτυλίων και οι ανακλαστήρες στομίου, που παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.11 και 5.12. Επίσης, σε κάποιους εναλλάκτες υπάρχουν διαμήκεις ανακλαστήρες σταθερού τύπου (δηλαδή συγκολλημένοι στο κέλυφος) ή ανακλαστήρες που μετακινούνται.

Οι τμηματικοί ανακλαστήρες και οι ανακλαστήρες δίσκων-δακτυλίων έχουν οπές περάσματος αυλών με μέγεθος κοντά στο μέγεθος της διαμέτρου των αυλών. Με αυτούς τους δύο τύπους ανακλαστήρων, το διάκενο ανάμεσα στους αυλούς και στο άκρο των οπών μπορεί να κυμαίνεται από το 1% έως το 3% της διαμέτρου του αυλού. Κατά συνέπεια, ένα μέρος του ρευστού περνάει μέσα από τα διάκενα, αλλά το μεγαλύτερο μέρος ρέει ανάμεσα στους ανακλαστήρες σε κατεύθυνση κάθετη στους αυλούς.

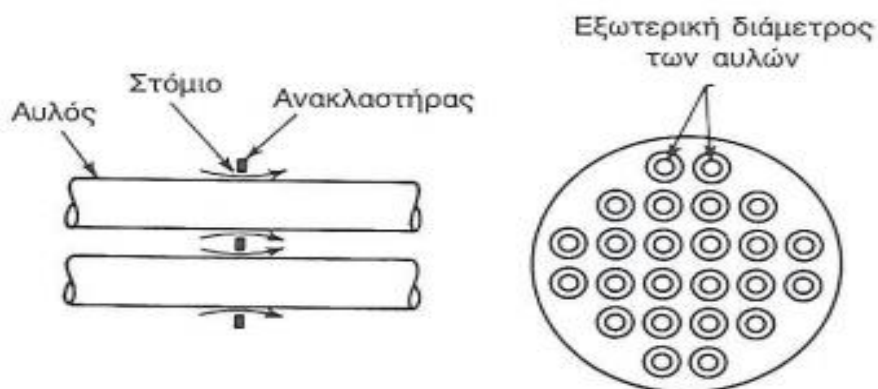
Οι ανακλαστήρες στομίου πρέπει να βρίσκονται σε λογική απόσταση ο ένας από τον άλλο, ώστε να προκαλούν συχνές αυξήσεις στην ταχύτητα του

ρευστού διαμέσω των ανοιγμάτων των στομιών ανάμεσα στους αυλούς και στους ανακλαστήρες. Αυτός ο τύπος ανακλαστήρα δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για ρευστά τα οποία έχουν υψηλά χαρακτηριστικά επικαθήσεων (υψηλή τάση επικαθήσεων).

Για να κρατηθούν στη θέση τους οι ανακλαστήρες χρησιμοποιούνται ευθείες συνδετικές ράβδοι. Συνήθως χρειάζονται τέσσερις έως έξι ράβδοι με διάμετρο από 1/8 έως 1/2 in. Αυτές τοποθετούνται στο σταθερό καθρέπτη των αυλών, ενώ γύρω από τις συνδετικές ράβδους τοποθετούνται περιβλήματα σωλήνων μικρού μήκους, ώστε να δημιουργήσουν πατούρες ανάμεσα στους γειτονικούς ανακλαστήρες. Το πάχος των ανακλαστήρων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσιο του πάχους του τοιχώματος του αυλού και συνήθως κυμαίνεται από 1/8 έως 1/4 in. Οι καθρέπτες πρέπει να έχουν πάχος τουλάχιστον τόσο όσο η εξωτερική διάμετρος των αυλών. Σε βιομηχανικούς εναλλάκτες, τα 7/8 in. θεωρούνται συνήθως ως το ελάχιστο πάχος για τους καθρέπτες.



ΣΧΗΜΑ 5.10: Ανακλαστήρες δίσκων-δακτυλίων.



ΣΧΗΜΑ 5.11: Ανακλαστήρες στομίου.

### 5.5.6 ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΘΕΣΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

Οι βασικοί παράγοντες που σχετίζονται με τον καθορισμό της καλύτερης θέσης των ρευστών σε έναν εναλλάκτη θερμότητας είναι τα χαρακτηριστικά επικαθήσεων και διάβρωσης των ρευστών, η πτώση πίεσης, το κόστος των υλικών και τα γενικά φυσικά χαρακτηριστικά των ρευστών και του εναλλάκτη. Όταν κάποιο από τα ρευστά είναι ισχυρά διαβρωτικό, θα πρέπει να ρέει μέσα στους αυλούς, ώστε να μη χρειαστεί να χρησιμοποιηθούν αντιδιαβρωτικά υλικά κατασκευής στην πλευρά του κελύφους τα οποία κοστίζουν αρκετά. Επειδή ο καθαρισμός στο εσωτερικό των αυλών είναι πιο εύκολος από τον εξωτερικό καθαρισμό, θα πρέπει πάντοτε να τοποθετείται μέσα στους αυλούς το ρευστό με την μεγαλύτερη τάση δημιουργίας επικαθήσεων. Αν οι άλλοι παράγοντες είναι ισοδύναμοι και ένα ρευστό βρίσκεται κάτω από υψηλή πίεση, μπορεί να αποφευχθεί το κόστος της κατασκευής ενός κελύφους υψηλής πίεσης αν το ρευστό υψηλής πίεσης περάσει μέσα από τους αυλούς.

Οι ταχύτητες των ρευστών που περνάνε από την πλευρά του κελύφους και από την πλευρά των αυλών ενός εναλλάκτη μπορούν να ασκήσουν μεγάλη επίδραση στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και στην πτώση της πίεσης. Σε υψηλές ταχύτητες, τα πλεονεκτήματα μεγάλων συντελεστών υμένα μπορούν να αντισταθμιστούν από το μειονέκτημα της υψηλής πτώσης πίεσης. Αν κάποιο από τα ρευστά είναι αρκετά πιο ιξώδες από κάποιο άλλο, η πτώση της πίεσης στους αυλούς μπορεί να είναι μεγάλη όταν το ιξώδες ρευστό περνάει διαμέσω των αυλών στην ταχύτητα που απαιτείται για να επιτευχθούν ικανοποιητικοί ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας. Επομένως, οι επιδράσεις της ταχύτητας και του ιξώδους του ρευστού πρέπει να μελετηθούν προσεκτικά πριν αποφασιστεί ποια είναι η καλύτερη διαδρομή των ρευστών.

### 5.5.7 ΑΝΕΝΕΡΓΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Κατά τη θέρμανση ενός ρευστού μπορεί να εκλύονται μη συμπτυκνώσιμα αέρια, όπως ο απορροφημένος αέρας. Αν αυτά τα αέρια δεν απομακρυνθούν, μπορούν να συσσωρευτούν στον εναλλάκτη και να σχηματίσουν μια ενεργή κάλυψη γύρω από κάποιο μέρος της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας. Επομένως, πρέπει να γίνει ακριβής πρόβλεψη για τον εξαερισμό μη συμπτυκνώσιμων. Η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας μπορεί επίσης να καταστεί ανενεργή λόγω της συσσώρευσης του συμπτυκνώματος, όταν στο σύστημα υπάρχουν ατμοί που συμπτυκνώνονται. Κατά συνέπεια, πολλές φορές

χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν κάποια εξαρτήματα όπως τα αποστραγγιστικά, οι ατμοπαγίδες με παρακάμψεις και οι γυάλινες θυρίδες παρατήρησης του επιπέδου του συμπυκνώματος. Όταν χρησιμοποιούνται υψηλές πιέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προστασία ανακουφιστικές βαλβίδες ή δίσκοι θραύσης. Στρώμα ατμού μπορεί να σχηματισθεί σε λέβητες, αν ξεπεραστεί η κρίσιμη διαφορά θερμοκρασίας (που αποτελεί την κινητήρια δύναμη) και ο μηχανικός σχεδιασμού πρέπει να λάβει υπόψη του αυτόν τον παράγοντα. Η ανεπαρκής χρησιμοποίηση ανακλαστών στην πλευρά του κελύφους ενός εναλλάκτη μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη φτωχή κατανομή του ρευστού που ρέει στην πλευρά του κελύφους και κατά συνέπεια την αναποτελεσματική χρήση της διαθέσιμης επιφάνειας.

### 5.5.8 ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟΥΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Εξαιτίας της αφθονίας του και της μεγάλης ειδικής Οερμότητάς του το νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως ως μέσο ανταλλαγής θερμότητας. Σε υψηλές θερμοκρασίες το νερό διαβρώνει το χάλυβα σε σημαντικό βαθμό, ιδιαίτερα αν το νερό περιέχει διαλυμένο οξυγόνο. Επομένως, τα μη σιδηρούχα μέταλλα χρησιμοποιούνται συχνά σε εναλλάκτες θερμότητας, όταν ένα από τα ρευστά είναι το νερό. Για να μειωθεί το κόστος, το νερό μπορεί να περνάει μέσα στους αυλούς (που είναι πιο ακριβοί) και το κέλυφος μπορεί να κατασκευαστεί από χάλυβα. Όταν το νερό έρχεται σε επαφή με το χάλυβα, στο μηχανολογικό σχεδιασμό πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα μεγάλο περιθώριο για τη διάβρωση.

Τα υγρά μείγματα τα οποία περιέχουν στερεά τείνουν να δημιουργήσουν αποθέσεις στους εναλλάκτες θερμότητας, επειδή τα στερεά μπορούν να κατακαθήσουν και να δημιουργήσουν ένα στρώμα στα θερμά τοιχώματα. Αυτή η δυσκολία μπορεί να αντιμετωπιστεί περνώντας το ρευστό διαμέσω του εναλλάκτη με τέτοια ταχύτητα, ώστε τα στερεά να διατηρηθούν σε αιώρηση. Συνήθως όταν το ρευστό που χρησιμοποιείται είναι το νερό, η ταχύτητα διατηρείται στα 3fps τουλάχιστον. Αυτή η ελάχιστη ταχύτητα είναι ιδιαίτερα σημαντική, αν είναι γνωστό ότι το νερό περιέχει αιωρούμενα στερεά. Επειδή είναι πολύ δύσκολο να εξαλειφθούν οι θύλακες χαμηλής ταχύτητας στην πλευρά του κελύφους ενός εναλλάκτη, το νερό που περιέχει αιωρούμενα στερεά πρέπει να περάσει μέσα από τους αυλούς του εναλλάκτη.

Τα αιωρούμενα στερεά πρέπει να απομακρύνονται όσο το δυνατόν περισσότερο από το νερό πριν αυτό εισαχθεί σε έναν εναλλάκτη θερμότητας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση δεξαμενών κατακάθισης ή φίλτρων. Τα

κόσκινα χρησιμοποιούνται συνήθως σε γραμμές νερού για να απομακρύνουν στερεά όπως χαλίκια, μικρά κομμάτια ξύλου, ή κομμάτια άλγης, αλλά δεν μπορούν να απομακρύνουν τα λεπτά διαμερισμένα στερεά.

Μια άλλη δυσκολία που παρουσιάζεται όταν χρησιμοποιείται νερό ως μέσο μεταφοράς θερμότητας είναι η δημιουργία ορυκτών επικαθήσεων. Σε θερμοκρασίες υψηλότερες από 120°F τείνει να γίνει υπερβολικά ανησυχητικό το φαινόμενο του σχηματισμού επικαθήσεων από νερό μέτριας περιεκτικότητας σε ορυκτά και αέρα. Κατά συνέπεια, θα πρέπει να αποφευχθεί μια θερμοκρασία, εξόδου του νερού πάνω από 120°F Σε πολλές περιπτώσεις συνιστάται να αποσκληρύνεται το νερό με χημική επεξεργασία πριν χρησιμοποιηθεί μέσα σε έναν εναλλάκτη θερμότητας. Το καυτό νερό που απομακρύνεται από έναν εναλλάκτη θερμότητας μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί με τη βοήθεια ενός πύργου ψύξης για να μειωθεί η θερμοκρασία του. Αυτό μειώνει το κόστος αποσκλήρυνσης του νερού καθώς και την ποσότητα του νερού που πρέπει να αγορασθεί.

### 5.5.9 ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΑΤΜΟΥ ΣΕ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ο υδρατμός έχει μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης ανά μονάδα βάρους, και επομένως, είναι ένα πολύ αποτελεσματικό μέσο θέρμανσης. Ο υδρατμός είναι συχνά διαθέσιμος ως παραπροϊόν των μονάδων παραγωγής ισχύος. Επειδή ο υδρατμός αυτός συνήθως έχει θερμοκρασία, κορεσμού από 215 έως 230 °F μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για θέρμανση στην περιοχή θερμοκρασίας κάτω από 200 °F περίπου. Αν ένα υλικό πρέπει να θερμανθεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί υδρατμός διεργασίας. Σε πίεση 200 psig η θερμοκρασία συμπύκνωσης του υδρατμού είναι 382°F. Κατά συνέπεια, όταν απαιτούνται θερμοκρασίες πολύ υψηλότερες από 300°F, η απαιτούμενη υψηλή πίεση του υδρατμού μπορεί να γίνει αιτία να μη χρησιμοποιηθεί ο υδρατμός ως μέσο θέρμανσης. Κάτω από αυτές τις συνθήκες μπορεί να επιλεγεί κάποιο άλλο μέσο θέρμανσης το οποίο δεν απαιτεί υψηλές πιέσεις.

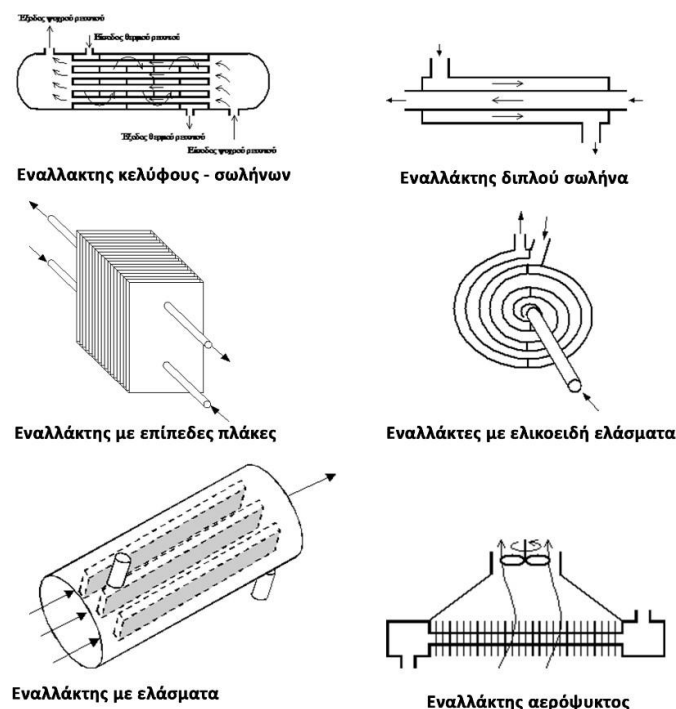
Οι συντελεστές υμένα της μεταφοράς θερμότητας για καθαρό υδρατμό που συμπυκνώνεται κυμαίνονται συνήθως από 1000 έως 3000 Btu/(h)(ft<sup>2</sup>)(°F), Επομένως, ο υμένας συμπυκνούμενου υδρατμού σπάνια αποτελεί την ελέγχουσα αντίσταση σε έναν εναλλάκτη θερμότητας. Για το σχεδιάσμά συνήθως αρκούν οι προσεγγιστικές τιμές των συντελεστών υμένα του



υδρατμού. Αν ο υδρατμός υπερθερμανθεί, συνήθως αγνοείται η υπερθέρμανση και θεωρείται ότι όλη η θερμότητα παρέχεται στη θερμοκρασία συμπύκνωσης που αντιστοιχεί στην πίεση του υδρατμού. Αντίστοιχα, η υπόψυξη του συμπυκνώματος και η πτώση πίεσης που οφείλεται στην τριβή στην πλευρά του υδρατμού του εναλλάκτη συνήθως αγνοούνται. Κάτω από αυτές τις συνθήκες της υποθετικής ισόθερμης συμπύκνωσης η πραγματική διαφορά θερμοκρασίας (που δρα σαν κινητήρια δύναμη) είναι ίση με τη μέσηλογαριθμική τιμή.

## 5.6 ΚΟΣΤΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΟΥΣ

Σύμφωνα με τους Κροκίδα Μ., Μαρίνος - Κουρής Δ., Μαρούλης Ζ.Β.(2003), στις βιομηχανίες διεργασιών η μεταφορά θερμότητας μεταξύ δύο ρευστών γίνεται, γενικά, στους εναλλάκτες θερμότητας. Ο πιο συνηθισμένος τύπος είναι εκείνος στον οποίο το θερμό και το ψυχρό ρευστό δεν έρχονται σε άμεση επαφή μεταξύ τους, αλλά διαχωρίζονται από το τοίχωμα ενός σωλήνα ή από μια επίπεδη ή κυρτή επιφάνεια. Σε άμεση επαφή μεταξύ τους έρχονται μόνο στην περίπτωση ρευμάτων της ίδιας σύστασης (π.χ. η συμπύκνωση ατμού με καταιονισμό ψυχρού νερού) ή σε ειδικές διεργασίες όπως η θέρμανση αποσταζόμενου διαλύματος με ζωντανό ατμό. Η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται από το θερμό ρευστό στην επιφάνεια ή το τοίχωμα του σωλήνα με συναγωγή, δια μέσω του τοιχώματος του σωλήνα ή της πλάκας με αγωγή και στη συνέχεια προς το ψυχρό ρευστό με συναγωγή. Οι περισσότερο χρησιμοποιούμενοι τύποι εναλλακτών παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.12 και στον Πίνακα 5.8 περιγράφονται οι περιοχές λειτουργίας τους.



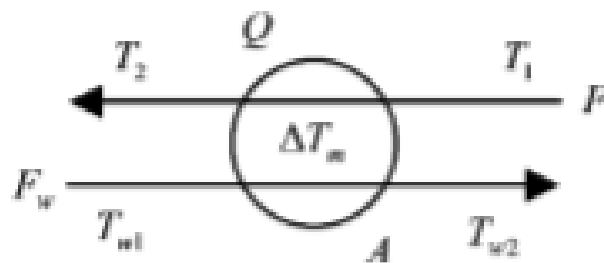
ΣΧΗΜΑ 5.12: Είδη εναλλακτών

Τύπος Εναλλάκτη	Πίεση λειτουργίας Max (MPa)	Θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας (°C)	Επιφάνεια εναλλαγής (m <sup>2</sup> )
Κελύφους κ' σωλήνων	30 >30 (κέλυφος)	-200 - 600	10-1000
Διπλού σωλήνα	>140 (σωλήνας)	-100 - 600	0.25-200
Με επίπεδες πλάκες	1.6	-25 - 175	1-1200
Με ελικοειδή ελάσματα	2	25 - 400	<200
Με ελάσματα	2	<500	1-1000
Συγκολλημένων πλακών	3	>400	>1000
Περιστρεφόμενοι ανακομιστές	ατμοσφαιρική	<980	
Αερόψυκτος εναλλάκτης	2	<1000	5-200

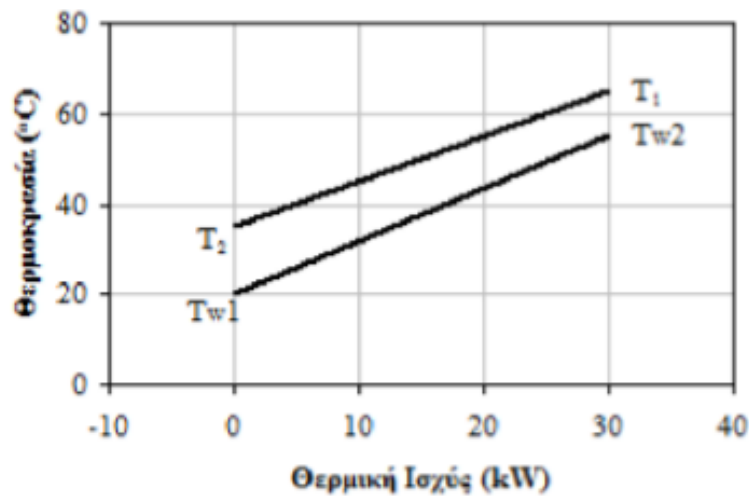
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.8: Βασικά χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων εναλλακτών.

### 5.6.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΨΥΚΤΗΡΑ (απλοποιημένος σχεδιασμός)

Το διάγραμμα ροής ενός ψυκτήρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.13. Το ρεύμα της διεργασίας εισέρχεται στον εναλλάκτη με παροχή  $F$  και θερμοκρασία  $T_1$  και εξέρχεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία  $T_2$ . Για την ψύξη χρησιμοποιείται νερό ψύξης με παροχή  $F_w$  αρχικής θερμοκρασίας  $T_{w1}$  και τελικής  $T_{w2}$ . Για την εναλλαγή θερμότητας συνολικής θερμικής ισχύος  $Q$  απαιτείται επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας  $A$ . Το δυναμικό θερμορροής είναι  $\Delta T_m$ . Το αντίστοιχο διάγραμμα θερμικής ισχύος - θερμοκρασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.14. Η θερμική ισχύς ισοδυναμεί με την ροή θερμότητας για την περίπτωση των εναλλακτών και στα δύο ρευστά δεν συμβαίνει αλλαγή φάσης.



ΣΧΗΜΑ 5.13: Διάγραμμα ροής.



ΣΧΗΜΑ 5.14: Διάγραμμα θερμικής ισχύος-θερμοκρασίας ψυκτήρα

Ένα απλοποιημένο μαθηματικό πρότυπο της διεργασίας παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.9. Η Εξίσωση 5.23 είναι το ισοζύγιο ενέργειας για το ρεύμα της διεργασίας και ουσιαστικά ορίζει τη θερμική ισχύ του ψυκτήρα. Η Εξίσωση 5.24 αποτελεί το ισοζύγιο ενέργειας για τη βοηθητική παροχή (νερό ψύξης). Η Εξίσωση 5.25 ορίζει το δυναμικό θερμορροής, για το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει επιλεγεί η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά (LMTD). Η LMTD αποτελεί καλή έκφραση του δυναμικού θερμορροής για την περίπτωση των εναλλακτών απλής αντιρροής ή ομορροής. Στις περιπτώσεις εγκάρσιας ροής, ή συνδυασμού των παραπάνω (π.χ. εναλλάκτης κελύφους και σωλήνων πολλαπλών περασμάτων στους σωλήνες και στο κέλυφος) απαιτείται διόρθωση του δυναμικού ανάλογα με τη γεωμετρία. Η Εξίσωση 5.26 περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ των δύο ρευμάτων, χρησιμοποιώντας τη φαινομενολογική εξίσωση ορισμού του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.9: Εξισώσεις ψυκτηρα

$Q = FC_p(T_1 - T_2)$	(5.23)
$Q = F_w C_{PW}(T_{W2} - T_{W1})$	(5.24)
$\Delta T_m = \frac{(T_2 - T_{w1}) - (T_1 - T_{w2})}{\ln[(T_2 - T_{w1}) - (T_1 - T_{w2})]}$	(5.25)
$Q = AU\Delta T_m$	(5.26)

Η χρήση σταθερού συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας αποτελεί τη βασική παραδοχή για τη διατύπωση του απλοποιημένου μαθηματικού προτύπου. Οι μεταβλητές του μαθηματικού προτύπου συνοψίζονται στον Πίνακα 5.10, ενώ τα απαιτούμενα τεχνικά δεδομένα για την επίλυση του μαθηματικού προτύπου συνοψίζονται στον Πίνακα 5.11. Στον Πίνακα 5.12 περιγράφεται ένα τυπικό πρόβλημα σχεδιασμού ψυκτήρα. Οι απαιτούμενες μεταβλητές του ρεύματος της διεργασίας είναι γνωστές ( $F$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ), ενώ για το νερό ψύξης είναι γνωστή μόνο η θερμοκρασία διάθεσής του ( $T_{w1}$ )

$F$	Παροχή ρεύματος διεργασίας (kg/s)
$F_w$	Παροχή νερού ψύξης (kg/s)
$T_1$	Θερμοκρασία ρεύματος της διεργασίας στην είσοδο (°C)
$T_2$	Θερμοκρασία ρεύματος της διεργασίας στην έξοδο (°C)
$T_{w1}$	Θερμοκρασία νερού ψύξης στην είσοδο (°C)
$T_{w2}$	Θερμοκρασία νερού ψύξης στην έξοδο (°C)
$\Delta T_m$	Μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά. δυναμικό θερμοροής (°C)
$Q$	Θερμική ισχύς ψυκτήρα (kW)
$A$	Επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας (m <sup>2</sup> )

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.10:Μεταβλητές ψυκτήρα

$U$	Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (kW/m <sup>2</sup> C)
$C_p$	Ειδική θερμότητα ρεύματος διεργασίας (kJ/kg C)
$C_{pw}$	Ειδική θερμότητα νερού ψύξης (kJ/kg C)

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.11:Τεχνικά δεδομένα ψυκτήρα

$F$	Παροχή ρεύματος διεργασίας (kg/s)
$T_1$	Θερμοκρασία ρεύματος της διεργασίας στην είσοδο (°C)
$T_2$	Θερμοκρασία ρεύματος της διεργασίας στην έξοδο (°C)
$T_{w1}$	Θερμοκρασία νερού ψύξης στην είσοδο (°C)

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.12: Προδιαγραφές σχεδιασμού ψυκτήρα

Η ανάλυση των βαθμών ελευθερίας της διεργασίας παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.13. Οι ελεύθερες μεταβλητές χαρακτηρίζουν τη συγκεκριμένη διεργασία (Ψυκτήρας, Σχήμα 5.13), ενώ οι μεταβλητές σχεδιασμού το συγκεκριμένο πρόβλημα σχεδιασμού (Πίνακας 5.12).

Μεταβλητές	9
Εξισώσεις	4
Ελεύθερες Μεταβλητές	5
Ελεύθερες Μεταβλητές	5
Προδιαγραφές Σχεδιασμού	4
Μεταβλητές Σχεδιασμού	1

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.13: Ανάλυση βαθμών ελευθερίας ψυκτήρα.

Ένας αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.14. Η θερμοκρασία απόρριψης του νερού ψύξης ( $T_{w2}$ ) είναι η βασική μεταβλητή σχεδιασμού. Εμπειρικά προσδιορίζεται δεχόμενοι μια ελάχιστη θερμοκρασιακή προσέγγιση στα άκρα του εναλλάκτη, και λαμβάνοντας υπ' όψη τους τυχόν περιορισμούς ως προς την επιστροφή του νερού ψύξης στον πύργο ψύξης (συνήθως 40-45 °C ).

Μεταβλητές Δεδομένα	4		$F, T_1, T_2, T_{w1}$
Μεταβλητές Σχεδιασμού	1		$T_{w2}$
Μεταβλητές Επίλυσης	4		$Q, F_w, \Delta T_m, A$
Αλγόριθμος	(5.23)	→	$Q$
	(5.24)	→	$F_w$
	(5.25)	→	$\Delta T_m$
	(5.26)	→	$A$

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.14: Αλγόριθμος επίλυσης ψυκτήρα

Ο αλγόριθμος επίλυσης υπολογίζει τη θερμική ισχύ από την Εξίσωση 5.23, το απαιτούμενο νερό ψύξης από την Εξίσωση 5.24, το δυναμικό θερμοροής από την Εξίσωση 5.25 και την απαιτούμενη επιφάνεια εναλλαγής από την Εξίσωση 5.26. Τα στάδια αυτά αποτελούν τμήμα της προτεινόμενης διαδικασίας λεπτομερούς υπολογισμού των εναλλακτών. Για τον υπολογισμό του εναλλάκτη με την απλοποιημένη αυτή μέθοδο απαιτούνται μέσες τιμές για τα τεχνικά δεδομένα του Πίνακα 5.11. Τυπικές τιμές του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συνοψίζονται στον Πίνακα 5.15. Οι τιμές του Πίνακα προέρχονται από επεξεργασία μεγάλου αριθμού δεδομένων που παρουσιάζονται στα βασικά βιβλία εναλλακτών. Για μεγαλύτερη ασφάλεια στο σχεδιασμό προτείνεται η χρησιμοποίηση τιμών κοντά στις ελάχιστες τιμές.

	Ελάχιστο	Μέγιστο	Σχεδιασμός
Αέριο-αέριο	0.010	0.050	0.015
Υγρό-αέριο	0.020	0.100	0.030
Υγρό-υγρό	0.150	1.250	0.300
Υγρό- ατμός	0.300	1.500	0.500

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.15: Τυπικές τιμές συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε  $KW / m^2 K$

Η οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.16. Ως αντικειμενική συνάρτηση αριστοποίησης επιλέγεται το ετήσιο συνολικό κόστος (Εξίσωση 5.27), όπου ο παράγοντας ανάκτησης κεφαλαίου ( $e$ ) υπολογίζεται από την Εξίσωση 5.28. Το κόστος της επένδυσης και το ετήσιο κόστος λειτουργίας υπολογίζονται από τις Εξισώσεις 5.29 και 5.30. Τα απαιτούμενα οικονομικά δεδομένα συνοψίζονται στον Πίνακα 5.17.

Ετήσιο συνολικό κόστος	$C = eC_{eq} + C_{op}$	5.27
Παράγοντας ανάκτησης κεφαλαίου (CapitalRecoveryFactor)	$e = CRF(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1}$	5.28
Κόστος εξοπλισμού	$C_{eq} = C_1 A^n$	5.29
Κόστος βοηθητικών παροχών (ετήσιο κόστος λειτουργίας)	$C_{op} = c_w F_w t$	5.30
Κόστος εναλλασόμενης ενέργειας	$C_Q = C / Q$	5.31

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.16: Οικονομική ανάλυση ψυκτήρα.

$C_1$	Μοναδιαίο κόστος εναλλάκτη
$n$	Παράγοντας κλίμακας
$c_w$	Κόστος νερού ψύξης
$t$	Ετήσιος χρόνος λειτουργίας εναλλάκτη
$i$	Επιτόκιο δανείου
$N$	Διάρκεια δανείου

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.17: Οικονομικά δεδομένα ψυκτήρα.

## 5.6.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΘΕΡΜΑΝΤΗΡΑ

Η ανάλυση που παρουσιάζεται αναφέρεται στον πιο χρησιμοποιούμενο τύπο εναλλάκτη, αυτόν του κελύφους σωλήνων. Θα παρουσιαστεί το λεπτομερές μαθηματικό πρότυπο του θερμαντήρα. Κατά την ανάλυση αγνοείται η θερμική αντίσταση των αποθέσεων. Το ρεύμα της διεργασίας εισέρχεται στον εναλλάκτη με παροχή  $F$  και θερμοκρασία  $T_1$  και εξέρχεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία  $T_2$ . Για την θέρμανση χρησιμοποιείται ατμός με παροχή  $F_s$ , ο οποίος συμπυκνώνεται σε θερμοκρασία  $T_s$ , το δυναμικό θερμοροής είναι  $\Delta T_m$ .

Για την εναλλαγή θερμότητας συνολικού θερμικού φορτίου  $Q$  απαιτείται επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας  $A$ . Η απαιτούμενη επιφάνεια εναλλαγής αποτελείται από  $N$  σωλήνες διαμέτρου  $d$  και μήκους  $L$ , οι οποίοι περικλείονται σε κέλυφος διαμέτρου  $D$ . Έστω ότι ο αριθμός των περασμάτων στους σωλήνες είναι  $n$ , και η ταχύτητα ροής του ρεύματος της διεργασίας στους αυλούς  $u$  (Coulson & Richardson, 1996). Το λεπτομερές μαθηματικό πρότυπο του θερμαντήρα παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.18. Οι τέσσερις πρώτες Εξισώσεις 5.32-5.35 αποτελούν το απλοποιημένο μαθηματικό πρότυπο του θερμαντήρα, όπως αυτό παρουσιάστηκε στον Πίνακα 5.9.

Οι υπόλοιπες εξισώσεις αποτελούν επί της ουσίας τη μέθοδο υπολογισμού του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σαν συνάρτηση της γεωμετρίας και των συνθηκών ροής. Πιο αναλυτικά, η Εξίσωση 5.36 υπολογίζει τον συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει των επιφανειακών συντελεστών. Έχει αμεληθεί η αντίσταση του τοιχώματος και οι συντελεστές αποθέσεων. Επίσης κατά προσέγγιση θεωρείται ότι η εξωτερική διάμετρος των σωλήνων είναι ίση με την εσωτερική και ίση με  $d$ . Η Εξίσωση 5.37 υπολογίζει τον επιφανειακό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για ροή αέρα μέσα σε σωλήνες. Η εξίσωση 5.38 υπολογίζει τον επιφανειακό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για συμπύκνωση υδρατμών στο εξωτερικό κατακόρυφων σωλήνων. Η Εξίσωση 5.39 υπολογίζει την μέση ταχύτητα ροής του αέρα στους σωλήνες, η οποία χρειάζεται για τον υπολογισμό του επιφανειακού συντελεστή. Οι Εξισώσεις 5.40 και 5.41 είναι γεωμετρικές σχέσεις.

Η Εξίσωση 5.40 υπολογίζει την συνολική επιφάνεια  $N$  σωλήνων διαμέτρου  $d$ , δηλαδή την επιφάνεια εναλλαγής, ενώ η Εξίσωση 5.41 υπολογίζει την διάμετρο  $D$  του κελύφους, το οποίο μπορεί να χωρέσει  $N$  σωλήνες σε τριγωνική διάταξη με απόσταση κέντρων  $1.25d$ . Οι Εξισώσεις 5.42 και 5.43 υπολογίζουν την πτώση πίεσης εντός των αυλών. Η Εξίσωση 5.42 είναι η

γνωστή εξίσωση υπολογισμού της πτώσης πίεσης λόγω ροής σε αγωγούς με την προσθήκη της πτώσης πίεσης λόγω αντιστροφής της ροής ανά πέρασμα. Ο συντελεστής τριβής υπολογίζεται από την Εξίσωση 5.43. Τέλος η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς για τη διακίνηση του ρευστού εντός των αγωγών υπολογίζεται από την Εξίσωση 5.44. Εδώ θα πρέπει να τονισθεί ότι η Εξίσωση 5.35 ισχύει για καθαρή αντιροή ή ομοροή των ρευστών. Για την περίπτωση ομοροής ή εγκάρσιας ή πολλαπλής ροής απαιτείται διόρθωση του δυναμικού  $\Delta T_m$  ως εξής:  $Q = AU F_T \Delta T_m$  όπου ο παράγοντας διόρθωσης  $F_T$  υπολογίζεται από διαγράμματα της βιβλιογραφίας, Στην περίπτωση που για το ένα ρεύμα συμβαίνει ισοθερμοκρασιακή αλλαγή φάσης τότε  $F_T = 1$  ανεξάρτητα από την κατεύθυνση των ροών (Sinnott, 1996)

$Q = FC_p(T_2 - T_1)$	5.32
$Q = F_s \Delta H_s$	5.33
$\Delta T_m = \frac{(T_2 - T_1) - (T_3 - T_2)}{\ln[(T_2 - T_1)/(T_3 - T_2)]}$	5.34
$Q = AU \Delta T_m$	5.35
$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}$	5.36
$h_i = 3.52 u^{0.8} / d^{0.2}$	5.37
$h_o = 318 \left( \frac{Nd}{F_s} \right)^{1/3}$	5.38
$u = \frac{F}{\rho \frac{N}{n} \left( \frac{\pi d^2}{4} \right)}$	5.39
$A = N \pi d L$	5.40
$N = 0.319 \left( \frac{D}{d} \right)^{2.142}$	5.41
$\Delta p = n \left[ 8f \left( \frac{L}{d} \right) + 2.5 \right] \frac{\rho u^2}{2}$	5.42
$\frac{1}{\sqrt{f}} = a \log \left( \frac{\rho d u}{\mu} \right) - b$	5.43
$W = F \Delta p$	5.44

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.18:** Εξισώσεις θερμαντήρα.

Οι εμπλεκόμενες στο μαθηματικό πρότυπο μεταβλητές συνοψίζονται στον Πίνακα 5.19, ενώ στον Πίνακα 5.20 περιγράφεται το τυπικό πρόβλημα σχεδιασμού, το οποίο επιλύθηκε με το απλοποιημένο μαθηματικό πρότυπο. Η ανάλυση των βαθμών ελευθερίας παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.21, ενώ ένας αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.22.



$F$	Παροχή Ρεύματος Διεργασίας (kg/s)
$F_s$	Παροχή Ατμού Θέρμανσης (kg/s)
$T_1$	Θερμοκρασία Ρεύματος της Διεργασίας στην Είσοδο (°C)
$T_2$	Θερμοκρασία Ρεύματος της Διεργασίας στην Έξοδο (°C)
$T_s$	Θερμοκρασία Συμπύκνωσης Ατμού Θέρμανσης (°C)
$\Delta T_m$	Μέση Θερμοκρασιακή Διαφορά. Δυναμικό Θερμοροής (°C)
$Q$	Θερμική ισχύς Θερμαντήρα (kW)
$W$	Ηλεκτρική ισχύς αντλίας (kW)
$A$	Επιφάνεια Εναλλαγής Θερμότητας (m <sup>2</sup> )
$U$	Συνολικός Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας (W/m <sup>2</sup> K)
$h_i$	Επιφανειακός Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας στο Εσωτερικό των Σωλήνων (W/m <sup>2</sup> K)
$h_o$	Επιφανειακός Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας στο Εξωτερικό των Σωλήνων (W/m <sup>2</sup> K)
$f$	Συντελεστής Τριβής
$u$	Ταχύτητα Ροής στους Σωλήνες (m/s)
$\Delta p$	Πτώση Πίεσης στους Αυλούς (Pa)
$d$	Διάμετρος Σωλήνων (m)
$L$	Μήκος Σωλήνων (m)
$N$	Αριθμός Σωλήνων (-)
$n$	Αριθμός Περσμάτων Σωλήνων (-)
$D$	Διάμετρος Κελύφους (m)

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.19: Μεταβλητές θερμαντήρα.

$F$	Παροχή Ρεύματος Διεργασίας (kg/s)
$T_1$	Θερμοκρασία Ρεύματος της Διεργασίας στην Είσοδο (°C)
$T_2$	Θερμοκρασία Ρεύματος της Διεργασίας στην Έξοδο (°C)
$T_s$	Θερμοκρασία Συμπύκνωσης Ατμού Θέρμανσης (°C)

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.20: Προδιαγραφές σχεδιασμού θερμαντήρα.

Μεταβλητές	20
Εξισώσεις	13
Ελεύθερες Μεταβλητές	7
Προδιαγραφές Σχεδιασμού	4
Μεταβλητές Σχεδιασμού	3

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.21: Ανάλυση βαθμών ελευθερίας θερμαντήρα.

Βήματα Σχεδιασμού Εναλλάκτη	
1	Καθορισμός Προδιαγραφών Σχεδιασμού και Υπολογισμός του Θερμικού Φορτίου (Πίνακας 5.20)
2	Υπολογισμός Θερμοφυσικών Ιδιοτήτων Ρευστών
3	Επιλογή Τύπου Εναλλάκτη (Πίνακας 5.8)
4	Προδιορισμός Δοκιμαστικής Τιμής του συντελεστή Μεταφοράς Θερμότητας (Πίνακας 5.15)
5	Υπολογισμός Δυναμικού Θερμορροής (Εξίσωση 5.34)
6	Υπολογισμός Απαιτούμενης Επιφάνειας Εναλλάκτη (Εξίσωση 5.35)
7	Επιλογή Γεωμετρίας Εναλλάκτη (αριθμός, μήκος και διάμετρος σωλήνων)
8	Υπολογισμός Επιφανειακών Συντελεστών Μεταφοράς Θερμότητας (Εξισώσεις 5.37 και 5.38)
9	Υπολογισμός Συνολικού Συντελεστή Μεταφοράς Θερμότητας (Εξίσωση 5.36)
10	Έλεγχος ισότητας με αρχική εκτίμηση. Αν όχι, επιστροφή στο βήμα 4.
11	Υπολογισμός Πτώσης Πίεσης
12	Μη Αποδεκτή Τιμή Πτώσης Πίεσης, Επιστροφή στο βήμα 7 ή 3
13	Αριστοποίηση Εναλλάκτη – Επαναλήψεις στο βήματα 3 & 7

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.22: Βήματα σχεδιασμού εναλλάκτη.

Στον αλγόριθμο χρησιμοποιούνται ως μεταβλητές σχεδιασμού η ταχύτητα ροής εντός των αγωγών ( $u$ ), η διάμετρος των σωλήνων ( $d$ ) καθώς και ο αριθμός των περασμάτων των σωλήνων ( $n$ ). Ως μεταβλητή δοκιμής χρησιμοποιείται ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ( $U$ ). Επί της ουσίας ο αλγόριθμος χωρίζεται σε δύο μέρη: το πρώτο μέρος είναι ακριβώς ο αλγόριθμος επίλυσης του απλοποιημένου μαθηματικού προτύπου, όπου ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι δεδομένο. Το δεύτερο μέρος υπολογίζει τον συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λαμβάνοντας υπ' όψη μία πρώτη εκτίμηση της συνολικής επιφάνειας εναλλαγής  $A$  και επιλέγοντας την κατανομή της στους σωλήνες (μήκος, διάμετρος). Με αυτό τον τρόπο δομείται μία επαναληπτική διαδικασία δοκιμής και σφάλματος με μεταβλητή ελέγχου τη συνολική επιφάνεια εναλλαγής. Τα απαιτούμενα τεχνικά δεδομένα για την επίλυση του μαθηματικού προτύπου συνοψίζονται στον Πίνακα 5.23 τα οποία υπολογίζονται από σχετικές προσεγγίσεις που παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία

$C_p$	Ειδική Θερμότητα Ρεύματος Διεργασίας (kJ/kg K)
$\Delta H_s$	Θερμότητα Συμπύκνωσης Ατμού (kJ/kg )
$h$	Επιφανειακοί Συντελεστές Μεταφοράς Θερμότητας
$D$	Διάμετρος Κελύφους Συναρτήσει της Διάταξης των Σωλήνων
$F$	Συντελεστής Τριβής

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.23: Τεχνικά δεδομένα θερμαντήρα.

Η οικονομική ανάλυση του θερμαντήρα παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.24, ενώ τα απαιτούμενα οικονομικά δεδομένα συνοψίζονται στον Πίνακα 5.25.

Ετήσιο συνολικό κόστος	$C = eC_{eq} + C_{op}$	5.45
Παράγοντας ανάκτησης κεφαλαίου (CapitalRecoveryFactor)	$e = CRF(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1}$	5.46
Κόστος εξοπλισμού	$C_{eq} = C_1 A^n$	5.47
Κόστος βοηθητικών παροχών (ετήσιο κόστος λειτουργίας)	$C_{op} = C_s Q t + C_e W t$	5.48
Κόστος εναλλασόμενης ενέργειας	$C_Q = C / Q$	5.49

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.24: Οικονομική ανάλυση θερμαντήρα.

$C_1$	Μοναδιαίο Κόστος Εναλλάκτη
$n$	Δείκτης Οικονομίας Κλίμακας
$C_s$	Κόστος Ατμού Θέρμανσης
$C_e$	Κόστος Ηλεκτρικής Ενέργειας
$t$	Ετήσιος Χρόνος Λειτουργίας Εναλλάκτη
$i$	Επιτόκιο Δανείου
$N$	Διάρκεια Δανείου

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.25: Οικονομικά δεδομένα θερμαντήρα.

### 5.6.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

#### Παράδειγμα 1

Εφαρμογή Ψυκτήρα (απλοποιημένος σχεδιασμός)  
Αέριο ρεύμα, ατμοσφαιρικής πίεσης, με ιδιότητες ισοδύναμες του αέρα, απαιτείται να ψυχθεί από τους  $65^\circ C$  στους  $35^\circ C$ . Νερό ψύξης είναι διαθέσιμο στους  $20^\circ C$ . Να σχεδιασθεί ο απαιτούμενος εναλλάκτης για την ψύξη παροχής  $1\text{kg/s}$ .

#### Λύση

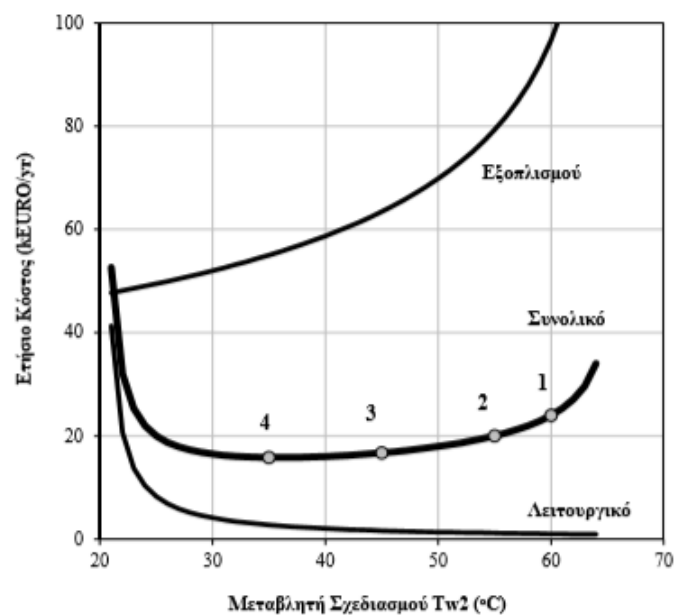
Εφαρμόζοντας το μαθηματικό πρότυπο του Πίνακα 5.8 και τον αλγόριθμο επίλυσης του Πίνακα 5.14 προκύπτει η λύση του Πίνακα 5.26. Στον Πίνακα 5.26 εμφανίζεται η άριστη τιμή της μεταβλητής σχεδιασμού  $T_{w2}$ . Για σύγκριση παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.15 έως 5.18 οι παρακάτω επιλογές για τη μεταβλητή σχεδιασμού:

1.  $T_{w2}=60^{\circ}C$  που αντιστοιχεί σε ελάχιστη θερμοκρασιακή προσέγγιση στα άκρα του εναλλάκτη  $5^{\circ}C$ .
2.  $T_{w2}=55^{\circ}C$  που αντιστοιχεί σε ελάχιστη θερμοκρασιακή προσέγγιση στα άκρα του εναλλάκτη  $10^{\circ}C$ .
3.  $T_{w2}=45^{\circ}C$  λαμβάνοντας υπ' όψη την απαίτηση για επιστροφή του νερού ψύξης.
4.  $T_{w2}=35^{\circ}C$  που αντιστοιχεί στην άριστη τιμή.

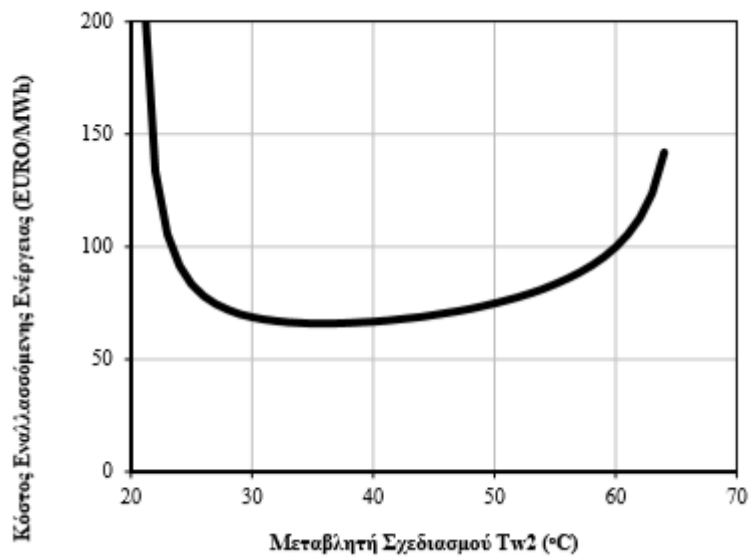
Στο Σχήμα 5.15 απεικονίζεται ουσιαστικά το αποτέλεσμα της αριστοποίησης για το συνολικό κόστος του ψυκτήρα. Παρόμοια διαγράμματα θα εμφανισθούν αργότερα και στις άλλες διεργασίες. Συνήθως το άριστο εμφανίζεται στο σημείο όπου εξισορροπούν αντίθετες τάσεις. Συγκεκριμένα στην περίπτωση του ψυκτήρα ελαττώνοντας τη θερμοκρασία απόρριψης του νερού ψύξης ελαττώνεται το κόστος επένδυσης και αυξάνεται το κόστος λειτουργίας. Το κόστος επένδυσης ελαττώνεται διότι αυξάνεται η θερμοκρασιακή διαφορά (Σχήμα 5.17) και κατά συνέπεια ελαττώνεται η απαιτούμενη επιφάνεια εναλλαγής. Αντίθετα το κόστος λειτουργίας αυξάνεται διότι απαιτείται μεγαλύτερη παροχή του νερού ψύξης για την απομάκρυνση του ίδιου ποσού θερμότητας. Εκατέρωθεν του άριστου υπερισχύει η μία από τις δύο τάσεις. Αυτό που πρέπει να τονισθεί είναι ότι στην περίπτωση αυτή το ελάχιστο του κόστους είναι πλατύ, που σημαίνει ότι η τιμή της μεταβλητής σχεδιασμού μπορεί να κινηθεί στην περιοχή  $30-45^{\circ}C$  χωρίς να μεταβληθεί αισθητά η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης αριστοποίησης. Στο Σχήμα 5.16 παρουσιάζεται η εξέλιξη του κόστους εναλλασσόμενης ενέργειας συναρτήσει της μεταβλητής σχεδιασμού  $T_{w2}$ . Επειδή στην συγκεκριμένη περίπτωση τη θερμική ισχύ είναι σταθερό η μορφή του  $C_o$  είναι όμοια με αυτήν του  $C$  και κατά συνέπεια η αριστοποίηση του  $C_o$  ισοδυναμεί με την αριστοποίηση του  $C$  (Εξίσωση 5.31). Όμως το  $C_o$  ένα κρίσιμο μέγεθος για την οικονομική αξιολόγηση της διεργασίας της ψύξης και τη σύγκριση της διεργασίας με άλλες όπως της θέρμανσης, κατάψυξης, συμπύκνωσης, εξάτμισης κλπ.

<b>Προδιαγραφές Σχεδιασμού</b>			
Παροχή ρεύματος διεργασίας	F	1.00	kg/s
Θερμοκρασία εισόδου ρεύματος	T <sub>1</sub>	65.0	°C
Θερμοκρασία εξόδου ρεύματος	T <sub>2</sub>	35.0	°C
Θερμοκρασία εισόδου νερού ψύξης	T <sub>w1</sub>	20.0	°C
<b>Τεχνικά Δεδομένα</b>			
Ειδική θερμότητα ρεύματος διεργασίας	C <sub>p</sub>	1.00	kJ/kgK
Ειδική θερμότητα νερού	C <sub>pw</sub>	4.18	kJ/kgK
Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας	U	0.020	kW/m <sup>2</sup> K
<b>Οικονομικά Δεδομένα</b>			
Μοναδιαίο κόστος εναλλάκτη	C <sub>1</sub>	3.50	kEURO/m <sup>2</sup>
Παράγοντας κλίμακας εναλλάκτη	n	0.65	-
Κόστος νερού ψύξης	c <sub>w</sub>	0.20	EURO/tn
Ετήσιος χρόνος λειτουργίας	t	8000	hr/yr
Ετήσιο επιτόκιο δανείου	i	0.06	-
Διάρκεια δανείου	N	5	yr
<b>Μεταβλητές Σχεδιασμού</b>			
Θερμοκρασία εξόδου νερού ψύξης	T <sub>w2</sub>	35.0	°C
<b>Επίλυση Προτύπου</b>			
Θερμική ισχύς ψυκτήρα	Q	30.0	kW
Παροχή νερού ψύξης	F <sub>w</sub>	0.48	kg/s
Μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά	ΔT <sub>m</sub>	21.6	°C
Επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας	A	69.3	m <sup>2</sup>
<b>Οικονομική Αξιολόγηση</b>			
Παράγοντας ανάκτησης κεφαλαίου	e	0.24	-
Κόστος εξοπλισμού	C <sub>eq</sub>	55.0	kEURO
Ετήσιο λειτουργικό κόστος	C <sub>op</sub>	2.8	kEURO/yr
Συνολικό ετήσιο κόστος	C	15.8	kEURO/yr
Κόστος εναλλασσόμενης ενέργειας	C <sub>Q</sub>	65.9	EURO/MWh

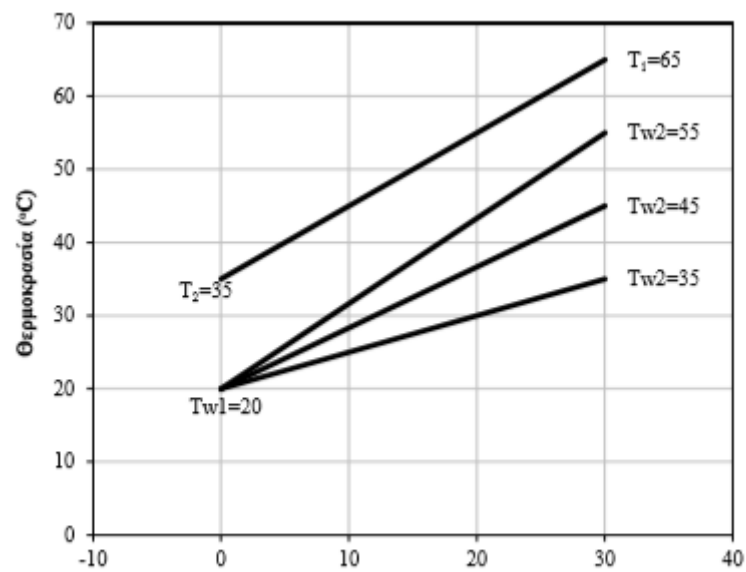
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.26: Αποτελέσματα σχεδιασμού ψυκτήρα.



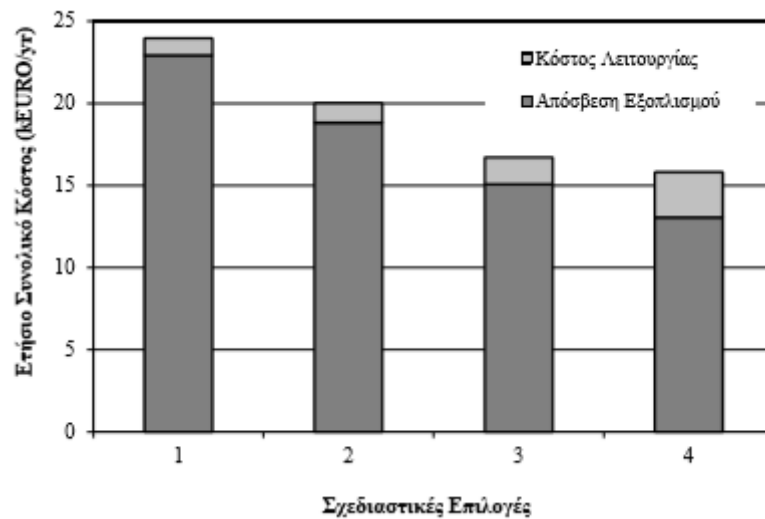
ΣΧΗΜΑ 5.15: Κόστος λειτουργίας, επένδυσης και ετήσιο συνολικό κόστος σαν συνάρτηση της μεταβλητής σχεδιασμού.



ΣΧΗΜΑ 5.16: Κόστος εναλλασσόμενης ενέργειας σαν συνάρτηση της μεταβλητής σχεδιασμού.



ΣΧΗΜΑ 5.17: Διάγραμμα θερμικής ισχύος-θερμοκρασίας για διάφορες τιμές της μεταβλητής σχεδιασμού.



ΣΧΗΜΑ 5.18: Κατανομή κόστους για διάφορες τιμές της μεταβλητής σχεδιασμού.

**Παράδειγμα 2:** Εφαρμογή Θερμαντήρα (λεπτομερής σχεδιασμός) Αέριο ρεύμα, ατμοσφαιρικής πίεσης, με ιδιότητες ισοδύναμες του αέρα, απαιτείται να θερμανθεί από τους  $35^{\circ}\text{C}$  στους  $65^{\circ}\text{C}$ , Ατμός θέρμανσης χαμηλής ποιότητας είναι διαθέσιμος στους  $120^{\circ}\text{C}$ . Να σχεδιασθεί ο απαιτούμενος εναλλάκτης για την θέρμανση παροχής  $10\text{kg/s}$ .

**Λύση:** Στον Πίνακα 5.27 παρουσιάζεται μια λύση στο πρόβλημα σχεδιασμού του Θερμαντήρα σύμφωνα με το λεπτομερές μαθηματικό πρότυπο του Πίνακα 5.18 και τον αλγόριθμο επίλυσης του Πίνακα 5.22. Τα αποτελέσματα του σχεδιασμού συνοψίζονται στον Πίνακα 5.28. Ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας έχει υπολογισθεί με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια και τα αποτελέσματα είναι περισσότερο ασφαλή σε σχέση με τον απλοποιημένο σχεδιασμό.

<b>Προδιαγραφές Σχεδιασμού</b>			
Παροχή ρεύματος διεργασίας	$F$	10.0	kg/s
Θερμοκρασία εισόδου ρεύματος	$T_1$	35.0	°C
Θερμοκρασία εξόδου ρεύματος	$T_2$	65.0	°C
Θερμοκρασία ατμού	$T_s$	120.0	°C
<b>Τεχνικά Δεδομένα</b>			
Ειδική θερμότητα ρεύματος διεργασίας	$C_p$	1.00	kJ/kgK
Λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης ατμού	$\Delta H_s$	2200	kJ/kg
<b>Μεταβλητές Σχεδιασμού</b>			
Ταχύτητα ροής	$u$	20	m/s
Διάμετρος σωλήνων	$d$	0.050	M
Αριθμός περασμάτων σωλήνων	$n$	1	-
<b>Μεταβλητές Δοκιμής</b>			
Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας	$U$	0.067	kW/m <sup>2</sup> K
<b>Επίλυση Προτύπου</b>			
Θερμική ισχύς θερμαντήρα	$Q$	300	KW
Παροχή ατμού	$\dot{F}_s$	0.14	kg/s
Μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά	$\Delta T_m$	68.9	°C
Επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας	$A$	64.9	m <sup>2</sup>
Αριθμός σωλήνων	$N$	255	-
Διάμετρος κελύφους	$D$	1.13	M
Μήκος σωλήνων	$L$	1.62	M
Επιφανειακός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο εξωτερικό των σωλήνων	$h_o$	1.44	kW/m <sup>2</sup> K
Επιφανειακός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο εσωτερικό των σωλήνων	$h_i$	0.07	kW/m <sup>2</sup> K
Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας	$U$	0.067	kW/m <sup>2</sup> K
Αριθμός Reynolds	$Re$	50000	-
Συντελεστής τριβής	$f$	0.003	-
Πτώση πίεσης στους σωλήνες	$\Delta p$	637	Pa
Ηλεκτρική ισχύς ανεμιστήρα	$W$	6.37	kW
<b>Οικονομικά Δεδομένα</b>			
Μοναδιαίο κόστος εναλλάκτη	$C_I$	3.50	kEURO/m <sup>2</sup>
Δείκτης οικονομίας κλίμακας εναλλάκτη	$n$	0.65	-
Κόστος ατμού	$c_s$	0.020	EURO/kWh
Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας	$c_e$	0.080	EURO/kWh
Ετήσιος χρόνος λειτουργίας	$t$	8000	hr/yr
Ετήσιο επιτόκιο δανείου	$i$	0.06	-
Διάρκεια δανείου	$N$	5	yr
<b>Οικονομική Αξιολόγηση</b>			
Παράγοντας ανάκτησης κεφαλαίου	$e$	0.24	-
Κόστος εξοπλισμού	$C_{eq}$	52.7	kEURO
Ετήσιο λειτουργικό κόστος θερμαντήρα	$C_{op,h}$	48.0	kEURO/yr
Ετήσιο λειτουργικό κόστος ανεμιστήρα	$C_{op,e}$	4.1	kEURO/yr
Ετήσιο λειτουργικό κόστος	$C_{op}$	52.1	kEURO/yr
Συνολικό ετήσιο κόστος	$C$	64.6	kEURO/yr
Κόστος εναλλασσόμενης ενέργειας	$C_Q$	27	EURO/MWh

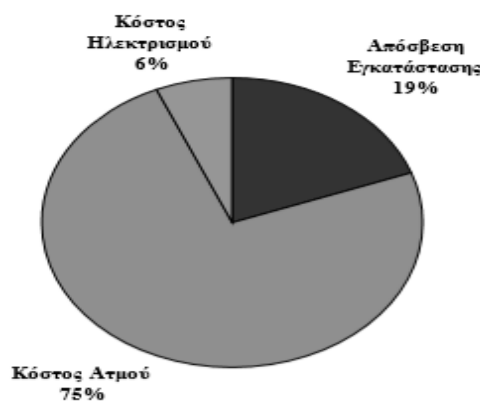
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.27: Επίλυση του προβλήματος σχεδιασμού θερμαντήρα.



<b>Ρεύμα Διεργασίας</b>	<b>Αέρας</b>	
Παροχή	10.0	kg/s
Αρχική Θερμοκρασία	35.0	°C
Τελική Θερμοκρασία	65.0	°C
<b>Βοηθητική Παροχή</b>	<b>Ατμός</b>	
Παροχή	0.14	kg/s
Θερμοκρασία	120	°C
Ετήσιο Κόστος	52	kEURO/yr
<b>Βοηθητική Παροχή</b>	<b>Ηλεκτρισμός</b>	
Ηλεκτρική Ισχύς	6	kW
Ετήσιο Κόστος	4	kEURO/yr
<b>Εξοπλισμός</b>	<b>Εναλλάκτης</b>	
Θερμική ισχύς	300	kW
Επιφάνεια Εναλλαγής	65	m <sup>2</sup>
Αριθμός Σωλήνων	255	-
Μήκος Σωλήνων	1.62	m
Διάμετρος Σωλήνων	0.05	m
Διάμετρος Κελύφους	1.13	m
Αριθμός Περσμάτων	1	-
Κόστος Εγκατάστασης	53	kEURO
<b>Οικονομική Αξιολόγηση</b>		
Συνολικό Κόστος	27	EURO/MWh

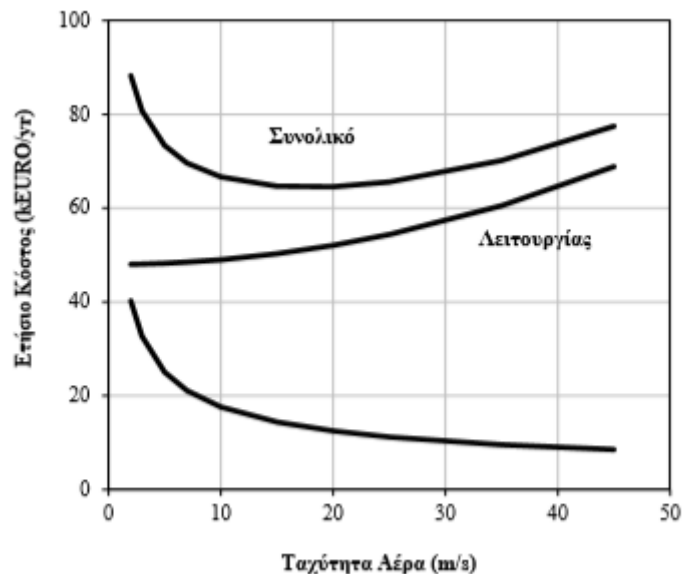
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.28: Αποτελέσματα σχεδιασμού θερμαντήρα.

Συνοπτικά για την ζητούμενη θέρμανση του αέρα απαιτείται εναλλάκτης κελύφους και σωλήνων με 255 σωλήνες διαμέτρου 5 cm και μήκους 1.62 m. Οι σωλήνες είναι σε τριγωνική διάταξη και απαιτούν κελύφος διαμέτρου 1.13 m. Το συνολικό κόστος του εναλλάκτη είναι 53 kECU. Η ταχύτητα του αέρα μέσα στους αγωγούς είναι 20 m/s και προκαλεί μία πτώση πίεσης 640 Pa, η οποία επιτυγχάνεται με ανεμιστήρα ισχύος 6.5 kW. Το ετήσιο κόστος λειτουργίας αφορά κύρια τον ατμό θέρμανσης, και λιγότερο την ηλεκτρική ενέργεια. Η κατανομή κόστους παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.19.



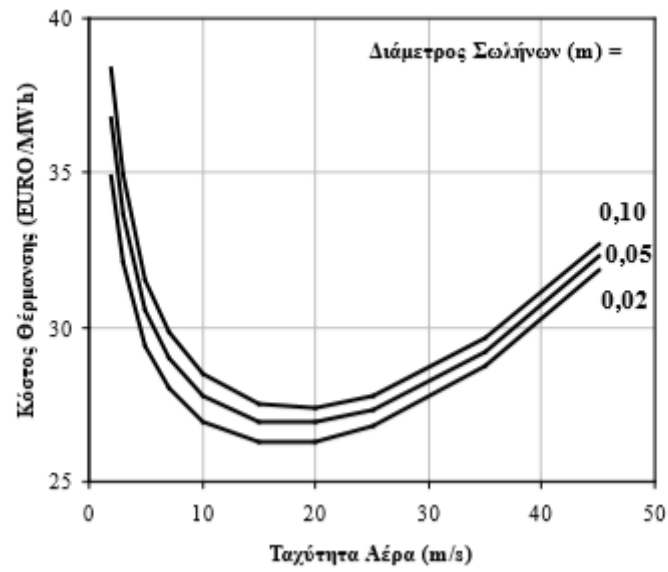
ΣΧΗΜΑ 5.19: Κατανομή ετήσιου κόστους.

Στο Σχήμα 5.20 παρουσιάζεται η επίδραση της κύριας μεταβλητής σχεδιασμού (ταχύτητα αέρα) στο κόστος. Αύξηση της ταχύτητας ροής οδηγεί σε καλύτερους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας με αποτέλεσμα την απαίτηση σε λιγότερη επιφάνεια εναλλαγής με χαμηλότερο κόστος επένδυσης. Παράλληλα, όμως αυξάνεται η πτώση πίεσης με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους λειτουργίας που οφείλεται στην κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας. Το άριστο συμβαίνει στην περιοχή μεταξύ 15 και 20 m/s.

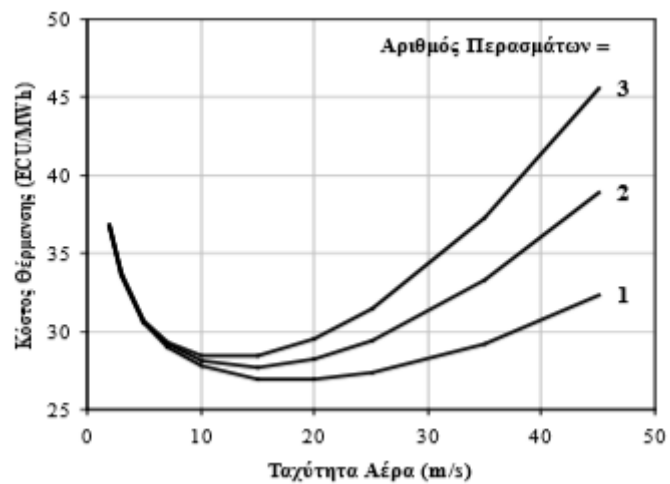


**ΣΧΗΜΑ 5.20:** Επίδραση της βασικής μεταβλητής σχεδιασμού στο κόστος εξοπλισμού, λειτουργίας, και συνολικό.

Τα Σχήματα 5.21 και 5.22 δίνουν μία ολοκληρωμένη εικόνα για το άριστο αφού εξετάζουν την επίδραση των μεταβλητών σχεδιασμού (ταχύτητα αέρα, διάμετρος σωλήνων, αριθμός περασμάτων) στο κόστος θέρμανσης του αέρα ανηγμένο ανά θερμική kWh. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.21 για την εξεταζόμενη περιοχή διαμέτρων ευνοείται η μικρή διάμετρος των σωλήνων. Κάτι τέτοιο βέβαια μεταβάλλει τη σύνθεση του συνολικού κόστους αυξάνοντας το ποσοστό του κόστους λειτουργίας σε σχέση με το κόστος επένδυσης. Ομοίως από το Σχήμα 5.22 αποδεικνύεται ότι αύξηση του αριθμού των περασμάτων δε βελτιώνουν το κόστος θέρμανσης.



ΣΧΗΜΑ 5.21: Κόστος θέρμανσης συναρτήσει της ταχύτητας του αέρα για διάφορες διαμέτρους σωλήνων.



ΣΧΗΜΑ 5.22: Κόστος θέρμανσης συναρτήσει της ταχύτητας του αέρα για 1, 2 και 3 περάσματα στους σωλήνες.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ

### ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΣ

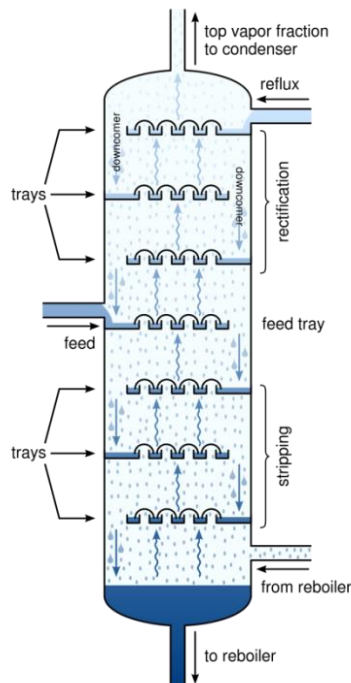
#### 6.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

Σύμφωνα με τους Μποντόζογλου και Ανδρίτσο (2003), ως μεταφορά μάζας ορίζεται η μεταφορά μιας χημικής ουσίας μεταφέρεται από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης σε περιοχές χαμηλής συγκέντρωσης με δρώσα δύναμη τη διαφορά συγκέντρωσης. Υπάρχουν, ωστόσο, και άλλες φυσικές διεργασίες που μπορεί να οδηγήσουν σε μεταφορά μάζας, όπως η ύπαρξη κλίσης θερμοκρασίας (φαινόμενο Soret), κλίσης πίεσης (pressure diffusion) και διαφορών που δημιουργούνται από εξωτερικές δυνάμεις (βαρύτητα, μαγνητικά πεδία κ.α.)

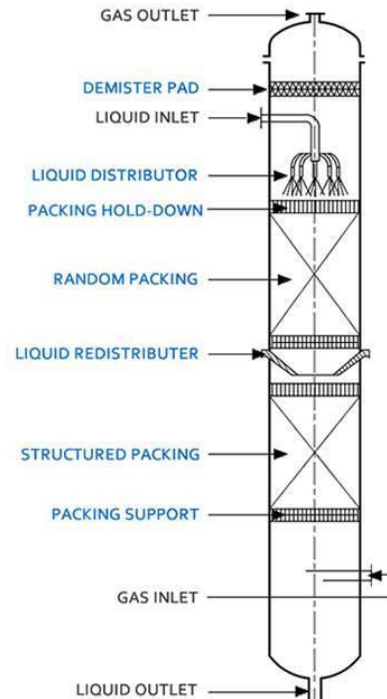
Η μεταφορά μάζας αποτελεί τη βάση για πολλές χημικές και βιολογικές διεργασίες, αλλά και για πολλές καθημερινές μας συνήθειες, όπως είναι η διαλυτοποίηση της ζάχαρης στον πρωινό καφέ και η διάχυση ενός αρώματος. Παραδείγματα διεργασιών στις οποίες η μεταφορά μάζας παίζει κυρίαρχο ρόλο είναι, μεταξύ άλλων, η απόσταξη, η προσρόφηση, η ξήρανση, οι διεργασίες μεμβρανών, η διάβρωση, η κατάλυση, η χημική εναπόθεση ατμού, ο τεχνητός νεφρός, η οξυγόνωση του αίματος, η μεταφορά αμινοξέων μέσα στα κύτταρα κ.ά. Σε πολλές από τις διεργασίες μεταφοράς μάζας έχουμε και ταυτόχρονη μεταφορά θερμότητας. Η μεταφορά μάζας επιτυγχάνεται συνήθως με συνδυασμό των μηχανισμών διάχυσης και συναγωγής.

Σύμφωνα με τους Peters και Timmerhaus (2002), έχουν αναπτυχθεί πολλοί ειδικοί τύποι εξοπλισμού για κάθε διεργασία, αλλά οι τύποι που απαντώνται πιο συχνά είναι οι συσκευές επαφής πεπερασμένων βαθμίδων (σταδίων) ή συσκευές

βαθμίδων επαφής και οι συσκευές συνεχούς επαφής. Οι χημικές αντιδράσεις και ο εξοπλισμός στον οποίο πραγματοποιούνται παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάλυση μιας χημικής διεργασίας.



ΣΧΗΜΑ 6.1: Συσκευή Πεπερασμένων Βαθμίδων

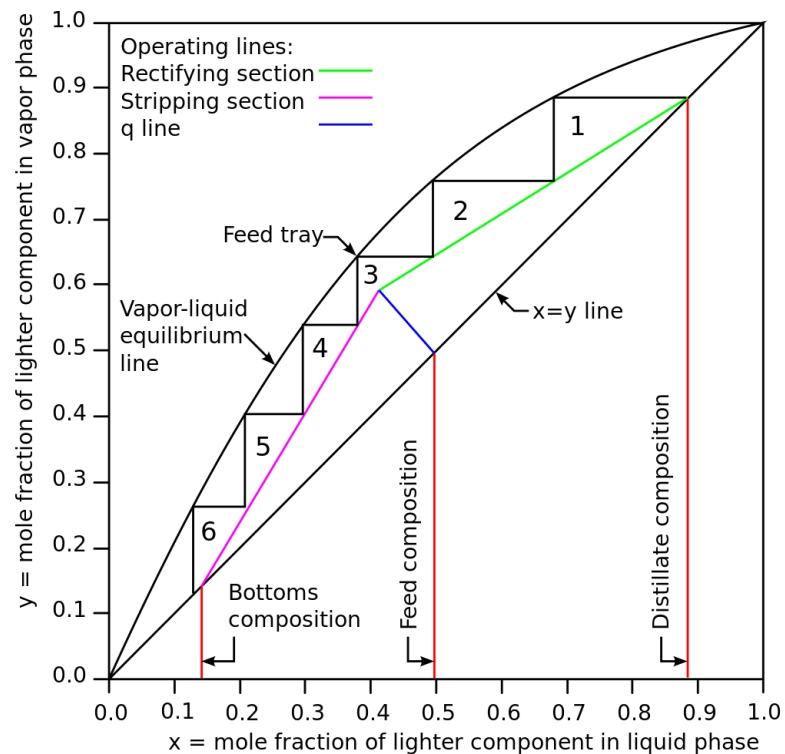


ΣΧΗΜΑ 6.2: Συσκευή Συνεχούς Επαφής

## 6.2 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΕΠΑΦΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΒΑΘΜΙΔΩΝ

Επειδή ο εξοπλισμός μιας συσκευής επαφής πεπερασμένων βαθμίδων αποτελείται από αλληλοσυνδεόμενες ανεξάρτητες μονάδες ή βαθμίδες, η συνολική διάταξη μπορεί να μελετηθεί καλύτερα αν η μελέτη βασιστεί στα χαρακτηριστικά της ροής και της μεταφοράς μάζας σε κάθε ανεξάρτητη βαθμίδα. Έτσι, για μια συσκευή επαφής με διάτρητους δίσκους, με βαλβίδες ή δίσκους με κάγκες, κάθε δίσκος μπορεί να θεωρηθεί ξεχωριστή μονάδα και ο συνολικός σχεδιασμός απαιτεί μια ανάλυση της διεργασίας από τον ένα δίσκο στον άλλο.

Μεταφορά μάζας ανάμεσα σε δύο φάσεις μπορεί να συμβεί μόνο όταν υπάρχει μια κινητήρια δύναμη ανάμεσα στις φάσεις, όπως μια διαφορά συγκέντρωσης. Όταν επιτυγχάνονται συνθήκες ισορροπίας, η κινητήρια δύναμη και, κατά συνέπεια, ο συνολικός ρυθμός μεταφοράς της μάζας, γίνονται ίσα με μηδέν. Μια κατάσταση ισορροπίας, επομένως, αντιπροσωπεύει ένα θεωρητικό όριο για τις διεργασίες μεταφοράς μάζας. Αυτό το θεωρητικό όριο χρησιμοποιείται ευρέως σε υπολογισμούς μεταφοράς μάζας.



ΣΧΗΜΑ 6.3: Διάγραμμα Συγκεντρώσεων

Μια θεωρητική βαθμίδα ορίζεται ως η βαθμίδα επαφής όπου επιτυγχάνεται ισορροπία ανάμεσα στις φάσεις που περιλαμβάνει το σύστημα. Έτσι σε μια στήλη με διάτρητους δίσκους η θεωρητική ή ιδανική βαθμίδα είναι αυτή όπου το υγρό που απομακρύνεται από το δίσκο βρίσκεται σε ισορροπία με το αέριο που απομακρύνεται από το δίσκο.

Οι πιο κοινοί τύποι συσκευών επαφής πεπερασμένων βαθμίδων είναι οι:

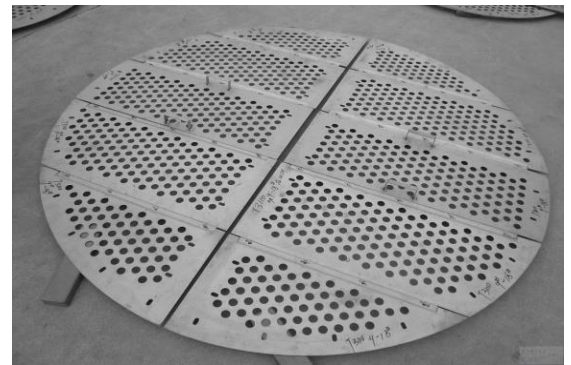
- Διάτρητοι δίσκοι
- Δίσκοι με βαλβίδες
- Δίσκοι με κάψες
- Στροβιλοφόροι δίσκοι

Πολλές από τις συσκευές που κατασκευάστηκαν στο παρελθόν χρησιμοποιούσαν κάψες για τους επαφείς, αλλά οι συσκευές επαφής με δίσκους με βαλβίδες και με διάτρητους δίσκους είναι πιο φθηνές και το ίδιο

αποτελεσματικές. Επομένως, οι κάψες χρησιμοποιούνται σπάνια πλέον σε καινούργιους εξοπλισμούς.

Οι διάτρητοι δίσκοι είναι ελάσματα με πολλές μικρές οπές, οι οποίες αποτελούν τη δίοδο από την οποία γίνεται η άνοδος του ατμού όσο το υγρό ρέει στην επιφάνεια του δίσκου. Παρότι οι δίσκοι αυτοί είναι και οι λιγότερο ακριβοί, ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην παροχή του

αερίου καθώς αν είναι αρκετά χαμηλή, το υγρό ρέει μέσω των οπών μειώνοντας την αποτελεσματικότητα της συσκευής.



ΣΧΗΜΑ 6.4: Διάτρητος Δίσκος

Στο δίσκο με κάψες το αέριο περνάει προς τα πάνω μέσα στις κάψες, όπου το υγρό πιέζεται επιτρέποντας στο αέριο να σχηματίζει φυσαλίδες, διαμέσω των σχισμών ή των εγκοπών τον καπακιού της κάψας μέσα στο υγρό. Καθώς οι φυσαλίδες διασκορπίζονται μέσα στο υγρό ανεβαίνουν μέσα από αυτό το δίσκο, σχηματίζεται μια μεγάλη διεπιφάνεια ανάμεσα στο αέριο και στο υγρό η οποία επιτρέπει την αποτελεσματική



ΣΧΗΜΑ 6.5: Δίσκος με Κάψες

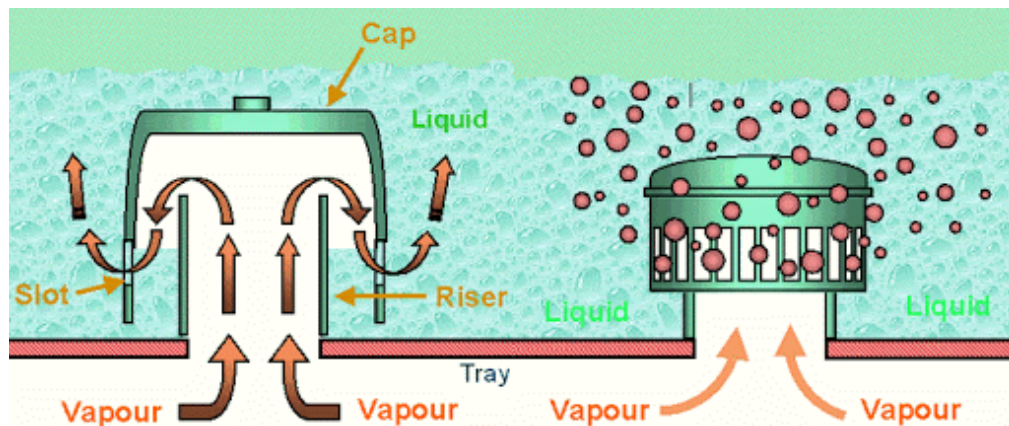
μεταφορά της μάζας. Το υγρό ρέει προς τα κάτω από δίσκο σε δίσκο μέσω των αγωγών καθόδου και η απαιτούμενη επαφή αερίου-υγρού επιτυγχάνεται καθώς το υγρό περνάει πάνω από κάθε δίσκο.

Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται συνήθως με πλήρη λειτουργία εγκάρσιας ροής για ένα διάτρητο δίσκο, οι μονάδες μπορούν να σχεδιασθούν με μια βαλβίδα ανύψωσης πάνω



ΣΧΗΜΑ 6.6: Δίσκος με Βαλβίδες

από την οπή στο δίσκο ή από τον αγωγό ανόδου τον ελάσματος, ώστε το αέριο που ανέρχεται να ανυψώσει αυτή τη βαλβίδα για να επιτρέψει τη δίοδο ατμών οριζόντια μέσα στο υγρό. Αυτό το υγρό δε μπορεί να ρεύσει εύκολα πίσω μέσα από τις οπές του δίσκου όταν η ροή του αερίου είναι χαμηλή, επειδή η βαλβίδα έχει την τάση να κλείνει όταν η ροή του αερίου είναι μειωμένη.



ΣΧΗΜΑ 6.7: Σχηματική Αναπαράσταση Βαλβίδας και Κάψας

## 6.2.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΕΠΑΦΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΒΑΘΜΙΔΩΝ

### ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι σε σύγκριση με τους πύργους με πληρωτικό υλικό όταν μπορούν να προκύψουν διακυμάνσεις στο ρυθμό ροής τον ατμού ή του υγρού ή όπου αναμένονται μεγάλες αλλαγές στη συνολική δυναμικότητα της στήλης.
- Το υγρό που κατακρατείται σε κάθε δίσκο καθιστά χρήσιμη τη συσκευή επαφής πεπερασμένων βαθμίδων για περιπτώσεις όπου πρέπει να περάσει κάποιο χρονικό διάστημα ώστε να πραγματοποιηθεί μια χημική αντίδραση, όπως σε έναν πύργο απορρόφησης για την παραγωγή νιτρικού οξέος με απορρόφηση και υδατική αντίδραση του διοξειδίου του αζώτου.
- Τα προβλήματα της κακής κατανομής του υγρού ή τον αερίου που αντιμετωπίζονται σε διάφορες δυναμικότητες φορτίου των πύργων με



πληρωτικό υλικό μπορούν να αποφευχθούν αν χρησιμοποιηθούν πύργοι με δίσκους.

- Οι πύργοι ελάσματος συνήθως καθορίζονται ευκολότερα όταν υπάρχει συσσώρευση στερεών.

### ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Από την άλλη πλευρά, οι πύργοι με πληρωτικό υλικό μπορούν συχνά να λειτουργήσουν με χαμηλότερη πτώση πίεσης, από ότι οι πύργοι με δίσκους, γεγονός που μπορεί να αποτελέσει ένα μεγάλο πλεονέκτημα για λειτουργία σε υψηλό κενό.
- Το κόστος ενός πύργου με πληρωτικό υλικό είναι συνήθως αρκετά μικρότερο από το κόστος ενός ισοδύναμου πύργου με δίσκους.

## 6.2.2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΕΠΑΦΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΒΑΘΜΙΔΩΝ

Οι βασικοί παράγοντες σχεδιασμού συσκευών επαφής πεπερασμένων βαθμίδων, εκτός από τον καθορισμό τον αριθμού των βαθμίδων που είναι θεωρητικά απαραίτητες για την απαιτούμενη εργασία, είναι:

- η διάμετρος της στήλης, ώστε να μη συμβεί πλημμύριση ή εκτεταμένος συμπαρασυρμός
- η λειτουργική απόδοση των δίσκων που εκφράζει το πόσο προσεγγίζει η διεργασία τον θεωρητικά ιδανικό δίσκο
- η πτώση της πίεσης σε κάθε δίσκο
- οι κατάλληλες διαστάσεις και η μορφή των διατάξεων επαφής
- η μορφή ροής του υγρού στους δίσκους
- η απόσταση ανάμεσα στους δίσκους
- οι αγωγοί καθόδου για τη μετακίνηση του ρευστού ανάμεσα στους δίσκους
- η σταθερότητα του δίσκου

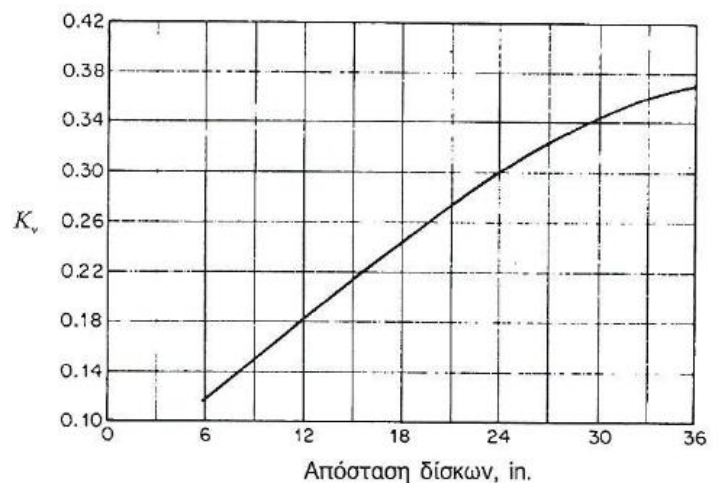
### 6.2.3 ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΑΤΜΟΥ

Η ταχύτητα τον ατμού σε μια στήλη επαφής πεπερασμένων βαθμίδων μπορεί να περιοριστεί από τη δυναμικότητα ροής του υγρού στους αγωγούς καθόδου ή από το συμπαρασυρμό των σταγόνων τον υγρού στα αέρια που ανέρχονται. Παρ' όλα αυτά, στις περισσότερες περιπτώσεις οι περιορισμοί των αγωγών καθόδου δεν καθορίζουν την επιτρεπόμενη ταχύτητα του ατμού. Αντίθετα, η κοινή βάση σχεδιασμού για την επιλογή των επιτρεπτών ταχυτήτων ατμού είναι συνάρτηση του ποσού τον συμπαρασυρμού του αερίου που μπορεί να οδηγήσει σε ακατάλληλη λειτουργία της στήλης ή σε πλημμύριση.

Ένας πύργος πρέπει να έχει αρκετή επιφάνεια διατομής για να επεξεργαστεί τα αέρια που ανέρχονται χωρίς υπερβολικό συμπαρασυρμό τον υγρού από τον ένα δίσκο στον άλλο. Υποθέτοντας ότι η αντίσταση λόγω τριβής τον ατμού στις αιωρούμενες σταγόνες υγρού δε πρέπει να υπερβαίνει το μέσο βάρος μιας σταγόνας, οι Souders και Brown (1934), ανέπτυξαν την παρακάτω εξίσωση, η οποία ισχύει για οποιαδήποτε συγκεκριμένη θέση στη στήλη.

$$V_m = K_v \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G}} \quad (6.1)$$

όπου  $V_m$  = μέγιστη επιτρεπτή φαινόμενη ταχύτητα ατμού (βασισμένη στο εμβαδό της διατομής ενός άδειου πύργου), ft/s, και  $K_v$  = μια εμπειρική σταθερά, ft/s.



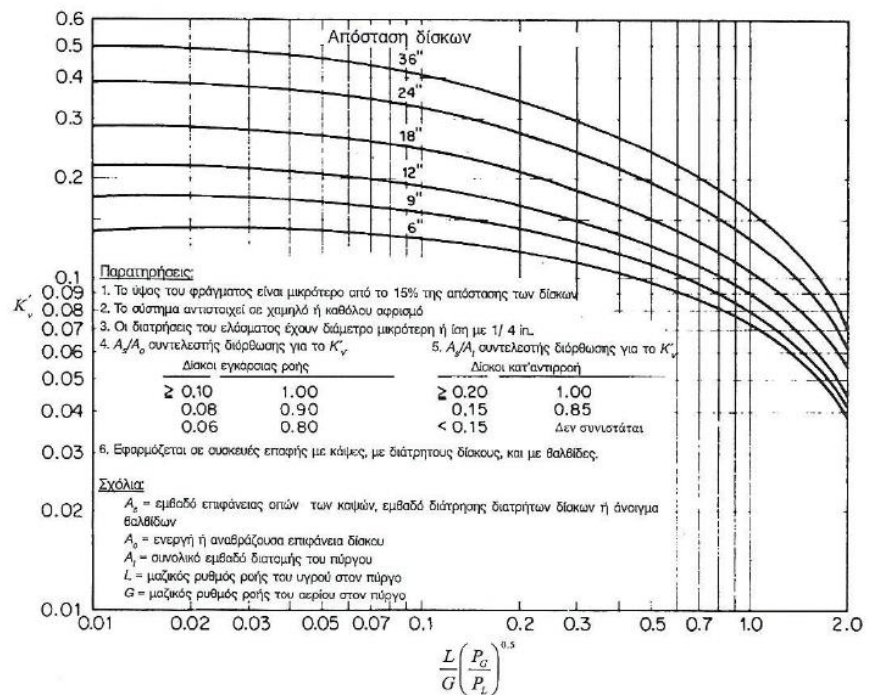
Η σταθερά  $K_v$  είναι μια συνάρτηση της απόστασης των δίσκων και μεταβάλλεται σε μικρότερο βαθμό με το βάθος τον υγρού στο δίσκο, το λόγο τον ρυθμού ροής του υγρού προς το ρυθμό ροής του αερίου, την επιφανειακή τάση τον υγρού, την πυκνότητα του αερίου

και του υγρού και τη φυσική διάταξη των εξαρτημάτων του δίσκου. Ο παραπάνω πίνακας δίνει τιμές για το  $K_v$  συναρτήσει μόνο της απόστασης των δίσκων και οι τιμές αυτές έχουν απόκλιση (στην καλύτερη περίπτωση)  $\pm 25\%$  για τις μέγιστες επιτρεπτές ταχύτητες.

Μια εναλλακτική προσέγγιση για τον υπολογισμό των μέγιστων επιτρεπτών ταχυτήτων έχει παρουσιαστεί από τον Fair (1961) και βασίζεται στα δεδομένα που έχουν ληφθεί με στήλες διάτρητων δίσκων και άλλους τύπους στηλών πεπερασμένων βαθμίδων. Η προσέγγιση αυτή λαμβάνει υπ' όψιν της την επίδραση της επιφανειακής τάσης του υγρού στη στήλη, το λόγο του ρυθμού ροής του υγρού προς το ρυθμό ροής του αερίου, τις πυκνότητες τον αερίου και του υγρού και τις διαστάσεις και τη διάταξη της συσκευής επαφής. Με αυτή τη μέθοδο, η βασική εξίσωση για τη μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα του ατμού είναι η:

$$V_m' = K_v' \left( \frac{\sigma}{20} \right)^{0,2} \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G}} \quad (6.2)$$

όπου  $V_m'$  = μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα ατμού βασισμένη στη συνολική επιφάνεια για τη ροή ατμού, ft/s  
 $K_v'$  = μια εμπειρική σταθερά, ft/s  
 $\sigma$  = επιφανειακή τάση του υγρού στον πύργο, dyn/cm.



Το διπλανό σχήμα δίνει τις τιμές του συναρτήσεως της

ΣΧΗΜΑ 6.9: Σταθερά  $K_v$  για σχέση Fair.

απόστασης των δίσκων και δίνει επίσης πληροφορίες για τους περιορισμούς στην εφαρμογή των αποτελεσμάτων. Παρ' όλο που η επιτρεπτή ταχύτητα που δίνεται από την σχέση Souders-Brown μπορεί να είναι συντηρητική για πολλούς τύπους λειτουργίας, ενώ η σχέση Fair είναι λιγότερο συντηρητική επειδή λαμβάνει υπ' όψιν την ενεργή ή αναβράζουσα επιφάνεια διατομής του πύργου μαζί με άλλες διορθώσεις, πολλοί μηχανικοί χρησιμοποιούν ταχύτητες ατμού στην περιοχή 65-80% του  $V_m$  ή  $V_m'$  για να εξασφαλίσουν ότι η στήλη τους θα είναι λειτουργική. Η πραγματική ταχύτητα που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί καθορίζει τη διάμετρο της στήλης. Στη συνέχεια προσδιορίζονται οι άλλες διαστάσεις των δίσκων. Θα πρέπει πάντα να γίνεται μια έρευνα για άλλους περιοριστικούς παράγοντες, όπως η δυναμικότητα του αγωγού καθόδου.

#### 6.2.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΔΙΣΚΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΤΗΛΗΣ

Γενικά, οι τρεις τύποι συσκευών επαφής έχουν αποδόσεις δίσκου στην περιοχή 80-90% όταν η στήλη λειτουργεί με τις κατάλληλες συνθήκες, όπου οι συσκευές επαφής με διάτρητους δίσκους και με δίσκους με βαλβίδες γενικά έχουν ελαφρώς μεγαλύτερες αποδόσεις από τις συσκευές επαφής με δίσκους με κάμψες. Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις αποδόσεις των δίσκων και της στήλης αναλύονται παρακάτω:

ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΩΝ ΑΤΜΩΝ: Οι αποδόσεις βελτιώνονται με την αύξηση της φαινόμενης ταχύτητας των ατμών όταν η ταχύτητα είναι χαμηλή, φτάνουν σε μια αρκετά σταθερή τιμή στην περιοχή των ταχυτήτων που αντιστοιχούν σε κανονική αποδεκτή λειτουργία και έπειτα μειώνονται σε μεγαλύτερες ταχύτητες.

ΒΑΘΟΣ ΥΓΡΟΥ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΑ ΑΝΟΙΓΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΤΜΩΝ: Η αύξηση στο βάθος του υγρού πάνω από τα ανοίγματα των ατμών τείνει να αυξήσει την απόδοση, ειδικά αν αυτό το βάθος είναι μικρότερο από 1 in.

ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΟΥΣ ΔΙΣΚΟΥΣ: Εξαιτίας της μεταφοράς με συμπαρασυρμό, η επίδραση της απόστασης των δίσκων σχετίζεται με την φαινόμενη ταχύτητα των ατμών. Μια πολύ μικρή απόσταση μπορεί να προκαλέσει χαμηλή απόδοση, αν η ταχύτητα του ατμού είναι μεγαλύτερη από την επιτρεπτή τιμή.

ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΤΟΥ ΥΓΡΟΥ: Το μήκος της διαδρομής του υγρού σε ένα δίσκο είναι ένας σημαντικός παράγοντας στον καθορισμό του βαθμού μεταβολής της συγκέντρωσης του υγρού στο δίσκο. Γενικά, καθώς αυξάνεται το μήκος της διαδρομής του υγρού, αυξάνεται η συνολική απόδοση της στήλης. Η επίδραση του μήκους της διαδρομής του υγρού είναι συνήθως αμελητέα, αν το μήκος είναι μικρότερο από 5 ft., αλλά η αύξηση του μήκους σε 10-15 ft. μπορεί να αυξήσει την ολική απόδοση της στήλης κατά 20-40%.

ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΥΓΡΟΥ ΣΕ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ: Η αύξηση στο ιξώδες του υγρού, η μείωση στη διαλυτότητα του αερίου για τις συσκευές απορρόφησης και η αύξηση στη σχετική πητικότητα της στήλης εμπλουτισμού προκαλούν μια αύξηση στην αντίσταση του υγρού στη διεπιφανειακή μεταφορά μάζας και μια μείωση στην απόδοση των δίσκων. Ο λόγος του ρυθμού ροής του υγρού προς το ρυθμό ροής του αερίου επηρεάζει την επίδραση της αντίστασης του υγρού στη διεπιφανειακή μεταφορά μάζας. Μια αύξηση στο λόγο του ρυθμού ροής του υγρού προς το ρυθμό ροής του αερίου μειώνει την επίδραση της αντίστασης του υγρού και μπορεί να προκαλέσει αύξηση της απόδοσης του δίσκου.

ΑΛΛΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ: Οι λεπτομέρειες σχεδιασμού της στήλης, όπως οι διαστάσεις ενός ανοίγματος ατμού, η διάταξη των δίσκων ή ο συνολικός αριθμός των δίσκων μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση. Η ακριβής επίδραση αυτών των παραγόντων καθορίζεται καλύτερα με πειραματικές δοκιμές.

Σε διεργασίες μεταφοράς μάζας πολλών συστατικών, γίνεται συνήθως η παραδοχή ότι ισχύει η ίδια απόδοση δίσκου σε όλα τα συστατικά που διαχωρίζονται. Η ολική απόδοση της στήλης υπολογίζεται έπειτα συναρτήσει των συστατικών-κλειδιών και υποτίθεται ότι ισχύει η ίδια απόδοση για το ελαφρύτερο και για το βαρύτερο συστατικό. Αυτή η παραδοχή δεν είναι απαραίτητα σωστή, λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων των συστατικών.

## 6.2.5 ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΣΕ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΕΠΑΦΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΒΑΘΜΙΔΩΝ

Καθώς το αέριο περνάει μέσα από μια συσκευή επαφής πεπερασμένων βαθμίδων, η πίεσή του μειώνεται λόγω των παρακάτω:

- Πτώση της πίεσης μέσω της συσκευής επαφής.
- Συστολή καθώς το αέριο εισάγεται στον αγωγό ανόδου ή στο άνοιγμα της οπής.
- Τριβή στον αγωγό ανόδου ή στις διατρήσεις τον δίσκου και στο δακτυλοειδές διάστημα αν χρησιμοποιούνται δίσκοι με κάψες.
- Τριβή που οφείλεται στην αλλαγή της κατεύθυνσης ροής του αερίου για μονάδες δίσκων με κάψες και μονάδες δίσκων με βαλβίδες.
- Πέρασμα του αερίου μέσω των σχισμών για μια μονάδα δίσκων με κάψες.
- Πτώση πίεσης που οφείλεται στο υγρό πάνω από τις σχισμές, τα ανοίγματα των διατρήσεων ή τα ανοίγματα των βαλβίδων.

Επειδή η πτώση της πίεσης είναι ομοιόμορφη σε όλο το χώρο τον αερίου πάνω ή κάτω από το δίσκο, η πτώση της πίεσης του αερίου σε ένα συγκεκριμένο δίσκο πρέπει να είναι η ίδια ανεξάρτητα από τη θέση στο δίσκο. Επομένως, η πτώση της πίεσης μπορεί να υπολογιστεί με βάση μια

μέση συσκευή επαφής, όπως μια μονάδα με δίσκους με κάψες, με διάτρητους δίσκους ή με δίσκους με βαλβίδες. Λόγω της κλίσης (gradient) τον υγρού που μπορεί να υπάρχει σε μονάδες με κάψες ή με βαλβίδες, ο ρυθμός της ροής του αερίου μέσα από τις μεμονωμένες κάψες ή βαλβίδες μπορεί να μεταβάλλεται από τη θέση εισόδου τον υγρού στη θέση εξόδου του υγρού στο δίσκο. Για ένα σταθερό δίσκο, μια μέση συσκευή επαφής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υπολογισμούς της πτώσης πίεσης είναι εκείνη που βρίσκεται στο σημείο της μέσης κλίσης τον υγρού. Ο ρυθμός ροής του αερίου μέσω αυτής της διάταξης μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ο ρυθμός ροής ανά διάταξη, υποθέτοντας ότι κάθε διάταξη παρέχει την ίδια ποσότητα αερίου.

Όταν γίνονται υπολογισμοί της πτώσης πίεσης για μονάδες επαφής με κάψες, διάτρητους δίσκους ή βαλβίδες, ισχύουν οι ίδιες γενικές αρχές και οι μόνες διαφορές που υπάρχουν βασίζονται στη γεωμετρική διάταξη των μεμονωμένων μονάδων επαφής. Ένας εμπειρικός κανόνας για το σωστό σχεδιασμό δίσκων με κάψες ή βαλβίδες είναι ότι η συνολική πτώση πίεσης ανά δίσκο θα είναι περίπου διπλάσια της πτώσης πίεσης που ισοδυναμεί με το μέσο μανομετρικό ύψος υγρού πάνω από την κορυφή των σχισμών των καψών ή την κορυφή των ανοιγμάτων των βαλβίδων. Ο αντίστοιχος εμπειρικός κανόνας για τη συνολική πτώση πίεσης ενός σωστά σχεδιασμένου διάτρητου δίσκου είναι να πολλαπλασιαστεί το συνολικό μανομετρικό ύψος τον υγρού στο δίσκο με 2.0, για να προκύψει το μανομετρικό ύψος του υγρού που είναι ισοδύναμο με τη συνολική πτώση πίεσης για αυτό το δίσκο.

### ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΕΠΑΦΗΣ

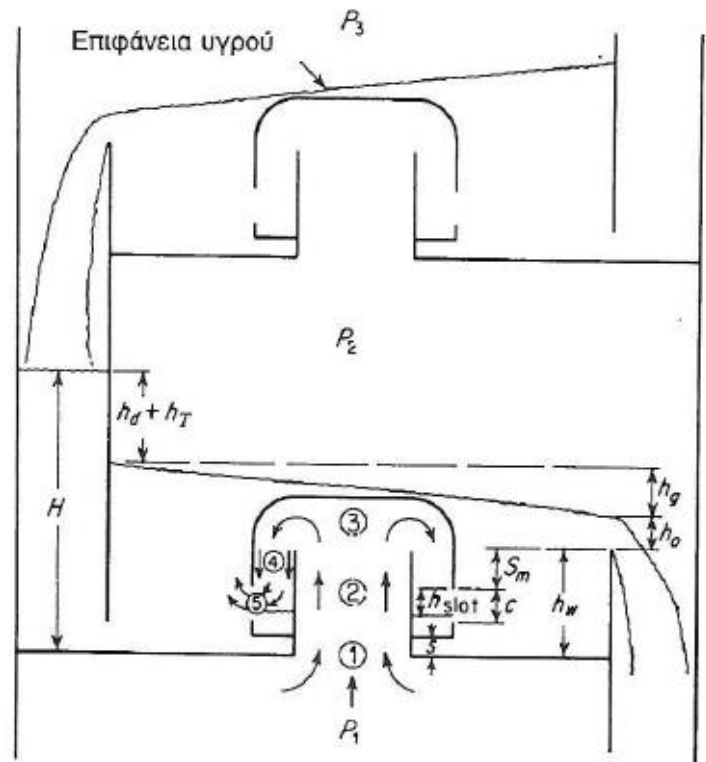
Οι αιτίες που προκαλούν την πτώση πίεσης δια μέσον μιας διάταξης επαφής παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.10 για καπάκια φουσαλίδας ως (1) συστολή, (2) τριβή στον αγωγό ανόδου, (3) αντιστροφή της κατεύθυνσης ροής και (4) τριβή στο δακτυλιοειδές διάστημα. Η συνολική πτώση πίεσης που προκαλείται

από τις παραπάνω αιτίες είναι κυρίως συνάρτηση του κινητικού  
μανομετρικού ύψους. Η πτώση πίεσης (εκφραζόμενη σε ft του υγρού) που  
είναι ισοδύναμη με ένα κινητικό μανομετρικό ύψος είναι:

$$h_H = \frac{V_c^2}{2g} \frac{\rho_G}{\rho_L} \quad (6.3)$$

όπου  $V_c$  = μέγιστη γραμμική  
ταχύτητα του αερίου στον αγωγό  
ανόδου, στην περιοχή αντιστροφής,  
στο δακτύλιο ή στην οπή της  
διάτρησης, ft/s  
 $\rho_G$  = πυκνότητα του αερίου, lb/ft<sup>3</sup>  
 $\rho_L$  = πυκνότητα του υγρού, lb/ft<sup>3</sup>  
 $g$  = τοπική επιτάχυνση λόγω  
βαρύτητας, ft/(s)(s)

Η συνολική πτώση πίεσης στον αγωγό  
ανόδου και την κάμα κυμαίνεται από  
τέσσερα έως οκτώ κινητικά  
μανομετρικά ύψη, ανάλογα με το  
σχεδιασμό του καπακιού. Μια λογική  
μέση τιμή είναι τα έξι κινητικά  
μανομετρικά ύψη. Με αυτό τον  
παράγοντα, η πτώση της πίεσης που  
οφείλεται στη ροή του αερίου μέσω  
του αγωγού ανόδου και της κάμας, που εκφράζεται ως μανομετρικό ύψος  
υγρού, είναι:



$h_d$  = μανομετρικό ύψος ισοδύναμο με την πτώση πίεσης του υγρού δια μέσου του αγωγού καθόδου και τη συστολή

$h_c$  = μανομετρικό ύψος ισοδύναμο με την πτώση πίεσης του αερίου μέσα από τον αγωγό ανόδου και το καπάκι  
= ① + ② + ③ + ④

$h_{slot}$  = μανομετρικό ύψος ισοδύναμο με την πτώση της πίεσης του αερίου μέσω των σχισμών = ⑤

$h_T = P_1 - P_2 = h_c + h_{slot} + S_m + h_o + h_g/2 \equiv P_2 - P_3$

$H = h_w + h_o + h_g + h_d + h_T$

ΣΧΗΜΑ 6.10: Πτώση Πίεσης σε Δίσκο με Κάμες



$$h_c = 3 \frac{V_c^2}{g} \frac{\rho_G}{\rho_L} \quad (6.4)$$

Η πτώση πίεσης διαμέσου των σχισμών των καψών είναι άμεση συνάρτηση της κατακόρυφης απόστασης στην οποία συμπιέζεται το υγρό κάτω από την κορυφή των σχισμών. Αυτή η απόσταση αντιπροσωπεύεται από το  $h_{slot}$ . Η διαφορά της πίεσης ανάμεσα στο εσωτερικό του καπακιού και στο υγρό εξωτερικά του καπακιού στην κορυφή των σχισμών ορίζεται ως η πτώση πίεσης διαμέσω των σχισμών. Κατά συνέπεια, το  $h_{slot}$  είναι το μανομετρικό ύψος υγρού που είναι ισοδύναμο με την πτώση της πίεσης μέσω των σχισμών.

Για σχισμές με σχήμα τετραγώνου, κατά Cross-Ryder (1952):

$$h_{slot} = 1.5 \left( \frac{Q_s}{b} \right)^{1/2} \left[ \frac{\rho_G}{(\rho_L - \rho_G) g} \right]^{1/3} \quad (6.5)$$

Για σχισμές με σχήμα τριγώνου:

$$h_{slot} = 1.85 \left( \frac{c Q_s}{b} \right)^{2/5} \left[ \frac{\rho_G}{(\rho_L - \rho_G) g} \right]^{1/5} \quad (6.6)$$

όπου  $Q_s$  = ογκομετρικός ρυθμός ροής του αερίου ανά σχισμή,  $\text{ft}^3/\text{s}$

$b$  = πλάτος της σχισμής στη βάση,  $\text{ft}$

$c$  = ύψος της σχισμής,  $\text{ft}$

Οι Εξισώσεις ισχύουν όταν το  $h_{slot}$  είναι μικρότερο από το  $c$ . Συχνά προτείνεται μια τιμή σχεδιασμού  $h_{slot} = 0.5c$ .

ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΜΑΝΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΥΨΟΥΣ ΤΟΥ ΥΓΡΟΥ  
ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΙΣ ΣΧΙΣΜΕΣ, ΤΙΣ ΟΠΕΣ ΤΩΝ ΔΙΑΤΡΗΤΩΝ ΔΙΣΚΩΝ Ή ΤΑ  
ΑΝΟΙΓΜΑΤΑ ΤΩΝ ΒΑΛΒΙΔΩΝ

Το συνολικό μανομετρικό ύψος πάνω από τις σχισμές των καψών για μια μέση κάψα είναι το άθροισμα της στατικής εμβύθισης  $S_m$ , του ύψους της κορυφής του υγρού πάνω από το φράγμα υπερχειλίσης  $h_o$  και της μέσης κλίσης (gradient) του υγρού  $0.5h_g$ . Το ίδιο θα μπορούσε να ισχύει για τους δίσκους βαλβίδων, όπου η στατική εμβύθιση είναι η απόσταση έως την κορυφή της ανοικτής βαλβίδας. Για διάτρητους δίσκους, η κλίση του υγρού συχνά αγνοείται και το μανομετρικό ύψος τον υγρού πάνω από τις οπές είναι απλά το άθροισμα τον μανομετρικού ύψους τον φράγματος  $h_w$  και του μανομετρικού ύψους της κορυφής του υγρού πάνω από το φράγμα  $h_o$ . Η στατική εμβύθιση καθορίζεται κατευθείαν από τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες τον δίσκου.

Το μανομετρικό ύψος του υγρού πάνω από το φράγμα, με βάση έναν ευθύ, τμηματικό αγωγό καθόδου, μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω τροποποίηση της εξίσωσης Francis:

$$h_o = \left( \frac{1.7Q_L}{l_w \sqrt{g}} \right)^{2/3} \quad (6.7)$$

όπου  $Q_L$  = ογκομετρικός ρυθμός ροής του υγρού,  $\text{ft}^3/\text{s}$  και  $l_w$  = μήκος του φράγματος,  $\text{ft}$ .

Η κλίση τον υγρού κατά μήκος τον δίσκου ( $h_g$ ) μπορεί να προσεγγιστεί με την παρακάτω εξίσωση που αναπτύχθηκε από τον Davies (1950).

Για κάψες φυσαλίδων τοποθετημένες στα κέντρα ισόπλευρων τριγώνων και για κάψες καλυμμένες με υγρό σε βάθος έως 1 in. ισχύει:

$$(h_g F_c)^{1.5} (1.5r - 1.4) + (h_g F_c)^{0.5} (3r) \left[ h_w + h_o + \frac{s(l_r - l_c)}{l_c} \right] = \frac{0.42 Q_L r^{1.5}}{C_D l_c} \quad (6.8)$$

όπου  $F_c$  = συντελεστής διόρθωσης για να ληφθούν υπόψη οι μεταβολές του ρυθμού ροής του αερίου και της πυκνότητας. Οι τιμές του  $F_c$ , δίνονται στο διπλανό σχήμα ως συνάρτηση του  $Q_L/W_T$  και  $V\rho_g^{1/2}$ .

$r$  = αριθμός σειρών των καψών κάθετα στην κατεύθυνση ροής του υγρού

$s$  = διάκενο λεκάνης, ft

$l_r$  = συνολικό ελεύθερο διάστημα ανάμεσα στους αγωγούς ανόδου κάθετα στην κατεύθυνση ροής του υγρού, μέσος όρος διαφόρων σειρών, ft

$l_c$  = συνολικό ελεύθερο διάστημα ανάμεσα στις κάψες κάθετα στην

κατεύθυνση ροής του υγρού, μέσος

όρος των διαφόρων σειρών, ft

$C_D$  = παράγοντας κλίσης του υγρού.

Η τιμή του  $C_D$  μπορεί να ληφθεί

από το Σχήμα 6.11

$V$  = φαινόμενη γραμμική ταχύτητα

του αερίου (βασισμένη στην

επιφάνεια διατομής του άδειου

πύργου), ft/s

$W_T$  = μέσο πλάτος τον δίσκου κάθετα

προς την κατεύθυνση ροής του υγρού,

ft, υπολογισμένο ως μέσος όρος τον

συνολικού πλάτους τον δίσκου σε

κάθε σειρά των καψών

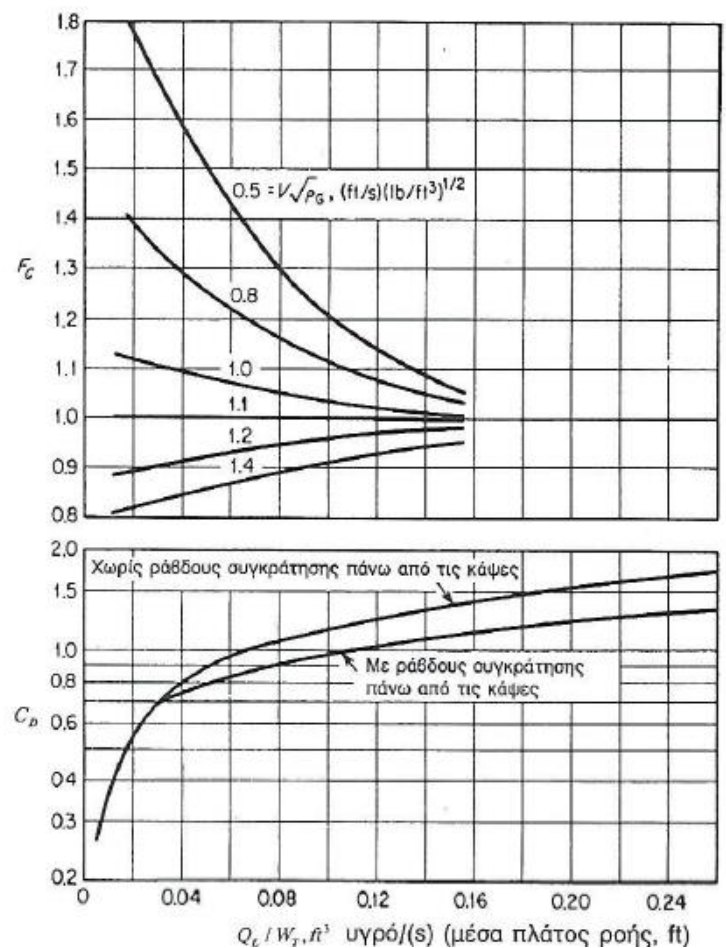
Για κάψες που είναι τοποθετημένα

στα κέντρα τετραγώνων και για

καπάκια tunnel, οι σταθερές 0.42

και 1.4 της παραπάνω εξίσωσης

αντικαθίστανται από τα 0.37 και 1.0, αντίστοιχα.



ΣΧΗΜΑ 6.11: Γραφική Παράσταση για τον Υπολογισμό του  $C_D$  και του  $F_c$

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΠΤΩΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΑΝΑ ΔΙΣΚΟ

Η συνολική πτώση πίεσης τον αερίου σε ένα δίσκου με κάψες, ισοδυναμεί με το άθροισμα της πτώσης πίεσης διαμέσω της κάψας και της πτώσης πίεσης που οφείλεται στο μανομετρικό ύψος τον υγρού πάνω από τις σχισμές, ή

$$h_T = h_c + h_{slot} + S_m + h_o + 0.5h_g \quad (6.9)$$

όπου  $h_T$  = μανομετρικό ύψος τον υγρού ισοδύναμο με τη συνολική πτώση πίεσης του αερίου στο δίσκο, ft.

Η συνολική πτώση πίεσης στο δίσκο σχετίζεται με το συνολικό μανομετρικό ύψος υγρού  $h_T$  με την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta p_T = \frac{h_T \rho_L g}{144 g_c} \quad (6.10)$$

όπου  $\Delta p_T$  συνολική πτώση πίεσης τον αερίου στο δίσκο, psi

$\rho_L$  = πυκνότητα του υγρού, lb/ft<sup>3</sup>

$g$  = τοπική επιτάχυνση λόγω βαρύτητας, ft/(s)(s)

$g_c$  = συντελεστής μετατροπής στο νόμο της κίνησης τον Newton, 32.17 ft

lbm/(s)(s)(lbf)

Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα  $g$  και  $g_c$  θεωρούνται αριθμητικά ίσα.

Επειδή το υγρό στις περισσότερες συσκευές επαφής πεπερασμένων βαθμίδων περιέχει συνήθως αέρα, η πυκνότητα τον καθαρού υγρού είναι μεγαλύτερη από την πυκνότητα του αερισμένου υγρού στο δίσκο. Επομένως, αν το  $\rho_L$  είναι η πυκνότητα του καθαρού υγρού, οι τιμές των  $\Delta p_T$  και  $h_T$  μπορεί να είναι ψηλές. Αυτές οι τιμές συνήθως πολλαπλασιάζονται με το 0.7, ώστε να δώσουν την κατάλληλη διόρθωση για τον αερισμό του υγρού.

## ΜΑΝΟΜΕΤΡΙΚΟ ΥΨΟΣ ΥΓΡΟΥ ΣΤΟΝ ΑΓΩΓΟ ΚΑΘΟΔΟΥ

Αν το μανομετρικό ύψος του υγρού στον αγωγό καθόδου είναι μεγαλύτερο από το άθροισμα της απόστασης ανάμεσα στους δίσκους και του ύψους του φράγματος, θα συμβεί πλημμύριση και θα συσσωρευτεί το υγρό στους δίσκους. Στην πράξη, το ύψος τον υγρού στον αγωγό καθόδου (βασισμένο στην πυκνότητα του καθαρού υγρού) πρέπει να είναι λιγότερο από το 50% της απόστασης των δίσκων. Το μανομετρικό ύψος του υγρού στον αγωγό καθόδου αποτελείται από πέντε ξεχωριστά μανομετρικά ύψη:

1. Ύψος του φράγματος υπερχειλίσης  $h_w$  το οποίο καθορίζεται από το σχεδιασμό τον δίσκου.
2. Ύψος της κορυφής πάνω από το φράγμα  $h_o$
3. Κλίση του υγρού  $h_g$
4. Μανομετρικό ύψος τον υγρού ισοδύναμο με την αντίσταση της ροής λόγω τριβής στον αγωγό καθόδου και στο πέρασμα του ρευστού από τον αγωγό καθόδου στο δίσκο. Αυτό το μανομετρικό ύψος είναι συνήθως σχετικά μικρό, αλλά μπορεί να υπολογιστεί ως τρία κινητικά μανομετρικά ύψη για το υγρό, με βάση στη γραμμική ταχύτητα του υγρού στην ελάχιστη επιφάνεια διατομής για τη ροή τον κατερχόμενου υγρού ή

$$h_d = \frac{3}{2g} \left( \frac{Q_L}{A_d} \right)^2 \quad (6.11)$$

όπου  $h_d$  = μανομετρικό ύψος του υγρού ισοδύναμο με την πτώση πίεσης του υγρού που οφείλεται στη ροή μέσω του αγωγού καθόδου και της συστολής,  $ft$  και

$A_d$  = ελάχιστη επιφάνεια διατομής για τη ροή τον κατερχόμενου υγρού,  $ft^2$

5. Μανομετρικό ύψος του υγρού, το οποίο θα πρέπει να υπερβεί το αέριο, καθώς αυτό (το αέριο) περνάει διαμέσω του επόμενου (επάνω) δίσκου. Αν υποθεθεί ότι η πτώση πίεσης τον αερίου σε γειτονικούς δίσκους είναι ίδια, αυτό το μανομετρικό ύψος τον υγρού είναι ίσο με  $h_T$ .

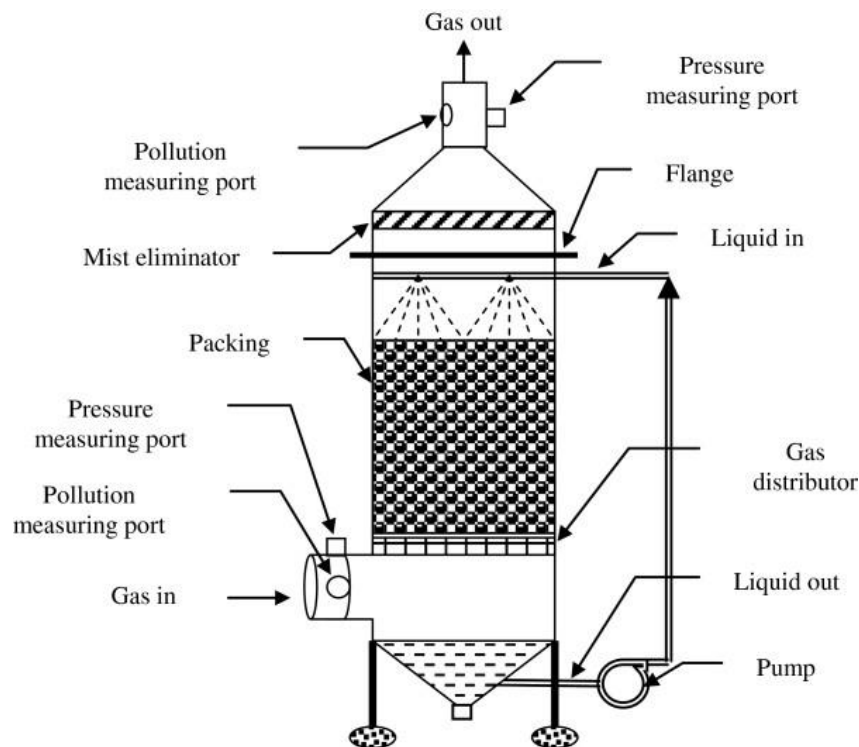
## 6.3 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΕΠΑΦΗΣ-ΠΥΡΓΟΙ ΜΕ ΠΛΗΡΩΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

Σύμφωνα με τη Στέγγου-Σαγιά(2010), οι διεργασίες μεταφοράς μάζας που περιλαμβάνουν δύο ρεύματα ρευστών γίνονται συχνά σε συνεχή λειτουργία με τη χρήση συσκευής με μια στήλη είτε κατα αντirroή είτε με ομορροή. Η πρώτη είναι η πιο συνηθισμένη, αλλά η ομορροή σε ειδικές περιπτώσεις είναι δυνατό να παρουσιάσει πλεονεκτήματα. Τρία συνήθη παραδείγματα διεργασιών μεταφοράς μάζας με αντirroή είναι τα εξής:

- Σε μια αποστακτική στήλη με πληρωτικό υλικό. Εδώ ένα ρεύμα ατμού ανέρχεται έναντι μιας ροής προς τα κάτω, της υγρής επαναρροής και σε συνθήκες σταθερής κατάστασης, επιτυγχάνεται μια κατάσταση δυναμικής ισορροπίας στη διεργασία. Το πιο πτητικό συστατικό μεταφέρεται, με τη δράση της διαφοράς συγκέντρωσης, από το υγρό στη διαχωριστική επιφάνεια όπου εξατμίζεται και μετά διαχέεται στο αέριο ρεύμα. Το λιγότερο πτητικό συστατικό μεταφέρεται κατά την αντίθετη κατεύθυνση και αν οι μοριακές λανθάνουσες θερμότητες των συστατικών είναι οι ίδιες, τότε λαμβάνει χώρα ισομοριακή αντιδιάχυση.
- Σε μια απορροφητική στήλη με πληρωτικό υλικό. Το σχήμα ροής είναι το ίδιο με το παραπάνω, αλλά το αέριο ρεύμα αντικαθίσταται από ένα αέριο φορέα μαζί με ένα διαλυτό αέριο. Η διαλυτή ουσία διαχέεται μέσα από την αέρια φάση προς την επιφάνεια του υγρού, όπου διαλύεται και ύστερα μεταφέρεται στη μάζα του υγρού. Σε αυτή την περίπτωση, δεν υπάρχει μεταφορά μάζας κατά την αντίθετη κατεύθυνση και ο ρυθμός μεταφοράς συμπληρώνεται με τη φαινόμενη ροή.
- Σε μια στήλη υγρής-υγρής εκχύλισης. Εδώ η διεργασία είναι όμοια με αυτή της απορρόφησης, με τη διαφορά ότι και τα δύο ρεύματα είναι υγρά και το ελαφρότερο ανέρχεται μέσα από το βαρύτερο.

Σύμφωνα με τους Peters και Timmerhaus (2002), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, ο συνηθισμένος τύπος ενός πύργου με πληρωτικό υλικό αποτελείται από ένα κυλινδρικό κέλυφος που περιέχει ένα αδρανές πληρωτικό

υλικό. Αυτοί οι πύργοι λειτουργούν συνήθως με αντirroή. Όταν στον πύργο υπάρχει και υγρό και ατμός, το υγρό κατέρχεται στη στήλη με τη μορφή υμένων που κατανέμονται στην επιφάνεια του πληρωτικού υλικού και οι ατμοί ανέρχονται από τα κενά διαστήματα ανάμεσα στα σωματίδια του πληρωτικού υλικού. Κατά συνέπεια, δημιουργείται μια μεγάλη επιφάνεια επαφής ατμού-υγρού, με αποτέλεσμα την αποτελεσματική μεταφορά μάζας.



ΣΧΗΜΑ 6.12: Πύργος με Πληρωτικό Υλικό

### 6.3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ-ΕΙΔΗ ΠΛΗΡΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ο σχεδιασμός ενός πύργου με πληρωτικό υλικό απαιτεί τη μελέτη των μηχανικών παραγόντων, όπως η πτώση πίεσης, οι δυναμικότητες της ροής και το φορτίο των θεμελίων. Επιπλέον, πρέπει να δοθεί προσοχή στους παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της επαφής ανάμεσα στις φάσεις των

ρευστών. Το κατάλληλο πληρωτικό υλικό θα πρέπει να έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Χαμηλή πτώση πίεσης: Επειδή η πτώση πίεσης στο πληρωτικό υλικό είναι άμεση συνάρτηση των ταχυτήτων των ρευστών, θα πρέπει να υπάρχει μια μεγάλη ελεύθερη επιφάνεια διατομής ανάμεσα στα σωματίδια του πληρωτικού υλικού, ώστε να προκύψει χαμηλή πτώση της πίεσης.

Μεγάλη δυναμικότητα: Το πληρωτικό υλικό πρέπει να επιτρέπει τη χρησιμοποίηση υψηλών ρυθμών ροής ρευστών χωρίς υπερβολική πτώση πίεσης ή συσσώρευση του υγρού στον πύργο. Αν οι ταχύτητες των ρευστών υπερβούν κάποια οριακή τιμή μπορεί να συμβεί πλημμύριση ή μεταφορά του υγρού έξω από τον πύργο. Για το λόγο αυτό όταν η δυναμικότητα είναι μεγάλη θα πρέπει να είναι μεγάλη η ελεύθερη επιφάνεια διατομής.

Μικρό βάρος και μικρή κατακράτηση υγρού: Το συνολικό βάρος της στήλης και το προκύπτον φορτίο της θεμελίωσης είναι χαμηλό, αν το βάρος του πληρωτικού υλικού και τον κατακρατημένου υγρού στον πύργο είναι μικρό. Ωστόσο το ποσό του κατακρατημένου υγρού πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο για να υπάρξει μια αποτελεσματική κινητήρια δύναμη για τη μεταφορά της μάζας.

Μεγάλη ενεργή επιφάνεια ανά μονάδα όγκου: Για να επιτευχθούν υψηλές αποδόσεις, το πληρωτικό υλικό πρέπει να παρέχει μια μεγάλη επιφάνεια επαφής ανάμεσα στις δύο φάσεις ρευστών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας πληρωτικό υλικό με ακανόνιστο σχήμα, το οποίο θα επιτρέψει την εκτεταμένη κατανομή του υγρού πάνω στην επιφάνεια, για να διευκολυνθεί η άμεση επαφή με το δεύτερο ρευστό.



Μεγάλος ελεύθερος όγκος ανά μονάδα ολικού όγκου: Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, αν πρέπει να υπάρχει αρκετός διαθέσιμος χρόνος για μια χημική αντίδραση στην αέρια φάση, όπως η οξείδωση του νιτρικού οξειδίου κατά την υδατική απορρόφηση του διοξειδίου τον αζώτου.

Διάφορα: Υψηλή αντοχή. Μεγάλη αντίσταση στη διάβρωση. Χαμηλή πλευρική πίεση στα τοιχώματα του πύργου. Χαμηλό κόστος.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι πληρωτικών υλικών για την αποδοτική επαφή ανάμεσα σε δύο φάσεις ρευστών, οι οποίοι γενικά μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο ομάδες: τα πληρωτικά υλικά που τοποθετούνται τυχαία (random) ή τα πληρωτικά υλικά με συγκεκριμένη διάταξη (stacked). Στην πρώτη ομάδα ανήκουν τα πληρωτικά υλικά που απλώς "ρίχνονται" τυχαία μέσα σε ένα κέλυφος και τα μεμονωμένα κομμάτια δεν είναι διατεταγμένα με ένα συγκεκριμένο τρόπο. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι τέτοιων πληρωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία είναι οι δακτύλιοι Pall, τα σάγματα Intalox, οι δακτύλιοι Raschig και τα σάγματα Berl.

Οι δακτύλιοι Pall και τα σάγματα Intalox αντικαθιστούν γενικά τους παλαιότερα χρησιμοποιούμενους δακτύλιους Raschig και τα σάγματα Berl, επειδή στις περισσότερες περιπτώσεις οι δακτύλιοι Pall και τα σάγματα Intalox επιτρέπουν έναν περισσότερο οικονομικό σχεδιασμό πύργου από τα άλλα πληρωτικά υλικά. Οι δακτύλιοι Pall κατασκευάζονται από μέταλλο ή από πλαστικό και έχουν την ίδια γενική μορφή με τους δακτύλιους Raschig που είναι ανοικτοί κύλινδροι με ύψος ίσο με τη διάμετρό τους. Οι δακτύλιοι Pall έχουν εγκοπές στα τοιχώματά τους και τα κομμάτια που κόβονται στρέφονται προς τα μέσα αφήνοντας οπές στο τοίχωμα. Οι προεκτάσεις σχεδόν αγγίζουν η μια την άλλη στο κέντρο του δακτυλίου. Έτσι ο δακτύλιος "ανοίγει" και γίνεται

εκμετάλλευση του εσωτερικού του, ώστε να γίνει καλύτερη επαφή ατμού-υγρού.



ΣΧΗΜΑ 6.13:  
Πληρωτικά Υλικά

Τα πληρωτικά υλικά με σχήμα σέλλας (σάγματα), όπως τα σάγματα Intalox και τα σάγματα Berl κατασκευάζονται από κεραμικό, πλαστικό ή οποιοδήποτε άλλο υλικό το οποίο μπορεί να μορφοποιηθεί σε ειδικά καλούπια. Η διάταξη αυτών των πληρωτικών υλικών είναι τέτοια, ώστε τα σωματίδια να αλληλεπικαλύπτονται με αποτέλεσμα μικρότερη πλευρική πίεση και μεγαλύτερη ενεργή επιφάνεια ανά μονάδα όγκου από τους δακτύλιους Raschig.

Οι δακτύλιοι Raschig είναι απλοί κενοί κύλινδροι με εξωτερική διάμετρο ίση με το ύψος τους. Κατασκευάζονται συνήθως από αδρανή υλικά τα οποία είναι φθηνά και ελαφριά, όπως η πορσελάνη, τα κεραμικά, ή ο άνθρακας. Χρησιμοποιούνται επίσης και άλλα υλικά κατασκευής, όπως ο πηλός, το

πλαστικό, ο χάλυβας και κράματα μετάλλων. Επειδή μπορεί να σπάσει το εύθραυστο πληρωτικό υλικό κατά τη ρίψη των σωματιδίων στο κέλυφος, η αρχική τοποθέτηση τον πληρωτικού υλικού μπορεί κάποιες φορές να γίνει γεμίζοντας έναν άδειο πύργο με νερό και έπειτα ρίχνοντας το πληρωτικό υλικό σιγά-σιγά μέσα στο νερό.

Προσθέτοντας ένα απλό ή ένα σταυρωτό πλέγμα στο εσωτερικό ενός δακτύλιου Rasching μπορεί να δημιουργηθεί πρόσθετη ενεργή επιφάνεια. Όταν προστίθεται απλό πλέγμα, το πληρωτικό υλικό ονομάζεται δακτύλιος Lessing, ενώ όταν προστίθεται ένα στερεό σταυρωτό πλέγμα το πληρωτικό υλικό ονομάζεται δακτύλιος σταυρωτού διαχωρισμού. Το δεύτερο είδος χρησιμοποιείται συνήθως ως πληρωτικό υλικό συγκεκριμένης διάταξης (τοποθέτησης).

Γενικά, τα πληρωτικά υλικά συγκεκριμένης διάταξης γνωστά και ως "διατεταγμένα πληρωτικά υλικά" δίνουν χαμηλότερες πτώσεις πίεσης για ισοδύναμες δυναμικότητες ρευστού από ότι τα πληρωτικά υλικά τυχαίας τοποθέτησης. Παρ' όλα αυτά, το πλεονέκτημα αυτό προκύπτει σε βάρος του υψηλότερου αρχικού κόστους εξαιτίας των παραπάνω εξόδων για εργατικά που απαιτεί η τοποθέτηση. Τα πληρωτικά υλικά σε σχήμα δακτυλίου με ονομαστικά μεγέθη 3 in. ή μεγαλύτερα τοποθετούνται συνήθως σε συγκεκριμένη διάταξη.

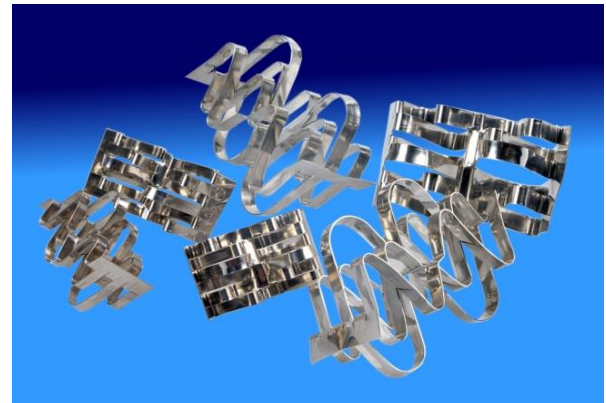


ΣΧΗΜΑ 6.14: Υπερσάγμα Torus

Άξιοι αναφοράς είναι επίσης οι νέοι τύποι πληρωτικών υλικών που κατασκευάζονται και χαρακτηρίζονται τόσο από την πολυπλοκότητα των σχημάτων τους, με σκοπό τη δημιουργία μεγαλύτερης επιφάνειας επαφής όσο και από τα νέα υλικά που χρησιμοποιούνται. Ενδεικτικά τέτοια υλικά είναι οι υπερδακτύλιοι Raschig (Σχήμα 6.16) και οι δακτύλιοι Ralu (Σχήμα 6.15) μεταλλικής κατασκευής, τα πλαστικά υπερσάγματα Toqus (Σχήμα 6.14) και δακτύλιοι χαμηλού προφίλ αλλά και οι κλασικοί δακτύλιοι Raschig κατασκευασμένοι από ανθρακόνημα που συνδυάζει υψηλή αντοχή και αμελητέο βάρος.



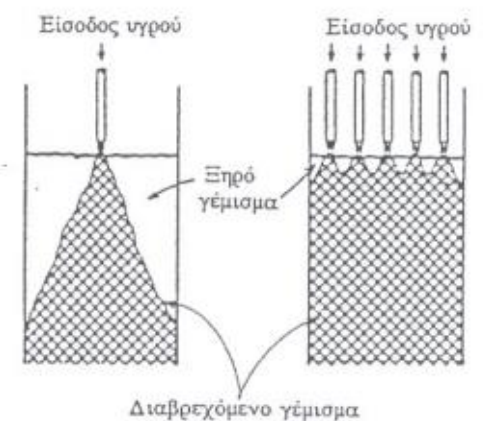
ΣΧΗΜΑ 6.15: Δακτύλιοι Ralu



ΣΧΗΜΑ 6.16: Υπερδακτύλιοι Raschig

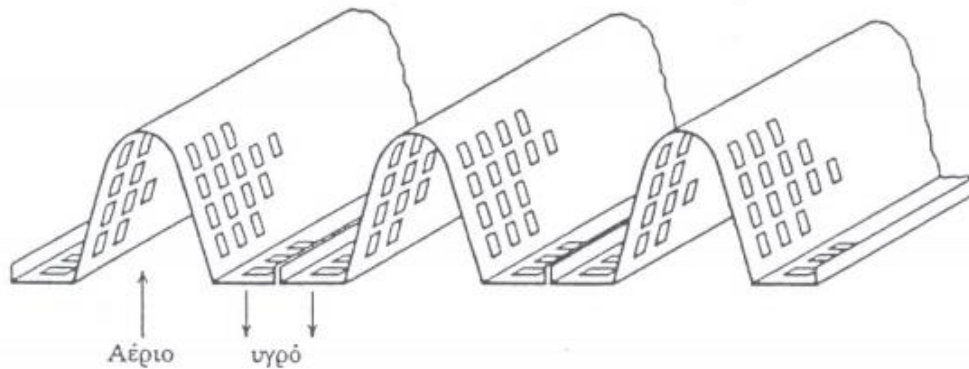
## ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΥΓΡΟΥ

Σε πύργους απορρόφησης και απόσταξης το πληρωτικό υλικό πρέπει να διαβρέχεται πλήρως από το κατερχόμενο υγρό, προκειμένου να εξασφαλιστεί η μέγιστη ενεργή επιφάνεια. Για αυτό το λόγο, το υγρό που εισέρχεται πρέπει να κατανέμεται ομοιόμορφα στην κορυφή του πληρωτικού υλικού, ενώ ο ρυθμός ροής θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να διαβρέχεται όλη η επιφάνεια του πληρωτικού υλικού. Το έλασμα στήριξης του πληρωτικού υλικού πρέπει να παρέχει επαρκή χώρο για τη διέλευση του υγρού και τον αερίου με καλή κατανομή του αερίου. Συχνά σε μικρές στήλες χρησιμοποιείται στήριγμα σε σχήμα κώνου για να κατανεμηθεί το



ΣΧΗΜΑ 6.17: Κατανομή Υγρού Εισόδου

αέριο ομοιόμορφα σε όλο το πληρωτικό υλικό και να μειωθεί η πιθανότητα πλημμύρισης του υγρού στο στήριγμα.



ΣΧΗΜΑ 6.18: Έλασμα Στήριξης σε Σχήμα Κώνου

Ακόμη και όταν υπάρχουν κατανομές στην κορυφή και στον πυθμένα του πύργου, το κατερχόμενο υγρό έχει την τάση να ρέει σε κανάλια ή να ρέει προς το τοίχωμα της στήλης, με αποτέλεσμα σε ορισμένες περιοχές τον πληρωτικού υλικού η επιφάνεια να είναι ξηρή. Τα πληρωτικά υλικά συγκεκριμένης διάταξης (διατεταγμένα πληρωτικά υλικά) δε δίνουν τόσο καλή κατανομή υγρού όπως τα πληρωτικά υλικά τυχαίας διάταξης και, γενικά, οι δυσκολίες της κατανομής τείνουν να γίνονται υπερβολικές αν ο λόγος της διαμέτρου του πύργου προς τη διάμετρο τον πληρωτικού υλικού είναι μικρότερος από 7.

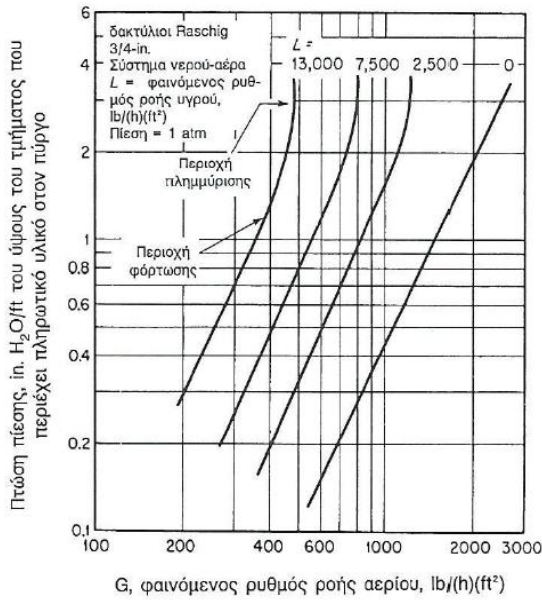
Η απώλεια της ενεργής επιφάνειας που οφείλεται σε ακατάλληλη κατανομή του υγρού μπορεί να μειωθεί με τη χρήση ενδιάμεσων ανακατανομέων.

Η πλήρης διαβροχή τον πληρωτικού υλικού που επιτυγχάνεται με προπλημμύριση της στήλης στην αρχή της λειτουργίας ή με τη χρήση ενός αυτοδιαβρεχόμενου πληρωτικού υλικού, όπως πληρωτικό υλικό με προεξοχές μπορεί να μειώσει τις επιζήμιες επιδράσεις της κακής κατανομής του υγρού.

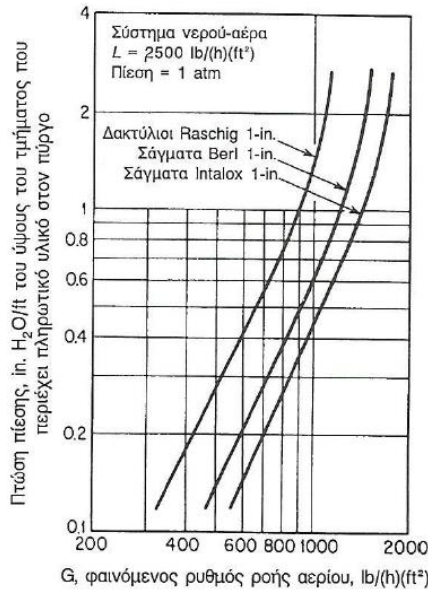
### 6.3.2 ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΙΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΕΠΑΦΗΣ

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την πτώση πίεσης σε πύργους με πληρωτικό υλικό είναι (1) οι ρυθμοί ροής των ρευστών, (2) η πυκνότητα και το ιξώδες των ρευστών και (3) το μέγεθος, το σχήμα, ο προσανατολισμός και η επιφάνεια των σωματιδίων του πληρωτικού υλικού. Το Σχήμα 6.19 παρουσιάζει τις επιδράσεις των ρυθμών ροής σε σταθερή πίεση λειτουργίας. Το Σχήμα 6.21 παρουσιάζει πώς η αυξημένη ταχύτητα τον αερίου που οφείλεται στη μείωση της πίεσης λειτουργίας μπορεί να επηρεάσει την πτώση πίεσης.

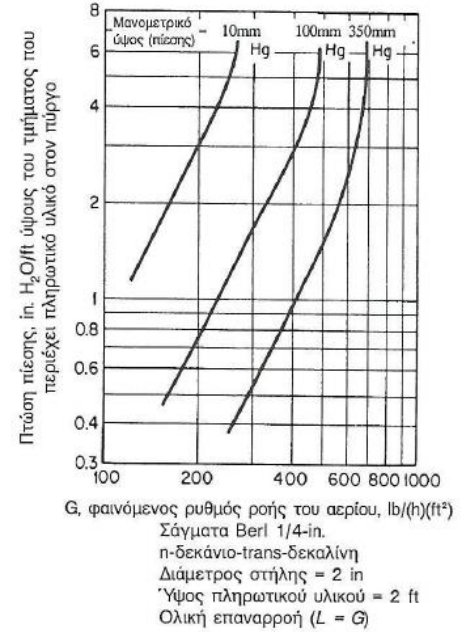
Όπως φαίνεται στα Σχήματα 6.19 έως 6.21, η γραφική παράσταση της πτώσης της πίεσης ανά πόδι ύψους του τμήματος του πύργου που περιέχει πληρωτικό υλικό ως προς το ρυθμό ροής τον αερίου σε ένα λογαριθμικό διάγραμμα είναι μια ευθεία γραμμή στη χαμηλότερη περιοχή των πτώσεων πίεσης. Το σημείο όπου η γραμμή ξεκινάει να κυρτώνεται προς τα πάνω ορίζεται συχνά ως σημείο φόρτωσης (loading point), δηλώνοντας ότι το υγρό αρχίζει να συσσωρεύεται στη στήλη και να μειώνει τον ενεργό ελεύθερο χώρο για τη ροή τον αερίου. Στο σημείο πλημμύρισης (flooding point) η καμπύλη της πτώσης πίεσης ως προς το ρυθμό ροής τον αερίου γίνεται σχεδόν κατακόρυφη και στην κορυφή τον πληρωτικού υλικού αρχίζει να συσσωρεύεται ένα στρώμα υγρού. Το σημείο πλημμύρισης αντιπροσωπεύει τις άνω οριακές συνθήκες για την πτώση πίεσης και τους ρυθμούς των ρευστών για την πρακτική λειτουργία τον πύργου.



**ΣΧΗΜΑ 6.19:** Πτώση πίεσης σε πύργους με πληρωτικό υλικό συνατήσει του ρυθμού ροής του αερίου και του υγρού.



**ΣΧΗΜΑ 6.20:** Πτώση πίεσης σε πύργους με πληρωτικό υλικό συνατήσει του ρυθμού ροής του αερίου και του τύπου του πληρωτικού υλικού.



**ΣΧΗΜΑ 6.21:** Πτώση πίεσης σε πύργους με πληρωτικό υλικό συνατήσει του ρυθμού ροής του αερίου και της πίεσης λειτουργίας.

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΤΩΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΣΕ ΠΥΡΓΟΥΣ ΜΕ ΠΛΗΡΩΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

Έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης σε πύργους με πληρωτικό υλικό. Πολλές από αυτές τις μεθόδους βασίζονται κυρίως σε πειραματικά δεδομένα τον συστήματος νερού και αέρα που ρέουν κατ' αντιστροφή μέσα σε διάφορους τύπους πύργων με πληρωτικό υλικό. Εξαιτίας της εμπειρικής φύσης αυτών των συσχετίσεων και του γεγονότος ότι δεν περιλαμβάνονται οι επιδράσεις κάποιων από τις μεταβλητές, είναι πάντα καλύτερο κατά το σχεδιασμό των πύργων με πληρωτικό υλικό να προβλέπονται οι πτώσεις πίεσης με βάση τα πειραματικά δεδομένα που λαμβάνονται με εξοπλισμό ο οποίος λειτουργεί κάτω από συνθήκες όμοιες με αυτές που εξετάζονται στο σχεδιασμό. Αν δεν υπάρχουν διαθέσιμα τέτοιου είδους

δεδομένα, μπορούν να γίνουν προσεγγίσεις χρησιμοποιώντας τις μεθόδους που περιγράφονται παρακάτω.

### ΔΙΑΒΡΕΧΟΜΕΝΑ ΠΛΗΡΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Επειδή η λειτουργία των πύργων πληρωτικών υλικών στην περιοχή ανάμεσα στη φόρτωση και στο σημείο πλημμύρισης μπορεί να δίνει ακανόνιστες διακυμάνσεις, πολλοί πύργοι λειτουργούν στην περιοχή προφόρτωσης. Σε αυτή την περιοχή η κλίση των γραμμών των Σχημάτων 6.19 έως 6.21 είναι περίπου 2.0, άρα η πτώση πίεσης μπορεί να θεωρηθεί ως ευθέως ανάλογη τον τετραγώνου της μαζικής ταχύτητας του αερίου.

Ο Leva (1954) συσχέτισε πειραματικά δεδομένα και ανέπτυξε την παρακάτω εμπειρική εξίσωση για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης σε κλίνες με πληρωτικό υλικό κάτω από συνθήκες προφόρτωσης με ταυτόχρονη αντιρροή του υγρού και τον αερίου:

$$\frac{\Delta p}{h} = \gamma(10)^{\Phi L / \rho_L} \frac{G^2}{\rho_G} \quad (6.12)$$

όπου  $\Delta p$  = πτώση πίεσης, psf

$h$  = ύψος τμημάτων με πληρωτικό υλικό στον πύργο, ft

$\gamma, \Phi$  = σταθερές με τιμή εξαρτώμενη από το μέγεθος και τον τύπο του πληρωτικού υλικού (βλ. Πίνακα 6.1)

$L$  = φαινόμενη μαζική ταχύτητα του υγρού (βασισμένη στην επιφάνεια διατομής του άδειου πύργου), lb/(h)(ft<sup>2</sup>)

$\rho_L$  = πυκνότητα του υγρού, lb/ft<sup>3</sup>

$G$  = φαινόμενη μαζική ταχύτητα του αερίου (βασισμένη στην επιφάνεια διατομής του άδειου πύργου), lb/(h)(ft<sup>2</sup>)

$\rho_G$  = πυκνότητα του αερίου, lb/ft<sup>3</sup>



Στην παραπάνω εξίσωση δεν περιλαμβάνεται η επίδραση των ιξώδους του υγρού. Παρ'όλο που η αύξηση του ιξώδους του υγρού τείνει να προκαλέσει μια αύξηση στην πτώση πίεσης αν οι ρυθμοί ροής διατηρούνται σταθεροί, τα αποτελέσματα της εξίσωσης μπορούν να θεωρηθούν ως λογική προσέγγιση, αν το υγρό έχει ιξώδες μικρότερο από 2 centipoises. Στο σημείο πλημμύρισης η πτώση πίεσης ανά πόδι ύψους του πληρωτικού υλικού στον πύργο, για ένα συγκεκριμένο πληρωτικό υλικό και για συγκεκριμένα ρευστά, παραμένει περίπου σταθερή ως προς τις μεταβολές των ρυθμών των ρευστών και της πίεσης λειτουργίας.

Πληρωτικό υλικό	Ονομαστικό μέγεθος in.	$\gamma \times 10^8$	$\Phi \times 10^3$	Ισχύει για την περιοχή του $L$ , lb/(h)(ft <sup>2</sup> )
Δακτύλιοι Raschig	1/2	139	7.2	300-9000
	3/4	33	4.5	2000-11,000
	1	32	4.3	400-27,000
	1 1/2	12	4.0	700-18,000
	2	11	2.3	700-22,000
Σάγματα Berl	1/2	60	3.4	300-14,000
	3/4	24	3.0	400-14,000
	1	16	3.0	700-29,000
	1 1/2	8	2.3	700-22,000
Σάγματα Intalox	1	12	2.8	2500-14,000
	1 1/2	6	2.3	2500-14,000

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1: Σταθερές για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης σε πύργους με πληρωτικό υλικό.

## ΞΗΡΑ ΠΛΗΡΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Η παρακάτω εξίσωση, που αναπτύχθηκε από τον Ergun (1952), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η πτώση πίεσης που προκαλείται από τη ροή ενός αερίου μέσα από ξηρά πληρωτικά υλικά:

$$\frac{\Delta p}{h} = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{G^2}{d_p g_c \rho_G} \left[ \frac{150(1-\varepsilon)\mu_G}{d_p G} + 1.75 \right] \quad (6.13)$$

όπου  $\varepsilon$  = κλάσμα τον κενού όγκου στην κλίνη,  $\text{ft}^3$  κενό/  $\text{ft}^3$  όγκου του πύργου με πληρωτικό υλικό (βλ. Πίνακα 6.2)

$\mu_G$  = απόλυτο ιξώδες του αερίου,  $\text{lb}/(\text{ft})(\text{h})$

$d_p$  = ενεργή διάμετρος τον σωματιδίου του πληρωτικού υλικού,  $\text{ft}$ , ή διάμετρος μιας σφαίρας με ίδιο λόγο επιφάνειας προς όγκο με το σωματίδιο του πληρωτικού υλικού  $=6(1-\varepsilon)\alpha_p$

$\alpha_p$  = εμβαδό επιφάνειας του πληρωτικού υλικού ανά μονάδα όγκου του πύργου με πληρωτικό υλικό,  $\text{ft}^2/\text{ft}^3$  (βλ. Πίνακα 6.2)

Η παραπάνω εξίσωση λαμβάνει υπ' όψιν τις ταυτόχρονες κινητικές και ιξώδεις απώλειες ενέργειας και ισχύει στην περίπτωση της μονοφασικής ροής υγρών και αερίων.

Πληρωτικό υλικό	Ονομαστικό μέγεθος, in.	Προσεγγιστικό μέσο βάρους ανά όγκο του πύργου, lb	Προσεγγιστική μέση συνολική επιφάνεια του πληρωτικού υλικού, $\text{ft}^2/\text{ft}^3$ του όγκου του πύργου	Ποσοστό του ελεύθερου χώρου του αερίου % $\times 100$	Συντελεστής κλίσησης, $\alpha_p/\text{ft}^2$ , ενεργή επιφάνεια/ κλάσμα κενού όγκου) $\text{ft}^2$ ανά $\text{ft}^3$ του όγκου του πύργου (τιμές ετήσις κλίσησης για να χρησιμοποιηθούν με το Σχ. 16-20)
Πληρωτικά υλικά με τυχαία διάταξη:					
Κεραμικό	$\frac{1}{4}$	46	240	73	768
Δακτύλιος Raschig	$\frac{1}{2}$	51	134	68	494
	$\frac{3}{4}$	50	122	64	517
	1	44	80	73	199
	1	40	58	73	150
	$1\frac{1}{2}$	42	35	68	108
	2	37	28	74	46
	3	40	19	74	
Δακτύλιος Raschig από άνθρακα	$\frac{1}{4}$	27	114	74	373
	1	27	57	74	170
	$1\frac{1}{2}$	34	38	67	92
	2	27	29	74	56
Δακτύλιος Raschig από χάλυβα (πλάτος τοιχώματος = 1/16 in.)	$\frac{1}{2}$	132	118	73	
	1	73	57	85	
	2	38	31	92	
Δακτύλιος Leaning (από πορσελίνα)	1	50	69	66	
	$\frac{1}{2}$	58	40	60	
	2	49	32	68	
Σόγματα Intalox (από πορσελίνα)	$\frac{1}{2}$	34	190	78	
	1	34	78	78	100
	$1\frac{1}{2}$	30	60	81	52
Σόγματα Berl (από πορσελίνα)	$\frac{1}{4}$	56	274	58	4225
	$\frac{1}{2}$	54	155	60	574
	1	45	79	69	229
Δακτύλιος Pall (από χάλυβα)	$1\frac{1}{4}$	38	52	70	79
	1	30	63	94	48
	$1\frac{1}{2}$	26	39	95	28
	2	24	31	96	20
Δακτύλιος Pall (από ποικιλοπορσελίνα)	$\frac{3}{8}$	$7\frac{1}{4}$	104	87	97
	1	$5\frac{1}{2}$	63	90	52
	$1\frac{1}{2}$	$4\frac{3}{4}$	39	91	32
	2	$4\frac{1}{2}$	31	92	25
Πληρωτικά υλικά με συγκεκριμένη διάταξη (η διάταξη τους είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη επιφάνεια ανά μονάδα όγκου του πύργου):					
Δακτύλιος Raschig	2		32		80
Δακτύλιος στρογγυλού διαγράμμου (από πορσελίνα)	$4 \times 4 \times \frac{2}{9}$	81	32		53
	$6 \times 6 \times \frac{2}{9}$	70	21		48

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2: Φυσικά χαρακτηριστικά εμπορικών πληρωτικών υλικών.

### 6.3.3 ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΑΤΜΟΥ

Η οριακή ταχύτητα του ατμού για τη λειτουργία ενός πύργου με πληρωτικό υλικό καθορίζεται από το σημείο πλημμύρισης. Όπως και στην περίπτωση των πύργων που χρησιμοποιούν συσκευές επαφής πεπερασμένων βαθμίδων, ο μηχανικός σχεδιασμού μπορεί να προσδιορίσει την απαιτούμενη διάμετρο ενός πύργου με πληρωτικό υλικό με βάση την οριακή ταχύτητα του ατμού. Η μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα του ατμού ορίζεται συνήθως ως η φαινόμενη ταχύτητα σε συνθήκες πλημμύρισης. Επειδή η λειτουργία του πύργου μπορεί να γίνει ασταθής καθώς προσεγγίζεται το σημείο πλημμύρισης, η σχεδιαστική τιμή της επιτρεπτής ταχύτητας του ατμού υπολογίζεται συνήθως ότι είναι το 50-70% της μέγιστης επιτρεπτής ταχύτητας. Αυτή η επιτρεπτή ταχύτητα χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η διάμετρος της στήλης.

#### ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΙΣΗΣ ΣΕ ΠΥΡΓΟΥΣ ΑΠΟΣΤΑΞΗΣ ΜΕ ΠΛΗΡΩΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

Όταν η ταχύτητα σε έναν πύργο με πληρωτικό υλικό είναι ίση με την ταχύτητα πλημμύρισης, το υγρό αρχίζει να συσσωρεύεται πάνω στο πληρωτικό υλικό. Επομένως, μπορεί να υποθεθεί ότι η πλημμύριση συμβαίνει όταν η προς τα κάτω πίεση του κατερχόμενου υμένα ή των κατερχόμενων σταγόνων είναι ίση με την προς τα πάνω πίεση της ταχύτητας του ανερχόμενου ατμού. Με αυτή την υπόθεση και θεωρώντας αμελητέα την πυκνότητα του αερίου σε σύγκριση με την πυκνότητα του υγρού, η εξίσωση του ισοζυγίου πίεσης μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\left( \frac{V_m^2}{2g} \right) \rho_G = H_p \rho_L \quad (6.14)$$

όπου το  $H$  είναι μια σταθερά για κάθε πληρωτικό υλικό και μπορεί να θεωρηθεί ως η μέση διάμετρος ή το μήκος των υμένα των σταγόνων του υγρού. Αν το  $K_p$  ορίζεται ως  $(2gH_p)^{0.5}$ , η παραπάνω εξίσωση μπορεί να εκφραστεί με μια μορφή παρόμοια με την Souders-Brown ως εξής:

$$V_m = K_p \sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_G}} \quad (6.15)$$

Επειδή η φαινόμενη μαζική ταχύτητα του αερίου είναι ίση με  $V_{rG}$ , η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί με την παρακάτω εναλλακτική μορφή:

$$G_m = V_m \rho_G = K_p \sqrt{p_L p_G} \quad (6.16)$$

Οι εξισώσεις αυτές δεν περιλαμβάνουν τις επιδράσεις που οφείλονται στο ιξώδες του υγρού ή στο ρυθμό ροής του υγρού. Κατά συνέπεια, οι εξισώσεις είναι πολύ χρήσιμες όταν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα για το πληρωτικό υλικό σε γνωστούς λόγους  $L/G$  και σε γνωστά ιξώδη υγρού. Για σχεδιαστικούς λόγους, οι επιδράσεις του ιξώδους του υγρού μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, αν το ιξώδες είναι μικρότερο από 2 centipoises. Επειδή μπορεί να γίνουν λάθη αν αγνοηθεί η επίδραση που ασκεί ο ρυθμός ροής του υγρού, η χρήση των δύο τελευταίων εξισώσεων θα πρέπει να περιοριστεί σε περιπτώσεις όπου ο ρυθμός ροής του υγρού είναι μικρότερος από 1.5 φορές το ρυθμό ροής του αερίου.

## 6.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΥΡΓΩΝ ΜΕ ΔΙΣΚΟΥΣ ΚΑΙ ΠΥΡΓΩΝ ΜΕ ΠΛΗΡΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Θεωρητικά η επιλογή ανάμεσα σε έναν πύργο με δίσκους ή ένα πύργο με πληρωτικό υλικό για μια συγκεκριμένη διεργασία μεταφοράς μάζας πρέπει να βασιστεί σε μια λεπτομερή ανάλυση κόστους για τους δύο τύπους συσκευών.

Έτσι, ο βέλτιστος οικονομικός σχεδιασμός για κάθε τύπο πρέπει να αναπτυχθεί με λεπτομέρεια και η τελική επιλογή πρέπει να βασιστεί σε μια μελέτη των κόστους και τον κέρδους στις βέλτιστες συνθήκες. Παρόλα αυτά, σε πολλές περιπτώσεις, η απόφαση μπορεί να βασιστεί σε μια ποιοτική ανάλυση των σχετικών πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων, οπότε δε χρειάζεται λεπτομερής σύγκριση κόστους. Όταν πρέπει να επιλεγεί ένας από τους δύο τύπους πύργων θα πρέπει να μελετηθούν τα παρακάτω γενικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

1. Η απόδοση βαθμίδας για πύργους με πληρωτικό υλικό πρέπει να βασίζεται σε πειραματικές δοκιμές για κάθε τύπο πληρωτικού υλικού. Η απόδοση ποικίλει όχι μόνο με τον τύπο και το μέγεθος του πληρωτικού υλικού, αλλά και με τους ρυθμούς ροής των ρευστών, τις ιδιότητες των ρευστών, τη διάμετρο της στήλης, την πίεση λειτουργίας και, γενικά, την έκταση της διασποράς του υγρού στη διαθέσιμη επιφάνεια του πληρωτικού υλικού.
2. Λόγω των δυσκολιών της διασποράς του υγρού στους πύργους με πληρωτικό υλικό, ο σχεδιασμός των πύργων με δίσκους είναι αρκετά πιο αξιόπιστος και απαιτεί μικρότερο συντελεστή ασφαλείας, όταν ο λόγος της μαζικής ταχύτητας του υγρού προς τη μαζική ταχύτητα του αερίου είναι μικρός.
3. Οι πύργοι με δίσκους μπορούν να σχεδιασθούν για μεγάλη περιοχή ρυθμών ροής του υγρού χωρίς πλημμύριση.
4. Αν η διεργασία περιλαμβάνει υγρά τα οποία περιέχουν διεσπαρμένα στερεά, προτιμάται η χρήση ενός πύργου με δίσκους, επειδή οι δίσκοι μπορούν να καθαριστούν ευκολότερα.
5. Αν απαιτείται ενδιάμεση ψύξη για να απομακρυνθεί η θερμότητα της αντίδρασης ή της διάλυσης προτιμώνται οι πύργοι με δίσκους, επειδή οι σπείρες ψύξης μπορούν να τοποθετηθούν στους δίσκους ή εναλλακτικά η γραμμή παραλαβής του υγρού από δίσκο σε δίσκο μπορεί να περάσει μέσα από έναν εξωτερικό ψύκτη.

6. Το συνολικό βάρος ενός ξηρού πύργου με δίσκους είναι συνήθως μικρότερο από εκείνο ενός πύργου με πληρωτικό υλικό που έχει σχεδιαστεί για το ίδιο φορτίο. Παρόλα αυτά, αν λαμβάνεται υπ' όψιν η κατακράτηση του υγρού κατά τη διάρκεια της λειτουργίας και οι δύο τύποι των πύργων έχουν περίπου το ίδιο βάρος.
7. Όταν η διεργασία περιλαμβάνει μεγάλες μεταβολές θερμοκρασίας, όπως στην απόσταξη, προτιμώνται οι πύργοι με δίσκους, επειδή η θερμική διαστολή ή συστολή των τμημάτων του εξοπλισμού μπορεί να συντρίψει το πληρωτικό υλικό.
8. Γενικά υπάρχουν περισσότερα και πιο αξιόπιστα δεδομένα σχεδιασμού για τους πύργους με δίσκους παρά για τους πύργους με πληρωτικό υλικό.
9. Οι πύργοι με πληρωτικό υλικό τυχαίας τοποθέτησης σπάνια σχεδιάζονται με διαμέτρους μεγαλύτερες από 1.2 m., ενώ οι διάμετροι των εμπορικών πύργων με δίσκους σπάνια είναι μικρότερες από 0.6 m.
10. Έχει αποδειχθεί ότι οι πύργοι με πληρωτικό υλικό είναι πιο φθινοί και κατασκευάζονται ευκολότερα από τους πύργους με δίσκους, αν τα ρευστά είναι ισχυρά διαβρωτικά.
11. Αν τα υγρά εμφανίζουν μεγάλη τάση αφρισμού προτιμώνται συνήθως οι πύργοι με πληρωτικό υλικό.
12. Η ποσότητα της κατακράτησης του υγρού είναι σχετικά μικρή στους πύργους με πληρωτικό υλικό.
13. Η πτώση πίεσης μέσω των πύργων με πληρωτικό υλικό μπορεί να είναι μικρότερη από την πτώση πίεσης μέσω των πύργων με δίσκους που έχουν σχεδιαστεί για την ίδια διεργασία. Αυτό το πλεονέκτημα, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το πληρωτικό υλικό μειώνει την πιθανότητα να καταρρεύσει το τοίχωμα τον πύργου, καθιστά τους πύργους με πληρωτικό υλικό ιδιαίτερα δημοφιλείς σε διεργασίες κενού.

## 6.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

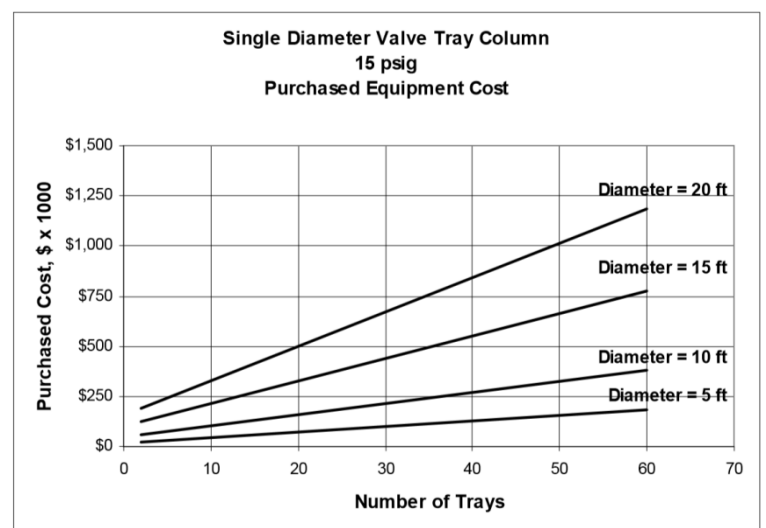
Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στην επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού είναι ο παράγοντας του κόστους. Σε έναν προκαταρκτικό σχεδιασμό μπορεί να γίνει μία αρχική εκτίμηση η οποία ωστόσο, ενδέχεται να κρύβει αποκλίσεις. Όσο πιο λεπτομερής ο σχεδιασμός, τόσο πιο μικρές αποκλίσεις θα έχει και η προσέγγιση κόστους. Τα διαγράμματα και οι υπολογισμοί που θα γίνουν παρακάτω είναι πιθανό έχουν αποκλίσεις της τάξης -30%/50% για τις εκτιμήσεις μεγέθους και -15%/30% για εκτιμήσεις προϋπολογισμού.

### 6.5.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΕ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΒΑΘΜΙΔΩΝ ΕΠΑΦΗΣ

Παρακάτω θα παραθέσουμε ένα παράδειγμα προκαταρκτικού υπολογισμού κόστους μίας αποστακτικής στήλης με βαλβίδες. Σαν δεδομένα θα θεωρήσουμε ότι:

- το υλικό του κελύφους είναι ατσάλι A515
- η θερμοκρασία σχεδιασμού είναι 650°F
- η πίεση σχεδιασμού είναι 15 psig
- το ύψος της στήλης 17-133ft.
- η απόσταση ανάμεσα στους δίσκους είναι 24in.
- το υλικό των δίσκων είναι ατσάλι A285C
- το πάχος των δίσκων είναι 0.19in.

Θα επιλέξουμε εμείς 20 ως αριθμό δίσκων και διάμετρο 20ft. Από το Σχήμα 6.22 παίρνουμε σαν δεδομένο πως το κόστος αγοράς είναι περίπου 500.000\$.



**ΣΧΗΜΑ 6.22:** Διάγραμμα αριθμού δίσκων-κόστους αγοράς για στήλη με βαλβίδες

Equipment Type	Factor (%)	Equipment Type	Factor (%)
Absorber	20	Hammermill	25
Ammonia Still	20	Heater	20
Ball Mill	30	Heat Exchanger	20
Briquetting machine	25	Lime Leg	15
Centrifuge	20	Methanator (catalytic)	30
Clarifier	15	Mixer	20
Coke Cutter	15	Precipitator	25
Coke Drum	15	Regenerator (packed)	20
Condenser	20	Retort	30
Conditioner	20	Rotoclone	25
Cooler	20	Screen	20
Crusher	30	Scrubber (water)	15
Cyclone	20	Settler	15
Decanter	15	Shift converter	25
Distillation column	30	Splitter	15
Evaporator	20	Storage Tank	20
Filter	15	Stripper	20
Fractionator	25	Tank	20
Furnace	30	Vaporizer	20
Gasifier	30		

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3: Συντελεστές εργασίας για την εγκατάσταση του εξοπλισμού.

Temperature Pressure		≤400 °F		>400 °F	
		≤ 150 psig (%)	>150 psig (%)	≤ 150 psig (%)	>150 psig (%)
<b>Foundations</b>	<i>Material</i>	5	6	6	5
	<i>Labor</i>	133	133	133	133
<b>Structural Steel</b>	<i>Material</i>	5	5	5	6
	<i>Labor</i>	50	50	50	50
<b>Buildings</b>	<i>Material</i>	3	3	3	4
	<i>Labor</i>	100	100	100	100
<b>Insulation</b>	<i>Material</i>	1	1	2	3
	<i>Labor</i>	150	150	150	150
<b>Instruments</b>	<i>Material</i>	6	7	7	7
	<i>Labor</i>	40	40	75	40
<b>Electrical</b>	<i>Material</i>	8	9	6	9
	<i>Labor</i>	75	75	40	75
<b>Piping</b>	<i>Material</i>	45	40	40	40
	<i>Labor</i>	50	50	50	50
<b>Painting</b>	<i>Material</i>	0.5	0.5	0.5	0.5
	<i>Labor</i>	300	300	300	300
<b>Miscellaneous</b>	<i>Material</i>	3	4	4	5
	<i>Labor</i>	80	80	80	80

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.4: Συντελεστές εργασίας και εξοπλισμού για διεργασίες μεταφοράς μάζας.

Εφόσον έχουμε μία αποστακτική στήλη από τον Πίνακα 6.3 λαμβάνουμε συντελεστή 30%.

Για πίεση 15 psig και θερμοκρασία 650°F η τρίτη στήλη του Πίνακα 6.4 μας δίνει τα δεδομένα που θέλουμε για τον σχεδιασμό κόστους που ακολουθεί.



Bare cost:		500.000\$
Setting Cost:	0,3*500.000	150.000\$
Bulk Installations:		
Foundations:		
Material:	0,06*500.000	30.000\$
Labor:	1,33*30.000	40.000\$
Structural Steel:		
Material:	0,05*500.000	25.000\$
Labor:	0,5*25.000	12.500\$
Buildings:		
Material:	0,03*500.000	15.000\$
Labor:	1*15.000	15.000\$
Insulation:		
Material:	0,02*500.000	10.000\$
Labor:	1,5*10.000	15.000\$
Instruments:		
Material:	0,07*500.000	35.000\$
Labor:	0,75*35.000	26.250\$
Electrical:		
Material:	0,06*500.000	30.000\$
Labor:	0,4*30.000	12.000\$
Piping:		
Material:	0,4*500.000	200.000\$
Labor:	0,5*200.000	100.000\$
Painting:		
Material:	0,005*500.000	2.500\$
Labor:	3*2.500	7.500\$
Miscellaneous:		
Material:	0,04*500.000	20.000\$
Labor:	0,8*20.000	16.000\$
<b><u>Total Installed Cost:</u></b>		<b>1.261.750\$</b>

Παραπάνω έγιναν αναλυτικά οι υπολογισμοί του προκαταρκτικού σχεδιασμού. Στον Πίνακα 6.5 που παρουσιάζεται στη συνέχεια υπάρχουν τα αποτελέσματα για κάθε μεταβολή της διαμέτρου της στήλης και του αριθμού των δίσκων και έτσι, μας δίνεται η ευκαιρία σύγκρισης με το αποτέλεσμα που προήλθε από τον αναλυτικό υπολογισμό.

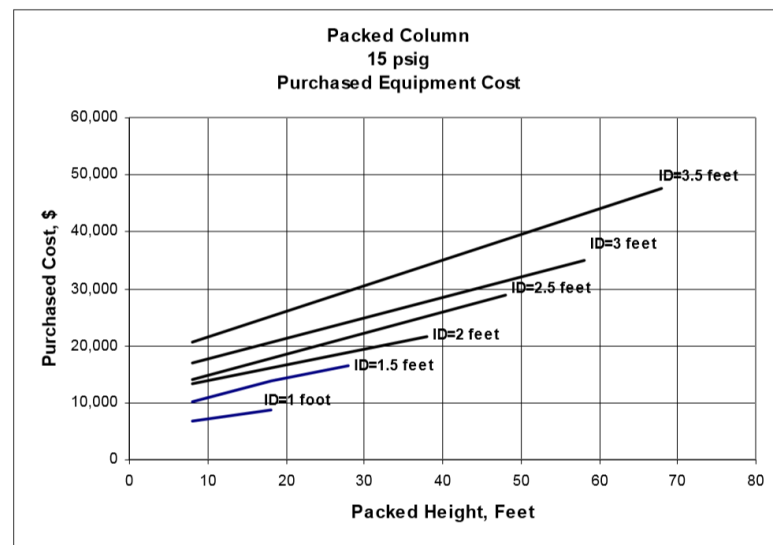
Diameter (ft)	Number of Trays	15 psig		150 psig	
		Purchased Equipment Cost (\$)	Installed Cost (\$)	Purchased Equipment Cost (\$)	Installed Cost (\$)
5	2	\$30,600	\$159,500	\$35,200	\$161,300
5	6	\$42,300	\$175,700	\$50,000	\$180,600
5	10	\$49,000	\$192,100	\$57,300	\$192,000
5	14	\$56,100	\$203,400	\$67,300	\$206,200
5	20	\$69,700	\$225,900	\$84,700	\$232,500
5	26	\$82,300	\$246,200	\$95,800	\$251,000
5	34	\$99,800	\$285,800	\$118,500	\$285,300
5	40	\$115,200	\$310,300	\$134,500	\$315,300
5	46	\$132,000	\$335,200	\$145,000	\$332,700
5	52	\$164,900	\$378,000	\$185,200	\$382,600
5	60	\$204,900	\$429,700	\$226,000	\$435,000
10	2	\$62,500	\$249,000	\$89,600	\$269,500
10	6	\$88,400	\$282,100	\$122,800	\$309,900
10	10	\$109,700	\$311,100	\$151,800	\$346,700
10	14	\$128,600	\$349,700	\$180,700	\$386,000
10	20	\$160,400	\$394,800	\$220,900	\$443,400
10	26	\$188,500	\$436,200	\$254,200	\$492,200
10	34	\$233,600	\$498,700	\$312,500	\$565,800
10	40	\$263,800	\$558,700	\$356,300	\$624,000
10	46	\$297,100	\$605,000	\$391,300	\$678,300
10	52	\$343,000	\$666,100	\$450,000	\$754,600
10	60	\$388,400	\$727,700	\$501,900	\$822,100
15	2	\$119,900	\$396,200	\$221,500	\$475,100
15	6	\$171,000	\$469,300	\$293,000	\$559,000
15	10	\$225,700	\$539,500	\$364,500	\$652,400
15	14	\$262,500	\$587,100	\$425,800	\$725,200
15	20	\$332,400	\$677,700	\$522,400	\$843,700
15	26	\$387,000	\$767,500	\$600,200	\$943,900
15	34	\$473,900	\$878,600	\$722,100	\$1,089,500
15	40	\$538,600	\$958,700	\$808,900	\$1,191,500
15	46	\$620,900	\$1,061,600	\$907,000	\$1,314,300
15	52	\$689,200	\$1,147,900	\$997,700	\$1,423,400
15	60	\$786,500	\$1,269,800	\$1,145,800	\$1,594,100
20	2	\$174,900	\$574,900	\$402,000	\$806,800
20	6	\$247,900	\$674,400	\$517,300	\$945,200
20	10	\$359,400	\$815,300	\$605,100	\$1,064,600
20	14	\$421,000	\$892,200	\$715,700	\$1,190,500
20	20	\$508,000	\$1,023,200	\$857,000	\$1,363,200
20	26	\$585,300	\$1,114,100	\$993,600	\$1,520,800
20	34	\$726,300	\$1,285,400	\$1,203,000	\$1,762,200
20	40	\$834,300	\$1,421,000	\$1,347,900	\$1,931,400
20	46	\$952,800	\$1,560,900	\$1,526,400	\$2,138,200
20	52	\$1,051,100	\$1,682,200	\$1,669,100	\$2,314,600
20	60	\$1,195,500	\$1,856,100	\$1,892,600	\$2,568,700

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.5: Κόστος εγκατάστασης με τα παραπάνω δεδομένα με μεταβλητή διάμετρο και αριθμό δίσκων.

## 6.5.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΕ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΕΠΑΦΗΣ

Παρόμοιος είναι και ο τρόπος με τον οποίο εκτιμούμε το κόστος και στις συσκευές συνεχούς επαφής. Άξιο αναφοράς είναι το επιπλέον κόστος του πληρωτικού υλικού που φαίνεται στον Πίνακα 6.6 και πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν. Σαν δεδομένα θα θεωρήσουμε ότι:

- το υλικό του κελύφους είναι ατσάλι A515
- η θερμοκρασία σχεδιασμού είναι 650°F
- η πίεση σχεδιασμού είναι 15 psig



ΠΙΝΑΚΑΣ 6.6: Κόστος πληρωτικού υλικού σε \$/ft.<sup>3</sup>

Εφόσον έχουμε ένα πύργο απορρόφησης από τον Πίνακα 6.3 λαμβάνουμε συντελεστή 20%.

Για πίεση 15 psig και θερμοκρασία 650°F η τρίτη στήλη του Πίνακα 6.4 μας δίνει τα δεδομένα που θέλουμε για τον σχεδιασμό κόστους που ακολουθεί.

Επιλέγοντας το ύψος του πύργου και τη διάμετρο του προκύπτουν το κόστος αγοράς του πύργου και το κόστος του πληρωτικού υλικού από το Σχήμα 6.23 και τον Πίνακα 6.6 αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 6.7 παρακάτω.

Diameter (Inches)	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
<b>Pall Rings</b>					
Polypropylene	33	29	21	8	-
Stainless Steel	130	118	92	76	-
<b>INTALOX Saddles</b>					
Ceramic	31	28	23	21	-
Porcelain	32	29	24	21	-
<b>Raschig Rings</b>					
Ceramic	119	14	12	12	11
Porcelain	-	17	15	12	11
Stainless Steel	-	111	94	59	54
Carbon Steel	-	37	31	20	18
<b>Activated Carbon</b>					
Activated Carbon	25				
<b>13X Molecular Sieve</b>					
13X Molecular Sieve	61				
<b>Silica Gel</b>					
Silica Gel	94				
<b>Calcium Chloride</b>					
Calcium Chloride	11				

ΣΧΗΜΑ 6.23: Διάγραμμα ύψους πύργου-κόστους αγοράς για πύργο με πληρωτικό υλικό.

Diameter (Feet)	Tangent/ Tangent Height (Feet)	Packed Height (Feet)	Number of Sections	15 psig		150 psig	
				Purchased Equipment Cost (\$)	Installed Cost (\$)	Purchased Equipment Cost (\$)	Installed Cost (\$)
1	10	8	1	\$6,700	\$64,000	\$6,600	\$62,000
1	20	18	3	\$8,700	\$73,400	\$9,000	\$67,800
1.5	10	8	1	\$10,300	\$75,500	\$11,300	\$69,800
1.5	20	18	2	\$13,900	\$83,000	\$15,400	\$77,600
1.5	30	28	3	\$16,600	\$89,700	\$18,700	\$84,800
2	10	8	1	\$12,900	\$82,800	\$13,900	\$76,500
2	20	18	2	\$16,900	\$90,900	\$18,500	\$85,000
2	30	28	2	\$18,600	\$97,000	\$20,100	\$90,900
2	40	38	3	\$21,500	\$105,500	\$23,600	\$101,400
2.5	10	8	1	\$14,700	\$92,200	\$15,400	\$82,400
2.5	20	18	1	\$16,700	\$98,700	\$17,600	\$89,000
2.5	30	28	2	\$22,400	\$112,000	\$23,800	\$104,200
2.5	40	38	2	\$23,200	\$116,000	\$24,600	\$108,000
2.5	50	48	3	\$30,000	\$127,800	\$31,800	\$119,800
3	10	8	1	\$16,200	\$98,700	\$17,200	\$89,400
3	20	18	1	\$21,900	\$110,800	\$23,500	\$101,900
3	30	28	2	\$24,300	\$119,700	\$25,900	\$112,100
3	40	38	2	\$26,500	\$125,300	\$29,200	\$118,500
3	50	48	3	\$31,200	\$135,400	\$34,700	\$129,500
3	60	58	3	\$35,400	\$147,400	\$37,500	\$135,900
3.5	10	8	1	\$20,600	\$112,300	\$23,100	\$100,000
3.5	20	18	1	\$26,400	\$125,000	\$30,600	\$118,200
3.5	30	28	2	\$30,400	\$135,800	\$35,000	\$126,300
3.5	40	38	2	\$31,500	\$140,800	\$36,300	\$131,300
3.5	50	48	3	\$38,700	\$157,600	\$45,000	\$145,700
3.5	60	58	3	\$43,400	\$166,600	\$48,000	\$152,500
3.5	70	68	4	\$48,400	\$178,500	\$57,600	\$168,000

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.7: Κόστος εγκατάστασης με τα παραπάνω δεδομένα με μεταβλητή διάμετρο και ύψος πύργου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ:

Grundfos , *Αντλίες*, Τεχνικό Εγχειρίδιο, 2013

Loh, H.P., Lyons, J. & White, W.C.. *Process Equipment Cost Estimation Final Report*. Morgantown, January 2002

Peters, S. M. & Timmerhaus, D. K. *Σχεδιασμός και Οικονομική Μελέτη Εγκαταστάσεων για Μηχανικούς*. 4η Έκδοση. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2002.

### ΕΛΛΗΝΙΚΗ:

Αιλιμάκης, Ε. «Εναλλάκτες Θερμότητας.»(Διπλωματική Εργασία), Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε, Σχολή Τεχνολογικών εφαρμογών, Τ.Ε.Ι Κρήτης, Ηράκλειο, 2017.

Ανδρίτσος, Ν. και Μποντόζογλου Β. *Φαινόμενα Μεταφοράς Μάζας*. Βόλος: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, 2015.

Γεντεκάκης, Ι. *Φυσικές Διεργασίες*. Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2010.

Καρακατσάνης, Μ. «Αντλίες,Σωληνώσεις,Εξαρτήματα,Εγκαταστάσεις στο Πλοιο.» (Διπλωματική Εργασία) , Ακαδημία εμπορικού ναυτικού ΑΕΝ Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη, 2005.

Κροκίδα, Μ. , Μαρίνος-Κουρής, Δ. και Μαρούλης, Ζ.Β. *Σχεδιασμός Θερμικών Διεργασιών*. Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, 2003.

Λιοδακάκης, Ε. «Είδη Αεροσυμπιεστών και Εφαρμογή σε πλοία.»(Διπλωματική Εργασία), Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού Κρήτης Σχολή Μηχανικών, Χανιά, 2013.

Μητρούδας, Κ. «Μελέτη Θαλάμου Μετρήσεων Λειτουργίας Μηχανών Εσωτερικής Καύσης σε Χαμηλή Θερμοκρασία.»(Διπλωματική Εργασία), Σέρρες, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας ,2017.

Μποντόζογλου, Β. 2015 *Εισαγωγή στις Φυσικές Διεργασίες*. Βόλος: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, <http://hdl.handle.net/11419/78>

Οικονόμου, Π. «Ανάπτυξη Υπολογιστικού Προγράμματος για την Ανάλυση και τον Σχεδιασμό Φυγοκεντρικών Αντλιών.» (Διπλωματική Εργασία) Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας Τμήμα Μηχανικών Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων, Κοζάνη, 2004.

Στέγγου-Σαγιά, Α. 2009. *Συσκευές και Εγκαταστάσεις Θερμικών Διεργασιών*. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. <http://hdl.handle.net/11419/2118>