Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου
Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών

Μελέτη, Σχεδιασμός και Προσομοίωση της Λειτουργίας Βιομηχανικού Πλυντηρίου Εξαρτημάτων με Λογισμικό CAD-CAE

Διπλωματική Εργασία

Χαράλαμπος Μαρκέτος

Επιβλέπων: Δρ. Βασίλειος Σπιτάς, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2018

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου
Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών

Μελέτη, Σχεδιασμός και Προσομοίωση της Λειτουργίας Βιομηχανικού Πλυντηρίου Εξαρτημάτων με Λογισμικό CAD-CAE

Διπλωματική Εργασία

Χαράλαμπος Μαρκέτος

Επιβλέπων: Δρ. Βασίλειος Σπιτάς, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2018

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση αυτή της εργασίας κλείνει για μένα ένας σπουδαίος και εποικοδομητικός κύκλος φοίτησης στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, για αυτό στην παρούσα φάση θα ήταν άδικο να λησμονηθούν φορείς και πρόσωπα που πέρα από το θεσμικό τους ρόλο βοηθούν χωρίς κανένα προσωπικό συμφέρον και που - ποδοσφαιρικώς ειπείν - «παίζουν για τη φανέλα». Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω, μέσα από την καρδιά μου, τον Καθηγητή μου Δρ. Βασίλη Σπιτά για τη διαρκή του στήριξη (πρακτική και ψυχολογική), την προθυμία κι αρωγή του στην επίλυση και εξήγηση οποιουδήποτε επιστημονικού θέματος προέκυπτε στην πορεία. Οι γνώσεις του, η παιδεία του, η απλότητά του, αναμφισβήτητα αποτελούν στοιχεία έμπνευσης και παράδειγμα προς μίμηση. Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω του διδακτορικούς σπουδαστές Γιώργο Βασιλείου και Νίκο Ρόγκα για την αμεσότατη απόκρισή τους στην επίλυση οποιασδήποτε απορίας, με τις παρατηρήσεις τους να μου εξοικονομούν πολύ χρόνο. Ευχαριστώ, επίσης τη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ και την οικογένεια μου, αναγκαίες προϋποθέσεις για να μπορώ αυτή τη στιγμή να γράφω αυτά τα λόγια. Τέλος, ευχαριστώ θερμά για τις εξαιρετικά βοηθητικές κατασκευαστικές τους παρατηρήσεις, οι οποίες και εφαρμόστηκαν, τον μηχανουργό Κύριο Τάκη Πουλημένο, τους τορναδόρους Σταύρο Ανδρουλιδάκη, Γεώργιο Ζαγουρή και τον μηχανολόγο Τάσο Σκαρώνη. Ευχαριστώ επίσης τους φίλους Μαρία Ρεβύθη, Αντώνη Ρουσκέτο, Αντώνη Χαραλαμπίδη και τον αδελφό μου Αντώνη Μαρκέτο, όπως και τον Κύριο Γιώργο Καϊσαρλή για την πολύτιμη βοήθεια του στην διόρθωση των μηχανολογικών σχεδίων.

Πια από καιρό Κι αργά-αργά
Εβάδιζε καταμεσής του δρόμου
...
Ενός κόσμου που ‘χε τέλος και αρχή
Έμοιαζε να τον είχανε εχθρό τους
Να υποτάξουν πάλευαν το καθετί
Το δρόμο και τον εαυτό τους
…
Για τους πολλούς Γι’ αυτό προκλητικά
Γύρευαν της ζωής το κάτι άλλο
Θες από πλάση θες από μετά
Το λίγο κάνανε πολύ και το πολύ ακόμα κι άλλο

Αντώνης Κούτης «Ενδιάμεσος Κόσμος»

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου
Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών

Μελέτη, Σχεδιασμός και Προσομοίωση της Λειτουργίας Βιομηχανικού Πλυντηρίου Εξαρτημάτων με Λογισμικό CAD-CAE

Διπλωματική Εργασία

Χαράλαμπος Μαρκέτος

Επιβλέπων: Δρ. Βασίλειος Σπιτάς, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2018

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται και σχεδιάζεται εξ ολοκλήρου μηχανή η οποία έχει ως σκοπό τον αυτόματο καθορισμό εξαρτημάτων ή ολόκληρου μπλοκ μηχανής (max Ø900mmx430mm) στα πλαίσια διαδικασιών συντήρησης και επισκευών. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται εργαζόμενο μέσο μίγμα ανακυκλωμένου νερού με απορρυπαντικό (3-5%), υπό πίεση και σε θερμοκρασία 60-80 ^{o}C. Αρχικά, γίνεται στατιστική έρευνα χαρακτηριστικών των ήδη κατασκευασμένων πλυντηρίων της παγκόσμιας αγοράς και παρουσιάζεται ο μηχανισμός του υδατικού καθαρισμού με σκοπό την αποτελεσματική χρήση του νερού. Στη συνέχεια, σχεδιάζεται δεξαμενή με σκοπό την καθίζηση ρύπων ~ 150μm, τον περιορισμό της έκτασης του αφρισμού, όπως και την απομάκρυνση του λαδιού που θα πλέει στην επιφάνεια (skimming) με σκοπό την αύξηση της διάρκειας ζωής του απορρυπαντικού. Έπειτα, σχεδιάζεται το σύστημα ψεκασμού εργαζόμενου μέσου με τη χρήση ακροφυσίων (flat pattern) με σκοπό την πλήρη κάλυψη των υπό πλύση αντικειμένων και επιλέγεται κατάλληλη αντλία για το σκοπό αυτό. Για τον όσο το δυνατόν καλύτερο καθαρισμό τα τεμάχια θα περιστρέφονται στον δίσκο όπου θα τοποθετούνται, ο οποίος θα παίρνει κίνηση από δέσμη νερού κατά το πλύσιμο. Τέλος, διαστασιολογούνται τα υπόλοιπα μέρη της κατασκευής, υπολογίζονται τα επιμέρους στοιχεία μηχανών (πλαίσιο στήριξης, συλλέκτης εργαζόμενου μέσου, περιστρεφόμενος μηχανισμός, καπάκι, σωληνώσεις κτλ.) και εξάγονται τα κατασκευαστικά σχέδια.

National Technical University of Athens
School of Mechanical Engineering
Department of Mechanical Design and Automatic Control
Machine Design Laboratory

Design and Simulation of an Industrial Parts Washing Machine using CAD-CAE software

Diploma Thesis

Charalampos Marketos

Supervisor: Dr. Vasileios Spitas, Assistant Professor NTUA

Athens 2018

Abstract

In this thesis, an industrial washing machine for parts or whole engine blocks with max loading dimension Ø900mm x 430mm is designed. Cleaning is accomplished with the use of a mixture of water and detergent (3-5%) under pressure and at temperature of 60-80 C. The water is recycled through a sedimentation tank. Initially, a statistical research of the characteristics of similar washing machines available in the global market is carried out and the aqueous cleaning essentials (cleaning chemistry, surfactant action, foaming) are presented. A sedimentation tank, in order to settle particles ~ 150μm, to reduce the extent of foaming and to remove the floating oil (skimming), increasing in this way the water solution cycle life , is designed. Furthermore, a spray washing system offering a full coverage of the parts (flat pattern nozzles) is designed and a suitable pump for this purpose is selected. For better cleaning results, the parts are placed in a disk which rotates with the power of a water jet (impact nozzle) during the washing cycle. Finally, the machine components (support frame, sink, rotating mechanism, cap, pipes etc.) are calculated and dimensioned and 2D mechanical drawings are produced.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Χαρακτηριστικά Βιομηχανικών Πλυντηρίων Ανταλλακτικών–Αρχές Υδατικού Καθαρισμού 1

1.1 Πλυντήριο καθαρισμού εξαρτημάτων 1

1.2 Υδατικός Καθαρισμός 1

1.3 Ιστορικά Στοιχεία 1

1.4 Παράμετροι καθαρισμού 2

1.5 Στοιχεία για την επιλογή πλυντηρίου 3

1.6 Στατιστική τεχνικών χαρακτηριστικών βιομηχανικών πλυντηρίων 4

1.7 Ο ρόλος του νερού 8

1.8 Συστατικά απορρυπαντικών 9

1.9 Αφρός – Αφρισμός 14

1.10 Μέτρηση περιεκτικότητας απορρυπαντικού 15

Κεφάλαιο 2: Σχεδιασμός δεξαμενής για ανακύκλωση εργαζόμενου μέσου 17

2.1 Γενικά στοιχεία 17

2.2 Ανάλυση ορθογωνικής δεξαμενής καθίζησης 19

2.3 Ανάλυση κι αρχή λειτουργίας κεκλιμένων πλακών 24

2.4 Το πρόβλημα με τα πολύ μικρά σωματίδια 27

2.5 Ταχύτητα ροής για τη μη αποκόλληση σωματιδίων από την ιλύ 28

2.6 Απομάκρυνση λαδιών από την επιφάνεια της δεξαμενής 31

2.7 Εφαρμογή για τον σχεδιασμό της διατομής δεξαμενής 32

2.8 Προσομοιώσεις για τον σχεδιασμό της δεξαμενής 32

2.9 Συγκεντρωτικά τα μεγέθη υπολογισμών δεξαμενής 36

2.10 Θέρμανση και εξάτμιση νερού δεξαμενής 37

Κεφάλαιο 3: Σχεδιασμός συστήματος ψεκασμού 41

3.1 Γενικά στοιχεία υπολογισμού 41

3.2 Μέγεθος σταγονιδίων 42

3.3 Επιλογή ακροφυσίων 43

3.4 Επιλογή φυγοκεντρικής αντλίας 47

3.5 Συγκεντρωτικός πίνακας υπολογισμών 52

3.6 Συνηθισμένα προβλήματα -Συντήρηση ακροφυσίων 53

Κεφάλαιο 4: Ανάλυση-Υπολογισμός Κατασκευής 54
4.1 Σκελετός κατασκευής 54
4.2 Περιστρεφόμενος Μηχανισμός 56
4.3 Καπάκι πλυντηρίου 64
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα-Προτάσεις 69
5.1 Συμπεράσματα 69
5.2 Προτάσεις για βελτίωση της κατασκευής 69
Παράρτημα Α: Ιδιότητες Νερού για $0 - 100°C$ 70
Παράρτημα Β: Φάκελος Μηχανολογικών Σχεδίων ..... (παρατίθεται ξεχωριστά)
Βιβλιογραφία 72

Κεφάλαιο1
Χαρακτηριστικά Βιομηχανικών Πλυντηρίων Ανταλλακτικών–Αρχές Υδατικού Καθαρισμού

1.1 Πλυντήριο καθαρισμού εξαρτημάτων

Το πλυντήριο εξαρτημάτων είναι μια μηχανή που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση ρύπων ή ακαθαρσιών όπως βρωμιά, σκόνη, επικαθίσεις άνθρακα, λάδι, γράσο, υγρά κοπής, μελάνι, μπογιά, ακόμα και σκουριά στα μεταλλικά τεμάχια. Σχεδιάζεται για καθαρισμό, απολύμανση και στέγνωμα των εξαρτημάτων μικρού ή μεγάλου μεγέθους διευκολύνοντας κατά πολύ τις εργασίες συντήρησης και επισκευών. Στο πλυντήριο εξαρτημάτων τα τεμάχια καθαρίζονται αυτόματα μέσα σ' ένα κλειστό περίβλημα χωρίς να απαιτείται χειροκίνητος ψεκασμός με ειδικό ακροφύσιο από τον χειριστή. Στη σημερινή πραγματικότητα η τεχνολογία καθιστά δυνατό το συνδυασμό πολλών διαδικασιών σε μία τελική. Για παράδειγμα, ένας αυτόματος κύκλος πλυντηρίου μπορεί να περιλαμβάνει φόρτωση, πλύσιμο, ξέπλυμα, στέγνωμα και ξεφόρτωση των εξαρτημάτων. Για τον καθαρισμό και απομάκρυνση των ρύπων πατροπαράδοτα στη βιομηχανία χρησιμοποιούνταν χημικοί διαλύτες (π.χ. white spirit) αλλά όμως με τις σημερινές περιβαλλοντικές ανησυχίες και τους κανόνες ασφαλείας έχει ενθαρρυνθεί ο υδατικός καθαρισμός με απορρυπαντικά.

1.2 Υδατικός Καθαρισμός

Ένα πλυντήριο με βάση το νερό μοιάζει με το πλυντήριο πιάτων, χρησιμοποιεί νερό και απορρυπαντικό (3-5 kg/100L) σε συνδυασμό με μηχανική ενέργεια και θερμοκρασία για τον καθαρισμό των ρύπων. Η διαδικασία έκχυσης του μίγματος νερού απορρυπαντικού κατά κύριο λόγο γίνεται είτε με ψεκασμό είτε με δέσμη ισχύος. Τα εξαρτήματα τοποθετούνται σε ένα περιστρεφόμενο δίσκο, κλείνει η πόρτα και ξεκινάει ο κύκλος καθαρισμού ο οποίος συνήθως περιλαμβάνει πλύσιμο, απόπλυση (ξέπλυμα) και στέγνωμα. Μόλις ολοκληρωθεί ο κύκλος, ο χειριστής ανοίγει την πόρτα και αφαιρεί τα εξαρτήματα. Μεγαλύτερη μηχανική ενέργεια και θερμοκρασία παρέχει μικρότερους κύκλους καθαρισμού και λιγότερο απορρυπαντικό. Το σύστημα ψεκασμού καθώς και η δεξαμενής ανακύκλωσης του νερού αποτελούν ίσως τα κρισιμότερα σημεία της κατασκευής για την αποτελεσματικότητα του καθαρισμού.

1.3 Ιστορικά Στοιχεία

Τα πλυντήρια εξαρτημάτων αναπτύχθηκαν αρχικά σε συνεργεία αυτοκινήτων ως ένας τρόπος βελτίωσης των απλών δεξαμενών εμποτισμού (βούτες καθαρισμού) όπου εκεί χρειαζόταν επίπονη χειρωνακτική εργασία ειδικά όταν πρόκειται για μεγάλου μεγέθους εξαρτήματα, σύνθετης γεωμετρίας με δύσκολους ρύπους. Από τα τέλη της δεκαετίας του 60 έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι καθαρισμού με βελτιωμένα επίπεδα ασφάλειας και λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ο διαλύτης Stoddard (white spirit), η βενζίνη το πετρέλαιο και η κηροζίνη μέχρι τότε ήταν τα κύρια καθαριστικά για την απολύμανση των εξαρτημάτων. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν διαλύτες με χλώριο (in vapor degreasers) που απαγορεύτηκαν τη δεκαετία του 80 για υγειονομικούς και περιβαλλοντικούς λόγους. Το 1971 ο Gary Minken ανέπτυξε ένα σύστημα πλύσης εξαρτημάτων με βάση το νερό που έγινε το εφαλτήριο για την εκμετάλλευση της υδραυλικής ισχύος στον καθαρισμό.

1.4 Παράμετροι καθαρισμού

Οι παράμετροι που συμβάλλουν στην ολοκλήρωση του καθαρισμού είναι η θερμοκρασία (συνεισφορά 30%), η περιεκτικότητα απορρυπαντικού (συνεισφορά 30%), ο χρόνος καθαρισμού (συνεισφορά 30%) και η ανακίνηση (συνεισφορά 10%). Επιπλέον, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η επιλογή κατάλληλου pH του καθαριστικού διαλύματος ώστε να επιτυγχάνεται ο καθαρισμός των ρύπων. Οι παράμετροι αυτοί συνοπτικά παρουσιάζονται παρακάτω.

1.4.1 Θερμοκρασία:

Στην πλειονότητα τους τα διαλύματα καθαρισμού δουλεύουν στους $60 - 80^oC$. Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει το ιξώδες του ρύπου άρα διευκολύνει την απομάκρυνσή του. Υπάρχουν ρύποι που σε θερμοκρασία δωματίου βρίσκονται σε στερεή κατάσταση οπότε είναι σημαντικό να ρευστοποιηθούν για να απομακρυνθούν με το νερό. Στην περίπτωση που το σημείο πήξης του ρύπου είναι μεγαλύτερο του σημείου βρασμού του διαλύματος τότε ο υδατικός καθαρισμός δε θα φέρει κανένα αποτέλεσμα δεδομένου ότι σε αυτή την περίπτωση η χημική δράση του απορρυπαντικού είναι πολύ αργή, άρα θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν χημικοί διαλύτες. Γενικός κανόνας είναι ότι σε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10 ^oC διπλασιάζεται ο ρυθμός της χημικής αντίδρασης. Τέλος, ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να προκληθούν απρόβλεπτες-αθέμιτες αντιδράσεις μεταξύ του ρύπου και του υποστρώματος με αποτέλεσμα να γίνεται πιο δύσκολη η αφαίρεση του ρύπου. Επίσης η ικανότητα των αναστολέων διάβρωσης να δημιουργούν μια προστατευτική μεμβράνη στην επιφάνεια του καθαρού μετάλλου χάνεται αφού η υψηλή θερμοκρασία τη διαρρηγνύει. Τέλος, αυξάνοντας τη θερμοκρασία μειώνεται το επίπεδο αφρισμού ενώ για $T > 50^oC$ η απώλεια μάζας νερού λόγω εξάτμισης γίνεται σημαντική.

1.4.2 Περιεκτικότητα απορρυπαντικού

Συνηθισμένες τιμές συγκέντρωσης κοινού αλκαλικού απορρυπαντικού, σε ίδιες θερμοκρασίες εν απουσία αφρού είναι 5%-10% για πλύση με εμποτισμό, 3%-5% σε εφαρμογή ψεκασμού, 1%-3% για καθαρισμό με ατμό και 2%-4% για εφαρμογές με χρήση νερού σε υψηλή πίεση. Διπλασιάζοντας την περιεκτικότητα του απορρυπαντικού πάνω από τα παραπάνω αναφερόμενα όρια ο ρυθμός αφαίρεσης των ρύπων αυξάνει μόνο κατά 10% και η διάρκεια ζωής του διαλύματος κατά 25%.

1.4.3 Χρόνος καθαρισμού

Ο καθαρισμός δεν γίνεται ακαριαία αφού οι μηχανισμοί καθαρισμού όπως η γαλακτωματοποίηση, η διάλυση, η αναστολή και η διείσδυση εξαρτώνται από το χρόνο, όσο μακρύτερος είναι ο χρόνος καθαρισμού τόσο λεπτομερέστερος γίνεται ο καθαρισμός. Μετά από ένα όριο, διπλασιάζοντας τον χρόνο καθαρισμού ο ρυθμός αφαίρεσης ρύπου αυξάνει μόνο κατά 10%. Στα περισσότερα συστήματα με εμβάπτιση και ανακίνηση το χρόνος ποικίλλει από $5min - 1hr$, ενώ στα πλυντήρια με ψεκασμό ο χρόνος δεν ξεπερνάει τα $15min$. Όσον αφορά τον καθαρισμό με υπερήχους έχει επικρατήσει ο γενικός κανόνας ότι αν τα $5min$ δεν επαρκούν για το καθαρισμό ενός τεμαχίου τότε η μέθοδος δεν είναι κατάλληλη. Τέλος, τονίζεται ότι το κόστος μείωσης του χρόνου καθαρισμού (εξοπλισμός, ενέργεια, χημικά) πρέπει να αντισταθμίζεται από τα οφέλη της αυξημένης παραγωγής καθαρών τεμαχίων.

1.4.4 Ανακίνηση

Αφορά την ανάδευση των εξαρτημάτων μέσα στο καθαριστικό υγρό. Η αποτελεσματικότητα της παραμέτρου αυτής απαιτεί καθαρό καθαριστικό διάλυμα και μεγάλη περιεκτικότητα σε απορρυπαντικό δεδομένου ότι με την ανακίνηση ευνοείται πολύ ο αφρισμός.

1.4.5 pH καθαριστικού διαλύματος

Ανάλογα το είδος του ρύπου που πρόκειται να καθαριστεί πρέπει να επιλέγεται αντίστοιχα κατάλληλο pH, όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

- Όξινο pH: Ιδανικό για τον καθαρισμό επικαθίσεων άνθρακα, απαγορευτικό για μεταλλικές κατασκευές.
- pH 7-9: Εύκολο ξέπλυμα, ασφάλεια στη χρήση, ιδανικό για ευαίσθητα κράματα, μικρή καθαριστική δράση στους βαρείς ρύπους, ευαίσθητα στον αφρισμό.
- pH 9-12: Συμβατό για τους περισσότερους τύπους μετάλλων, χαμηλότερο επίπεδο αφρισμού, δεν ενδείκνυται για αφαίρεση εναποθέσεων άνθρακα, ανάγκη για καλό ξέπλυμα ώστε να αποφευχθούν υπολείμματα.
- pH 12-13: Ιδανικό για βαριά λάδια κι γράσα, προκαλεί φθορές στις επικαλύψεις των μετάλλων, ανάγκη για καλό ξέπλυμα για μείωση της διάβρωσης.

Συνοψίζοντας: Καθαρισμός = Χημική δράση x Θερμοκρασία x Χρόνος x Ανακίνηση + Ξέπλυμα + Στέγνωμα

1.5 Στοιχεία για την επιλογή πλυντηρίου

Όλα τα βιομηχανικά πλυντήρια δεν είναι τα ίδια, όπως και κάθε μηχανή ποικίλλουν ανάλογα με το μέγεθος, την ικανότητα φόρτωσης και καθαρισμού, την αξιοπιστία κτλ. Παράγοντες που πρέπει να ληφθούν για τη σωστή επιλογή πλυντηρίου παρουσιάζονται παρακάτω.

- Τύπος τεμαχίου για καθαρισμό:

Ποια είναι τα εξαρτήματα που χρειάζονται πλύσιμο; Π.χ. μπλοκ κινητήρα, κυλινδροκεφαλή, έδρανα, έμβολα, τροχοί κτλ.

- Υλικό τεμαχίων για καθαρισμό:

Ποιο είναι το υλικό το τεμαχίων προς καθαρισμό; Πλαστικό, χάλυβας, ανοξείδωτος χάλυβας, χυτοσίδηρος, χαλκός, διαφορετικά υλικά απαιτούν διαφορετικούς τύπους απορρυπαντικών για σωστό καθαρισμό.

- Μέγεθος τεμαχίων:

Ποιο είναι το μέγεθος των τεμαχίων; Το μέγεθος καθορίζει τον ελάχιστο επιτρεπτό όγκο της κατασκευής άρα τη διάμετρο του στρεφόμενου δίσκου και το ωφέλιμο ύψος πλυσίματος.

- Τύποι ρύπου προς αφαίρεση:

Τι τύπος είναι ο ρύπος που πρέπει να αφαιρεθεί από την επιφάνεια των τεμαχίων; Λάδι, λίπος, χρώμα, βερνίκι, διαφορετικοί ρύποι απαιτούν περισσότερη ή λιγότερη πυκνότητα ισχύος, πίεση, παροχή κι θερμότητα για την απομάκρυνσή τους.

- Ποσότητα τεμαχίων για καθαρισμό:

Ποιο είναι το πλήθος των υπό πλύση εξαρτημάτων; Ο αριθμός προσδιορίζει την απαιτούμενη ενέργεια ώστε όλα τα εξαρτήματα να καθαριστούν στον απαιτούμενο χρόνο κύκλου.

- Απαιτούμενο επίπεδο καθαρισμού:

Πώς προσδιορίζεται αν τα τεμάχια καθαρίστηκαν καλά ή όχι; Πώς προσδιορίζεται η καθαρότητα μιας επιφάνειας; Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι είναι η οπτική επιθεώρηση, η μέτρηση σωματιδίων, η δοκιμή Millipore, και η δοκιμή λευκού γαντιού.

- Απαιτούμενη ενέργεια πλυσίματος:

Πόση πρέπει να είναι η ισχύς της αντλίας και ο ωφέλιμος όγκος της κατασκευής άρα η πυκνότητα ισχύος ώστε να επιτευχθεί ο καθαρισμός; Η πυκνότητα ισχύος αυξάνει εκθετικά με την αύξηση της διαμέτρου του περιστρεφόμενου δίσκου.

- Επιλογή μεθόδου πλύσης με ψεκασμό ή δέσμη ισχύος:

Ποια μέθοδος πλύσης ενδείκνυται για αποτελεσματικό καθαρισμό των εξαρτημάτων; Το πλύσιμο με ψεκασμό έχει περιορισμένη ικανότητα καθαρισμού και εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση του απορρυπαντικού. Αντίθετα, το πλύσιμο με δέσμη ισχύος εκμεταλλεύεται κυρίως την υδραυλική ισχύ του ρευστού για την απομάκρυνση των ρύπων, όμως στην περίπτωση αυτή απαιτείται έκχυση από πολλές και διαφορετικές γωνίες για την πλήρη κάλυψη των εξαρτημάτων.

- Χωροταξία πλυντηρίου:

Υπάρχει αρκετός χώρος για την τοποθέτηση και εγκατάσταση του πλυντηρίου, όπως επίσης για τη μετακίνηση των εξαρτημάτων προς το πλυντήριο; Η πόρτα θα μπορεί να ανοίγει χωρίς να εμποδίζεται ή να δημιουργεί άλλα προβλήματα. Επίσης, θα υπάρχει ο απαιτούμενος χώρος ώστε να γίνεται εύκολα η συντήρηση του πλυντηρίου;

- Φόρτωση εξαρτημάτων:

Πώς θα φορτώνονται τα εξαρτήματα στο εσωτερικό του πλυντηρίου; Η τοποθέτηση θα γίνεται χειροκίνητα ή μέσω κυλιόμενου μηχανισμού κτλ.

- Πηγή ενέργειας:

Ποια είναι η διαθέσιμη ηλεκτρική ισχύς για τη λειτουργία του μηχανήματος, η τάση του δικτύου και το συνολικό φορτίο που μπορεί να διαχειριστεί το σύστημα; Η γραμμή παροχής ρεύματος θα είναι μονοφασική ή τριφασική; Το ηλεκτρικό φορτίο θα μπορούσε να μειωθεί αν η θέρμανση του διαλύματος γίνει από άλλη πηγή θερμότητας.

1.6 Στατιστική τεχνικών χαρακτηριστικών βιομηχανικών πλυντηρίων

1.6.1 Δείγματα βιομηχανικών πλυντηρίων της παγκόσμιας αγοράς

Παρακάτω παρουσιάζονται σε εικόνες χαρακτηριστικά δείγματα βιομηχανικών πλυντηρίων που κυκλοφορούν στην παγκόσμια αγορά καθώς και αυτό που σχεδιάστηκε.

Εικόνα 1.1: BAUFOR, standard parts washers (Spain)

Εικόνα 1.2: Magido, cabinet parts washer (Italy)

Εικόνα 1.3: BestTechnology, top load spray cabinet part washer, opened-closed position (USA)

Εικόνα 1.4: Graymills, top-load spray washer (USA)

Εικόνα 1.5: Stingray, retractable turntable parts washer (USA)

Εικόνα 1.6: Babcoequip, automotive parts cleaner (Canada)

Εικόνα 1.7: EMC, Spray Washer (USA)

Εικόνα 1.8: Aquaclean, cleaning machine (Finland)

Εικόνα 1.9: Jri Industries, front loading cleaning system (USA)

Εικόνα 1.10: Safetykleen, parts washer (Ireland)

Εικόνα 1.11: Hotwash, spray washer heavy duty (Australia)

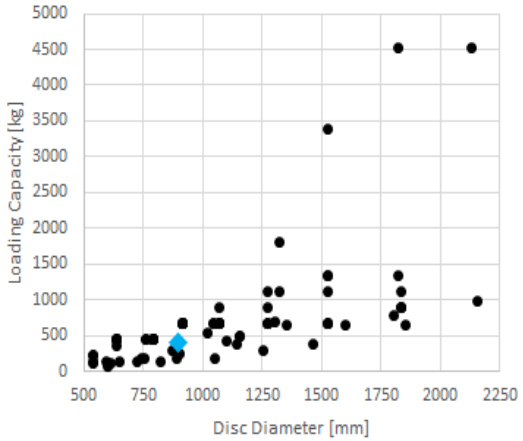
Εικόνα 1.12: Machine Design Laboratory NTUA, parts washer (Greece)

Από τα παραπάνω δείγματα βιομηχανικών πλυντηρίων, οπτικά και μόνο, εξάγεται το συμπέρασμα της μεγάλης ποικιλίας που υπάρχει όσον αναφορά το μέγεθος, τη μορφή, το σύστημα ψεκασμού, τον τρόπο φόρτωση κτλ. Για παράδειγμα τα πλυντήρια των εικόνων (*Εικόνα 1.3, 1.4, 1.10, 1.*11) και αυτού που σχεδιάστηκε στην παρούσα διπλωματική (*Εικόνα 1.12*) έχουν το χαρακτηριστικό γνώρισμα το άνοιγμα του καπακιού και η πρόσβαση να γίνεται από πάνω (*top load parts washer*), ενώ στα υπόλοιπα η πρόσβαση επιτυγχάνεται από μπροστά. Επιπλέον, χαρακτηριστικό γνώρισμα όλων των εικονιζόμενων πλυντηρίων (εκτός του πλυντηρίου της *Εικόνας 1.8*) είναι το κυκλικό σχήμα (για λόγους χωροταξίας) του περιστρεφόμενου δίσκου όπου θα τοποθετούνται τα υπό πλύση εξαρτήματα. Ένα άλλο κοινό χαρακτηριστικό όλων των εικονιζόμενων πλυντηρίων (εκτός των πλυντηρίων της *Εικόνας 1.4* και της *Εικόνας 1.5*) είναι η ικανότητά μετακίνησής τους στο χώρο είτε με τη χρήση περονοφόρου ανυψωτικού οχήματος, είτε συρόμενα (*Εικόνα 1.6*). Τέλος, χαρακτηριστικό αποτελεί το γεγονός ότι σε όλα τα εικονιζόμενα πλυντήρια (εξαιρούνται τα πλυντήρια της *Εικόνας 1.7* και της *Εικόνας 1.9*) η τοποθέτηση εξαρτημάτων μεγάλης μάζας σε αυτά μπορεί να γίνει με τη χρήση γερανού. Τέλος, τα πλυντήρια (*Εικόνα 1.5, Εικόνα 1.7*) παρουσιάζουν επιπλέον κινητό σύστημα ψεκασμού.

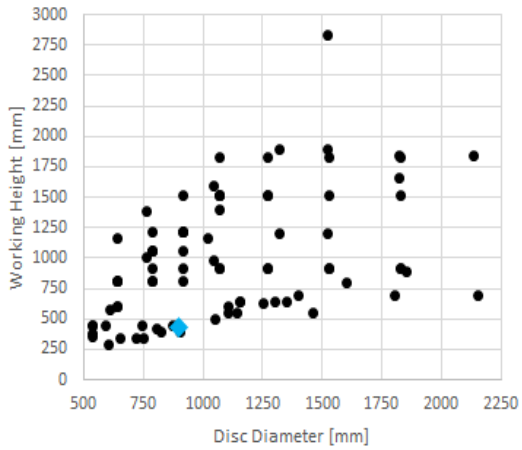
1.6.2 Αποτύπωση τεχνικών χαρακτηριστικών

Από τους ιστοτόπους εταιριών που εμπορεύονται τέτοιες μηχανές, και όπου δίνονταν επιμέρους τεχνικά χαρακτηριστικά, συλλέχθηκαν και κατανεμήθηκαν. Το συμπέρασμα που προέκυψε από αυτήν την κατανομή είναι ότι δεν παρουσιάζεται κάποια αναλογία των τεχνικών χαρακτηριστικών με την τάξη μεγέθους του πλυντηρίου, δίνοντας έτσι ελευθερία στο σχεδιασμό.

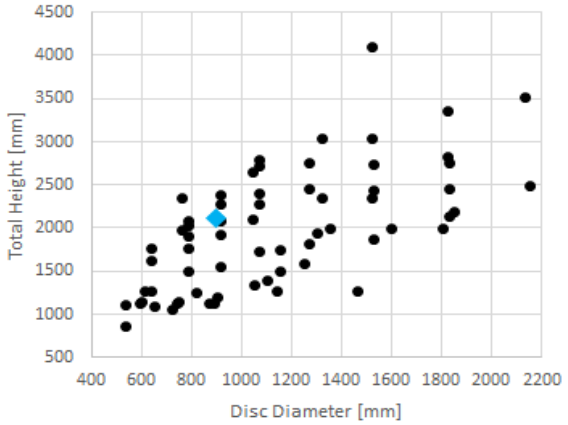
Τα διαγράμματα της αποτύπωσης των τεχνικών χαρακτηριστικών παρουσιάζονται παρακάτω και με μπλε χρώμα αναπαρίστανται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του σχεδιασθέντος πλυντηρίου της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



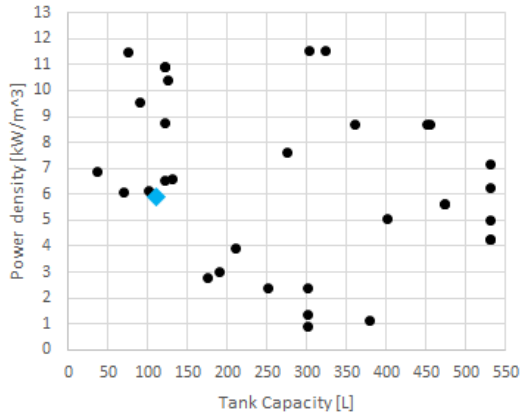
Εικόνα 1.13: Μέγιστη μάζα φόρτωση και διάμετρος περιστρεφόμενου δίσκου



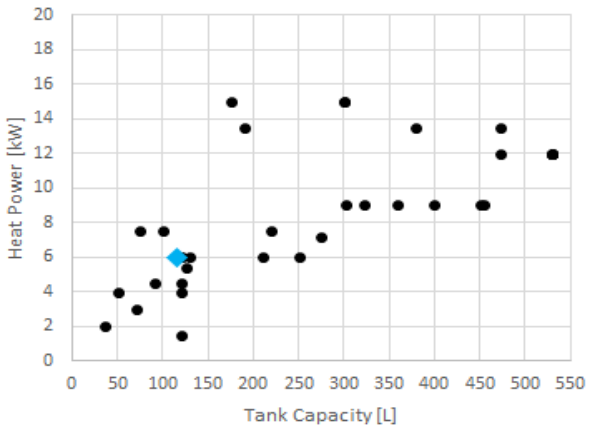
Εικόνα 1.14: Μέγιστο ύψος φόρτωσης τεμαχίων και διάμετρος περιστρεφόμενου δίσκου



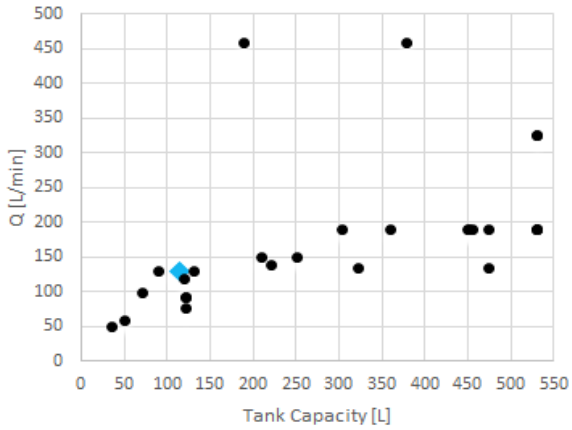
Εικόνα 1.15: Συνολικό ύψος πλυντηρίου και διάμετρος περιστρεφόμενου δίσκου



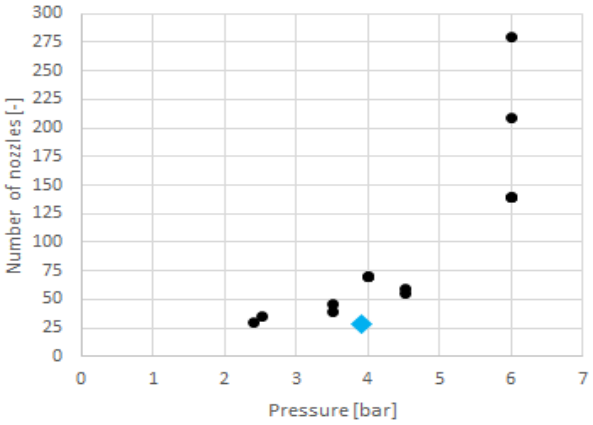
Εικόνα 1.16: Πυκνότητα ενέργειας και χωρητικότητα δεξαμενής



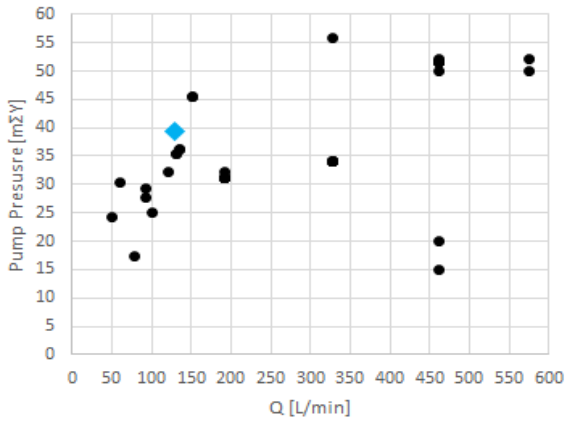
Εικόνα 1.17: Θερμική ισχύς και χωρητικότητα δεξαμενής



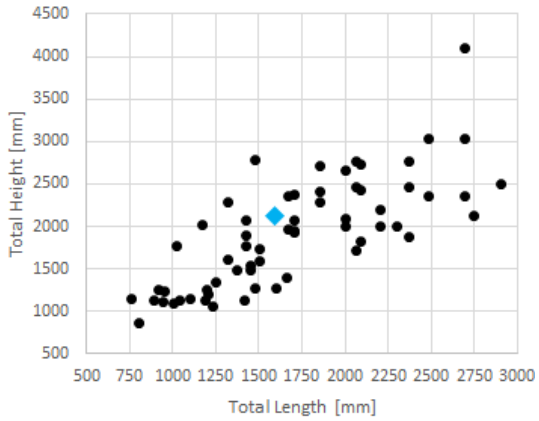
Εικόνα 1.18: Παροχή αντλίας και χωρητικότητα δεξαμενής



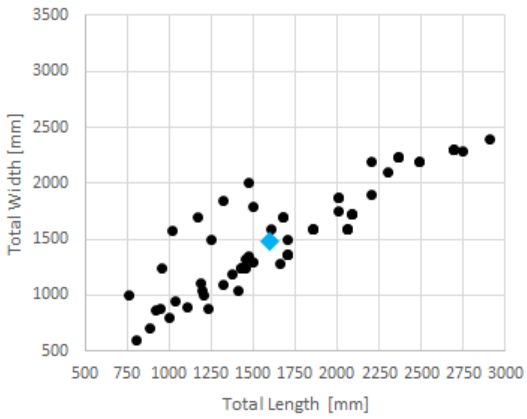
Εικόνα 1.19: Αριθμός ακροφυσίων και πίεσης αντλίας



Εικόνα 1.20: Πίεση και παροχή λειτουργίας αντλίας



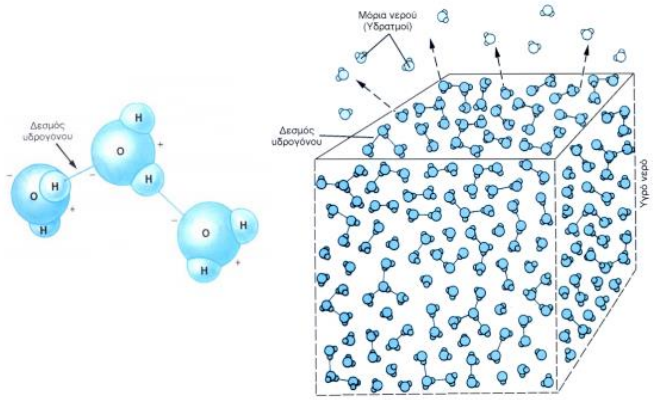
Εικόνα 1.21: Συνολικό ύψος και μήκος πλυντηρίου



Εικόνα 1.22: Συνολικό πλάτος και μήκος πλυντηρίου

1.7 Ο ρόλος του νερού

Σχεδόν σε όλες τις μεθόδους υδατικού καθαρισμού το νερό περιλαμβάνει πάνω από 90% του υδατικού διαλύματος, χρησιμοποιείται σε όλα σχεδόν τα στάδια καθαρισμού και διαδραματίζει πρακτικά το ρόλο του διαλύτη. Χαρακτηριστικό ενός μορίου νερού είναι ότι είναι πολωμένο λόγω της υψηλής ηλεκτραρνητικότητας του οξυγόνου. Ηλεκτραρνητικότητα ορίζεται το μέτρο της τάσης την οποία έχει ένα άτομο που συνδέεται με ομοιοπολικό δεσμό μ' ένα άλλο άτομο, να έλκει προς το μέρος του το κοινό ζεύγος των ηλεκτρονίων. Η ηλεκτραρνητικότητα ενός ατόμου είναι αποτέλεσμα της σχετικής του μάζας (ατομικού βάρους) και της απόστασης του δεσμικού ζεύγους ηλεκτρονίων από τους ατομικούς πυρήνες. Στο μόριο του νερού τα ηλεκτρόνια που μοιράζονται βρίσκονται πιο κοντά στο άτομο του οξυγόνου απ' ότι στα άτομα υδρογόνου, οπότε προκύπτει το τελικό μόριο του νερού να είναι αρνητικά φορτισμένο από τη μεριά του οξυγόνου και θετικά από τη μεριά των υδρογόνων. Έτσι, τα πολωμένα μόρια νερού σχηματίζουν ισχυρούς δεσμούς μεταξύ τους που ονομάζονται δεσμοί υδρογόνου και με αυτή τη συμπεριφορά οφείλονται οι γνωστές ιδιότητες του νερού (υψηλή θερμοχωρητικότητα, υψηλή επιφανειακή τάση, τριχοειδής δράση κτλ.). Επιπλέον, λόγω της πολικότητας, τα μόρια του νερού δεν αλληλοεπιδρούν με μη πολωμένα μόρια με αποτέλεσμα οι μη πολωμένες ενώσεις να μη διαλύονται στο νερό όπως γίνεται με το λάδι.



Εικόνα 1.23: Πολωμένο μόριο νερού και οι σχηματιζόμενοι δεσμοί υδρογόνου

KATIONTA/CATIONS	Ca^{-2}	Mg^{-2}	Na^{+}	K^{-}	NH_{4+}	Fe	Mn
(σε mg/l)	28.4	13.6	7.0	0.4	<0.26	<0.1	<0.005
ANIONTA/ANIONS	Cl^{-}	SO_4^{-2}	HCO_{3-}	CO_3^{-2}	NO_{3-}	NO_2^{-}	SiO_2
(σε mg/l)	13.6	6.1	143	0.0	<5	<0.05	<5

Εικόνα 1.24: Τυπικές τιμές ιόντων στο νερό (στο σκληρό νερό η περιεκτικότητα Ca^{-2} ξεπερνά τα 120 ppm)

Το νερό στη φύση δεν βρίσκεται σε καθαρή μορφή αλλά περιέχει και άλλα στοιχεία που κάποια από αυτά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Τα πιο προβληματικά από αυτά στον υδατικό καθαρισμό είναι τα κατιοντικά άλατα που είναι τα πολυπληθέστερα (Ca^{+2}, Mg^{+2}).

Τύπος Ιόντος	Χημικός τύπος	Χαρακτηριστικό
Κατιόν	Ca^{+2}	Σκληρότητα
	Mg^{+2}	Σκληρότητα
	Fe^{+2} και Fe^{+3}	Λεκές σιδήρου
	Mn^{+2} και Mn^{+4}	Λεκές μαγνησίου
	Na^{+}, Ka^{+}	Κηλίδες κατά το στέγνωμα
Ανιόν	CO_3^{2-}	Τα ανθρακικά άλατα σχηματίζουν εναποθέσεις με τα άλλα στοιχεία του σκληρού νερού
	HCO_3^{2-}	Τα διαττανθακικά άλατα (όξινα ανθρακικά ιόντα) σχηματίζουν εναποθέσεις με τα άλλα στοιχεία του σκληρού νερού
	PCO_4^{3-}	Τα ορθοφωσφορικά άλατα σχηματίζουν εναποθέσεις με τα άλλα στοιχεία του σκληρού νερού
	SiO_4^{4-} και SiO_3^{2-}	Σχηματισμός ανθεκτικών πυριτικών αλάτων ιδιαίτερα με την παρουσία του σίδηρου, μαγνησίου και ασβεστίου
	SO_4^{2-}	Τα θειικά άλατα προωθούν τα ιόντα ασβεστίου και μαγγανίου
	Cl^{-}	Τα χλωριόντα επιταχύνουν τη διάβρωση στο χάλυβα, αλουμίνιο (σχηματίζοντας ευδιάλυτες ενώσεις)
	NO_3^{2-}	Νιτρικά άλατα στο νερό απόπλυσης μπορούν να προκαλέσουν κηλίδες

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά συνηθισμένων στοιχείων που περιέχονται στο νερό

1.7.1 Προβλήματα που δημιουργεί το σκληρό νερό

Με τη θέρμανση του νερού τα κατιόντα ασβεστίου και μαγνησίου αντιδρούν με ανθρακικά ιόντα σχηματίζοντας ανθρακικό ασβέστιο ($CaCO_3$) και ανθρακικό μαγνήσιο ($MgCO_3$) τα οποία επικάθονται στα μηχανικά μέρη (πουρί) επιταχύνοντας τη διάβρωση (γαλβανική διάβρωση, τα κατιόντα Ca^{2+}, Mg^{2+} (κάθοδος) έχουν μεγαλύτερο δυναμικό οξειδοαναγωγής, από το σίδηρο της δεξαμενής, με αποτέλεσμα η τελευταία να μετατρέπεται άνοδο).

$$CO_{2(g)} \rightleftharpoons CO_{2(l)} \overset{+H_2O}{\rightleftharpoons} H_2CO_3 \overset{+H_2O}{\rightleftharpoons} \underset{+H_3O^+}{HCO_3^-} \overset{+H_2O}{\rightleftharpoons} \underset{+H_3O^+}{CO_3^{2-}} \overset{+Ca^{2+}}{\underset{+Mg^{2+}}{\rightleftharpoons}} CaCO_3\downarrow,\ MgCO_3\downarrow \quad (1.1)$$

Παράλληλα, η μέσα στο χρόνο παραγωγή ιόντων υδρογόνου (H^+), από τη διάσπαση του ανθρακικού οξέος (H_2CO_3), εξουδετερώνει τα ιόντα υδροξυλίου (OH^-) του διαλύματος με αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση του pH (βλ. *Εικόνα 1.44*).

Το ίδιο πρόβλημα προκύπτει και με τη χρήση ανθρακικού νατρίου-σόδας (Na_2CO_3) για το «μαλάκωμα» του νερού, όπου προκύπτει πάλι στα προϊόντα ανθρακικό ασβέστιο.

$$CaSO_{4(aq)} + Na_2CO_{3(aq)} \rightleftharpoons CaCO_{3(s)} + Na_2SO_{4(aq)} \quad (1.2)$$

Επίσης, τα θετικά ιόντα προσελκύονται από το αρνητικό υδρόφιλο μέρος των τασιενεργών (βλ. *παράγραφο 1.8.1*), με αποτέλεσμα να τα δεσμεύουν από την καθαριστική τους δράση.

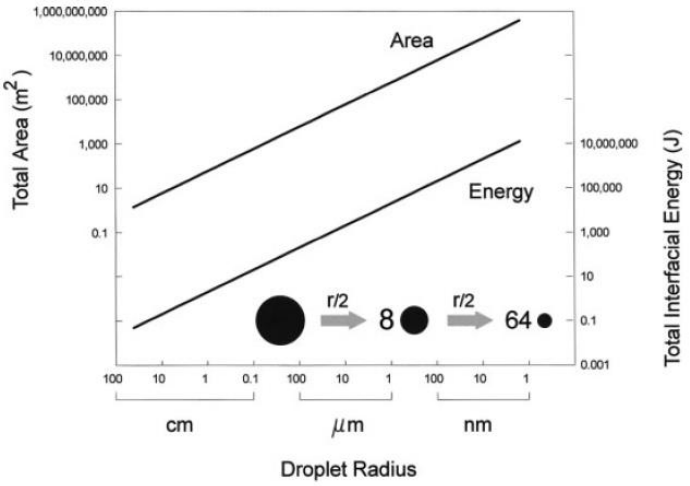
$$2C_{17}H_{35}COO^-{}_{(aq)} + Ca^{2+}{}_{(aq)} \rightleftharpoons (C_{17}H_{35}COO)_2Ca_{(s)} \quad (1.3)$$

1.8 Συστατικά απορρυπαντικών

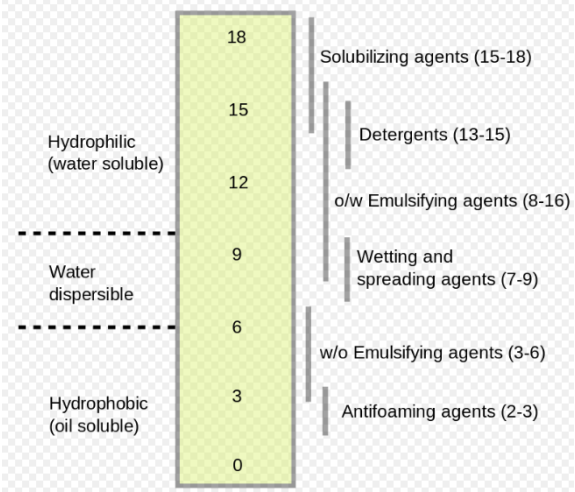
1.8.1 Επιφανειοδραστικά-Τασιενεργά (Surfactants, Surface Active Agents)

- *Δομή και λειτουργία*

Τα τασιενεργά είναι χημικές ενώσεις οι οποίες μειώνουν την επιφανειακή τάση του νερού και λόγω της διττής τους φύσης (υδρόφιλο, υδρόφοβο μέρος) μπορούν υποβοηθούμενες από μηχανική δράση να εξαρθρώσουν ρύπους αδιάλυτους στο νερό μέσω της γαλακτωματοποίησης (διαδικασία διασποράς ενός υγρού σε ένα άλλο μη αναμιγνυόμενο με πρώτο). Ετυμολογικά προέρχεται από τη λέξη «γάλα», παράδειγμα γαλακτώματος λίπος σε νερό. Επίσης, αυξάνουν την επιφανειακή ελαστικότητα και το επιφανειακό ιξώδες για αυτό και ευνοούν τον αφρισμό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η προσπάθεια διάλυσης λαδιού μέσα σε νερό με ανακίνηση του διαλύματος. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η μηχανική ενέργεια που χρειάζεται για να γαλακτωματοποιηθεί ένα βαρέλι λάδι (159L) σε νερό και θεωρώντας αρχική διάμετρο σταγόνας λαδιού 33,6cm. Σημειώνεται ότι αν προστεθεί <0,5% απορρυπαντικό η συνολική ενέργεια θα ήταν 100 φορές μικρότερη (*Εικόνα 1.25*)



Εικόνα 1.25: Γαλακτωματοποίηση 159L λαδιού σε νερό



Εικόνα 1.26: Τιμές HLB τασιενεργού για διάφορες χρήσεις

Το μόριο της επιφανειοδραστικής ουσίας είναι αμφίφιλο και αποτελείται από δύο τμήματα:

- *Το υδρόφιλο τμήμα*: Αποτελείται από κάποια πολωμένη ένωση έτσι ώστε να έχει τη δυνατότητα να διαλύεται στο νερό. Συνήθως, το υδρόφιλο τμήμα είναι κάποια ιοντική ένωση όπως το καρβοξυλικό ανιόν ($HCOO^-$, άλας ή εστέρας ενός μονοκαρβοξυλικού οξέος) ή το θειικό ανιόν (SO_4^{2-}) ή το σουλφονικό ανιόν (SO_3^-, άλας ή εστέρας ενός σουλφονικού οξέος), ή αμίνη ή να περιλαμβάνει ένα υδρόφιλο τμήμα όπως οξείδιο του αιθυλενίου ή οξιράνιο (C_2H_4O).

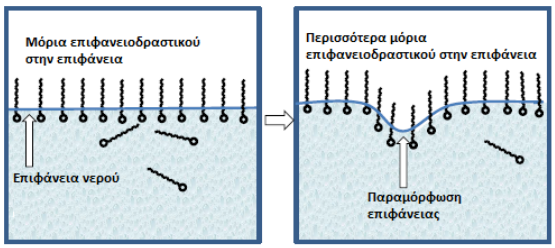
- *Το υδρόφοβο τμήμα, αλυσίδα ή ουρά*: Περιλαμβάνει 4-18 το πλήθος, ομάδες αιθυλίων (CH_2) που είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους σε μορφή αλυσίδας. Το υδρόφοβο τμήμα δεν είναι πολωμένο όπως το νερό και οι οργανικές ενώσεις.

- *Υδρόφιλη- λιπόφιλη ισορροπία (Hydrophilic – lipophilic balance HLB)*

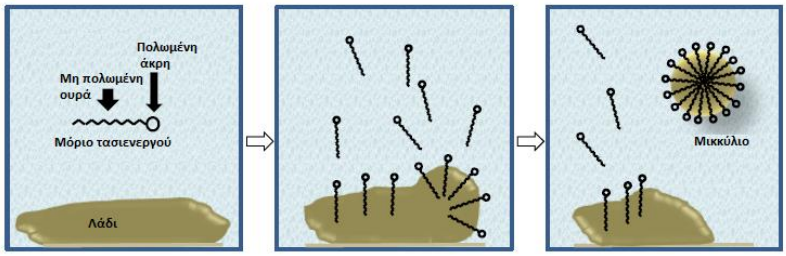
Είναι ο αριθμός που εκφράζει τη σχέση που υπάρχει μεταξύ υδρόφιλου και λιπόφιλου τμήματος τασιενεργής ουσίας σε κλίμακα από το 1-20. Μια επιφανειοδραστική ουσία είναι 100% υδρόφιλη όταν HLB>10, ενώ είναι 100% λιπόφιλη όταν είναι HLB<10. Η τιμή HLB καθορίζει την καταλληλόλητα του τασιενεργού για χρήση σύμφωνα με την *Εικόνα 1.26*.

- *Μείωση επιφανειακής τάσης*

Καθώς προστίθεται απορρυπαντικό στο νερό τα μόρια των επιφανειοδραστικών συσσωρεύονται στην επιφάνεια αφού το υδρόφοβο τμήμα τείνει να απομακρυνθεί από το νερό. Τα μόρια των τασιενεργών, διαρρηγνύουν τους δεσμούς υδρογόνου των μορίων του νερού αφού οι φορτισμένες υδρόφιλες κεφαλές αλληλοεπιδρούν με τα άτομα του υδρογόνου κι οξυγόνου του νερού, άρα προκύπτει τοπική παραμόρφωση της επιφάνειας. Έτσι, περισσότερα μόρια τασιενεργών έρχονται σε επαφή με αποτέλεσμα να πέφτει η επιφανειακή τάση. Η χαμηλότερη επιφανειακή τάση $\sim 25mN$ για νερό με απορρυπαντικό (από $73mN/m$ για σκέτο νερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος) επιτρέπει τη διείσδυση του απορρυπαντικού σε μη υγρές επιφάνειες.



Εικόνα 1.27: Μείωση επιφανειακής τάσης από τα μόρια τασιενεργών

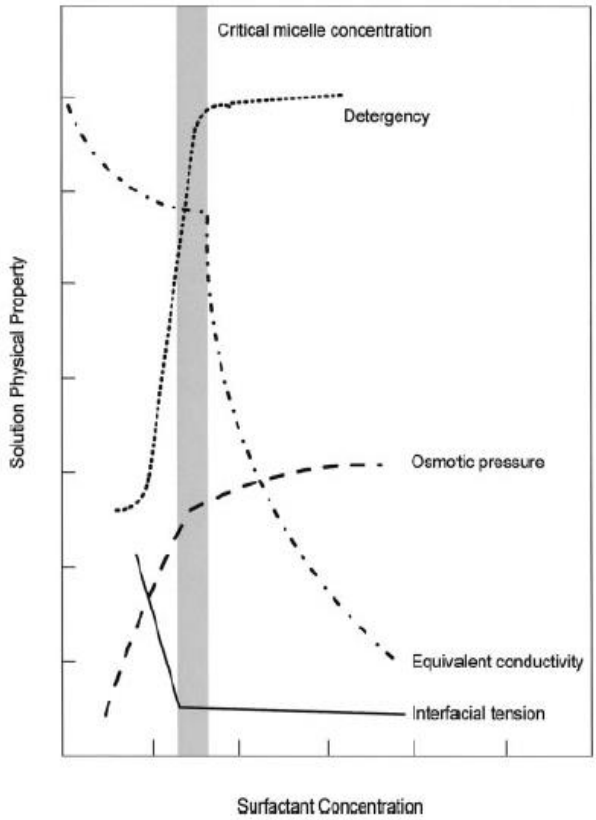


Εικόνα 1.28: Καθαριστική δράση απορρυπαντικού

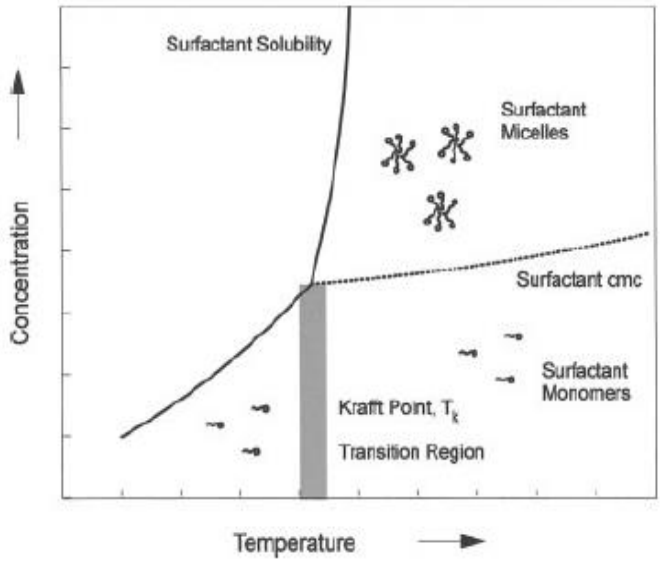
Αν και το λάδι με το νερό, δεν αναμιγνύονται δεδομένου ότι το λάδι είναι μη πολική ουσία, ενώ το νερό είναι πολική ουσία, ωστόσο παρουσία αρκετά υψηλής συγκέντρωσης επιφανειοδραστικών μορίων, το λάδι και το νερό γαλακτωματοποιούνται σχηματίζοντας ένα νέο διάλυμα. Το πολικό (υδρόφιλο) τμήμα του επιφανειοδραστικού μορίου προσελκύεται από το νερό και το μη πολικό (υδρόφοβο) τμήμα έλκεται από το έλαιο. Τα μόρια επιφανειοδραστικής ουσίας συσσωρεύονται γύρω από τα μόρια του λαδιού σχηματίζοντας σφαιρικά μικύλλια (micelles) τα οποία εμποδίζουν πλέον τα μόρια του λαδιού να ξανασυνδεθούν μεταξύ τους. Η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί εφόσον υπάρχουν διαθέσιμα μόρια τασιενεργού για να αλληλοεπιδράσουν με τα εναπομείναντα μόρια λαδιού.

- *Κρίσιμη συγκέντρωση μικυλλίου* - Critical Micelle Concentration (CMC)

Η περιεκτικότητα τασιενεργού πάνω από την οποία μπορούν να σχηματιστούν μικύλλια και οποιαδήποτε άλλη προσθήκη τασιενεργού θα πάει στη δημιουργία μικυλλίων (χωρίς να υπάρχει κάποιος ρύπος) ονομάζεται κρίσιμη συγκέντρωση μικυλλίου και αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα του απορρυπαντικού. Είναι φανερό πως χρησιμοποιώντας απορρυπαντικό με τασιενεργά σε μεγαλύτερη συγκέντρωση από την κρίσιμη δεν αυξάνεται ο αριθμός των τασιενεργών στις διεπιφάνειες και δεν αυξάνεται περαιτέρω η καθαριστική δράση των απορρυπαντικών (*Εικόνα 1.29*). Μικρή CMC προκύπτει αν αυξηθεί η μοριακή μάζα της λιπόφιλης αλυσίδας ή με τη μείωση της θερμοκρασίας ή με την αραίωση του διαλύματος.



Εικόνα 1.29: Αλλαγή στις ιδιότητες του διαλύματος σε περιεκτικότητες τασιενεργού κοντά στη CMC



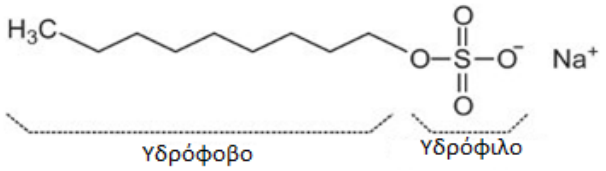
Εικόνα 1.30: Διαλυτότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας

Παράλληλα, παρατηρείται η διαλυτότητα των μικυλλίων να παρουσιάζει σημαντική αύξηση πάνω από κάποια θερμοκρασία T_k ή $Kraft\ point$ (δεν υφίσταται για τα μη ιοντικά τασιενεργά). Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι μεμονωμένα μόρια τασιενεργού παρουσιάζουν μικρή διαλυτότητα ενώ τα μικύλλια μεγάλη. Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία αυξάνεται και η διαλυτότητα μέχρι τη θερμοκρασία T_k όπου η περιεκτικότητα φτάνει την *CMC*. Από εκεί και μετά η διαλυτότητα αυξάνεται κατακόρυφα (*Εικόνα 1.30*).

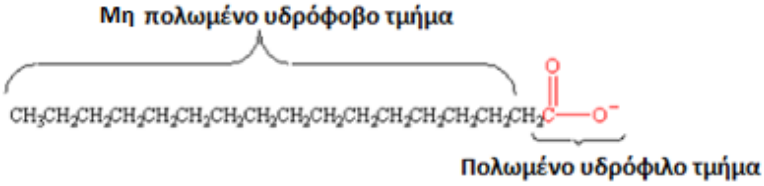
Σημειώνεται, επίσης, ότι στα ιοντικά τασιενεργά η CMC και η διαλυτότητα αυξάνει με τη αύξηση της θερμοκρασίας άλλα με διαφορετικό ρυθμό. Επομένως, πρακτικά μιλώντας, T_k είναι η θερμοκρασία όπου προκύπτει στο διάλυμα CMC και κάτω από αυτήν το απορρυπαντικό είναι ένα μη χρήσιμο στερεό.

- Τύποι επιφανειοδραστικών ουσιών που χρησιμοποιούνται:

Ανιοντικά τασιενεργά ($-COO^{-1}, -OSO_3^-$): Είναι η πιο συνηθισμένη μορφή, έχουν αρνητικά φορτισμένο το υδρόφιλο μέρος και σε κανονικές συνθήκες έλκει το κατιόν του νατρίου (Na^+). Επίσης, το αρνητικά φορτισμένο μέρος απωθείται συνεχώς με τις αρνητικά φορτισμένες επιφάνειες με αποτέλεσμα να διευκολύνεται πολύ η απομάκρυνση των ρύπων. Το μειονέκτημά τους όμως είναι ότι ευνοούν τον αφρισμού. Παραδείγματα ανιοντικών τασιενεργών παρουσιάζονται παρακάτω:

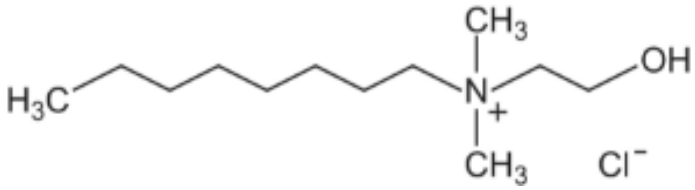


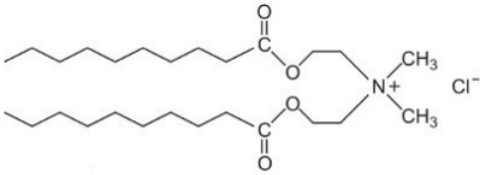
Εικόνα 1.31: Θειικό αλκύλιο - Alkyl sulfate



Εικόνα 1.32: Παράδειγμα μορφής τασιενεργού μορίου (κοινό σαπούνι)

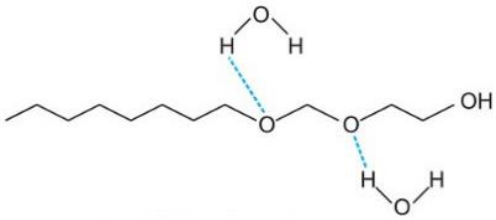
Κατιοντικά τασιενεργά ($-NH_3^+, -N(CH_3)_3^+$): Έχουν θετικά φορτισμένο το υδρόφιλο μέρος, δεν συνηθίζονται να χρησιμοποιούνται σε καθαριστικά, αλλά ως από-γαλακτωματοποιητές και έχουν πολύ καλές αντιδιαβρωτικές και αντιβακτηριδιακές ικανότητες.

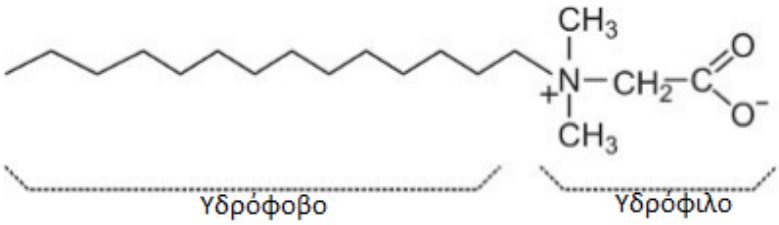

Εικόνα 1.33: Τεταρτογενές σύστημα αλκυλίου - Alkyl quaternary system


Εικόνα 1.34: Esterquat

Μη ιοντικά τασιενεργά: Έχουν ουδέτερα φορτισμένο το υδρόφιλο μέρος, οπότε δε επηρεάζονται από τα κατιόντα του σκληρού νερού. Χρησιμοποιούνται στον καθαρισμό σε συνθήκες χαμηλού αφρισμού είτε σε συνδυασμό με ανιοντικά τασιενεργά.

Αμφότερα τασιενεργά: Σε όξινο περιβάλλον μετατρέπονται σε κατιονικά, ενώ σε αλκαλικό περιβάλλον σε ανιοντικά τασιενεργά.

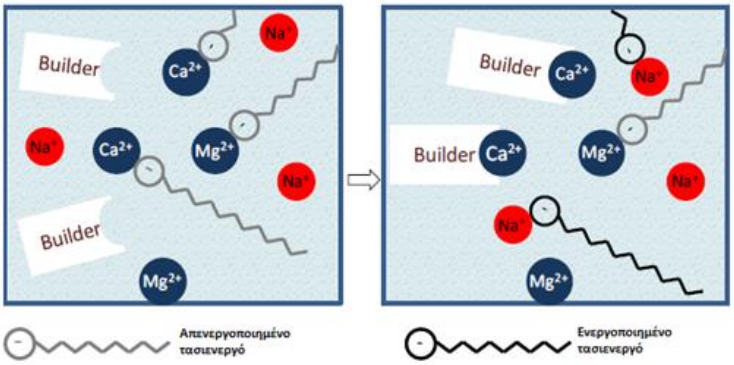

Εικόνα 1.35: Μη-ιοντικό μόριο τασιενεργού



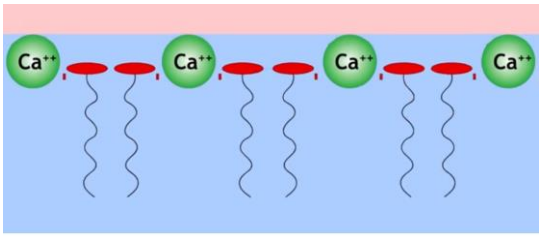
Εικόνα 1.36: Αμφότερο μόριο τασιενεργού (Alkyne betaine)

1.8.2 Builders

Βελτιώνουν τη δράση του απορρυπαντικού δεσμεύοντας τα κατιόντα ασβεστίου (Ca^{2+}) και μαγνησίου (Mg^{2+}). Τα κατιόντα αυτά αν δεν απομονωθούν αντιδρούν με το ανιοντικό τμήμα του της τασιενεργής αλυσίδας κάνοντάς την λιγότερο αποτελεσματική ή ιζηματοποιούνται μέσα στο διάλυμα αυξάνοντας την ιλύ στη δεξαμενή. Επίσης, τα Ca^{2+} μπορούν να εμποδίσουν την απομάκρυνση του ρύπου κρατώντας τον στο υπόστρωμα του μετάλλου. Γι' αυτό και το σκληρό νερό εμποδίζει την καθαριστική δράση του επιφανειοδραστικών άρα του απορρυπαντικού. Παράλληλα, οι *builders* ρυθμίζουν το pH του διαλύματος ώστε να παραμένει βασικό.



Εικόνα 1.37: Builders εξουδετερώνουν τα Ca^{2+}, Mg^{2+} του νερού («μαλακώνουν» το νερό)



Εικόνα 1.38: Δράση κατιόντων σκληρού νερού στα επιφανειοδραστικά

Οι μηχανισμοί με τους οποίους δρουν οι «builders» είναι:

- Διαλυτοί αρχικά σχηματίζουν διαλυτές ενώσεις με τα Ca^{2+}, Mg^{2+} (απομονωτές) π.χ sodium tripolyphosphate.
- Διαλυτοί αρχικά σχηματίζουν αδιάλυτες ενώσεις με τα Ca^{2+},Mg^{2+} (κατακρημνιστές) π.χ. ανθρακικό νάτριο (σόδα).
- Αδιάλυτοι αρχικά σχηματίζουν αδιάλυτες ενώσεις με τα Ca^{2+}, Mg^{2+} (ιοανταλλαγής) π.χ. ζεόλιθος

Παραδείγματα χημικών ενώσεων που «μαλακώνουν» το νερό είναι:

Ανόργανοι: Πυριτικά άλατα: $Na_2H_2SiO_4.5H_2O$
Φωσφορικά άλατα: $K_5P_3O_{10}, K_4P_2O_7$
Ανθρακικά άλατα: Na_2CO_3 (σόδα),
Βορικά άλατα: $Na_2B_4O_7.10H_2O$
Άλλα: $CaCl_2$, $MgSO_4(H_2O)_x$, $NaOH, KOH$

Οργανικοί: Συμπληρώματα αλκανολαμίνης - λιπαρών οξέων

1.8.3 Ενισχυτές γαλακτωματοποίησης

Πρόκειται για λεπτά διαμελισμένα σωματίδια στερεών ουσιών υπό τη μορφή λεπτής σκόνης (υδροξείδιο του μαγνησίου, υδροξείδιο του ασβεστίου, οξείδιο ψευδαργύρου, τιτανίου). Οι ουσίες αυτές ενσωματώνονται στην επιφάνεια διαχωρισμού και βοηθούν στο σχηματισμό και τη σταθερότητα του γαλακτώματος. Όταν προσροφώνται στην επιφάνεια διαχωρισμού, σχηματίζουν ένα λεπτό στρώμα στερεών σωματιδίων που εμποδίζει τα σταγονίδια να συνενωθούν.

1.8.4 Αναστολείς διάβρωσης (*Corrosion* Inhibitors)

Η αναστολή της διάβρωσης επιτυγχάνεται με το σχηματισμό ενός στρώματος παθητικοποίησης (λεπτής μεμβράνης) στην επιφάνεια του μετάλλου ώστε να απομονώνονται περιοχές με διαφορετικό δυναμικό. Κοινός αναστολέας διάβρωσης αποτελεί το άλας πυριτικού νατρίου (Na_2SiO_3)

1.8.5 Πρόσθετα - Μειωτές αφρισμού (Additives - Foam Regulators)

Χημικά πρόσθετα που μειώνουν κι εμποδίζουν τη δημιουργία αφρού είτε μετατοπίζοντας τους σταθεροποιητές αφρισμού μεταξύ των φυσαλίδων είτε τοπικά προκαλώντας «έκρηξη» των φυσαλίδων.

1.9 Αφρός – Αφρισμός

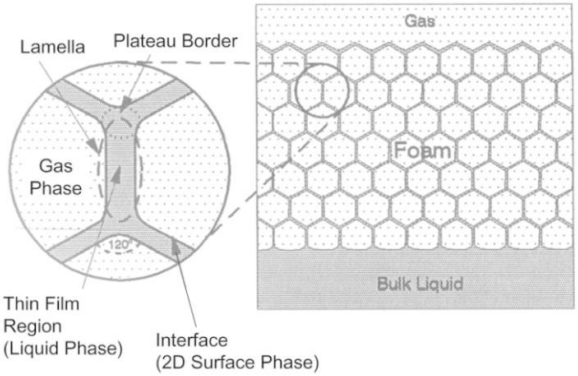
Ο αφρός δεν είναι επιθυμητός στον υδατικό καθαρισμό δεδομένου ότι δεσμεύει στην διεπιφάνεια του μόρια τασιενεργών με αποτέλεσμα αυτά να μην χρησιμοποιούνται στον καθαρισμό των εξαρτημάτων. Επίσης, αν φυσαλίδες αφρού αναρροφώνται από την αντλία θα δαπανάται επιπλέον ισχύς στην συμπίεση του αέρα με αποτέλεσμα τη μεταβολή του σημείου λειτουργίας της αντλίας και άρα την αποτυχία του καθαρισμού και της μηχανής.

1.9.1 Γενικός μηχανισμός

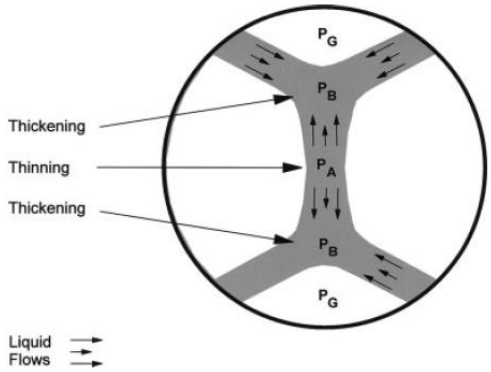
Ο αφρός είναι ένα σύστημα διεσπαρμένων φυσαλίδων αερίου που διαχωρίζονται μεταξύ τους από στρώση υγρού. Τα καθαρά υγρά δεν αφρίζουν εύκολο, ενώ αντίθετα η μείωση της επιφανειακής τάσης με την προσθήκη απορρυπαντικού ευνοεί το σχηματισμό και σταθεροποίηση του αφρού. Η δημιουργία αφρού απαιτεί μηχανικό έργο (W) για την αύξηση της επιφάνειας (ΔΑ):

$$W = \gamma \Delta A \tag{1.4}$$

όπου γ η επιφανειακή τάση. Η δημιουργία του αφρού συμβαίνει κατά την ανακίνηση του ρευστού, καθώς το λιπόφιλο μέρος του τασιενεργού τείνει να διαφύγει από το νερό κατευθυνόμενο προς την επιφάνεια, ενώ παράλληλα το υδρόφιλο μέρος μένει στο νερό, εγκλωβίζοντας ενδιάμεσα αέρα (*Εικόνα 1.41*).



Εικόνα 1.39: Χαρακτηριστική δομή αφρού



Εικόνα 1.40: Ροή υγρού ενδιάμεσα των φυσαλίδων προκαλεί μείωση πάχους λαμέλλας

1.8.6 Παράγοντες καταστολής αφρού

Λόγω της σημαντικής διαφοράς της πυκνότητα του αερίου από το υγρό οι φυσαλίδες γρήγορα ανεβαίνουν προς την επιφάνεια, παραμορφώνοντάς την και σχηματίζουν πολυεδρικές δομές πάνω από αυτή (σύνορα $Plateau$). Η φυσαλίδα αερίου διατηρείται όσο η επιφανειακή τάση (σ_θ) δεν ξεπερνάει το «όριο διαρροής» της φυσαλίδας

$$\sigma_\theta = \frac{Rp}{2t} \tag{1.5}$$

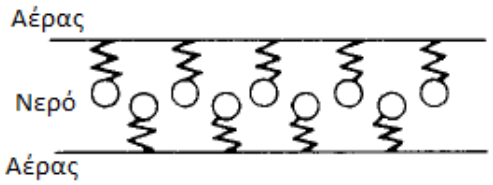
Όπου R η ακτίνα της φυσαλίδας, t το πάχος της μεμβράνης και p η εσωτερική μανομετρική πίεση αερίου.

Η καταστολή του αφρού συμβαίνει όταν:

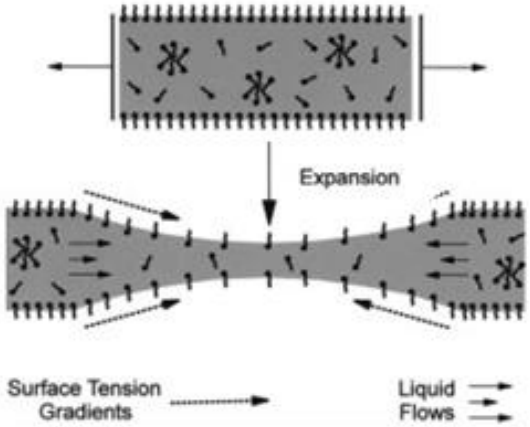
- Λόγω βαρύτητας αποστραγγιστεί το υγρό γύρω από τη φυσαλίδα.
- Αν υπάρχει διαφορά συγκέντρωσης στο υγρό (ροή από τη λαμέλλα προς τα σύνορα Plateau) με αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση του πάχους λαμέλλας, $t \ll \rightarrow \sigma_\theta \gg$ (*Εικόνα 1.40)*
- Λόγω διαφοράς πιέσεως όταν δυο φυσαλίδες ενώνονται με αποτέλεσμα την ανακατανομή του αφρού (φαινόμενο χιονοστιβάδας)

1.8.7 Επίδραση των τασιενεργών στη δημιουργία και διατήρηση του αφρού

Όταν στο υγρό περιέχονται μόρια τασιενεργών και δημιουργηθεί αφρός, αυτά λόγω του υδρόφοβου τμήματος και της διαστολής της μεμβράνης μεταξύ των φυσαλίδων, συναντώνται σε μεγαλύτερους αριθμούς στην επιφάνεια του ρευστού απ' ότι στο στρώμα ρευστού μεταξύ των φυσαλίδων.



Εικόνα 1.41: Δημιουργία φυσαλίδων



Εικόνα 1.42: Λιγότερα μόρια τασιενεργών στο διαστελλόμενο τμήμα προκαλεί μεταβολή στην επιφανειακή τάση και άρα ροή ρευστού

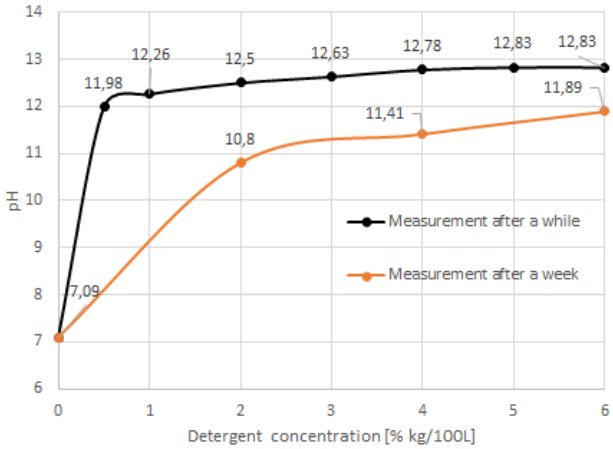
Άρα η πτώση επιφανειακής τάσης θα είναι μεγαλύτερη στην επιφάνεια του ρευστού απ' ότι στη διεπιφάνεια μεταξύ των φυσαλίδων. Επομένως λόγω του φαινομένου *Gibbs-Marangoni* θα αναπτυχθεί ροή ρευστού από την περιοχή χαμηλής επιφανειακής τάσης προς την αντίστοιχη υψηλής *(λαμέλλα, σύνορο Plateau*), έτσι που το στρώμα ρευστού γύρω από τις φυσαλίδες θα συντηρείται με αποτέλεσμα τη μη καταστολή του αφρού.

1.10 Μέτρηση περιεκτικότητας απορρυπαντικού

Ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας απορρυπαντικού στο υπό χρήση διάλυμα γίνεται με τη μέθοδο της τιτλοδότησης. Η τιτλοδότηση (*titration test*) αφορά τον προσδιορισμό περιεκτικότητας μιας ένωσης σε διάλυμα παρατηρώντας αλλαγή σε αντίδραση του διαλύματος με γνωστή άλλη ένωση. Σύμφωνα με τη διαδικασία, σε συγκεκριμένο δείγμα διαλύματος, γνωστού όγκου γίνεται αρχικά προσθήκη δείκτη φαινολοφθαλεΐνης $C_{20}H_{14}O_4$ (*acid-based titration test*) με αποτέλεσμα να προκληθεί στο διάλυμα αλλαγή χρώματος (μοβ χρώμα, ένδειξη βασικού διαλύματος, αν χρησιμοποιηθεί φαινολοφθαλεΐνη). Έπειτα, στο μοβ διάλυμα, γίνεται προσθήκη και μέτρηση σταγόνων κάποιου οξέος, συνήθως HCl (*titrant*) μέχρις ότου το διάλυμα επανέλθει στο αρχικό του διαφανές χρώμα. Με την προσθήκη κάθε σταγόνας γίνεται εξουδετέρωση των υδροξυλίων και νέα υδροξύλια παράγονται από το απορρυπαντικό, μέχρις ότου εξουδετερωθούν κι αυτά, οπότε με την επόμενη ρίψη σταγόνας θα αρχίσει η μείωση του pH μέχρις ότου να αλλάξει χρώμα το διάλυμα (ένδειξη ουδέτερου pH). Οπότε, ανάλογα με τον αριθμό των σταγόνων που ρίχθηκαν καθορίζεται η περιεκτικότητα του απορρυπαντικού στο διάλυμα της δεξαμενής.

Σημειώνεται ότι η μέτρηση του pH του διαλύματος **δεν** αποτελεί ένδειξη για την περιεκτικότητα απορρυπαντικού στο διάλυμα διότι η σχέση του pH με την περιεκτικότητα δεν είναι γραμμική όπως φαίνεται στις μετρήσεις στην *Εικόνα 1.44.*

Εικόνα 1.43: Μέτρηση pH διαλύματος ανά περιεκτικότητα



Εικόνα 1.44: pH (± 0.01) απορρυπαντικού Karcher RM-63 συναρτήσει περιεκτικότητας

Επίσης, επισημαίνεται, ότι αν πρόκειται να γίνει μέτρηση pH του διαλύματος αυτή πρέπει να γίνει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ώστε να είναι έγκυρη. Δεδομένου ότι η διαμόρφωση ιόντων υδρογόνου (H^+) και υδροξυλίου (OH^-) από το μόριο νερού είναι ενδόθερμη αντίδραση ($H_2O_{(aq)} \rightleftharpoons H^+_{(aq)} + OH^-_{(aq)}$), καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του, σύμφωνα με την αρχή του *Le Châtelier*, για να επέλθει ισορροπία το σύστημα τείνει να κατεβάσει τη θερμοκρασία απορροφώντας θερμότητα, οπότε επιπλέον ιόντα υδρογόνου και υδροξυλίου θα δημιουργηθούν.

$T[^oC]$	pH	pOH
0	7.47	7.47
10	7.27	7.27
20	7.08	7.08
25	7.00	7.00
30	6.92	6.92
40	6.77	6.77
50	6.63	6.63
100	6.14	6.14

Πίνακας 1.2: pH, pOH και θερμοκρασία

Αν και με την αύξηση της θερμοκρασίας το pH πέφτει, αυτό δε σημαίνει ότι το νερό γίνεται πιο όξινο στις μεγάλες θερμοκρασίες αλλά παραμένει ουδέτερο, δεδομένου ότι $pH = pOH$. Επομένως, η μέτρηση του pH ($pH = -\log H^+$) της δεξαμενής πρέπει να γίνεται πριν την θέρμανση του διαλύματος.

Κεφάλαιο 2
Σχεδιασμός δεξαμενής για ανακύκλωση εργαζόμενου μέσου

2.1 Γενικά στοιχεία

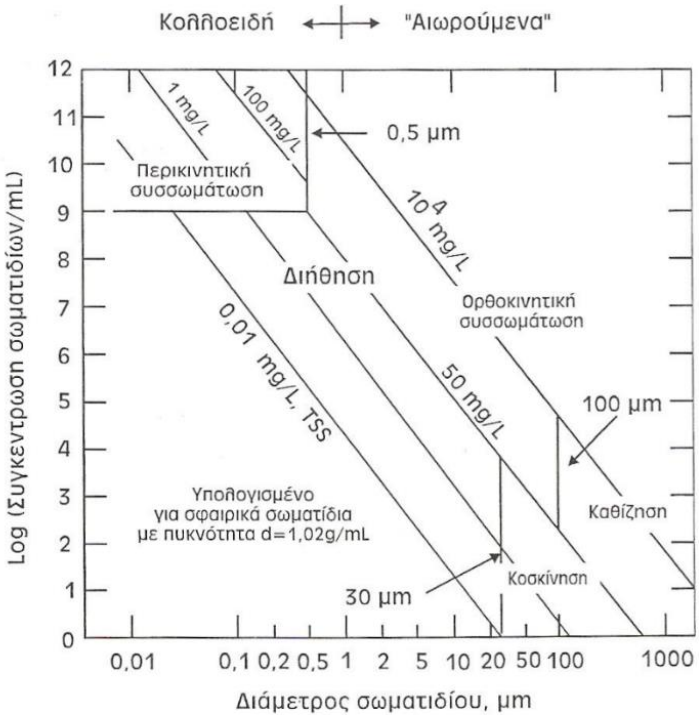
Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης κάθε πλύσης το χρησιμοποιούμενο νερό εισέρχεται στη δεξαμενή μαζί με τους ρύπους που αφαιρέθηκαν. Επομένως, για να ξαναχρησιμοποιηθεί, προκύπτει η ανάγκη το ρευστό στην έξοδο της δεξαμενής να βγαίνει όσο το δυνατόν καθαρότερο δηλαδή να περιέχει όσο το δυνατόν λιγότερα σωματίδια με σκοπό την ξαναχρησιμοποίησή του

2.1.1 Μηχανισμοί αφαίρεσης-απομάκρυνσης-διαχωρισμού σωματιδίων σε πλυντήρια εξαρτημάτων

- Βαρυτικός διαχωρισμός (Gravity separation)
  - Πλεονεκτήματα: Απλή τεχνολογία, μικρές απαιτήσεις σε ενέργεια, μικρό λειτουργικό και κόστος εγκατάστασης.
  - Μειονεκτήματα: Χαμηλοί ρυθμοί καθαρισμού, μεγάλες απαιτήσεις σε χώρο, αδυναμία διαχωρισμού πολύ μικρών σωματιδίων.
- Επίπλευση (Flotation)
- Σύστημα φιλτραρίσματος (Filtration)

Η χρήση φίλτρου για την από-γαλακτωματοποίηση του διαλύματος αποτελεί μη αποδοτική διαδικασία αφού το φίλτρο καλύπτεται γρήγορα από ρύπους οπότε η συχνή αντικατάστασή του δεν αποσβένει το κέρδος από την αύξηση της διάρκειας ζωής του διαλύματος.

Τεχνολογία μεμβράνης: Σε αυτή την περίπτωση το διάλυμα δεχόμενο πίεση περνάει μέσα από ένα σύστημα μεμβρανών όπου συγκρατούνται τα πολύ μικρά σωματίδια διαμέτρου 0,005-0,1μm στα οποία συμπεριλαμβάνονται και τα σωματίδια γαλακτωματοποιημένου λαδιού με πολύ μικρές ανάγκες σε χώρο και ενδείκνυνται για καθαρισμό μη πυριτικών καθαριστικών διαλυμάτων. Τα αρνητικά της μεθόδου αυτής είναι ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί για ζεστά και καυστικά διαλύματα, ενώ πολλές φορές χρειάζεται προ-επεξεργασία του διαλύματος πριν το τελικό φιλτράρισμα.



Εικόνα 2.1: Διάγραμμα επιλογής μεθόδου διαχωρισμού σωματιδίων από το νερό

2.1.2 Βαρυτικός διαχωρισμός

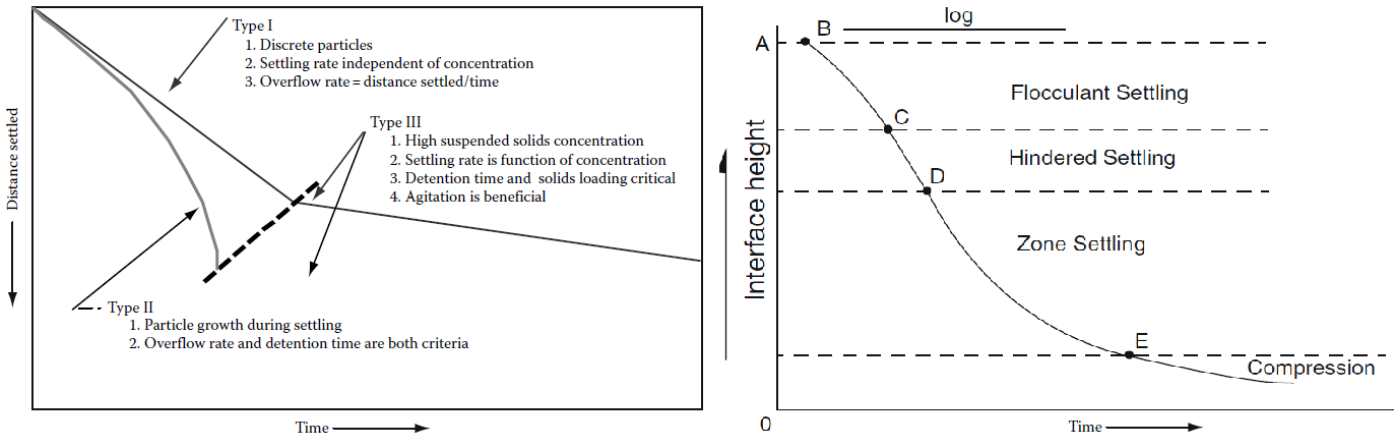
Ο διαχωρισμός των ρύπων και του μη γαλακτωματοποιημένου λαδιού μπορεί να επιτευχθεί με φυσική διαδικασία μέσα από ειδική σχεδίαση (gravity separator, plate separator, coalescing unit) της δεξαμενής (settling tank, sedimentation tank).

Ορισμοί

- Καθίζηση (Settling): Η διαδικασία κατά την οποία τα σωματίδια καθιζάνουν ανάλογα με την έλξη τους από τη βαρύτητα.
- Ιζηματοποίηση (Sedimentation): Η κατάσταση στην οποία τα σωματίδια έχουν καθιζάνει στον πάτο της δεξαμενής.

Τύποι διαχωρισμού σωματιδίων (βαρυτικός διαχωρισμός)

- Τύπος I: Διακριτή καθίζηση (discrete settling) σωματιδίων (η ταχύτητα καθίζησης κάθε σωματιδίου είναι σταθερή και η τροχιά που χαράσσει μέχρι να καθιζάνει είναι ευθεία γραμμή).
- Τύπος II: Τα σωματίδια κατά την πτώση τους μεγαλώνουν σε μέγεθος (flocculent settling) με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ταχύτητα και ο χρόνος καθίζησης.
- Τύπος III: Καθώς τα σωματίδια φτάνουν στον πάτο της δεξαμενής, η μεταξύ τους απόσταση μειώνεται σε τέτοιο βαθμό που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους με αποτέλεσμα να παρεμποδίζεται η καθίζησή τους (hindered settling)
- Τύπος IV: Μετά την καθίζηση πολλών σωματιδίων η πυκνότητα αυξάνεται σημαντικά, φτάνοντας σ' ένα σημείο όπου τα σωματίδια δεν μπορεί να υποστηρίξει το ένα το άλλο και περαιτέρω καθίζηση γίνεται μέσω συμπίεσης (compression settling), με αποτέλεσμα τελικά να δημιουργείται στον πάτο της δεξαμενής στρώμα ιλύος.



Εικόνα 2.2: Ταχύτητα καθίζησης και απόσταση αλληλεπίδρασης μεταξύ σωματιδίων συναρτήσει του χρόνου

Γενικές Παρατηρήσεις

- Η συνισταμένη δύναμη κατευθύνει το κάθε σωματίδιο.
- Τα σωματίδια κατακάθονται στον πυθμένα σχηματίζοντας ένα ίζημα.
- Σωματίδια μεγαλύτερα των 150μm διαχειρίζονται αποτελεσματικά από βαρυτικά συστήματα.
- Η αποδοτικότητα του διαχωρισμού σωματιδίων αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Παράγοντες από-γαλακτωματοποίησης

- Μείωση θερμοκρασίας.
- Μείωση τυρβώδους ροής στη δεξαμενή.

Κατά τη διάρκεια μου η μηχανή μένει ανενεργή ευνοείται η από-γαλακτωματοποίηση και άρα το λάδι μπορεί και φτάνει στην επιφάνεια για να απομακρυνθεί.

Επίδραση τύρβης στη δεξαμενή: Αύξηση μεταφοράς θερμότητας, μάζας και άρα ανάμειξης του εργαζόμενου μέσου.

2.1.3 Κατασκευαστικές παρατηρήσεις

Σχεδίαση Δεξαμενής	Καλή	Καλύτερη	Άριστη
Υλικό Κατασκευής (υδατικός καθαρισμός)	Πλαστικό (Πολυπροπυλένιο)	Χάλυβας	Ανοξείδωτος Χάλυβας
Όγκος	x2 του όγκου γεμάτου καλαθιού	x3 του όγκου γεμάτου καλαθιού	
Επιφάνεια	x2 της επιφάνειας του καλαθιού	x3 της επιφάνειας του καλαθιού	
Χρησιμοποιούμενος χώρος	Όπως προκύψει	Δεξαμενή κάθετα, από κάτω του κυρίου μέρους	
Σύνδεση-στεγάνωση σωληνώσεων	Βιδωτά	Με φλάντζα (Teflon flange gasket)	Με φλάντζα (O-ring gasket)
Θερμοστοιχεία	Εξωτερικά της δεξαμενής (μη εμπόδιση κυκλοφορίας του ρευστού)	Εσωτερικά της δεξαμενής (βελτίωση μεταφοράς θερμότητας)	
Μόνωση	Όχι	Ναι (Μείωση απωλειών)	
Γωνίες Βάσης	Τετράγωνες		
Βάση δεξαμενής	Επίπεδη		Ελαφρώς κεκλιμένη προς τη μια μεριά

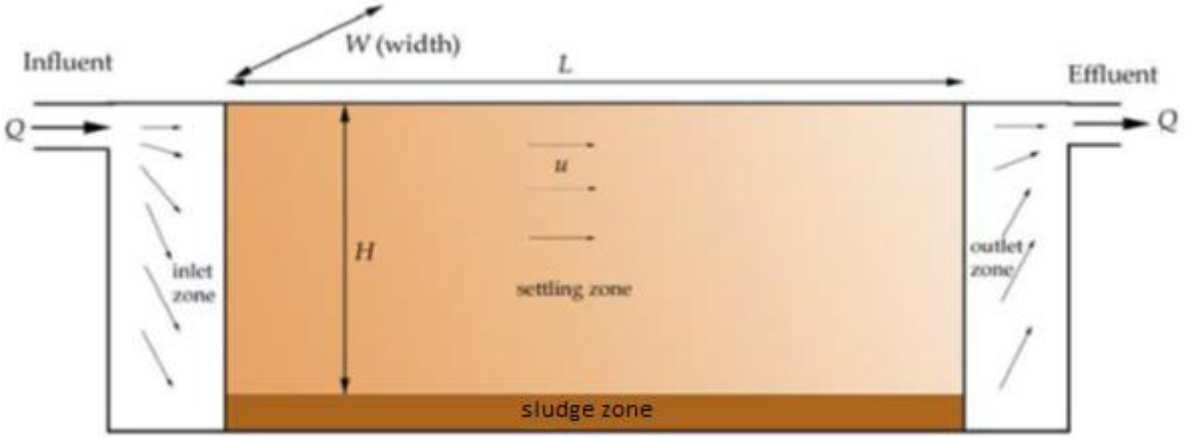
Πίνακας 2.1: Κατασκευαστικές παρατηρήσεις για το σχεδιασμό της δεξαμενής ([3] *Durkee, J. B.*)

2.2 Ανάλυση ορθογωνικής δεξαμενής καθίζησης

Σημειώνεται ότι η παρακάτω ανάλυση που ακολουθεί αφορά το κάθε σωματίδιο ξεχωριστά (διακριτή καθίζηση), δεν συμπεριλαμβάνει την αλληλεπίδραση μεταξύ των σωματιδίων, ούτε την ενδεχόμενη αύξησης βάρους λόγω συνένωσης σωματιδίων κατά την καθίζηση.

2.2.1 Χαρακτηριστικές ζώνες και μεγέθη δεξαμενής

- Ζώνη εισόδου (Inlet zone): Το ρευστό κατά την είσοδό του χρειάζεται ένα χώρο ώστε η ροή μέσα στη δεξαμενή να αποκτήσει ομοιομορφία (περιεκτικότητα σωματιδίων, ταχύτητα).
- Ζώνη καθίζησης (Settling zone): Η οριζόντια κίνηση της ροής και η κατακόρυφη συνιστώσα της βαρύτητας επί των σωματιδίων τα οδηγούν προς τον πάτο της δεξαμενής.
- Ζώνη ιλύος (Sludge zone): Η ζώνη που σχηματίζεται στον πάτο της δεξαμενής από την εναπόθεση των σωματιδίων. Όσα σωματίδια φτάνουν αυτή τη ζώνη δεν εξέρχονται από την δεξαμενή με την πορεία του ρευστού.
- Ζώνη εξόδου (Outlet zone): Σε αυτή τη ζώνη όσα σωματίδια υπάρχουν συμπαρασύρονται προς την έξοδο μαζί με το ρευστό.



Εικόνα 2.3: Πιο απλή σχεδίαση ορθογωνικής δεξαμενής

Χαρακτηριστικά μεγέθη δεξαμενής:

H: Βάθος ζώνης καθίζησης (ενεργό βάθος δεξαμενής)

L: Μήκος ζώνης καθίζησης (ενεργό μήκος δεξαμενής)

W: Πλάτος ζώνης καθίζησης (ενεργό πλάτος δεξαμενής)

$V = HxLxW$: Όγκος νερού δεξαμενής

Q: Παροχή όγκου ρευστού

$u = \frac{Q}{HW}$: Ταχύτητα ροής

$T = \frac{V}{Q}$: Χρόνος παραμονής στοιχείου ρευστού-σωματιδίου στη δεξαμενή

Σημείωση: Στη πραγματικότητα η ροή που θα δημιουργηθεί θα ακολουθήσει τη διαδρομή με την μικρότερη αντίσταση (βραχυκύκλωμα) με αποτέλεσμα τη δημιουργία νεκρών ζωνών (dead zones) όπου εκεί το ρευστό θα παραμένει σχεδόν ακίνητο ή θα ανακυκλοφορεί (short circuiting) με αποτέλεσμα ο πραγματικός χρόνος παραμονής του σωματιδίου στη δεξαμενή (αν αυτό δεν εισέλθει στην περιοχή ανακυκλοφορίας) να είναι πολύ πιο μικρός.

2.2.2 Υπολογισμός ταχύτητας καθίζησης σωματιδίου

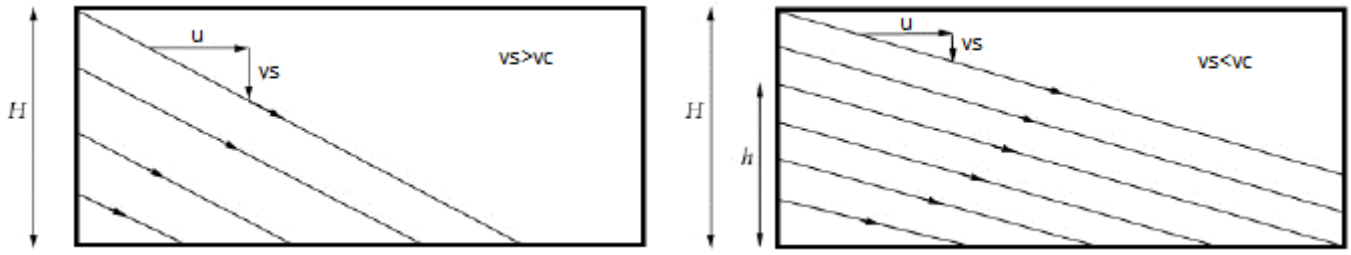
Αν ένα σωματίδιο μάζας m_p με κατακόρυφη ταχύτητα v_s (*settling velocity*) πέφτει κινούμενο κατά μήκος της δεξαμενής τότε το κατακόρυφο μήκος που διανύει είναι:

$$h = v_s T = v_s \frac{L}{u} \tag{2.1}$$

Αν

- $h \geq H$,τότε το σωματίδιο θα φτάσει στον πάτο της δεξαμενής πριν το τέλος της δεξαμενής.

- $h < H$,τότε το αν θα φτάσει ή όχι στον πάτο της δεξαμενής εξαρτάται από το ύψος εισόδου του στη δεξαμενή. Αν εισέλθει στη δεξαμενή σε ύψος $> h$ τότε θα εξέλθει μαζί με την ροή από την έξοδο και το αντίθετο.



Εικόνα 2.4: Αναπτυσσόμενες τροχιές σωματιδίων κατά τη είσοδό τους στη δεξαμενή

Έτσι ορίζεται η μέγιστη κατακόρυφη ταχύτητα (κρίσιμη ταχύτητα) σωματιδίου v_c (*overflow rate*) για την οποία το σωματίδιο εισερχόμενο από το πάνω μέρος θα καθιζάνει στον πάτο της δεξαμενής αναπτύσσοντας γραμμικές τροχιές.

$$v_c = \frac{H}{T} = \frac{Hu}{L} = \frac{H}{L}\frac{Q}{WH} = \frac{Q}{A_s} \tag{2.2}$$

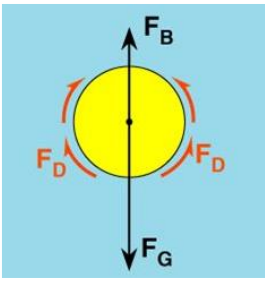
Επίσης ορίζεται η αποτελεσματικότητα της καθίζησης ως:

$$\eta_{sed} = \frac{h}{H} = \frac{v_s L}{uH} = \frac{v_s}{v_c} \leq 1 \tag{2.3}$$

Καθώς το σωματίδιο εισέρχεται στη δεξαμενή βυθιζόμενο στο ρευστό αρχίζει να επιταχύνεται από την επίδραση του βαρυτικού πεδίου ενώ ταυτόχρονα δέχεται αντίθετες δυνάμεις από την άνωση και την τριβή με το ρευστό. Οι ανωστικές και οι βαρυτικές δυνάμεις είναι σταθερές, ενώ η αντίσταση από την τριβή είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας. Έτσι κάποια στιγμή, από την ισορροπία των δυνάμεων το σωματίδιο θα αποκτήσει σταθερή ταχύτητα καθίζησης (v_s).

Χαρακτηριστικά μεγέθη σωματιδίου:

m_p, V_p, ρ_p: Μάζα, Όγκος, Πυκνότητα σωματιδίου
A_p: Προβαλλόμενη επιφάνεια σωματιδίου σε επίπεδο κάθετο της ροής
d: Διάμετρος σωματιδίου
ρ_w: Πυκνότητα νερού
C_D: Συντελεστής αντίστασης
$s = \rho_p/\rho_w$: Ειδική πυκνότητα
v_s: Ταχύτητα καθίζησης σωματιδίου



Εικόνα 2.5: Ασκούμενες δυνάμεις σε σωματίδιο

Η ισορροπία δυνάμεων σε ένα σωματίδιο γράφεται:

$$m_p \frac{dv_s}{dt} = F_G - F_B - F_D \tag{2.4}$$

Όπου:

Βαρυτική δύναμη: $F_G = m_p g = \rho_p V_p g$

Δύναμη άνωσης: $F_B = \rho_w V_p g$

Δύναμη αντίστασης: $F_D = C_D A_p \rho_w \frac{v_s^2}{2}$

Με τον συντελεστή αντίστασης, για σφαιρικά σωματίδια, να δίνεται από την πειραματική σχέση:

$$C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}} + \frac{3}{\sqrt{\mathrm{Re}}} + 0.4 \tag{2.5}$$

Όπου $\mathrm{Re} = \frac{v_s d}{\nu_{fluid}}$ ο αριθμός Reynolds της ροής και $\nu_{fluid} = \frac{\mu_{fluid}}{\rho}$ η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού.

Για σφαιρικό σωματίδιο ($V_p = \frac{1}{6}\pi d^3, A_p = \frac{\pi d^2}{4}$) από τις (2.4), (2.5) προκύπτει:

$$\frac{dv_s}{dt} = (1 - \frac{1}{s})\mathrm{g} - (\frac{18\nu_{fluid} v_s}{d^2 s} + \sqrt{\frac{81\nu_{fluid} v_s^3}{16 d^3 s^2}} + 0.255\frac{v_s^2}{sd}) \tag{2.6}$$

Ενώ, για σταθερή ταχύτητα ($\frac{dv_s}{dt} = 0$) από την (2.4) προκύπτει:

$$v_s = \sqrt{\frac{2g(\rho_p - \rho_w)\mathrm{V}_p}{C_D \rho_w A_p}} \tag{2.7}$$

Οπότε, για σφαιρικό σωματίδιο, κινούμενο με σταθερή ταχύτητα, η (2.7) γράφεται:

$$v_s = \sqrt{\frac{4}{3}\frac{(\rho_p - \rho_w)gd}{C_D \rho_w}} \tag{2.8}$$

- Για *στρωτή ροή* ($Re < 1$) οι δύο τελευταίοι προσθετέοι του συντελεστή αντίστασης μπορούν να παραληφθούν άρα

$$C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}} \tag{2.9}$$

Οπότε για **στρωτή ροή** και σφαιρικό σωματίδιο, συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.8), (2.9) προκύπτει ο **Νόμος του Stokes**:

$$v_s = \frac{gd^2}{18\mu_{fluid}}(\rho_p - \rho_w) \tag{2.10}$$

- Στη μεταβατική περιοχή ($1 < Re < 1000$) ο συντελεστής αντίστασης δίνεται από την πειραματική σχέση των $Schiller\ και\ Naumannn$ ([17] *Karimi, M. et al.*) ως:

$$C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}}(1 + 0.15\,\mathrm{Re}^{0.687}) \tag{2.11}$$

- Στην τυρβώδη ροή ($1000 < Re < 10^5$) και για μεγάλα σφαιρικά σωματίδια ο συντελεστής αντίστασης γίνεται ανεξάρτητος του αριθμού Reynolds (άρα και της συνεκτικότητας του ρευστού) και δίνεται από τη σχέση:

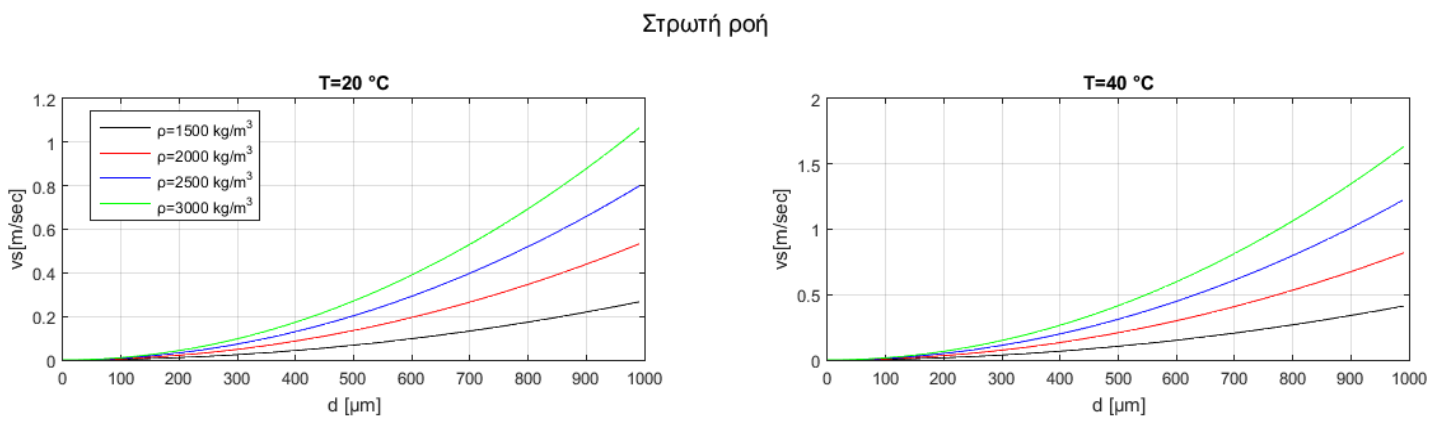
$$C_D = 0.4 \tag{2.12}$$

Οπότε για **τυρβώδη ροή** προκύπτει:

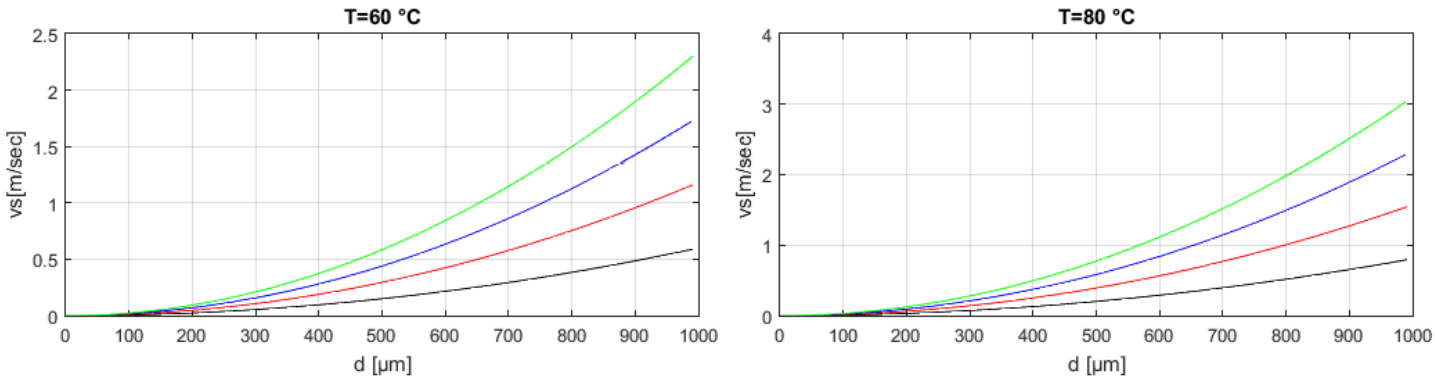
$$v_s = \sqrt{\frac{10}{3} gd \frac{(\rho_p - \rho_w)}{\rho_w}} \tag{2.13}$$

Επομένως προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα σωματίδια με $v_s > v_c$ θα καθιζάνουν στον πάτο της δεξαμενής. Ενώ αυτά $v_s < v_c$ θα παραμένουν στη δεξαμενή με λόγο v_s/v_c.

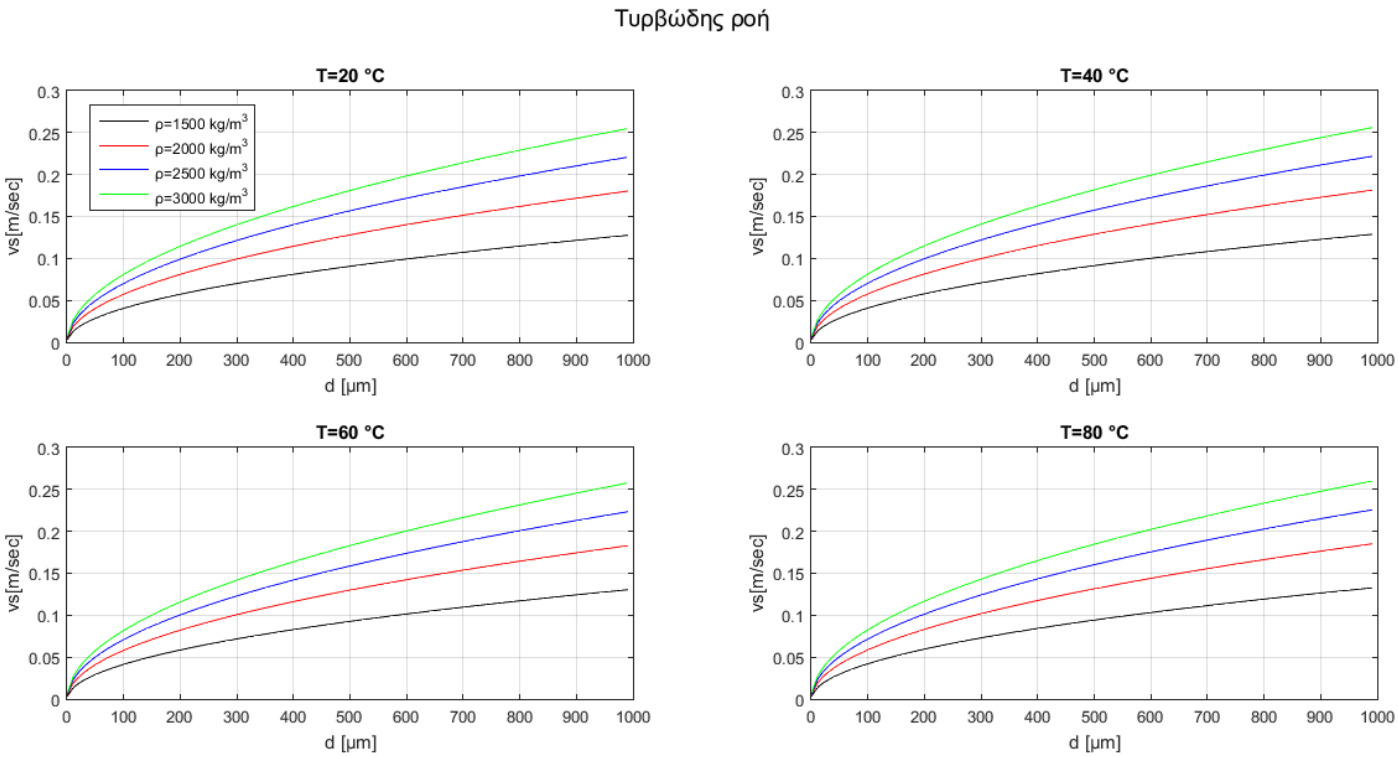
Από τις (2.10), (2.13)και σύμφωνα με την επίδραση της θερμοκρασίας στο νερό στα μεγέθη $\mu_{fluid}, \nu_{fluid}, \rho_w$ (*βλ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α*) προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα.



Εικόνα 2.6: Ταχύτητα καθίζησης σε στρωτή ροή συναρτήσει θερμοκρασίας για διάφορες πυκνότητες σωματιδίου (1/2)



Εικόνα 2.7: Ταχύτητα καθίζησης σε στρωτή ροή συναρτήσει θερμοκρασίας για διάφορες πυκνότητες σωματιδίου (2/2)



Εικόνα 2.8: Ταχύτητα καθίζησης σε τυρβώδη ροή συναρτήσει θερμοκρασίας για διάφορες πυκνότητες σωματιδίου

Παρατήρηση: Για μεγέθη σωματιδίου μέχρι 350μm η ταχύτητα καθίζησης είναι μεγαλύτερη στην τυρβώδη ροή διότι κυριαρχεί η επίδραση του συντελεστή αντίστασης C_D, ο οποίος είναι μεγαλύτερος στη στρωτή ροή. Αντίθετα, για $d_p > 350\mu m$ στην τυρβώδη ροή η ταχύτητα καθίζησης είναι αισθητά πιο μικρή, αφού οι διαστάσεις του σωματιδίου υπερτερούν του μικρού αλλά σταθερού συντελεστή αντίστασης, ενώ η επίδραση της θερμοκρασίας είναι αμελητέα. Άρα, εύκολα προκύπτει το συμπέρασμα της ανάγκης για ελαχιστοποίηση της τυρβώδους ροής, δηλαδή ανάγκη για μικρή παροχή και μεγάλων διαστάσεων δεξαμενή. Οι μεγάλες διαστάσεις μπορούν να αποφευχθούν αν χρησιμοποιηθούν εσωτερικά της δεξαμενής διαφράγματα ή κεκλιμένες πλάκες ώστε να αυξηθεί «εσωτερικά» το εμβαδόν της.

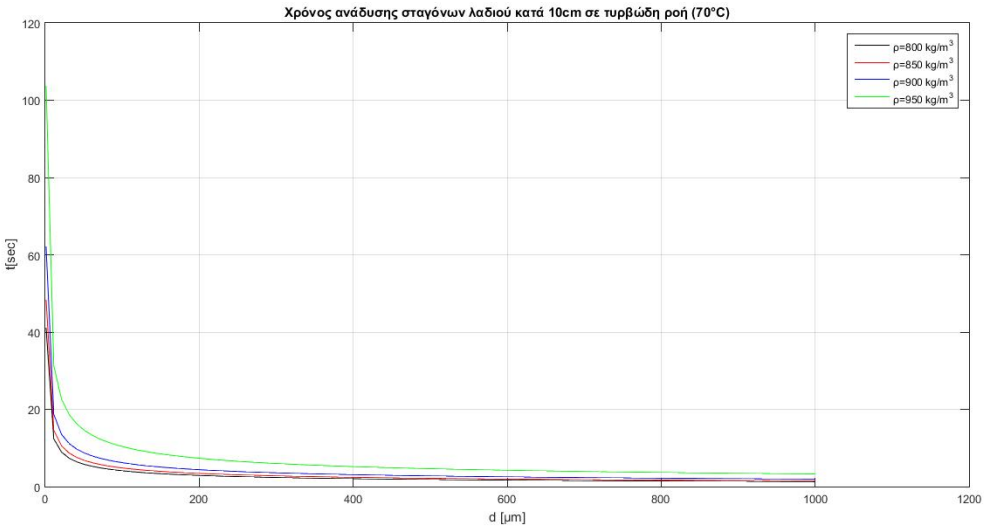
Αντίστοιχα όταν τα σωματίδια είναι μικρότερης πυκνότητας του νερού (π.χ. σωματίδια λαδιού) και άρα θα αναδύονταν η σχέση (2.8) γράφεται:

$$v_{up} = \sqrt{\frac{4}{3}\frac{(\rho_w - \rho_p)gd}{C_D \rho_w}} \tag{2.14}$$

Και αντίστοιχα για την τυρβώδη ροή η ταχύτητα ανάδυσης γράφεται:

$$v_s = \sqrt{\frac{10}{3} gd \frac{(\rho_w - \rho_p)}{\rho_w}} \tag{2.15}$$

Από τη σχέση (2.15) και για διάφορες πυκνότητες λαδιού προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα.

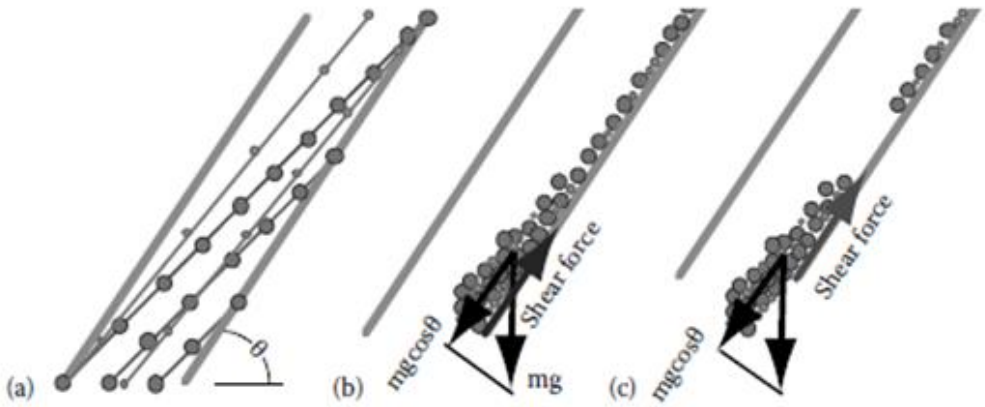


Εικόνα 2.9: Χρόνος ανάδυσης σταγόνας λαδιού συναρτήσει πυκνότητας και διαμέτρου σταγόνας (τυρβώδη ροή)

2.3 Ανάλυση κι αρχή λειτουργίας κεκλιμένων πλακών

2.3.1 Ανάλυση γεωμετρίας

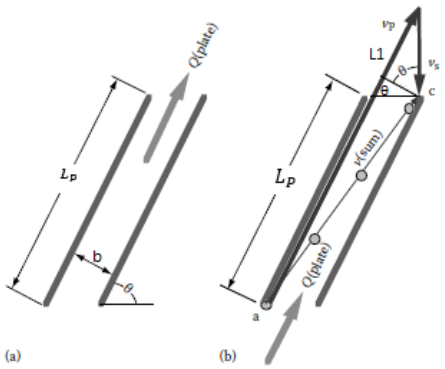
Η λαμέλλα αποτελείται από κεκλιμένες πλάκες $45^o - 60^o$ από το οριζόντιο επίπεδο διατεταγμένες η μία δίπλα στην άλλη έτσι ώστε στη σχεδίαση που το νερό εισέρχεται από κάτω προς τα πάνω ανάμεσα στις κεκλιμένες πλάκες τα σωματίδια καθιζάνουν στο πάνω μέρος της κάτω πλάκας (χωρίς να χρειάζεται να διασχίσουν το συνολικό ύψος της δεξαμενής) και κυλιόμενα να συλλέγονται στο κάτω μέρος της δεξαμενής. Σε μια πρώτη εκτίμηση ο λόγος επιφάνειας που απαιτείται για το διαχωρισμό σωματιδίων σε συμβατική δεξαμενή καθίζησης σε σχέση με αυτή με κεκλιμένες πλάκες κυμαίνεται από $8:1 - 10:1$.



Εικόνα 2.10: Αρχή λειτουργίας κεκλιμένων πλακών (up flow settler): (a) τροχιές δύο διαφορετικών σωματιδίων, (b) τα σωματίδια συσσωρεύονται στην επιφάνεια της χαμηλότερης πλάκας, (c) το βάρος των συγκεντρωμένων σωματιδίων ξεπερνά την διατμητική δύναμη και κυλίονται προς τα κάτω.

Χαρακτηριστικά μεγέθη κεκλιμένης πλάκας:

θ: Γωνία κεκλιμένης πλάκας
L_P: Μήκος κεκλιμένης πλάκας
W_P: Πλάτος κεκλιμένης πλάκας
b: Απόσταση μεταξύ κεκλιμένων πλακών
v_P: Εφαπτομενική ταχύτητα ρευστού
Q_P: Παροχή όγκου ρευστού σε κάθε πλάκα



Εικόνα 2.11: Διανύσματα ταχυτήτων ροή ενδιάμεσα των πλακών

Σύμφωνα με το σχήμα (*Εικόνας 2.11*) είναι:

$$\cos\theta = \frac{b}{v_s} \Rightarrow v_s = \frac{b}{\cos\theta} \tag{2.16}$$

Και

$$\cos\theta = \frac{b/\sin\theta}{L_1} \Rightarrow L_1 = \frac{b}{\cos\theta\sin\theta} \tag{2.17}$$

Για την απλοποίηση της ανάλυσης θεωρείται ότι το προφίλ ταχύτητας μεταξύ των δύο πλακών είναι ομοιόμορφο με μέση ταχύτητα v_P.

Οπότε, αφού $v_P = L_P + L_1$, από τις παραπάνω δύο σχέσεις προκύπτει:

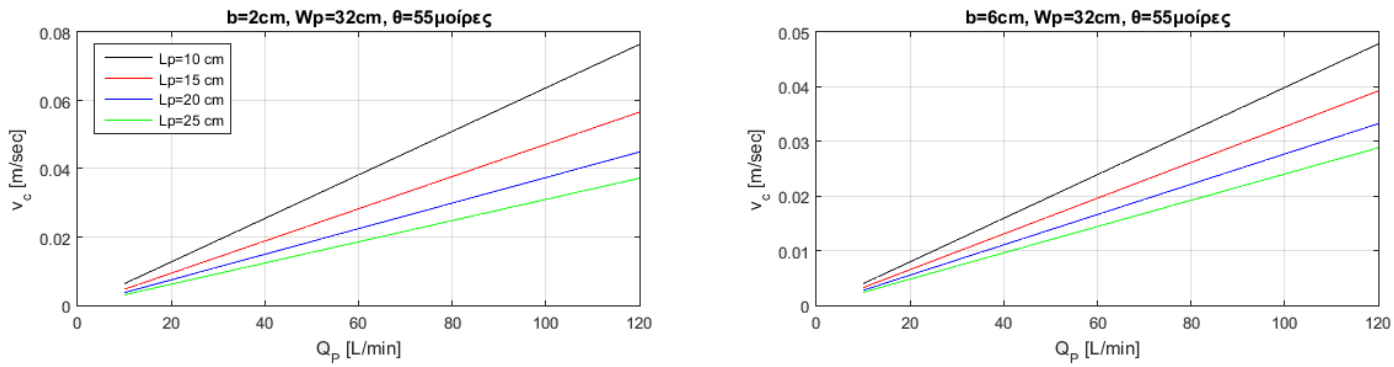
$$\frac{v_s}{v_P} = \frac{b/\cos\theta}{L_P + b/(\cos\theta\sin\theta)} \tag{2.18}$$

Η μέση ταχύτητα σε κάθε πλάκα μπορεί να γραφεί ως:

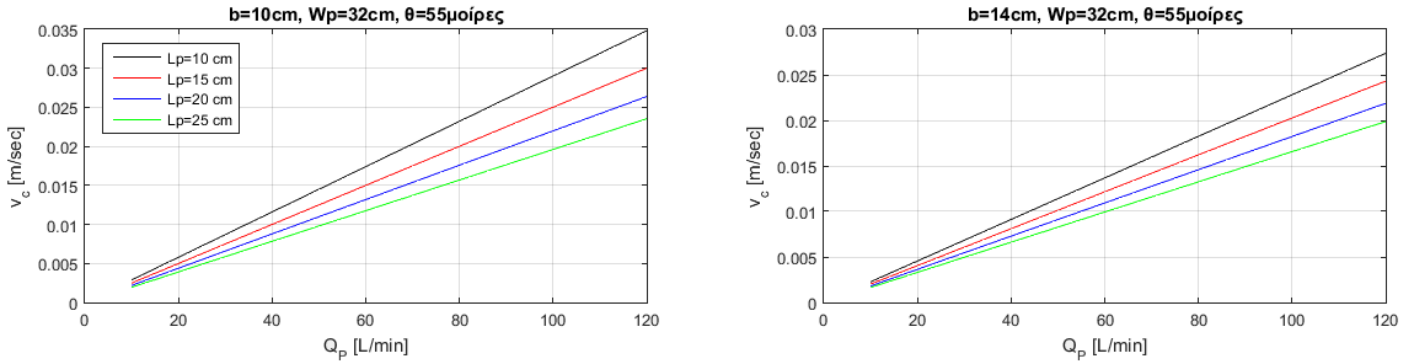
$$v_P = \frac{Q_P}{W_P b} \tag{2.19}$$

Οπότε συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις για την οριακή περίπτωση $v_s = v_c$ προκύπτει:

$$v_c = \frac{Q_P}{L_P W_P \cos\theta + \frac{b}{\sin\theta} W_P} \tag{2.20}$$



Εικόνα 2.12: Κρίσιμη ταχύτητα για διάφορες τιμές διακινούμενης παροχής και απόσταση μεταξύ των πλακών (1/2)



Εικόνα 2.13: Κρίσιμη ταχύτητα για διάφορες τιμές διακινούμενης παροχής και απόσταση μεταξύ των πλακών (2/2)

Επομένως τα σωματίδια με $v_s > v_c$ εισερχόμενα των κεκλιμένων πλακών θα καθιζάνουν τελικά στον πάτο της δεξαμενής.

2.3.2 Ροή ενδιάμεσα των πλακών

Υδραυλική διάμετρος πλακών ($W_P \gg b$) :

$$D_h = \frac{4x\text{Επιφάνεια}}{\text{Βρεχόμενη Περίμετρος}} = \frac{4bW_P}{2W_P} = 2b \tag{2.21}$$

Αριθμός Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{v_P D_h}{\nu} \tag{2.22}$$

Άρα

$$\text{Re} = \frac{2bv_s(\frac{L_P}{b}\cos\theta + \frac{1}{\sin\theta})}{\nu} \tag{2.23}$$

ή μέσω της σχέσης (2.19)

$$\text{Re} = \frac{2Q_P}{\nu W_P} \tag{2.24}$$

Για δεδομένα Re, v_s η σχέση (2.23) γράφεται:

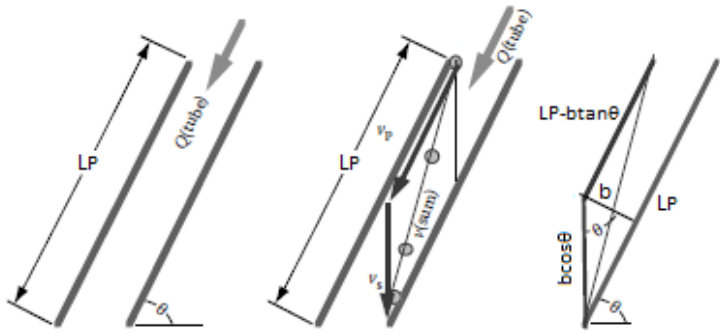
$$\frac{L_P}{b} = \frac{\nu\,\text{Re}}{2bv_s\cos\theta} - \frac{1}{\sin\theta\cos\theta} \tag{2.25}$$

Αδυναμία επίτευξης στρωτής ροής μεταξύ των κεκλιμένων πλακών

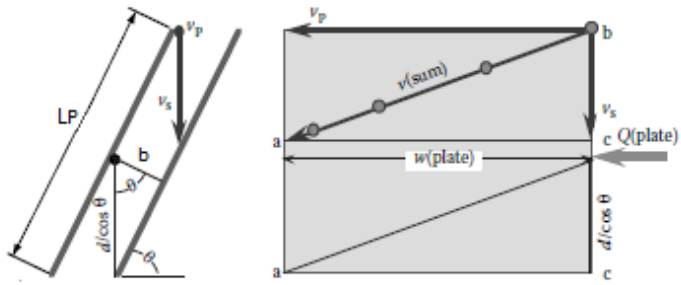
Για $Re < 280,\ T = 70^o \Rightarrow \nu = 4.154 * 10^{-7}\frac{m^2}{sec}$ είναι $Q_P < 5.815\ 10^{-5}\ W_P$, άρα για ελάχιστο πλάτος πλάκας $W_P = 20cm$ προκύπτει $Q_P < 0.7\frac{L}{min}$ που είναι αδύνατο.

2.3.3 Άλλες γεωμετρικές διατάξεις

Εκτός από την παραπάνω περίπτωση όπου η ροή διαμέσου των πλακών είναι από κάτω προς τα πάνω, υπάρχει η δυνατότητα σχεδίασης ώστε η ροή να είναι από πάνω προς τα κάτω ή οριζόντια επί των πλακών και ομοίως προκύπτουν αντίστοιχες εξισώσεις για τον υπολογισμό της v_c (αντίστοιχα της σχέσης 2.20).



Εικόνα 2.14: Down - flow settler



Εικόνα 2.15: Cross - flow settler

Για την περίπτωση ροής από πάνω προς τα κάτω (down-flow settler) είναι:

$$\frac{v_s}{v_P} = \frac{\mathrm{b}/\cos\theta}{(L_P - b\tan\theta)} \tag{2.26}$$

Αντίστοιχα για την οριζόντια ροή επί των πλακών (cross –flow) :

$$\frac{v_s}{v_P} = \frac{\mathrm{b}/\cos\theta}{W_P} \tag{2.27}$$

Οι δύο τελευταίες διατάξεις απορρίφθηκαν διότι σε συγκεκριμένων διαστάσεων γεωμετρία αποδίδουν χαμηλότερη καθίζηση, όμως έχουν το πλεονέκτημα ότι λειτουργούν σε οποιαδήποτε στάθμη του ρευστού τροφοδότησης.

2.4 Το πρόβλημα με τα πολύ μικρά σωματίδια

Στην περίπτωση των σωματιδίων της τάξης των 1μm, όπως οργανικά υπολείμματα, λεπτή άργιλος κ.α., λόγω της μικρής τους μάζας, η τροχιά τους επηρεάζεται από την κίνηση των πλαϊνών μεγαλύτερων σωματιδίων (κίνηση Brown) με αποτέλεσμα να αναπτύσσουν τυχαίες τροχιές και να αδυνατούν να καθιζάνουν. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με συγκεκριμένες τεχνικές (*coagulation-flocculation*) στις οποίες γίνεται χρήση χημικών όπως $Al_2(SO_4)_3, Fe_2(SO_4)_3, FeCl_3, FeSO_4$ και με έντονη ανάδευση του διαλύματος ενεργοποιούνται αντιδράσεις με αποτέλεσμα τη δημιουργία αδιάλυτων συσσωματωμάτων (π.χ. Fe_3S_4, FeS, FeS_2), μεγαλύτερου μεγέθους και μάζας (κροκίδωση), τουλάχιστον 10-100μm, που θα μπορούν πλέον να καθιζάνουν.

- *Κροκιδωτικά και pH όπου δρουν βέλτιστα:*

Θειικό αργίλιο: $[\mathrm{Al}_2(SO_4)_3]\cdot 14H_2O \rightarrow 4-7\,pH$

Θειικός σίδηρος: $[\mathrm{Fe}_2(SO_4)_3]\cdot 3H_2O \rightarrow 3.5-7\,pH$

Τριχλωριούχος σίδηρος: $\mathrm{FeCl}_3\cdot 6H_2O \rightarrow 3.5-6.5\,pH$

Θειικός υποσίδηρος: $\mathrm{FeSO}_4\cdot 7H_2O \rightarrow pH > 8.5$

2.5 Ταχύτητα ροής για τη μη αποκόλληση σωματιδίων από την ιλύ

Αν η μέση οριζόντια συνιστώσα της ροής u_x γίνει μεγαλύτερη από την v_{sc} (*scour velocity*) τότε σωματίδια με $d < d_{sc}$ θα αποκολληθούν από τη ζώνη ιλύος και θα συμπαρασυρθούν από τη ροή. Για να γίνει αυτό πρέπει η τ_b (*bed shear stress*) που ασκείται από το ρευστό να ξεπεράσει την τ_c (*critical shear stress*) ή οριακά:

$$\tau_b = \tau_c \tag{2.28}$$

ή αδιαστοποιώντας

$$\tau_b^* = \tau_c^* \tag{2.29}$$

η αδιάστατη σε κάθε περίπτωση τ^* ([18] *Shields, A.*) ορίζεται ως:

$$\tau^* = \frac{\tau}{(\rho_p - \rho_w)\,\mathrm{gH}} \tag{2.30}$$

Ο υπολογισμός της τ^* γίνεται μέσω εμπειρικών διαγραμμάτων συναρτήσει του αριθμού Reynolds του σωματιδίου είναι δηλαδή:

$$\tau_b^* = f(\mathrm{Re}_p^*) \tag{2.31}$$

Όπου,

$$\mathrm{Re}_p^* = \frac{u^* d_p}{\nu} \tag{2.32}$$

Και u^* η ταχύτητα διάτμησης η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$u^* = kh\frac{\partial u}{\partial h} = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho_w}} \tag{2.33}$$

όπου k ο αδιάστατος συντελεστής $Von\ Karman$ με

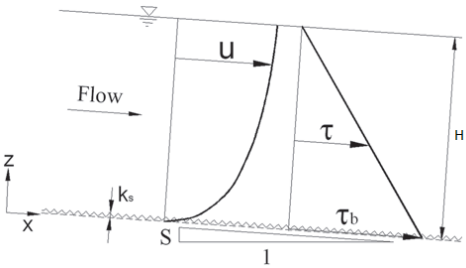
$$k = 0.407 \tag{2.34}$$

Η ταχύτητα διάτμησης και συνεπώς η τ_b παρέχει άμεση ένδειξη της έντασης της ροής και της ικανότητας να παρασύρει και να μεταφέρει ιζήματα. Η πιο απλή προσέγγιση για τον προσδιορισμό της τ_b γίνεται με την υπόθεση ότι η ροή είναι πλήρως ανεπτυγμένη και ομοιόμορφη. Σε αυτή την περίπτωση η τ_b ισούται με τη δύναμη τριβής δηλαδή:

$$\tau_b = \rho_w gH \sin\varphi \tag{2.35}$$

όπου φ η κλίση της δεξαμενής και H το ύψος ρευστού πάνω από τη δεξαμενή. Για μικρές γωνίες η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$\tau_b = \rho_w gH \tan\varphi = \rho_w gHS \tag{2.36}$$



Εικόνα 2.16: Διατμητική τάση στον πάτο της δεξαμενής (bed shear stress)

Τύπος μεταφοράς	Αριθμός Rouse
Έναρξη κίνησης	>7,5
Bed load	2,5<P<7,5
Suspended load - 50%	1,2<P<2,5
Suspended load - 100%	0,8<Pe<1,2
Wash load	<0,8

Πίνακας 2.2: Αριθμός Rouse και κίνηση σωματιδίων

Εκφράζοντας την τ_b με όρους απωλειών πίεσης προκύπτει:

$$\tau_b = \rho_w C_f \bar{u}^2 = \rho_w \frac{f}{8} \bar{u}^2 \tag{2.37}$$

Όπου:

- $\bar{u} = \frac{1}{H}\int_0^H u dz$ η μέση ταχύτητα της ροής
- f συντελεστής τριβής *Darcy-Weisbach* (μέσω αυτού γίνεται διάκριση της u^* με την $\bar{u}$).

Συνδυάζοντας τις δύο τελευταίες σχέσεις και θέτοντας όπου $\bar{u} = u_{sc}$ (ταχύτητα αποκόλλησης σωματιδίου από την ιλύ), για την περίπτωση της στρωτής ροής, προκύπτει:

$$u_{sc}^{laminar} = \sqrt{\frac{8}{f} gH \tan\varphi} \tag{2.38}$$

Όπου δεδομένου της στρωτής ροής $f = \frac{64}{\mathrm{Re}}$.

Ανάλογα με την ταχύτητα καθίζησης και διάτμησης εκάστου σωματιδίου προκύπτει αν αυτό θα αποκολληθεί και θα συμπαρασυρθεί από την ροή. Έτσι ορίζεται ο αδιάστατος αριθμός Rouse ως:

$$P = \frac{v_s}{ku^*} \tag{2.39}$$

Στον *Πίνακα 2.2* φαίνεται για διάφορες τιμές του αριθμού Rouse ή ανάλογη κίνηση των σωματιδίων.

Ορισμοί:

- Bed load: Τα σωματίδια κινούνται κατά μήκος της ιλύος με κύλιση ολίσθηση ή/και κάνοντας μικρά άλματα.
- Suspended load: Τα σωματίδια, κυρίως τα μικρά (λάσπη, άμμος) ανασηκώνονται και μένουν αναρτημένα από την ταχύτητα του ρευστού (ακόμα και απουσία τύρβης).
- Wash load: Σωματίδια μικρότερα των 600μm ανασηκώνονται και απομακρύνονται με τη ροή, χωρίς ξανά να καθιζάνουν.

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.33), (2.35), (2.37) και θέτοντας όπου $\bar{u} = u_{sc}$ προκύπτει:

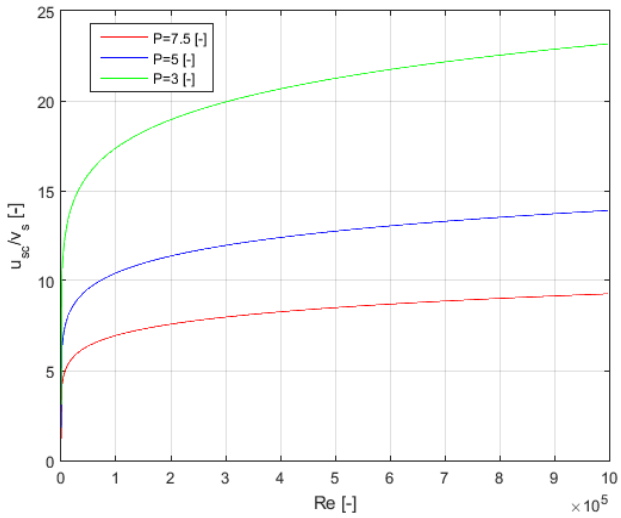
$$u_{sc} \le \frac{1}{Pk}\sqrt{\frac{8}{f}} v_s \tag{2.40}$$

Υποθέτοντας τη ροή στην περιοχή $Re < 800000$ ο συντελεστής τριβής στη συγκεκριμένη περίπτωση μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση Blasius ως:

$$f = \frac{0.316}{\mathrm{Re}^{0.25}} \tag{2.44}$$

Άρα τελικά προκύπτει:

$$\frac{u_{sc}}{v_s} = \frac{12.36}{P}\mathrm{Re}^{0.125} \tag{2.45}$$



Εικόνα 2.17: u_{sc}/v_s συναρτήσει του αριθμού Reynolds για διάφορους αριθμούς P

Επομένως, για τη μη αποκόλληση και απομάκρυνση σωματιδίου (με ταχύτητα καθίζησης v_s) από την ιλύ θα πρέπει να ισχύει:

$$u_{sc} < \bar{u} \tag{2.46}$$

2.5.1 Αδυναμία επίτευξης στρωτής ροή σε διατομή $(h_f\ x\ W)$ κάθετα της ροής

Υδραυλική διάμετρος ορθογωνικής διατομής εισόδου:

$$D_h = \frac{4h_f W}{2(h_f + W)} \tag{2.41}$$

Μέση ταχύτητα κι αριθμός Reynolds στην είσοδο της διατομής:

$$\bar{u} = \frac{Q}{h_f W} \Rightarrow \mathrm{Re} = \frac{2Q}{\nu(h_f + W)} \tag{2.42}$$

Αν η στρωτή ροή επιτυγχάνεται για $Re < 280$ άρα

$$h_f + W > \frac{2Q}{280\nu} \tag{2.43}$$

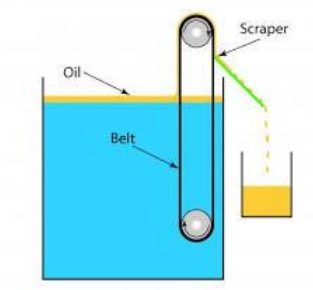
Για τη μικρότερη παροχή λειτουργίας $Q = 50\frac{L}{min} = 8.33 \cdot 10^{-4}\frac{m}{sec}$ και $T = 70^o \Rightarrow \nu = 4.154 \cdot 10^{-7}\frac{m^2}{sec}$ προκύπτει $h_f + W > 14.33m$, διαστάσεις που είναι αδύνατον να υλοποιηθούν.

2.6 Απομάκρυνση λαδιών από την επιφάνεια της δεξαμενής

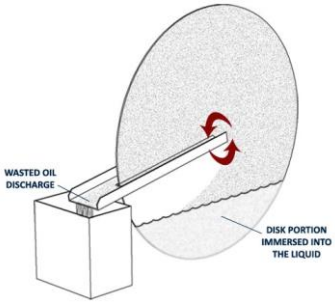
Η απομάκρυνση των πλεούμενων λαδιών από την επιφάνεια της δεξαμενής γίνεται φυσικά με υπερχειλιστή στο πρώτο τμήμα της δεξαμενής, ενώ στο δεύτερο η απομάκρυνση γίνεται μηχανικά με τη χρήση *oil skimmer*.

2.6.1 Τύποι oil skimmers

Οι πιο διαδεδομένοι τύποι μηχανικής απομάκρυνσης λαδιού (με κοινή αρχή λειτουργίας) από την επιφάνεια ρευστού παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 2.18: Belt oil skimmer



Εικόνα 2.19: Disc oil skimmer

Εικόνα 2.20: Tube oil skimmer

Εικόνα 2.21: Screw oil skimmer

2.6.2 Επιλογή oil skimmer

Κατά την επιλογή κατάλληλου oil skimmer πρέπει να ληφθούν υπόψη η θερμοκρασία του νερού, το pH του διαλύματος και η στάθμη της δεξαμενής.
Δεδομένου ότι στην παρούσα εφαρμογή για θέματα χωρητικότητας απαιτείται ύψος δεξαμενής, αναγκαίο είναι το ύψος του oil skimmer πάνω από αυτήν να είναι τον μικρότερο δυνατό. Με αυτόν τον περιορισμό επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί *belt type oil skimmer (Abanaki Mighty Mini 1", belt length 153mm),* υλικού ζώνης (*belt*) και λεπίδας καθαρισμού (*wiper blade*), ανοξείδωτος χάλυβας (corrosion resistant steel) και νιτρίλιο (*nitrile*) αντίστοιχα .

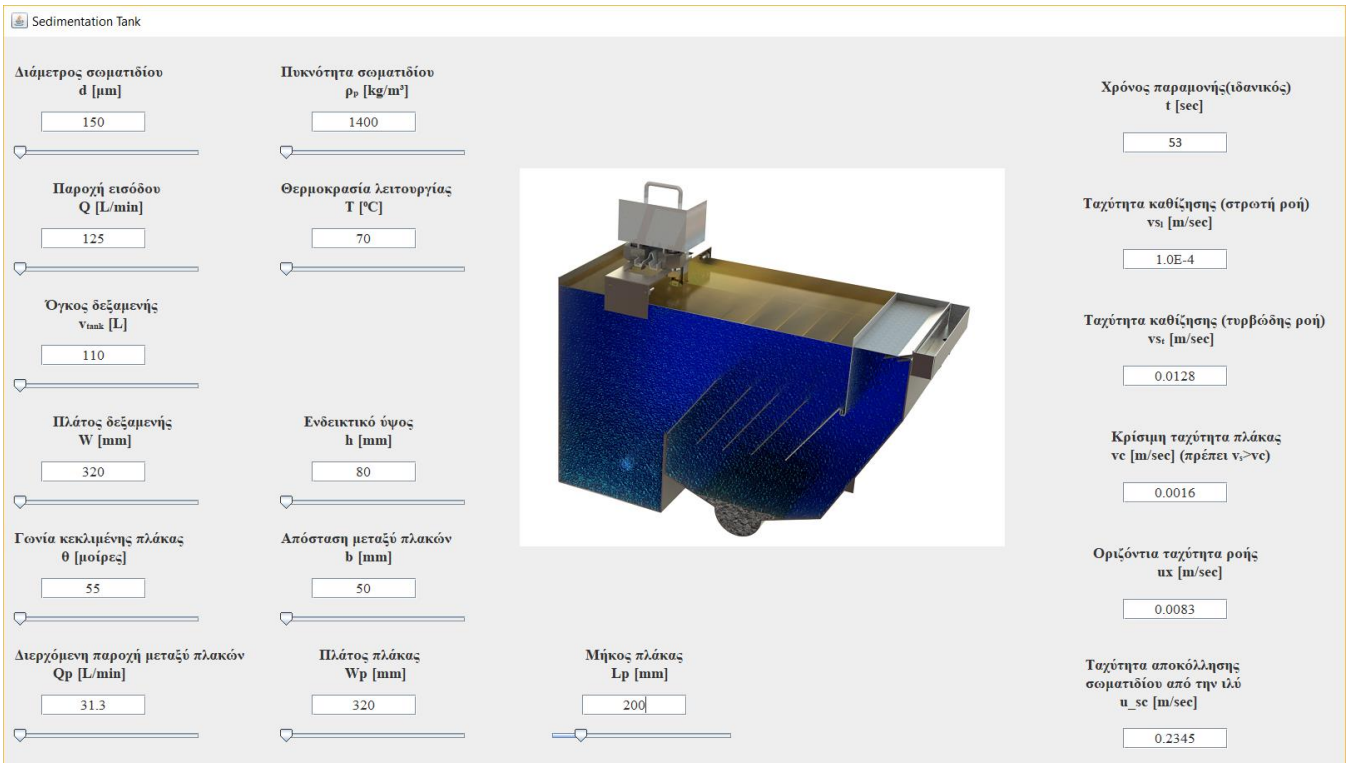
Belt Capabilities	Corrosion Resistant Steel	Elastomer	Poly-Belt	Poly-XP	Poly-HT	LFO "Fuzzy"
+ 150°F (66°C)	YES	NO	YES	YES	YES	YES
pH down to 3 pH up to 13	YES	YES	YES	YES	YES	YES (down to 3) NO (up to 11)
Can operate in the presence of grit, fine and other suspended particles	YES	YES	YES	YES	YES	YES

Πίνακας 2.3: Υλικά κατασκευής ζώνης (belt type oil skimmer)

Εικόνα 2.22: Belt oil skimmer (Abanaki Mighty Mini 1")

2.7 Εφαρμογή για τον σχεδιασμό της διατομής δεξαμενής

Για την εύρεση κατάλληλης γεωμετρίας δημιουργήθηκε εφαρμογή στο υπολογιστικό περιβάλλον της Java (*Εικόνα 2.23*) στην οποία γίνεται ο υπολογισμός των ανωτέρω μεγεθών. Έτσι, έγινε γρήγορη εναλλαγή μεταξύ πολλών γεωμετρικών διατάξεων ώστε να επιλεχθεί η καλύτερη.



Εικόνα 2.23: Εφαρμογή Java για το σχεδιασμό της διατομής της δεξαμενής (στο κέντρο φαίνεται η τελική δεξαμενή που σχεδιάστηκε)

2.8 Προσομοιώσεις για τον σχεδιασμό της δεξαμενής

Για να είναι αποτελεσματική η δεξαμενή, θα πρέπει να μην υπάρχουν περιοχές με δίνες ανακυκλοφορίας ρευστού καθώς και νεκρές ζώνες εκτός της περιοχής όπου θα κατακάθεται η ιλύς. Επίσης, Για αυτό και εκτελούνται προσομοιώσεις, καταρχήν για τον εντοπισμό των κρίσιμων αυτών περιοχών και ύστερα για τον περιορισμό τους.

2.8.1 Παράμετροι προσομοίωσης

Η προσομοιώσεις έγιναν στο λογισμό *ANSYS Fluent Release 16.2.* Στο μοντέλο υποτέθηκε τυρβώδης ροή ρευστού με ελεύθερη επιφάνεια σε αέρα. Οι παράμετροι προσομοιώσεις ([23] *Zhang, D.*, [24] *Weerasooriya, A.*) παρουσιάζονται παρακάτω, ενώ οι αριθμητικές τιμές μεγεθών που αναγράφονται στην παρένθεση αφορούν την τελική σχεδίαση της δεξαμενής.

Γενικά (General)

- Solver-Type: *Pressure Based*
- Time: *Transient*
- Velocity formulation: *Absolute*
- Operating pressure: *101325 Pa*
- Gravitational acceleration: $-9.81\ m/sec^2$

Φάσεις (Phases):

- Αέρας, $\rho = 1.225\ kg/m^3$, $\mu = 1.789 \cdot 10^{-5} kg/(msec)$
- Νερό, $\rho = 998.2\ kg/m^3$, $\mu = 0.001003\ kg/(msec)$
- Phases interaction: Constant surface tension $0.0644\ N/m$

Μοντέλα (Models):

- Multiphase: *Volume of Fluid*
- Viscous model: *k-ε model (Standard Wall Functions)*

Οριακές συνθήκες εισόδου (Velocity inlet boundary conditions):

- Flow rate: $(0.002m^3/sec \rightarrow 125L/min)$
- Inlet velocity: $(0.06m/sec)$
- Turbulent intensity of the inlet of sedimentation tank: 10%
- Hydraulic diameter: $(0.08m)$
- Initial gauge pressure: $0\ Pa$

Οριακές συνθήκες εξόδου (Pressure outlet boundary conditions):

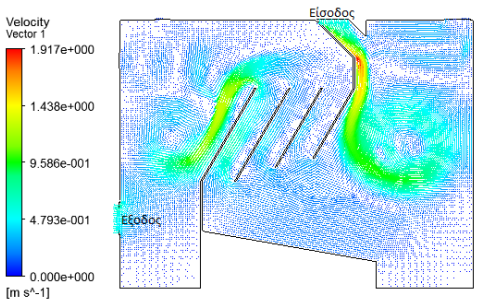
- Turbulent intensity of the outlets of sedimentation tank: 5%
- Length scale of the outlets of sedimentation tank: $(0.08m)$
- Inlet velocity: $(-0.06\ m/sec)$
- Back flow volume fractions: $0\ Pa$

Μέθοδος επίλυσης (Solution methods):

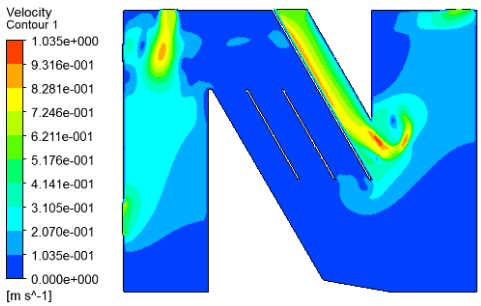
- Scheme: *SIMPLE*
- Gradient: *Green Gauss Cell Based*
- Pressure: *PRESTO!*
- Momentum: Second Order Upwind
- Volume fraction: *Geo-Reconstruct*
- Turbulent kinetic energy: *First Order Upwind*
- Turbulent dissipation rate: *First Order Upwind*
- Transient formulation: *First order implicit*

2.8.2 Εκτέλεση προσομοιώσεων-Παρατηρήσεις

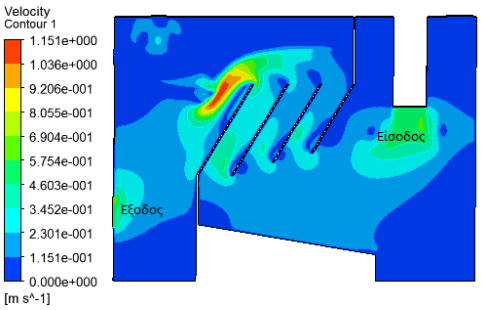
Σύμφωνα με τις παραπάνω παραμέτρους, εκτελέσθηκαν προσομοιώσεις για διάφορες διατάξεις διατομών δεξαμενής και παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα. Σημειώνεται επίσης ότι οι παρακάτω προσομοιώσεις εκτελέστηκαν με μεγαλύτερες ταχύτητες εισόδου από τις πραγματικές για να γίνουν πιο διακριτές οι κρίσιμες περιοχές.



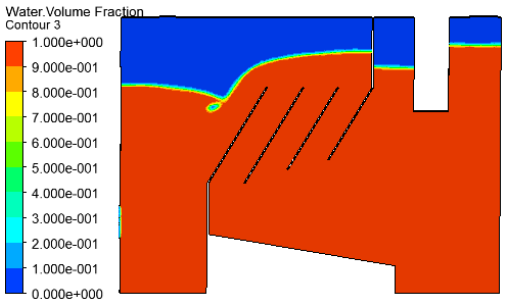
Εικόνα 2.24: Διάταξη 1 – Διανύσματα ταχυτήτων



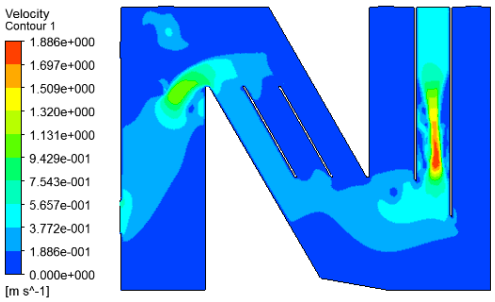
Εικόνα 2.25: Διάταξη 2 - Προφίλ ταχυτήτων



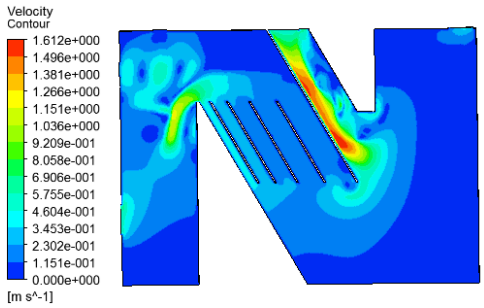
Εικόνα 2.26: Διάταξη 3 - Προφίλ ταχυτήτων



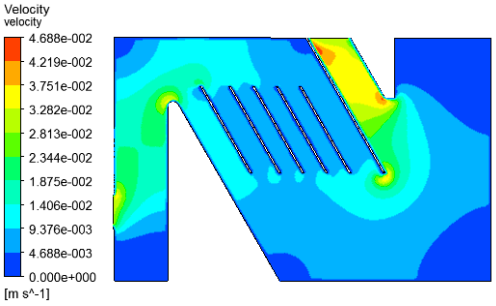
Εικόνα 2.27: Διάταξη 3– Κλάσμα όγκου νερού αέρα



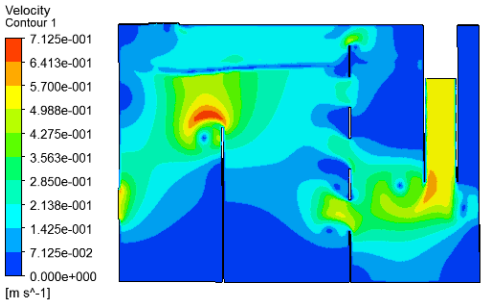
Εικόνα 2.28: Διάταξη 4 - Προφίλ ταχυτήτων



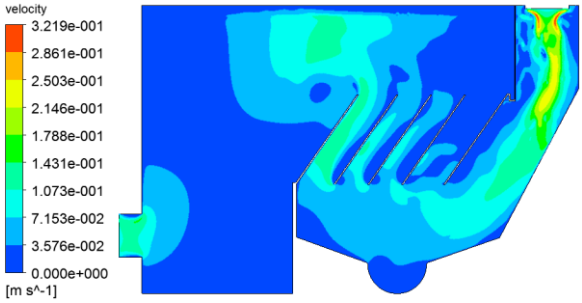
Εικόνα 2.29: Διάταξη 5 - Προφίλ ταχυτήτων



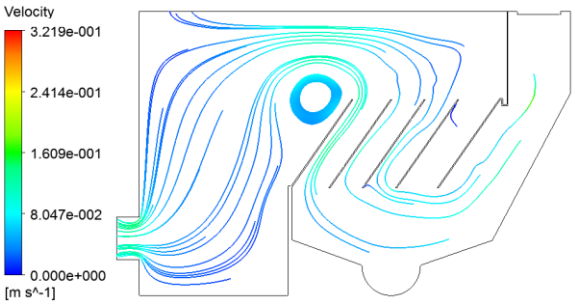
Εικόνα 2.30: Διάταξη 6 - Προφίλ ταχυτήτων



Εικόνα 2.31: Διάταξη 7 - Προφίλ ταχυτήτων



Εικόνα 2.32: Διάταξη 8 - Προφίλ ταχυτήτων



Εικόνα 2.33: Διάταξη 8 – Γραμμές ροής

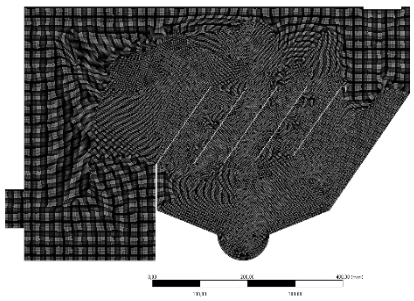
Παρατηρήσεις επί των προσομοιώσεων:

- Στις γωνίες της δεξαμενής το ρευστό μένει ακίνητο άρα αυτοί οι χώροι τις δεξαμενής δεν εκμεταλλεύονται.
- Κατά την στροφή του ρευστού για την είσοδό του στην πρώτη διακλάδωση επί των κεκλιμένων πλακών δημιουργείται δίνη η οποία μειώνει (όσον αφορά τη λειτουργικότητα) την πραγματική διατομή. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται κατά την έξοδο και στροφή του ρευστού από την τελευταία διακλάδωση.
- Κατά την διαίρεση παροχής επί των πλακών το ρευστό λόγω αδράνειας δεν διακλαδίζεται ισόποσα αλλά περνάει περισσότερο από την τελευταία πλάκα.

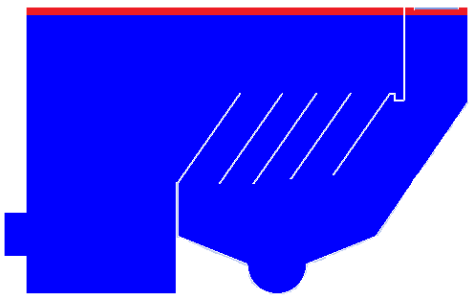
2.8.3 Τελική σχεδίαση δεξαμενής

Προδιαγραφές κατά τη σχεδίαση δεξαμενής:

- Ο περιορισμός των νεκρών ζωνών ρευστού εκτός της περιοχής καθίζησης σωματιδίων.
- Ο περιορισμός του αφρού στην είσοδο της δεξαμενής.
- Η απομάκρυνση των πλεούμενων λαδιών σε όλη την επιφάνεια της δεξαμενής.
- Ίση ταχύτητα ρευστού μεταξύ των πλακών.

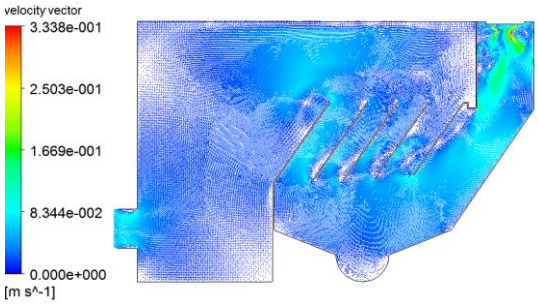


Εικόνα 2.34: Υπολογιστικό πλέγμα διατομής δεξαμενής (2mm, 90807 κόμβων, 89549 στοιχείων)

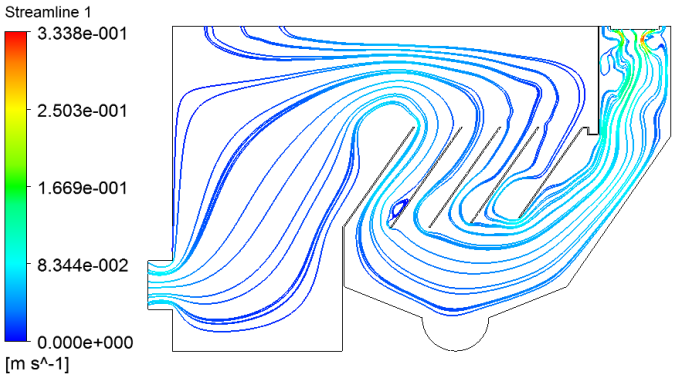


Εικόνα 2.35: Αρχική κατάσταση δεξαμενής (μπλε χρώμα νερό, κόκκινο αέρας)

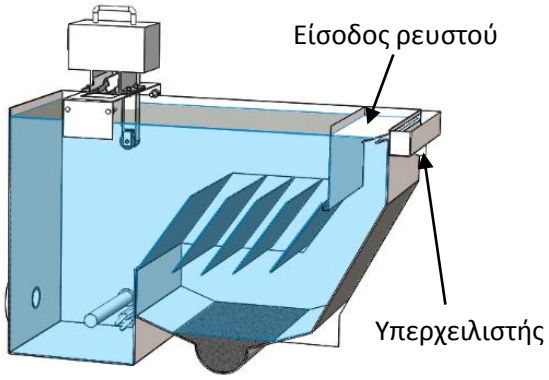
Εικόνα 2.36: Περίγραμμα ταχυτήτων (t=5sec)



Εικόνα 2.37: Διανύσματα ταχυτήτων (t=5sec)



Εικόνα 2.38: Γραμμές ροής (t=5sec)



Εικόνα 2.39: Τελική διάταξη δεξαμενής 3D (χωρητικότητα 110L)

Παρατηρήσεις επί της τελικής διάταξης:

- Για τον περιορισμό του αφρού στην είσοδο του ρευστού, η επιφάνεια της δεξαμενής χωρίστηκε σε δύο μέρη.
- Η καθίζηση της ιλύος θα γίνεται σε ημικυκλικό πλαίσιο σωλήνωσης ($u_{fluid} = 0$).
- Η απόσταση μεταξύ των πλακών της πρώτης και τελευταίας διακλάδωσης σχεδιάστηκαν μεγαλύτερες των ενδιαμέσων διακλαδώσεων, για να επιτυγχάνονται όσο το δυνατόν ίσες ταχύτητες ροής μεταξύ τους.
- Το τμήμα εισόδου σχεδιάστηκε κεκλιμένο με σταδιακή αύξηση διατομής (κάθετα στη ροή) με σκοπό την μείωση της τύρβης κατά την είσοδο του ρευστού στην πρώτη διακλάδωση των κεκλιμένων πλακών.
- Οι δύο πρώτες πλάκες έχουν μικρότερο μήκος για την διευκόλυνση εισόδου του ρευστού.
- Στο χώρο αναρρόφησης της αντλίας προστίθεται ηλεκτρική αντίσταση και ανόδιο μαγνησίου για την προστασία της δεξαμενής από τη διάβρωση (καθοδική προστασία).
- Στην εισόδου του ρευστού και πάνω από την αρχική στάθμη σχεδιάζεται υπερχειλιστής για την φυσική αποβολή του πλεούμενου αφρού και λαδιού.
- Στην κύρια επιφάνεια πάνω από την δεξαμενή τοποθετείται η μηχανή (oil skimmer) όπου θα αφαιρεί με μηχανικό τρόπο τα πλεούμενα λάδια (oil skimmer).

2.9 Συγκεντρωτικά τα μεγέθη υπολογισμών δεξαμενής

Συγκεντρωτικά τα μεγέθη και οι αριθμητικές τους τιμές, που αφορούν την τελική διάταξη της δεξαμενής (Ε*ικόνα 2.39*) παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Μέγεθος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδες	Παρατηρήσεις
Παροχή εισόδου	Q	0,0021	[m^3/sec]	INPUT (50 L/min < Q <150 L/min)
		125	[L/min]	
		7,5	[m^3/hr]	
Επιφάνεια δεξαμενής (Επαφή με τον αέρα)	A	259200	[mm^2]	INPUT
		0,26	[m^2]	
Πλάτος δεξαμενής	W	320	[mm]	INPUT
Όγκος δεξαμενής	V_{tank}	110	[L]	INPUT (70L<V_tank<150L)
Χρόνος παραπονής στοιχείου ρευστού στη δεξαμενή (ιδανικά)	t_r	53	[sec]	$t_r=V_{tank}/Q$
Κινηματική συνεκτικότητα νερού	v	4,154E-07	[m^2/sec]	Συνάρτηση θερμοκρασίας
Διάμετρος σωματιδίου	d_p	1,50E-04	[m]	INPUT
		150	[μm]	
Πυκνότητα σωματιδίου	ρ_p	1400	[kg/m^3]	INPUT
Πυκνότητα νερού	ρ_w	1007	[kg/m^3]	(water @ 70oC +3%detergent)
Ταχύτητα καθίζησης (στρωτή ροή)	v_{sl}	0,012	[m/sec]	Νόμος Stokes
Ταχύτητα καθίζησης (τυρβώδης ροή)	v_{st}	0,044	[m/sec]	v_{st}=SQRT(10gd_p(ρ_p-ρ_w)/(3ρ_w))
Ενδεικτικό σημείο πάνω από την περιοχή καθίζησης ιλύος				
Κατακόρυφο ύψος	h_c	80	[mm]	INPUT
Εμβαδό (κάθετο στη ροή)	A_c	0,0256	[m^2]	$A_c=h_c$ * W
Οριζόντια ταχύτητα	u_x	0,082	[m/sec]	$u_c=Q/A_c$
Υδραυλική διάμετρος	D_{hc}	0,128	[m]	$D_{hc}=4A_c/(2h_c+2W)$
Αριθμός Reynolds	Re_c	251	[-]	$Re_c=u_cD_h/v$
Ταχύτητα αποκόλλησης σωματιδίου από την ιλύ για P=7.5 (πρέπει $u_x<u_{sc}$)	u_{sc}	0,144	[m/sec]	u_{sc}=12,36v_sRe^0,125/P
Κεκλιμένες πλάκες				
Διαίρεση παροχής	n	4	[-]	INPUT
Πλάτος κεκλιμένων πλακών	W_P	320	[mm]	W_P=W
Γωνία κλίσης	θ	55	[μοίρες]	INPUT
		0,96	[rad]	
Απόσταση (κάθετη) μεταξύ των πλακών	b	50	[mm]	INPUT
Μήκος κεκλιμένων πλακών	L_P	200	[mm]	INPUT
Εφαπτομενική ταχύτητα επί της πλάκας	v_P	0,033	[m/sec]	$v_P=Q_P/(W_P*b)$
Παροχή σε κάθε διακλάδωση (ιδανικά)	Q_P	0,0005	[m^3/sec]	Q_P=Q/n
		31,3	[L/min]	
Αριθμός Reynolds	Re_P	7850	[-]	$Re_P=2QP/(vW_p)$
Settler – Up-flow – Καθιζάνονται όσα σωματίδια έχουν $v_s>v_{cP}$	v_c	0,0093	[m/sec]	$v_c=Q_P/(L_PW_P\cos\theta+bW_P/\sin\theta)$
Settler – Down-flow – Καθιζάνονται όσα σωματίδια έχουν $v_s>v_{cP}$	v_c	0,022	[m/sec]	$v_c=bV_p/[(L_P-b\tan\theta)\cos\theta]$
Settler – Cross-flow – Καθιζάνονται όσα σωματίδια έχουν $v_s>v_{cP}$	v_c	0,0089	[m/sec]	$v_c=bV_P/(\cos\theta W_P)$

Πίνακας 2.4: Συγκεντρωτικός πίνακας μεγεθών δεξαμενής καθίζησης

2.10 Θέρμανση και εξάτμιση νερού δεξαμενής

2.10.1 Ενέργεια και χρόνος ανύψωσης θερμοκρασίας νερού δεξαμενής

Χαρακτηριστικά μεγέθη

Θερμοκρασία περιβάλλοντος: $T_{env} = 20\,^{o}C$

Θερμοκρασία λειτουργίας (ανύψωσης): $T_{op} = 70^{o}C$

Όγκος νερού δεξαμενής: $V_{\text{tank}} = 110\,L$

Μάζα νερού: $m_w = V_{\text{tank}}\rho_{w,20^{o}C} \simeq 110\,kg$

Θερμική ισχύς αντίστασης: $W_R = 6\,kW$

Τιμή κιλοβατώρας: $c_{kW\cdot hr} = 0.1\ €/(kW\cdot hr)$

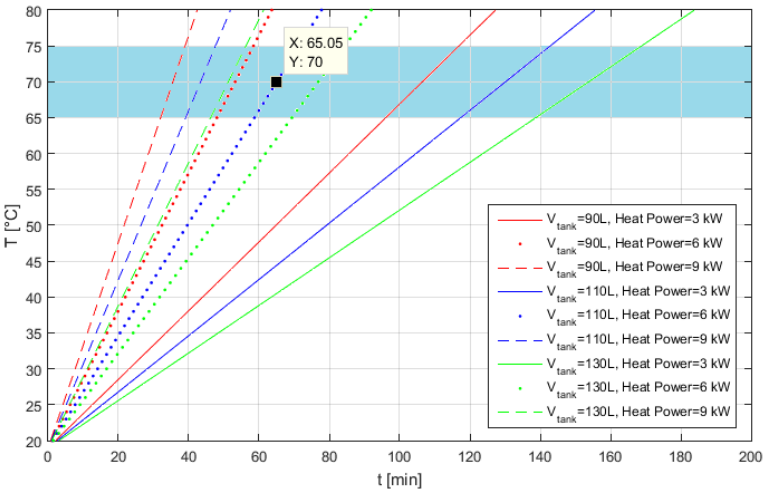
Ενέργεια που δαπανάται για ανύψωση θερμοκρασίας του νερού:

$$Q_t = m_w \overline{C_p} \Delta T \ \ [\text{kJ}] \tag{2.47}$$

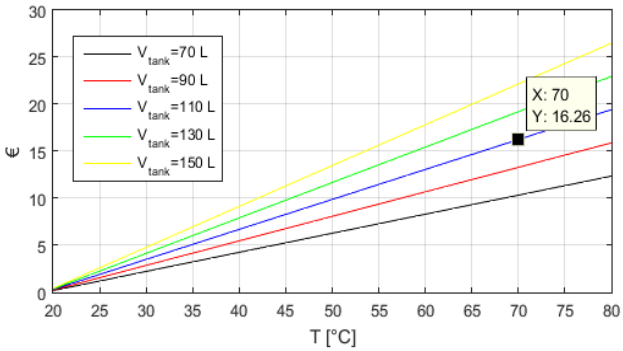
Όπου $\overline{C_p}$ η μέση θερμοχωρητικότητα του νερού υπό σταθερή πίεση (για τον υπολογισμό *βλ. Παράρτημα Α.*)

Οπότε δεδομένης της ισχύος που χρησιμοποιείται, ανάλογος είναι και ο χρόνος ανύψωσης θερμοκρασίας:

$$t_h = \frac{Q_R}{W_R} \tag{2.48}$$



Εικόνα 2.40: Χρόνος ανύψωσης θερμοκρασίας νερού για διάφορους όγκους και ισχύς



Εικόνα 2.41: Μηνιαίο κόστος ανύψωσης θερμοκρασίας

Σημειώνεται ότι στον υπολογισμό του μηνιαίου κόστους (25 εργάσιμες) θεωρείται ότι κάθε μέρα (οκτάωρη λειτουργία) η θερμοκρασία του νερού θα ανυψώνεται μια φορά στη θερμοκρασία λειτουργίας 70°C και διατηρείται μέχρι το τέλος του οκταώρου.

Επομένως, με τη χρήση ηλεκτρικής αντίστασης 6kW ο χρόνος θέρμανσης του νερού ανέρχεται στα 65min, ενώ το κόστος ανύψωσης είναι αμελητέο.

2.10.2 Εξάτμιση νερού από τη δεξαμενή

Η παροχή μάζας εξατμιζόμενου νερού από τη δεξαμενή δίνεται από τη σχέση:

$$g_s = \frac{\Theta A_s (x_s - x)}{3600} \, [\frac{kg}{\sec}] \tag{2.49}$$

Όπου,

- $\Theta = 25 + 19 u_{air} \, [\frac{kg}{m^2 hr}]$: Συντελεστής εξάτμισης, με $u_{air} = 0$ η ταχύτητα του αέρα πάνω από τη δεξαμενή
- $A_s = 0.26 \; m^2$: Επιφάνεια δεξαμενής-νερού $[m^2]$
- $x_s = 0.62198 \frac{p_{ws}}{p_a - p_{ws}} [\frac{kg \, H_2O}{kg \, Dry \, Air}]$ (λόγος μαζών νερού κορεσμένου σε ξηρό αέρα, στην ίδια θερμοκρασία με την επιφάνεια)
- $x = 0.62198 \frac{p_w}{p_a - p_w} [\frac{kg \, H_2O}{kg \, Dry \, Air}]$ (λόγος μαζών νερού σε ξηρό αέρα, στην ίδια θερμοκρασία με την επιφάνεια)

  - $p_a = 101325 \, [Pa]$: Ατμοσφαιρική πίεση αέρα
  - $p_{ws} [Pa]$: Πίεση ατμοποίησης ή πίεση κορεσμού νερού-ατμού (μερική πίεση νερού όταν ο ρυθμός συμπύκνωσης ισούται με τον ρυθμό εξάτμισης, για τον υπολογισμό βλ. *Παράρτημα Α*)
  - $p_w [Pa]$: Μερική πίεση νερού-ατμού $(p_w < p_{ws})$
  - $0.62198 \approx \frac{MB_{water}}{MB_{air}} = \frac{18}{28.96}$

Για δεδομένη σχετική υγρασία (RH) αέρα είναι $p_w = RH \; p_{ws}$ και άρα:

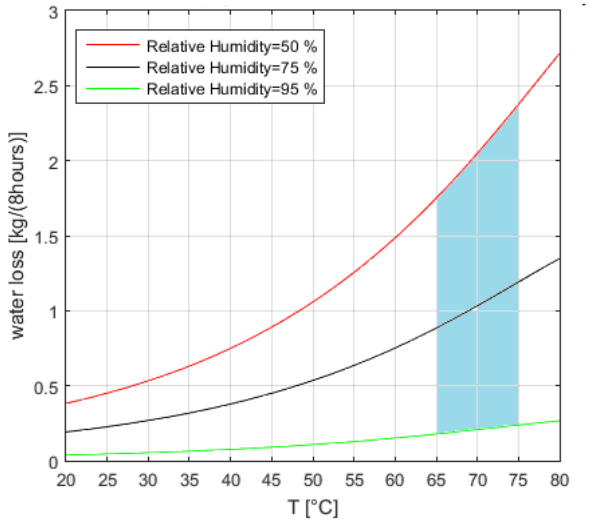
$$x = 0.62198 \frac{RH \; p_{ws}}{p_a - RH \; p_{ws}} \, [\frac{kg \, H_2O}{kg \, Dry \, Air}] \tag{2.50}$$

2.10.3 Απώλειες θερμότητας κατά την εξάτμιση

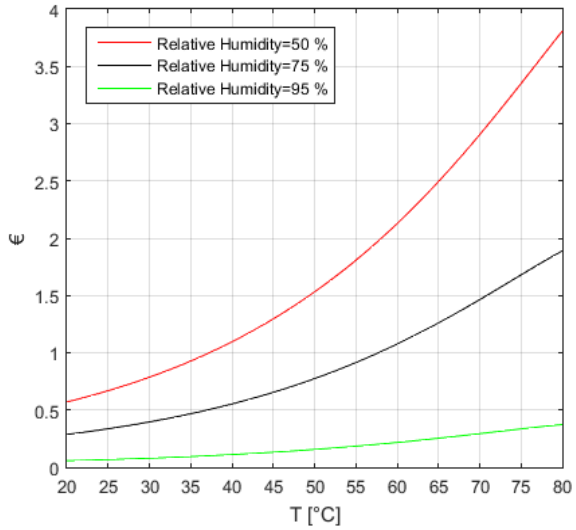
Η ενέργεια που απαιτήθηκε για την ατμοποίηση του νερού πάρθηκε από το ίδιο το νερό. Επομένως η θερμότητα που απαιτείται για να καλυφθούν αυτές τις απώλειες ώστε να διατηρηθεί η θερμοκρασία του νερού σταθερή είναι:

$$q_{vap} = h_{we} g_s \;\; [kW] \tag{2.51}$$

Όπου, $h_{we} \; [kJ/kg]$ η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης του νερού (για τον υπολογισμό *βλ. Παράρτημα Α*)



Εικόνα 2.42: Απώλεια μάζας νερού λόγω εξάτμισης ανά 8ωρο



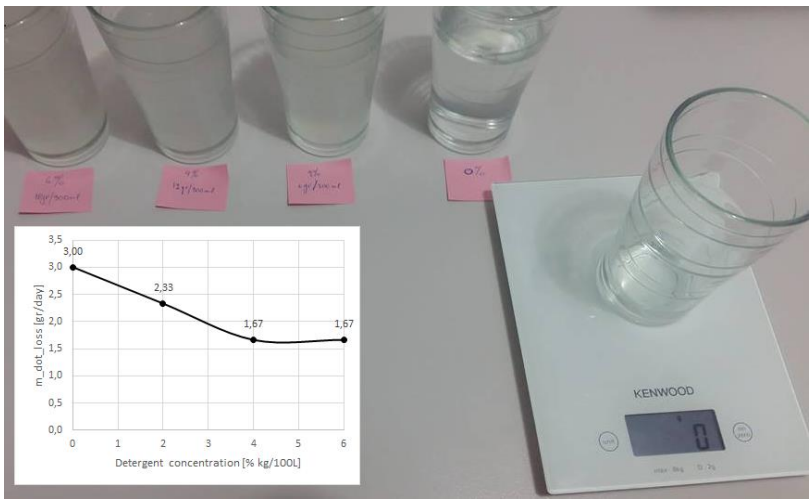
Εικόνα 2.43: Μηνιαίο κόστος διατήρησης της θερμοκρασίας έναντι απωλειών εξάτμισης

2.10.4 Επίδραση απορρυπαντικού στην εξάτμιση του νερού

Με πείραμα (*εικόνα 2.44*) φαίνεται ότι η ύπαρξη τασιενεργών στο διάλυμα μειώνει την απώλεια μάζας εξατμιζόμενου νερού από τη δεξαμενή και μια εξήγηση είναι ότι λόγω της διπλής φύσης των τασιενεργών και δεδομένου ότι η περιεκτικότητα είναι μεγαλύτερη της κρίσιμης συγκέντρωσης μικυλλίου (CMC) αυτά συσσωρεύονται στην επιφάνεια μειώνοντας έτσι την επιφάνεια του νερού που έρχεται σε επαφή με τον αέρα.

Περιεκτ. απορ/κού	pH	Μάζα απορ/κού	Αρχική μάζα νερού	Χρόνος
[% kg/L]	[pH±0,1]	[± 2gr]	[± 2gr]	[days]
0	7,09	0	290	6
2	10,8	6	290	6
4	11,41	12	290	6
6	11,89	18	290	6
Περιεκτ. απορ/κού	**Τελική μάζα μίγματος**	**Τελική μάζα νερού**	**Απώλεια νερού**	**Παροχή**
[% kg/L]	[± 2gr]	[± 2gr]	[± 2gr]	[gr/day]
0	272	272	18	3,00
2	282	276	14	2,33
4	292	280	10	1,67
6	298	280	10	1,67

Πίνακας 2.5: Πίνακας μετρήσεων



Εικόνα 2.44: Προσδιορισμός απωλειών εξάτμισης μίγματος νερού με απορρυπαντικό (Karcher RM-63)

2.10.5 Απώλειες θερμότητας από τα τοιχώματα της δεξαμενής

Για την μείωση των απωλειών θερμότητας τους διαλύματος προς το περιβάλλον τοποθετείται γύρω από τη δεξαμενή (πάχους, $t_1 = 33mm$) μονωτικό υλικό πάχους $t_2 = 15mm$. Η απώλειες θερμότητας (ρεύμα θερμότητας) σε αυτή την περίπτωση υπολογίζονται από τη σχέση:

$$Q_{loss} = \frac{T_{op} - T_{env}}{\frac{1}{h_1 A_{\tan k}} + \frac{t_1}{k_1 A_{\tan k}} + \frac{t_2}{k_2 A_{\tan k}} + \frac{1}{h_2 A_{\tan k}}} \tag{2.52}$$

Όπου,

- $T_{op} = 70^oC,\ T_{env} = 20^oC$ θερμοκρασία νερού δεξαμενής και περιβάλλοντος αντίστοιχα.
- $A_{tank} = 1.4\ m^2$ η συνολική διαβρεχόμενη επιφάνεια της δεξαμενής.
- $k_1 = 45W/(mK)\ \ k_2 = 0.03\ W/(mK)$ συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας ανοξείδωτου χάλυβα και μονωτικού υλικού αντίστοιχα.
- $t_1 = 3mm,\ t2 = 30mm$ το πάχος της δεξαμενής και του μονωτικού υλικού αντίστοιχα.

Για ελεύθερη συναγωγή σε κατακόρυφο τοίχωμα (στρωτή ροή) ο αριθμός του *Nusselt* δίνεται από τη σχέση:

$$Nu_x = 0.508\frac{Gr_x^{1/4}\,\mathrm{Pr}^{1/2}}{(0.952+\mathrm{Pr})^{1/4}} \tag{2.53}$$

Όπου,

- $Pr = 0.71\ [-]$ αριθμός του Prandtl αέρα στους 20^oC, και
- $Gr_x = \dfrac{\beta_{air} g x^3 (T_{op} - T_{env})}{\nu_{air}^{\ 2}}$ (*αριθμός του Grashof*) με $\beta_{air} = 3430\ K^{-1},\ \nu_{air} = 15.11x10^{-6}m^2/sec$ συντελεστής χωρικής διαστολής και κινηματική συνεκτικότητα του αέρα αντίστοιχα

Οπότε αφού

$$Nu_x = \frac{h_x x}{k} \tag{2.54}$$

Από την (2.53) προκύπτει:

$$h_x = 0.508k\frac{\mathrm{Pr}^{1/2}}{(0.952+\mathrm{Pr})^{1/4}}\left[\frac{\beta g(\mathrm{T}_{op} - T_{env})}{\nu^2}\right]^{1/4} x^{-1/4} = c\,x^{-1/4} \tag{2.55}$$

Όπου για αέρα θερμοκρασίας περιβάλλοντος είναι $k_{air} = 0.026\ W/(mK)$ και άρα $c_{air} = 72.2\ [\mu o\nu\acute{\alpha}\delta\varepsilon\varsigma\ SI]$.

Ο μέσος συντελεστής συναγωγής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\bar{h} = \frac{1}{L}\int_0^L h_x = \frac{1}{L}\int_0^L cx^{-1/4} = \frac{4}{3}cL^{-1/4} \tag{2.56}$$

Για αέρα και $L = h_{tank} = 530mm$ το ύψος της δεξαμενής, προκύπτει $\overline{h_2} = 112.9\ \left[\frac{W}{m^2K}\right]$.

Αγνοώντας τη συναγωγή του ρευστού της δεξαμενής με τα τοιχώματά της ($h_1 \to \infty$) εφαρμόζοντας την (2.52) οι απώλειες θερμότητας από τα τοιχώματα της δεξαμενής είναι:

$$Q_{loss} = \frac{T_{op} - T_{env}}{\dfrac{t_1}{k_1 A_{\tan k}} + \dfrac{t_2}{k_2 A_{\tan k}} + \dfrac{1}{\bar{h}\mathrm{A}_{\tan k}}} = 68.6W$$

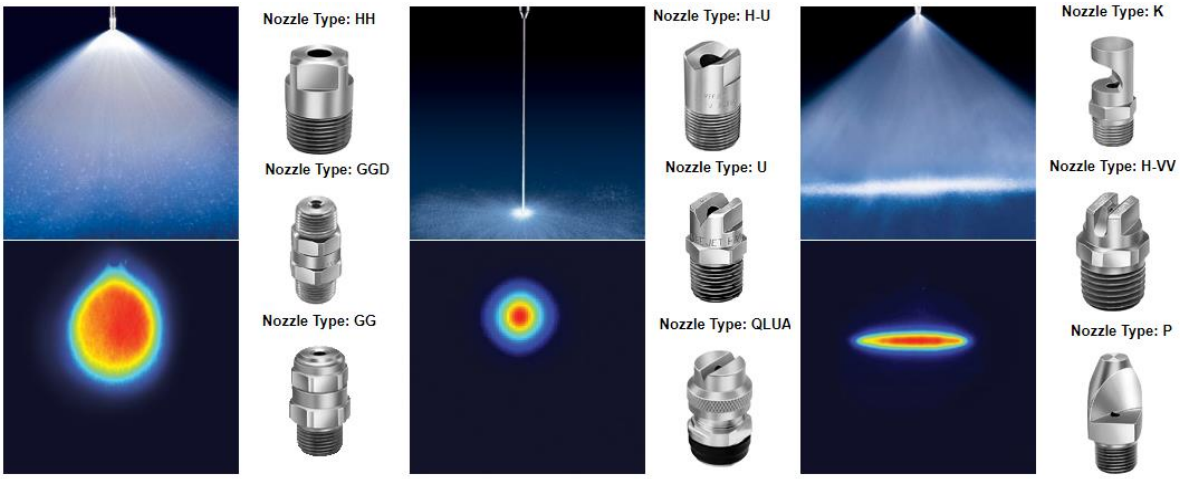
Επομένως, στην περίπτωση που η δεξαμενή μονώνεται με πάχος μονωτικού υλικού μεγαλύτερο των 30mm οι απώλειες από τα τοιχώματα της μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.

Κεφάλαιο 3
Σχεδιασμός συστήματος ψεκασμού

3.1 Γενικά στοιχεία υπολογισμού

Για να ολοκληρωθεί ο καθαρισμός απαιτείται τα ακροφύσια να επιτελούν τις παρακάτω λειτουργίες από τις οποίες η κάθε μία επιτυγχάνεται με διαφορετικό τύπο ακροφυσίου:

- Διαβροχή τεμαχίου ($wetting$): Για την πλήρη κάλυψη του τεμαχίου με υγρό (η ισχύς που αποδίδεται στο ρευστό είναι μέτρια, ενώ η πίεση είναι αδιάφορη).
- Πλύσιμο με δέσμη ισχύος ($impact$): Ώστε να αποκολληθούν οι ρύποι που είναι ισχυρά προσκολλημένοι στα υπό πλύση τεμάχια (απαιτείται υψηλή πίεση της δέσμης νερού)
- Ξέπλυμα ($rinsing$): Για την τελική απομάκρυνση όλων των εναπομεινάντων ρύπων και τον πλήρη καθαρισμό των τεμαχίων.



Εικόνα 3.1: : Ακροφύσια, από αριστερά προς τα δεξιά, για λειτουργία wetting, impact, rinsing

Nozzle Type	Application: Rinsing	Washing	High Impact Cleaning	Drying	Agitation Mixing	Flow Rate Range gpm (l/min)*	Pressure Range psi (bar)
VeeJet®	•	•	•			.035 to 247 (.14 to 944)	5 to 500 (.4 to 35)
FlatJet®			•			.31 to 39 (1.1 to 144)	15 to 150 (1.0 to 10)
FloodJet®	•	•				.03 to 110 (.11 to 410)	3 to 60 (.2 to 4)
WashJet®	•	•	•			.27 to 78 (1 to 290)	300 to 3000 (20 to 200) (up to 4000 {275} for IMEG®)
FullJet®	•	•				.07 to 17.4 (.29 to 65) (up to 25 {92} for narrow angle)	5 to 150 (.4 to 10) (up to 300 {20} for narrow angle)
MFP FullJet	•	•				1.4 to 57 (5.3 to 224)	10 to 80 (.7 to 6)
WhirlJet®	•	•				.05 to 38 (.19 to 145)	3 to 100 (.2 to 7)
SpiralJet®	•	•				.7 to 3320 (2.7 to 11967) .49 to 3320 (2 to 11967)	10 to 400 (.7 to 25) 5 to 400 (.4 to 25)

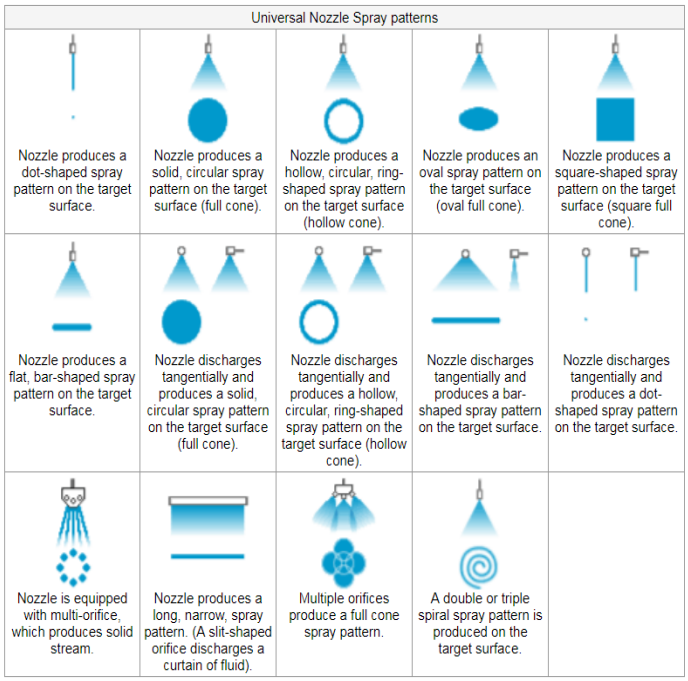
Εικόνα 3.2: Τύποι συμβατικών ακροφυσίων ανά εφαρμογή, εύρη πιέσεων και παροχών λειτουργίας

- Στον ψεκασμό η πίεση κυμαίνεται από $0{,}5 - 5\ bar$, ενώ στον καθαρισμό με δέσμη ισχύος η πίεση είναι $\geq 20\ bar$.

- Πίεση ακροφυσίου, p , εννοείται η στατική του ρευστού ανάντι του ακροφυσίου (είσοδος ακροφυσίου) και διαφέρει από την δυναμική πίεση στην έξοδο ($\neq 0.5\rho u^2$).
- Ο αριθμός των ακροφυσίων στα περισσότερα πλυντήρια είναι μεγαλύτερος των 50.
- Ο καθαρισμός αποτυγχάνει όταν η ισχύς της αντλίας δεν επαρκεί να καλύψει κάθε ακροφύσιο.
- Η παροχή και στους τρεις τύπους ακροφυσίων μπορεί να είναι παρόμοια, για ίδια πίεση και διάμετρο στομίου, αυτό που αλλάζει όμως είναι η καλυπτόμενη της δέσμης επιφάνεια.
- Η γωνία δέσμης είναι $50^o - 130^o, 0^o, < 50^o$ για τα ακροφύσια «wetting», «impact» και «rinsing» αντίστοιχα.
- Η κύρια συνιστώσα του κόστους του ακροφυσίου δεν είναι η τιμή αγοράς του (1-15 €) αλλά το κόστος σύνδεσής του με τη σωλήνωση και το ενεργειακό κόστος που αντιστοιχεί στον στραγγαλισμό της ροής.
- Το σχέδιο ψεκασμού αναφέρεται στη διατομή του κύριου σώματος ρευστού καθώς αυτό διασκορπίζεται. Τα μοτίβα ποικίλουν (*βλ. εικόνα 3.3*) και καθορίζονται από την εφαρμογή.
- Οι παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του ακροφυσίου (*βλ. εικόνα 3.4*) είναι η πίεση, η θερμοκρασία, το ιξώδες, η πυκνότητα και η επιφανειακή τάση. Σε κάποιες περιπτώσεις π.χ. στην αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται η πυκνότητα άρα αυξάνεται η παροχή, ενώ την ίδια στιγμή μειώνεται το ιξώδες που μειώνει την παροχή.

Nozzle Characteristics	Increase in Operating Pressure	Increase in Specific Gravity	Increase in Viscosity	Increase in Fluid Temperature	Increase in Surface Tension
Pattern Quality	Improves	Negligible	Deteriorates	Improves	Negligible
Drop Size	Decreases	Negligible	Increases	Decreases	Increases
Spray Angle	Increases then decreases	Negligible	Decreases	Increases	Decreases
Capacity	Increases	Decreases	Full/hollow cone – increases Flat – decreases	Depends on fluid sprayed and nozzle used	No effect
Impact	Increases	Negligible	Decreases	Increases	Negligible
Velocity	Increases	Decreases	Decreases	Increases	Negligible
Wear	Increases	Negligible	Decreases	Depends on fluid sprayed and nozzle used	No effect

Εικόνα 3.3: Συγκεντρωτικά η επίδραση φυσικών μεγεθών στα χαρακτηριστικά ακροφυσίου



Εικόνα 3.4: Σχέδια διατομής δέσμης κατά τον ψεκασμό

3.2 Μέγεθος σταγονιδίων

Χαρακτηριστικά μεγέθη σταγονιδίων

- $u_j\ [m/sec]$: Μέση ταχύτητα σταγονιδίου-δέσμης
- $d_{SMD}\ [m]$: Μέση διάμετρος σταγονιδίου ([34] *Wang, D. et al.*), $d_{SMD} = \sum d_i^3 n_i / \sum d_i^2 n_i$ (εικονική σταγόνα που έχει τον ίδιο λόγο επιφανείας προς όγκο με τη δέσμη στο σύνολό της)
- $\sigma\ [N/m]$: Επιφανειακή τάση σταγόνας
- $C_W\ [-]$: Συντελεστής αντίστασης

Αεροδυναμική δύναμη αντίστασης σταγονιδίου:

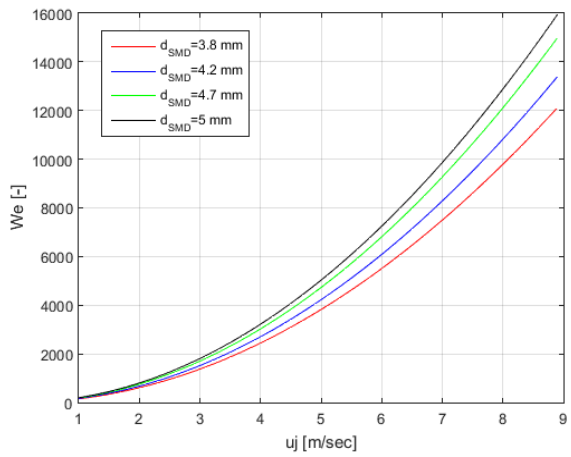
$$F_A = \frac{1}{2} C_W \frac{\pi d_{SMD}^{\ 2}}{4} \rho_w u_j^{\ 2} \tag{3.1}$$

Δύναμη συνοχής σταγονιδίου (συγκρατεί το σχήμα της σταγόνα κατά την παραμόρφωσή της):

$$F_K = \pi d_{SMD} \sigma \tag{3.2}$$

Αριθμός Weber:

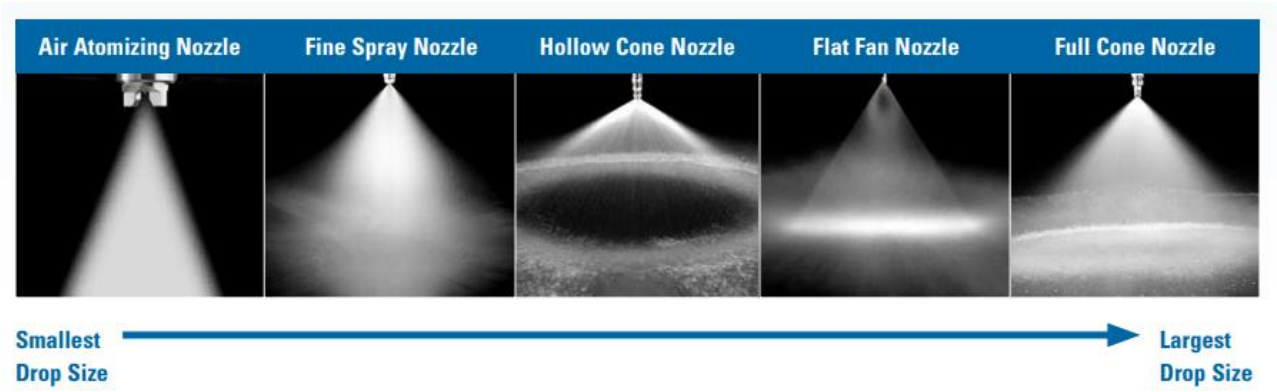
$$We = \frac{\delta\upsilon\nu\acute{\alpha}\mu\varepsilon\iota\varsigma\ \alpha\delta\rho\acute{\alpha}\nu\varepsilon\iota\alpha\varsigma}{\delta\upsilon\nu\acute{\alpha}\mu\varepsilon\iota\varsigma\ \sigma\upsilon\nu o\chi\acute{\eta}\varsigma} = \frac{8F_A}{C_W F_K} = \frac{\rho_w u_j^2 d_{SMD}}{\sigma} \tag{3.3}$$



Εικόνα 3.5: Αριθμός Weber, για $\sigma = 25mN/m$, συναρτήσει ταχύτητας εξόδου δέσμης από το ακροφύσιο, για διάφορες διαμέτρους στομίου (σε όλες τις περιπτώσεις We>>1)

Συμπεράσματα για το μέγεθος σταγονιδίων:

- Ακροφύσια μικρότερης ροής παράγουν μικρότερες σταγόνες και το αντίθετο.
- Μείωση της επιφανειακής τάσης επιφέρει μείωση της διαμέτρου των σταγονιδίων.
- Τα μικρά μεγέθη σταγονιδίων μπορεί να έχουν μεγαλύτερη αρχική ταχύτητα αλλά γρήγορα αυτή ελαττώνεται, αντίθετα οι μεγάλες σταγόνες διατηρούν την ταχύτητά τους μετά την έξοδο από το ακροφύσιο.



Εικόνα 3.6: Ακροφύσια και μεγέθη σταγονιδίων

3.3 Επιλογή ακροφυσίων

Η επιλογή ακροφυσίου περιλαμβάνει τον καθορισμό πίεσης, παροχής, γωνίας δέσμης-πλάτους κάλυψης, σχήματος ψεκασμού, υλικού και τύπου σύνδεσης καθώς και της διάταξης των ακροφυσίων.

- Πίεση και παροχή

Τα ακροφύσια χαρακτηρίζονται από τον κατασκευαστή από μια παροχή Q_{nozzle}, σε συγκεκριμένη πίεση p_{nozzle}. Ο μετασχηματισμός αυτών σε άλλες τιμές λειτουργίας γίνεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{Q_{nozzle}}{Q_{desire-water}} = \frac{p^n_{nozzle}}{p^n_{desire}} \tag{3.4}$$

Όπου p σε [psi] ή $[bar]$ και αντίστοιχα Q σε $[gpm]$ ή $[L/\min]$ ο εκθέτης n εξαρτάται από τον τύπο του ακροφυσίου με τιμές που φαίνονται στον *Πίνακα 3.1*.

Nozzle Type	n
Flat Spray Nozzles-All	0,5
Full cone Nozzles-Vaneless, $15^o - 30^o$ Series	
Hollow Cone Nozzles-All	
Solid Stream Nozzles-All	
Full Cone Nozzles-Standard and Square	0,46
Full Cone Nozzles-Wide Spray and Wide Square Spray	0,44

Πίνακας 3.1: Εκθέτης n για κάθε τύπο ακροφυσίου

Δεδομένου όμως ότι η παροχή αναφέρεται σε εργαζόμενο μέσο νερό, σε κάθε άλλη περίπτωση θα λαμβάνεται από τη σχέση:

$$Q_{desire} = Q_{\text{desire}-water} \times \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_{fluid}}} \tag{3.5}$$

Όπου ρ_{fluid} η πυκνότητα του διακινούμενου ρευστού.

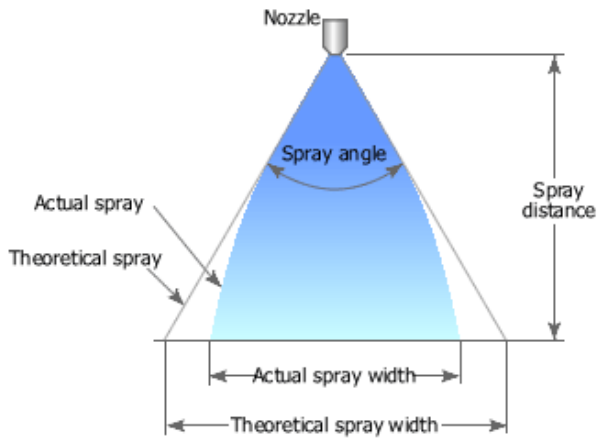
Στη μέγιστη περιεκτικότητα απορρυπαντικού, $5kg/100L$, προκύπτει $Q_{desire} = 0.97Q_{desire-water}$ και δεδομένου ότι κατά τη λειτουργία, στο εργαζόμενο μέσο διαλύονται επιπλέον ρύποι λαμβάνεται προσεγγιστικά $Q_{desire} = 0.9Q_{desire-water}$.

Οπότε, η σχέση (3.4) γράφεται:

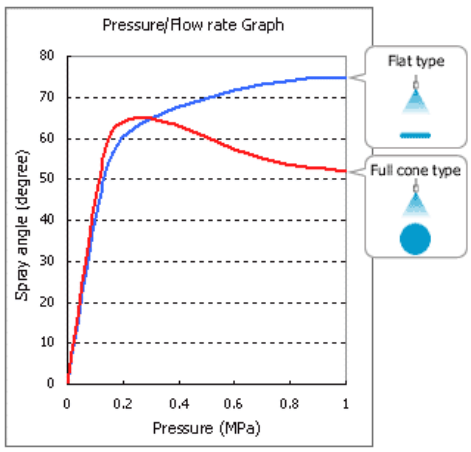
$$\frac{Q_{nozzle}}{Q_{desire}} = 1.11\frac{p^n_{nozzle}}{p^n_{desire}} \tag{3.6}$$

- ## Γωνία & σχήμα ψεκασμού - Πλάτος κάλυψης

Γωνία ψεκασμού αναφέρεται στην γωνία με την οποία οι δέσμες υγρού εξέρχονται από το ακροφύσιο. Το πλάτος κάλυψης (πλάτος ψεκασμού) αντιπροσωπεύει το πλάτος της διατομής της δέσμης συγκεκριμένη απόσταση από το στόμιο. Θεωρητικά το πλάτος κάλυψης κάθε ακροφυσίου για συγκεκριμένη γωνία ψεκασμού φ_{spray} είναι ανάλογο της κλίσης της γωνίας ψεκασμού ($tan\varphi_{spray}$). Στη πραγματικότητα αυτό ισχύει μόνο σε κοντινή απόσταση από το ακροφύσιο, ενώ σε μεγαλύτερες αποστάσεις το πλάτος ψεκασμού είναι μικρότερο (ειδικά όταν το ακροφύσιο είναι τοποθετημένο να ψεκάζει προς τα κάτω) και γίνεται ακόμα μικρότερο για διακινούμενο ρευστό με μεγαλύτερο ιξώδες. Επίσης, η γωνία ψεκασμού μεταβάλλεται καθώς αυξάνεται η πίεση ψεκασμού κυρίως για γωνίες $> 40^o$, ενώ στη μείωση της επιφανειακής τάσης αυξάνεται η γωνία ψεκασμού.



Εικόνα 3.7: Διαφορά μεταξύ θεωρητικού και πραγματικού μήκους κάλυψης για δεδομένη γωνία ψεκασμού



Εικόνα 3.8: Γωνία δέσμης και πίεση ψεκασμού

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή και για την πλήρη κάλυψη των τεμαχίων, χωρίς συγκρούσεις επί των δεσμών ενδείκνυται το σχήμα βεντάλιας ($flat\ spray\ pattern$) με τη μικρότερη γωνία ψεκασμού $\sim 15^o$ για μεγαλύτερη συγκέντρωση ισχύος.

- Υλικό κατασκευής

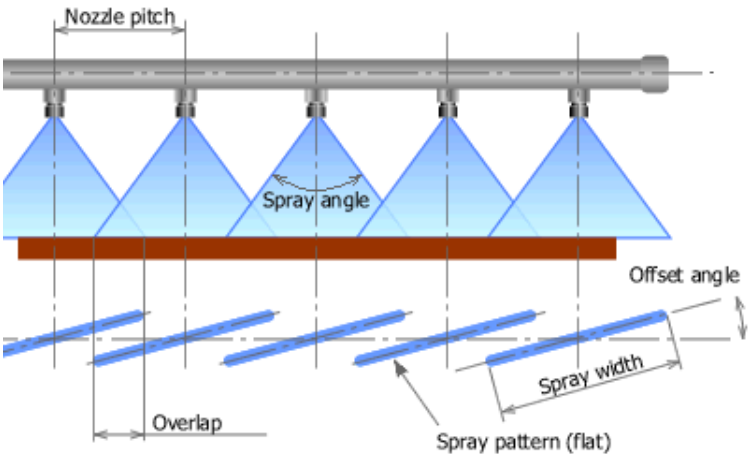
Τα ακροφύσια συνήθως κατασκευάζονται από ορείχαλκο, ανοξείδωτο χάλυβα ή πλαστικό. Ο ορείχαλκός αποτελεί το πιο φθηνό υλικό αλλά έχει μικρή αντοχή στη διάβρωση, το πλαστικό χρησιμοποιείται στον ψεκασμό χημικών που διαβρώνουν τον χάλυβα, οπότε δεδομένου του αλκαλικού περιβάλλοντος της εφαρμογής επιλέγεται το υλικό των ακροφυσίων να είναι ανοξείδωτος χάλυβας ($SUS316, SUS316L\ stainless\ steel$).

- Τύπος σύνδεσης

Δεδομένης της μικρής παροχής που θα διακινείται από κάθε ακροφύσιο (<3L/min) η σύνδεση θα γίνει με σπείρωμα NPT μεγέθους $1/4"$ ή $1/8"$.

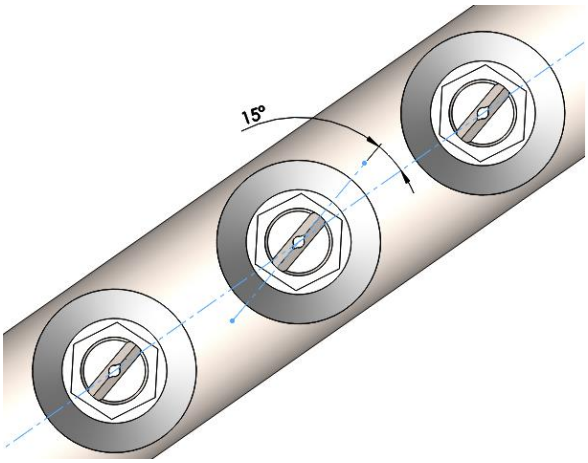
- Διάταξη ακροφυσίων

Τα ακροφύσια τοποθετούνται με κλίση 15° (*Εικόνα 3.10*) από τον άξονα του κύριου αγωγού έτσι ώστε οι δέσμες να μη συγκρούονται μεταξύ τους (*Εικόνα 3.9*).

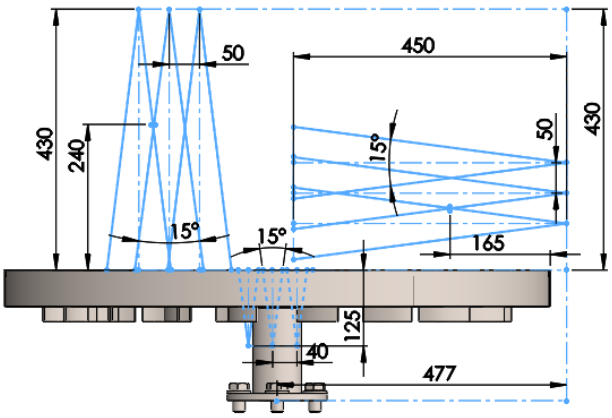


Εικόνα 3.9: Διάταξη ακροφυσίων πολλαπλής

Για την πλήρη κάλυψη των τεμαχίων τοποθετούνται 28 ακροφύσια και καθορίζεται αντίστοιχα η απόσταση τους (*Εικόνα 3.11*) σε κάθε μία από τις σωληνώσεις που θα αποτελούν το σύστημα ψεκασμού.



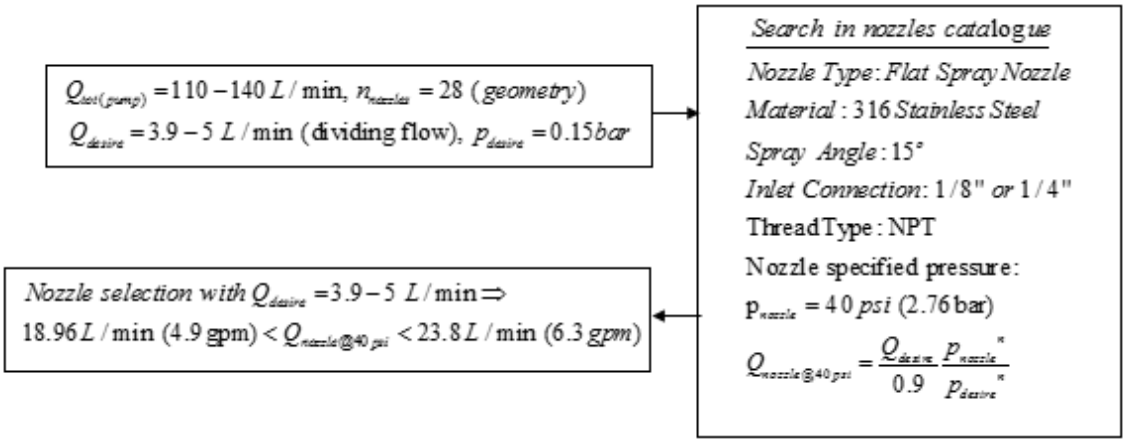
Εικόνα 3.10: $Offset\ angle$ ακροφυσίου



Εικόνα 3.11: Βήμα τοποθέτησης ακροφυσίων σε κάθε μια από τις τρεις σωληνώσεις της πολλαπλής

- Επιλογή ακροφυσίων

Για την επιλογή ακροφύσιο είναι αναγκαίος ο καθορισμός της πίεσης και παροχής λειτουργίας του. Δεδομένου του επιθυμητού εύρους παροχής λειτουργίας (*110-140L*), του αριθμού των ακροφυσίων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν (28 ακροφύσια) και αν θεωρηθεί αρχικά ότι η παροχή διαμοιράζεται ισόποσα σε αυτά προκύπτει το εύρος παροχής λειτουργίας ακροφυσίου. Επιπλέον, τίθεται άνω όριο στην πίεση λειτουργίας της αντλίας τα *4 bar*. Επομένως, το επιθυμητό ακροφύσιο θα πρέπει να αποδίδει παροχή $Q_{desire} = 3.9 - 5\ L/min$ σε πίεση λειτουργίας $0.15bar$ (μανομετρική). Έτσι από τη σχέση (*3.6*) γίνεται ο μετασχηματισμός και προκύπτει αντίστοιχη παροχή (Q_{nozzle}) στην πίεση τυποποίησης του ακροφυσίου. Η διαδικασία που αναφέρθηκει παραπάνω αναγράφεται κωδικοποιημένα στην *Εικόνα 3.12*.



Εικόνα 3.12: Διαδικασία επιλογής ακροφυσίων

Τα χαρακτηριστικά των ακροφυσίων που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες, ενώ η τελική διάταξη του συστήματος ψεκασμού φαίνεται στην *Εικόνα 3.15*.

VeeJet Spray Nozzles, Standard Spray, Small Capacity
H1/4U-316SS1560

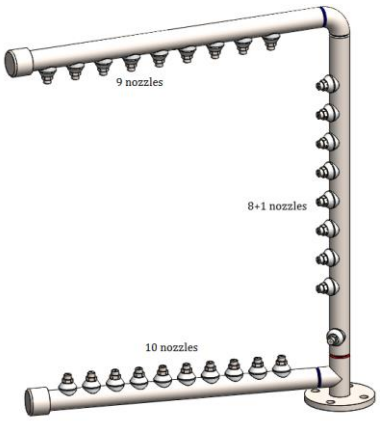
Ordering Number	H1/4U-316SS1560
Nozzle Prefix Code	H
Nozzle Type Prefix	U
Nozzle Inlet Connection	Male NPT
Spray Angle	15
Spray Pattern Type	Tapered Edge
Capacity @ 40 psi	6
Nozzle Type	H-U
Inlet Connection	1/4
Capacity Size	60
Material	316 Stainless Steel
Material Code	316SS
Length	1
Hex	0.5625
Net Wt. (oz)	0.75
Option	Integral Strainer
Minimum PSI	10
Maximum PSI	500

Εικόνα 3.13: Επιλεγόμενο flat pattern nozzle

VeeJet Spray Nozzles, Solid Stream Standard Spray, Small Capacity
H1/4U-316SS0060

Nozzle Inlet Connection	Male NPT
Spray Pattern Type (inches)	Solid Stream
Capacity (gpm @ 40 psi)	6.0
Nozzle Type	H-U
Inlet Connection	0.25
Capacity Size	60
Material	316 Stainless Steel
Material Code	316SS
Length (inches)	1
Hex (inches)	0.5625
Net Weight (oz)	0.75
Equivalent Orifice Diameter (inches)	0.183
Spray Tip Material	316 Stainless Steel
Spray Tip Material Code	316SS
Nozzle Body Material	316 Stainless Steel
Nozzle Body Material Code	316SS
Tip Material	316 Stainless Steel
Minimum Pressure (psi)	5
Maximum Pressure (psi)	100
Tip material code	316SS

Εικόνα 3.14: Επιλεγόμενο impact nozzle



Εικόνα 3.15: Διάταξη πολλαπλής ψεκασμού (28 συνολικά ακροφύσια)

3.4 Επιλογή φυγοκεντρικής αντλίας

3.4.1 Υδραυλικές απώλειες

Οι υδραυλικές απώλειες διακρίνονται σε γραμμικές και εντοπισμένες.

- *Γραμμικές απώλειες*

Για σωλήνα ευθύ, κυκλικής διατομής ο οποίος είναι γεμάτος από διακινούμενο ρευστό η πτώση πίεσης σε μήκος L δίνεται από τη σχέση των $Darcy - Weisbach$ ως:

$$\delta h = \lambda \frac{L}{d}\frac{u^2}{2g} = \lambda \frac{8L}{\pi^2 g D_1^2} Q^2 = k_1 Q^2 \quad [m\Sigma\Upsilon] \tag{3.7}$$

Όπου: λ αδιάστατος συντελεστής γραμμικών απωλειών $[-]$
D_1 η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα $[m]$
u η μέση ταχύτητα της ροής στον αγωγό $[m/sec]$
ρ η πυκνότητα του διακινούμενου ρευστού $[kg/m^3]$
$g = 9.81$ η επιτάχυνση της βαρύτητας $[m/sec^2]$

Στη στρωτή ροή ($Re < \sim 2300$) η τιμή του λ είναι ανεξάρτητη της τραχύτητας των τοιχωμάτων και σύμφωνα με τους $Hagen - Poiseuille$ είναι:

$$\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}} \tag{3.8}$$

Στη μεταβατική περιοχή ($2200 < Re < 4000$) η τιμή του λ μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση $Blasius$ ως:

$$\lambda = \frac{0.3164}{\mathrm{Re}^{0.25}} \tag{3.9}$$

Ενώ στην τυρβώδη ροή ($Re > \sim 4000$) ο προσδιορισμό του λ θα γίνει σύμφωνα με τη σχέση των $Swamee - Jain$:

$$\lambda = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{\varepsilon / \mathrm{D}_1}{3.7} + \frac{5.74}{\mathrm{Re}^{0.9}}\right)\right]^2} \tag{3.10}$$

Όπου $\varepsilon = 0.05\,[mm]$ η σχετική τραχύτητα του τοιχώματος του αγωγού (καινούργιος ανοξείδωτος χάλυβας) και $\mathrm{D}_1\,[mm]$ η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης.

- *Εντοπισμένες*

Είναι οι απώλειες που προκαλούνται από ειδικές διαμορφώσεις των σωλήνων ή από εξαρτήματα από τα οποία διέρχεται η ροή (βάνες, σύνδεσμοι, κτλ.) και εκφράζονται από τη σχέση:

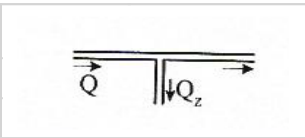
$$\delta h = \zeta \frac{u^2}{2g} = \zeta \frac{8}{\pi^2 g D_1^4} Q^2 = k_2 Q^2 \ [m\Sigma Y] \tag{3.11}$$

Όπου, ζ αδιάστατος συντελεστής της εντοπισμένης αντίστασης, ζ=0,5 (στόμιο αναρρόφησης), ζ=0,2 (welded elbow 90°, long), ζ=0,3 (welded elbow 90°, short), ζ=0,3 (welded elbow 90°, short), ζ=0,15 (βαλβίδα ανεπίστροφης), ζ=0,5 (τρίοδη βαλβίδα) κτλ.

Όσον αφορά την εντοπισμένη απώλεια του ακροφυσίου αυτή δίνεται από τον κατασκευαστή και περιλαμβάνονται απώλειες αλλαγής διατομής και κινητικής ενέργειας εξόδου. Σύμφωνα με τα επιλεγμένα ακροφύσια είναι:

$$k_{2(nozzle)} = 1.11 \frac{p_{nozzle}}{\rho g} \cdot \frac{1}{Q_{nozzle}^2} \tag{3.12}$$

Αντίστοιχα, στις διακλαδώσεις ο συντελεστής αντίστασης ζ λαμβάνει τιμή ανάλογα την παροχή που διακλαδίζεται όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.



Q/Qz	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
ζz	0,96	0,88	0,89	0,96	1,1	1,29
ζ	0,05	-0,08	-0,04	0,07	0,21	0,35

Πίνακας 3.2: Συντελεστής αντίστασης ζ ανά παροχή διακλάδωσης (διάμετρος αγωγού διακλάδωσης ίσης με του κυρίου αγωγού)

Σημειώνεται, επίσης, ότι επιλέγεται να μη χρησιμοποιηθεί φίλτρο ανάντη ή κατάντη της αντλίας δεδομένου ότι στη δεξαμενή τροφοδοσίας γίνεται φιλτράρισμα σωματιδίων ~150μm και το στόμιο των ακροφυσίων είναι μεγαλύτερο των $3mm$.

3.4.3 Διαστασιολόγηση σωληνώσεων αναρρόφησης και κατάθλιψης αντλίας

➢ Πάχος σωλήνωσης κατάθλιψης

Το απαιτούμενο πάχος t σωλήνα, εξωτερικής διαμέτρου D_2, που υπόκειται σε εσωτερική στατική πίεση p υπολογίζεται από τη σχέση:

$$t = t_{01} + t_{02} + t_{03} \tag{3.13}$$

Όπου,

- $t_{01} = \frac{k_1}{k_2} \frac{D_2}{2} \frac{p}{\sigma_Y}$, $k_1 = 1.7$ (συντελεστής ασφαλείας), $k_2 = 0.7 - 0.9$, (για συγκολλητούς σωλήνες, αλλιώς $k_2 = 1$).
- t_{02} : Ανοχή κατασκευαστή για την ανομοιομορφία πάχους (αμελείται εδώ).
- $t_{03} = 1mm$: Ανοχή για περίπτωση φθοράς ή διάβρωσης.

➢ Πάχος σωλήνα αναρρόφησης έναντι μέγιστης τιμής υποπίεσης

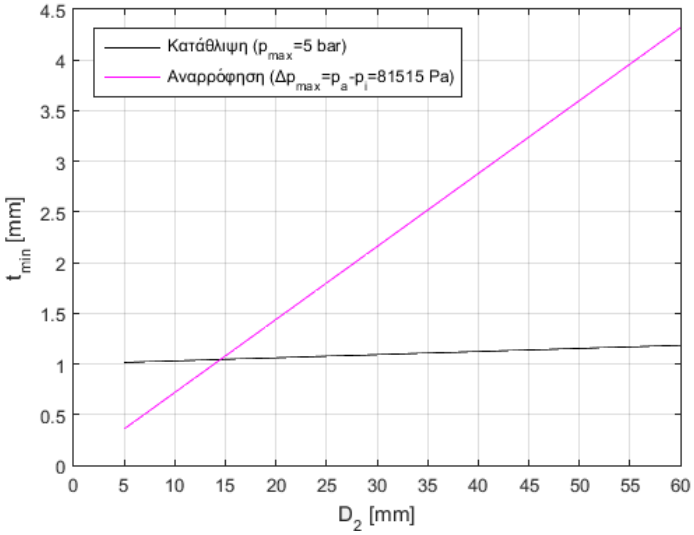
Η ανάπτυξη υποπίεσης σε σωλήνα αντιστοιχεί σε φόρτιση αντίστοιχη του λυγισμού, αν $\Delta p > \Delta p_{crit}$ ο σωλήνας υφίσταται μόνιμη παραμόρφωση τύπου σύνθλιψης.

Κρίσιμη τιμή υποπίεσης:

$$\Delta p_{cr} = (p_e - p_i)_{cr} = \frac{2E}{1-v^2}\left(\frac{t}{D_2}\right)^3 \tag{3.14}$$

Όπου, p_e, p_i η εξωτερική και εσωτερική πίεση του αγωγού αντίστοιχα. Για γνωστή μέγιστη υποπίεση $\Delta p_{max} = 101325 - p_{ws,60^oC} = 81515\ Pa$ προκύπτει:

$$t_{\min} = D_2 \sqrt[3]{\frac{\Delta p_{\max}(1-v^2)}{2E}} \tag{3.15}$$



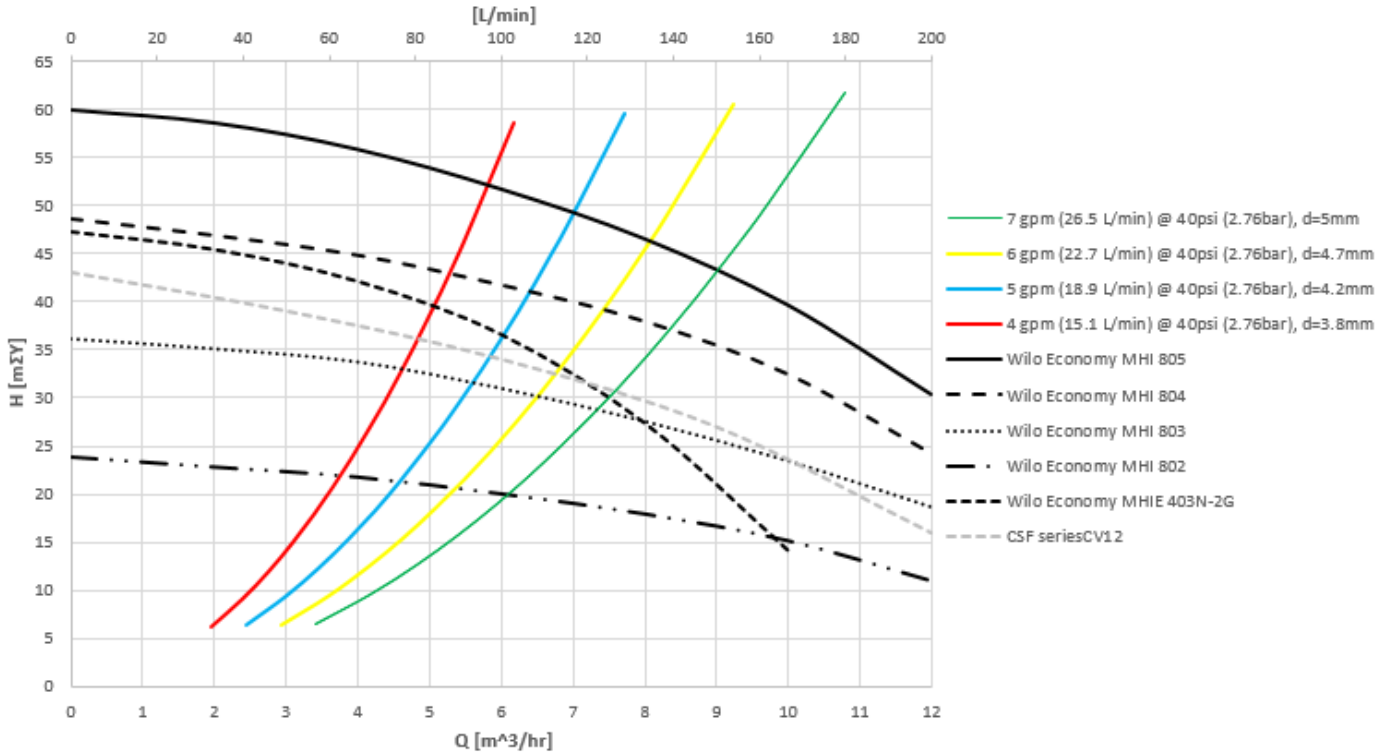
Εικόνα 3.16: Ελάχιστο πάχος σωλήνωσης αναρρόφησης και κατάθλιψης

Για την τάξη μεγέθους αντλίας που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί η κατάθλιψη συνδέεται με σωλήνωση 1 1/4" ($D_2 = 42.2mm$), ενώ η αναρρόφηση με 1 1/2" ($D_2 = 48.3mm$). Επομένως για αυτά τα μεγέθη σωληνώσεων και σύμφωνα με το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος, επιλέγεται το πάχος σωλήνωσης κατάθλιψης $t = 2.77mm$ ($Sch\ 10S \Rightarrow D1 = 36.8mm$) και της αναρρόφησης $t = 3.68mm$ ($Sch\ 40S \Rightarrow D_1 = 40.9mm$) σύμφωνα με το πρότυπο $ASTM\ A312 - 2001$.

3.4.2 Χαρακτηριστικές σωλήνωσης και αντλιών

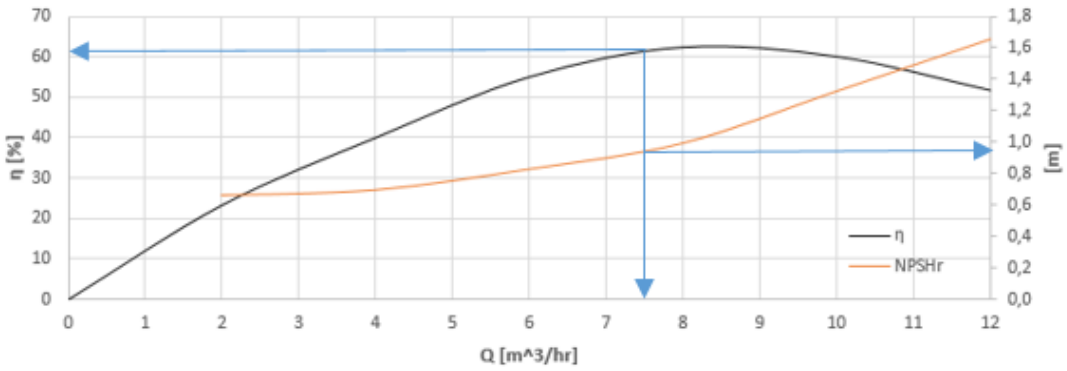
Αν $A.R. = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i}{A}$ ο λόγος με αριθμητή το άθροισμα της διατομής στομίου όλων των ακροφυσίων και παρονομαστή το εμβαδό διατομής του αγωγού και ισχύει $A.R. < 1$ ([33] *Kamil, B. K. et al.*) η διανομή της παροχής γίνεται ομοιόμορφα μεταξύ των διακλαδώσεων.

Για σωλήνωση 1 1/4" και στόμιο ακροφυσίου 4,65mm (28 ακροφύσια) προκύπτει $A.R. = 0.45 < 1$ και δεδομένου ότι για τις επιθυμητές παροχές λειτουργίας ($80 - 150L/min$) οι εντοπισμένες απώλειες στα ακροφύσια ($> 3bar$) είναι πολύ μεγαλύτερες των γραμμικών ($\sim 0{,}1\ bar$) θεωρείται ότι η παροχή της αντλίας διαμοιράζεται ισόποσα δηλαδή ισχύει $Q_{nozzle} = Q/28$. Επομένως, πλέον μπορεί να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική της σωλήνωσης όπως φαίνεται στο σχήμα της *Εικόνας 3.17*.

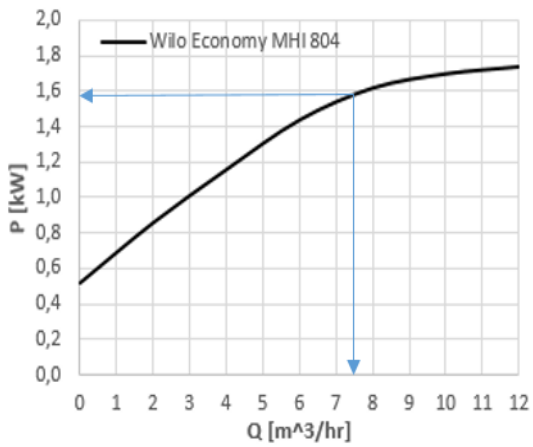


Εικόνα 3.17: Χαρακτηριστικές αντλιών και χαρακτηριστική σωλήνωσης για τη χρήση τεσσάρων διαφορετικών ακροφυσίων

Δεδομένου του εύρους των επιθυμητών παροχών λειτουργίας ($80 - 140 L/min$) και την ανάγκη για όσο το δυνατόν μεγαλύτερη δέσμη ισχύος χωρίς η πίεση να ξεπερνά τα 4bar σύμφωνα με το διάγραμμα της *εικόνας 3.16* επιλέγεται η αντλία *Wilo Economy MHI 804 (1~230V, FKM)*, με σημείο λειτουργίας ($Q_\Sigma = 125\ L,\ H_\Sigma = 39 m\Sigma\Upsilon$). Το υλικό των στεγανώσεων της αντλίας επιλέχτηκε FKM (80% fluoroelastomers) διότι είναι πιο ανθεκτικό στα λάδια, γράσα, κτλ. από την εναλλακτική επιλογή του EPDM (αιθυλένιο μονομερές διένιο προπυλενίου) [40],[41].



Εικόνα 3.18: NPSHr=0,95m & η_{pump}=61% αντλίας στο σημείο λειτουργίας



Εικόνα 3.19: Ισχύς αντλίας στο σημείο λειτουργίας (1,6 kW)

3.4.3 Έλεγχος αντλίας ως προς τη σπηλαίωση

Λαμβάνοντας ως στάθμη αναφοράς τη στάθμη της αντλίας και συμβολίζοντας με $H_{atm} = 10\, m\Sigma Y$ την απόλυτη στατική πίεση που επικρατεί στην επιφάνεια της δεξαμενής καθίζησης (δυσμενέστερη περίπτωση) το καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης της αντλίας ($NPSHa$) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$NPSH_a = H_{atm} + h_{\text{tank}} - k_2 Q^2 - H_{ws} \tag{3.16}$$

Όπου,

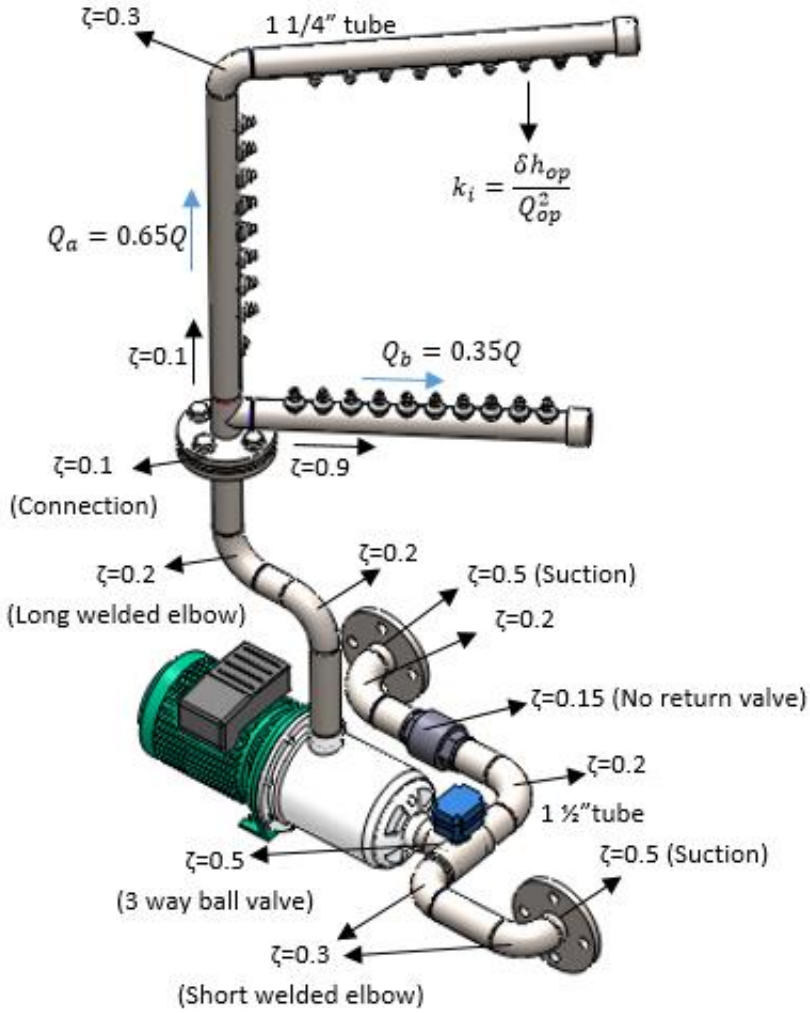
- $h_{tank} = 0.3\, m$: Υψομετρική διαφορά των στάθμεων δεξαμενής και αντλίας.
- $\zeta_e = 1.6$ (*εικόνα 3.20*) : Σύνολο συντελεστών εντοπισμένων αντιστάσεων της κύριας δεξαμενής (αμελούνται ως αμελητέες οι γραμμικές απώλειες)
- $H_{ws} = 3.14\, m\Sigma Y$: Πίεση ατμοποίησης του νερού στου $70^o C$

Η συνθήκη μη εμφάνισης σπηλαίωσης στην αντλία είναι:

$$NPSH_a > NPSH_r \approx 1\text{m} \tag{3.17}$$

Για την παροχή λειτουργίας ($Q_\Sigma = 125\, L/min$) προκύπτει $k_2 Q^2 = 0.2\, m\Sigma Y$ και άρα $NPSH_a = 6.6\, m\Sigma Y > NPSH_r$, επομένως η αντλίας λειτουργεί με ασφάλεια όσον αφορά την σπηλαίωση.

Η γενική διάταξη σύνδεσης του συστήματος ψεκασμού με την αντλία και τις δεξαμενές παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 3.20: Συνδεσμολογία αντλίας και τιμές εντοπισμένων αντιστάσεων (ωφέλιμος όγκος κατάθλιψης 2.4L)

3.5 Συγκεντρωτικός πίνακας υπολογισμών

Συγκεντρωτικά τα μεγέθη και οι αριθμητικές τους τιμές, που αφορούν το σύστημα ψεκασμού παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

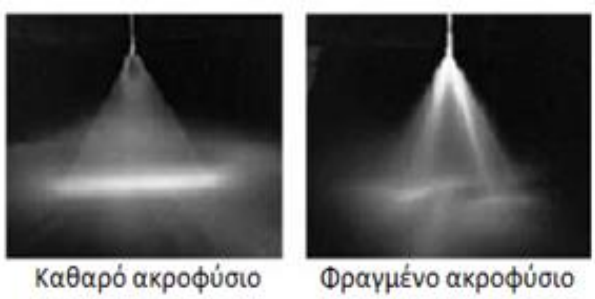
	Μέγεθος		Σύμβολο	Τιμή	Μονάδες	Παρατηρήσεις	
Αγωγός διανομής	Διακινούμενη παροχή		Q	0,00209	[m^3/sec]	INSERT (80 L/min < Q <150 L/min)	
				125,2	[L/min]		
				7,5	[m^3/hr]		
	Πυκνότητα εργαζόμενου μέσου		ρ	1007	[kg/m^3]	(water @ 70oC +3%detergent)	
	Κινηματική συνεκτικότητα νερού		v	4,771E-07	[m^2/sec]	(water @70oC)	
	Διάμετρος αγωγού διανομή		D	36,8	[mm]	INSERT	
				0,0368	[m]		
	Διατομή αγωγού διανομής		A	0,0011	[m^2]	A=πD^2/4	
	Μέση ταχύτητα		u	2,0	[m/sec]	u=Q/A	
	Αριθμός Reynolds		Re	151344	[-]	Re=uDh/v	
	Συνολικό μήκος αγωγού κατάθλιψης		Lκατάθλιψης	2	[m]	INSERT	
	Όγκος νερού στον αγωγό κατάθλιψης		Vκατάθλιψης	2,4	[L]	Vκατάθλιψης=A*L	
Ακροφύσια	Αριθμός ακροφυσίων πολλαπλής		n	28	[-]	INSERT	
	Διάμετρος στομίου ακροφυσίου		dnozzle	4,65	[mm]	INSERT	d=5,03mm @ 7gpm
				0,183	[inch]		d=4,65mm @ 6gpm
				4,65E-03	[m]		d=4,24mm @ 5gpm
	Παροχή ακροφυσίου (διαίρεση παροχής)		Qdesire	7,45E-05	[m/sec]	Qi=Q/n	
				4,5	[L/min]		
				1,2	[gpm]		
	Διατομή στομίου		Anozzle	1,698E-05	[m^2]	Anozzle=πd^2/4	
				0,17	[cm^2]		
	Λόγος εμβαδών απομαστεύσεων προς κυρίου αγωγού		A.R.	0,45	[-]	A.R.=SUM(Anozzle)/A	
	Ταχύτητα εξόδου δέσμης		unozzle	4,4	[m/sec]	unozzle=Qnozzle/A	
	Παροχή μάζας ακροφυσίου		m_dotnozzle	0,0751	[kg/sec]	m_dotnozzle=Qnozzle*ρ	
	Jet Impact Force		F	0,33	[N]	F=m_dot*u=Q*ρ*u	
	Απόσταση πτερυγίου από άξονα περιστροφής		x	0,335	[m]	INSERT	
	Ροπή δέσμης νερού (στην στεφάνη)		Md	0,11	[N.m]	Md=F*x	
	Πίεση λειτουργίας ακροφυσίου (στατική κατάντι ακροφυσίου)	Κατάλογος ακροφυσίων	pnozzle	40	[psi]	INSERT	(from catalogue)
				2,76	[bar]		
	Παροχή όγκου (στην πίεση λειτουργίας και τη διάμετρο στομίου)		Qnozzle	6,0	[gpm]	INSERT	
				22,71	[L/min]		
				3,79E-04	[m^3/sec]		
	Συντελεστής μετασχηματισμού εργαζόμενου μέσου		cf	0,9	[-]	Qdesire=Qdesire,water*sqrt(ρfluid/ρw)	
	Επιθυμητή πίεση λειτουργίας		pdesire	1,91	[psi]	INSERT	
				0,132	[bar]		
	Προκύπτουσα παροχή (need to check)		Q	1,18	[gpm]	Q=cf*Qnozzle*(pdesire/pnozzle)^n	
				4,47	[L/min]		
				7,5E-05	[m^3/sec]		
	Συνολική παροχή		Qtot	125,2	[L/min]	Qi=Q/n	
	Εύρεση για παροχής ακροφυσίου		Qcataloque	6	[gpm]	Qcatalogue=(1/cf)*Qdesire*(p_nozzle/pdesire)^n	
				22,71	[L/min]		
	Συντελεστής απωλειών πίεσης ακροφυσίου		kh	240529980,8	[sec^2/m^5]	knozzle=(pdesire/(ρg))/Qi^2, δh=knozzleQ^2	
Αντλία	Ύψος αντλίας (ΚΣΛ)		Hκ	35,4	[mΣΥ]	PUMP DATA (Wilo economy MHI 804 ~230V, FKM)	
	Παροχή αντλίας (ΚΣΛ)		Qκ	7,5	[m^3/hr]		
	Κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης		NPSHr (Hκρ)	1	[mΣΥ]		
	Βαθμός απόδοσης στο σημείο λειτουργίας		ηpump	0,6	[-]		
	Καταναλούμενη ισχύς		Ppump	1,6	[KW]		
Σπηλαίωση Αντλίας	Πίεση ατμοποίησης (70oC)		Hws	0,31	[bar]	water @ 70oC	
				3,14	[mΣΥ]		
	Διάμετρος αναρρόφησης		De	40,9	[mm]	INSERT	
				0,041	[m]		
	Εμβαδό		Ae	1,3E-03	[m^2]	A=πD^2/4	
	Ταχύτητα αναρρόφησης		ue	1,6	[m/sec]	ue=Qe/A	
	Αριθμός Reynolds		Re	136039	[-]	Re=uDh/v	
	Συντελεστής απωλειών αναρρόφησης		κ	47060	[sec^2/m^5]	κ=8λL/(π^2gD^5)+8ζ/(π^2gD^4) (αμελούνται οι γραμμικές)	
	Πτώση πίεσης		δhs	0,20	[mΣΥ]	δh=kQ^2	
				0,020	[bar]	p=ρgH	
	Ύψος στάθμης δεξαμενής		htank	0,3	[m]	INSERT	
	Καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης (Πρέπει NPSHa>NPSHr)		NPSHa	7,0	[mΣΥ]	HΘ=hatm+htank-δhs-Hws	

Πίνακας 3.3: Συγκεντρωτικός πίνακας υπολογισμών

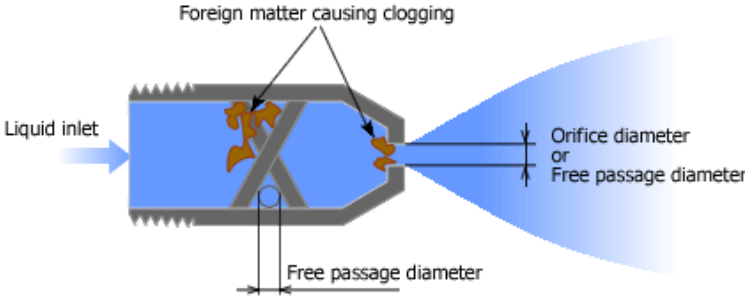
3.6 Συνηθισμένα προβλήματα - Συντήρηση ακροφυσίων

Τα παρακάτω προβλήματα αναφέρονται σε ακροφύσια που τροφοδοτούνται από φυγοκεντρική αντλία:

- Διάβρωση και απόφραξη ακροφυσίων.
- Ακροφύσια που είναι παράλληλα διατεταγμένα υπάρχει το ενδεχόμενο οι δέσμες να συγκρούονται μεταξύ τους και να αναιρείται η ισχύς της κάθε δέσμης.
- Η αύξηση της ροή σε ένα ακροφύσιο συνήθως δεν μπορεί να γίνει αντιληπτή οπτικά, μόνο αν γίνει ξεχωριστή μέτρηση παροχής σε κάθε ακροφύσιο ή μετρηθεί αύξηση ρεύματος στον κινητήρα.



Εικόνα 3.21: Οπτική διαφορά δέσμης (το καθαρό ακροφύσιο παρουσιάζει ομοιόμορφο ψεκασμό)



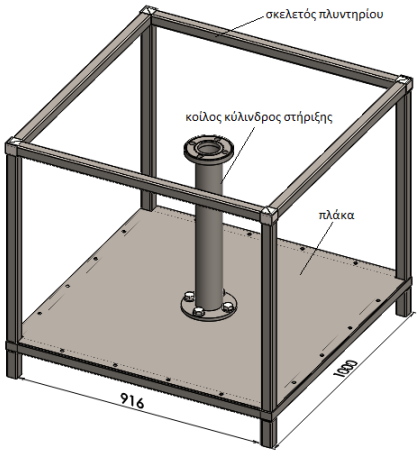
Εικόνα 3.22: Μέρη ακροφυσίου-περιοχές φραξίματος

Η φθορά των ακροφυσίων δεν είναι εύκολο να ανιχνευθεί καθώς δεν αλλάζει το σχήμα της δέσμης. Αυτό που αλλάζει είναι η παροχή (π.χ. στα flat ή στα full cone ακροφύσια, η φθορά προκαλεί αύξηση της ροής στην κεντρική περιοχή της δέσμης). Για τους λόγους αυτούς, η ροή των ακροφυσίων θα πρέπει να ελέγχεται τακτικά συγκρίνοντας την ονομαστική τιμή της ροής των ακροφυσίων με την πραγματική τιμή τους. Η αντικατάσταση των ακροφυσίων συνιστάται αν η πραγματική ροή είναι 10% μεγαλύτερη από την ονομαστική τιμή. Για καλύτερη αντοχή στο χρόνο, συνιστάται ο καθαρισμός του ακροφυσίου και του κυκλώματος στο τέλος κάθε εργασίας ψεκασμού ώστε να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα μπλοκαρίσματος και αστοχίας. Δεν συνίσταται ο καθαρισμός των ακροφυσίων με αιχμηρά αντικείμενα γιατί είναι σχεδόν σίγουρο ότι θα προκαλέσουν ζημιά, προτείνεται βουρτσάκι ή καθαρισμός με δέσμη πεπιεσμένου αέρα.

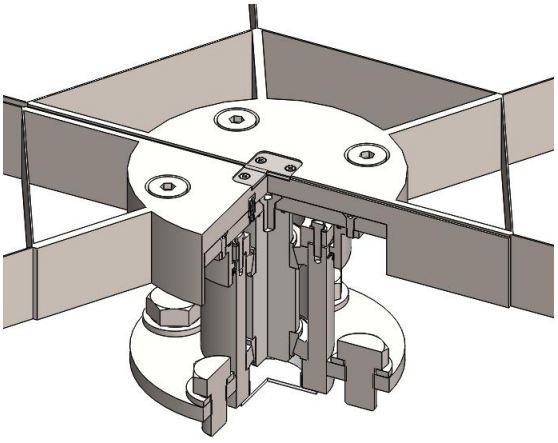
Κεφάλαιο 4
Ανάλυση-Υπολογισμός Κατασκευής

4.1 Σκελετός κατασκευής

Ο σκελετός, τετραγωνικού σχήματος, θα είναι θα είναι συγκολλητή κατασκευή από κοιλοδοκούς υλικού κοινού χάλυβα κατασκευών, $\sigma_Y = 250\ MPa$. Πάνω στο σκελετό θα βιδώνεται χαλύβδινη πλάκα στην οποία θα εδράζονται οι δεξαμενές με τις σωληνώσεις, η αντλία με τον κινητήρα, καθώς και το φορτίο που μεταφέρεται από τον περιστρεφόμενο μηχανισμό.



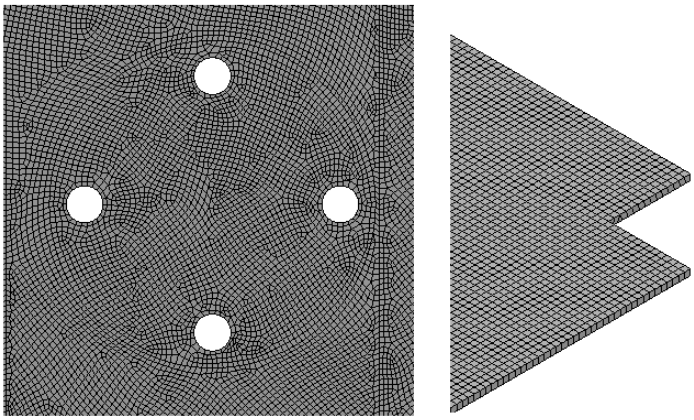
Εικόνα 4.1: Σκελετός πλυντηρίου



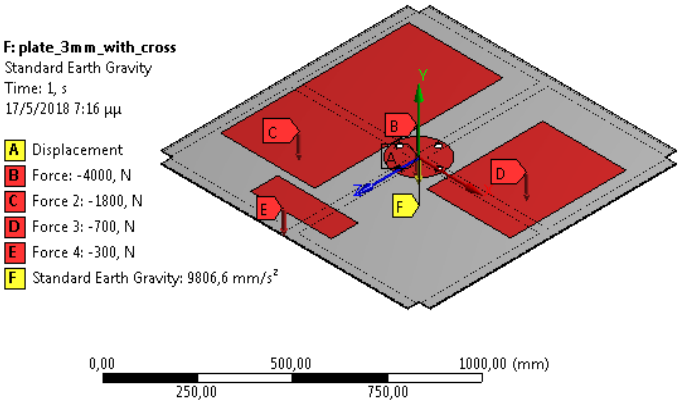
Εικόνα 4.2: Περιστρεφόμενος μηχανισμός σε ημιτομή

4.1.1 Έλεγχος αντοχής βάσης

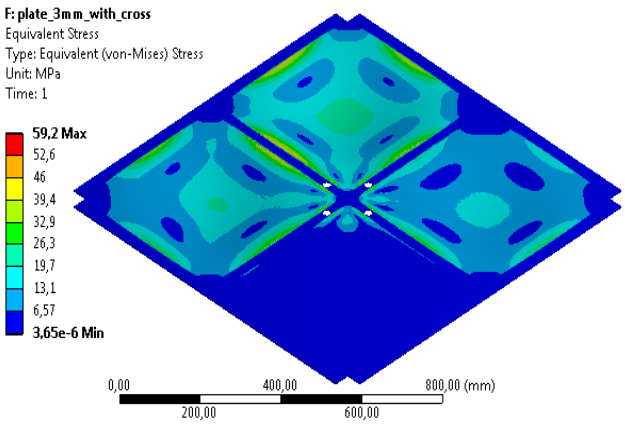
Προδιαγραφή κατά το σχεδιασμό της πλάκας τίθεται η αντοχή της στο κατακόρυφο φορτίο, οπότε ανάγκη είναι ο προσδιορισμός απαιτούμενου πάχους πλάκας και κατάλληλου τρόπου στήριξης με το μικρότερο δυνατό βάρος. Για το σκοπό αυτό έγιναν προσομοιώσεις στο λογισμικό *ANSYS Static Structural Release 16.2* με τα τελικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων να παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



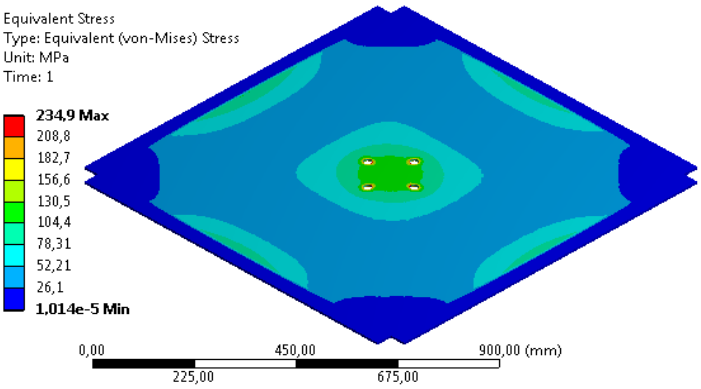
Εικόνα 4.3: Πλέγμα 987117 κόμβων , 24985 στοιχείων (basic element size 3mm), πλάκα πάχους 3mm



Εικόνα 4.4: Οριακές συνθήκες



Εικόνα 4.5: Κατανομή τάσεων (Von-Mises) σε πλάκα πάχους 3mm με σταυρό στήριξης, σ_{eq}=59.2MPa<σ_Y

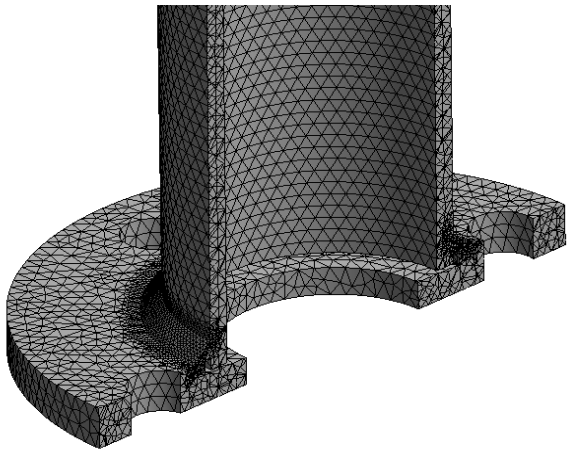


Εικόνα 4.6: Κατανομή τάσεων (Von-Mises) σε πλάκα πάχους 6mm χωρίς σταυρό στήριξης, σ_{eq}=235MPa<σ_Y

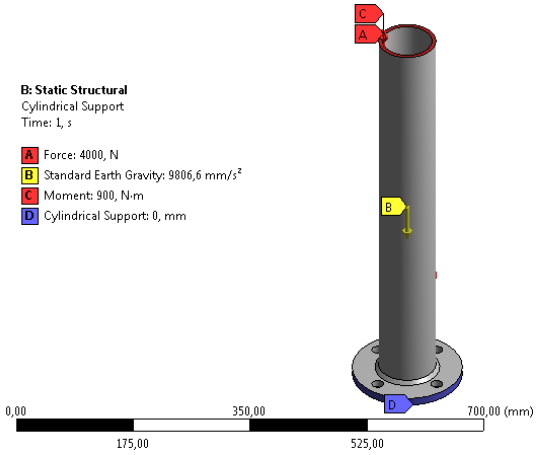
Οπότε, επιλέγεται πλάκα πάχους $3mm$ μαζί με σταυρό στήριξης συνολικής μάζας $23.4 + 6 = 29.9\ kg$ (στην άλλη περίπτωση η πλάκα πάχους $6mm$ θα ζύγιζε $46.8\ kg$).

4.1.2 Έλεγχος αντοχής κοίλου κυλίνδρου (σωλήνα) στήριξης

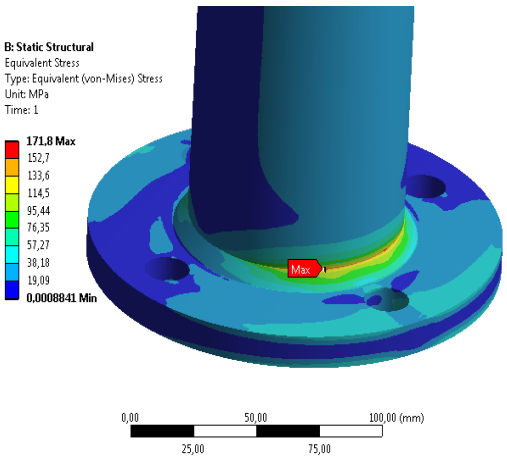
Ο κοίλος κύλινδρος με συγκολλημένη στη βάση του φλάντζα διαστασιολογούνται έτσι ώστε να παραλαμβάνουν με ασφάλεια το θλιπτικό και καμπτικό φορτίο στη δυσμενέστερη περίπτωση φόρτωσης.



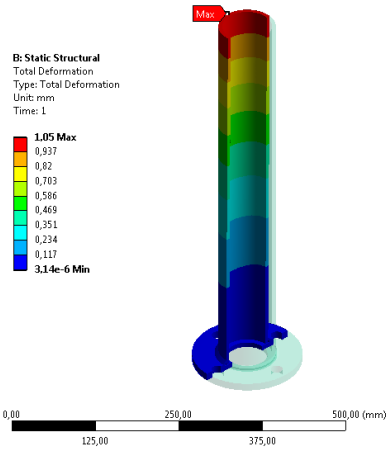
Εικόνα 4.7: Πλέγμα 382301 κόμβων , 241818 στοιχείων (basic element size 3mm)



Εικόνα 4.8: Οριακές συνθήκες



Εικόνα 4.9: Κατανομή τάσεων Von-Mises σ_{eq} =172 MPa<σ_Y



Εικόνα 4.10: Συνολική παραμόρφωση σωλήνα στήριξης

4.2 Περιστρεφόμενος Μηχανισμός

4.2.1 Περιγραφή

Για όσο το δυνατόν καλύτερο καθαρισμό τα τεμάχια πρέπει να περιστρέφονται γύρω από άξονα ώστε οι σταθερές δέσμες νερού να εκμεταλλεύονται πλήρως. Για το λόγω αυτό σχεδιάζεται περιστρεφόμενος μηχανισμός στον οποίο θα τοποθετούνται και θα περιστρέφονται τα τεμάχια. Οπότε προδιαγραφές κατά τον σχεδιασμό του μηχανισμού τίθενται η αντοχή του σε οποιαδήποτε διάταξης φορτίο (400kg) και της δυνατότητας του να στεγανοποιεί τον νεροχύτη και τα εσωτερικά έδρανα κύλισης. Ο μηχανισμός θα αποτελείται από ένα σταθερό μέρος το οποίο θα εδράζεται στον κύριο σκελετό του πλυντηρίου και ένα κινητό όπου θα επιτελείται η περιστροφή. Το σταθερό μέρος περιλαμβάνει την πλήμνη και βιδωμένους δύο κυκλικούς δακτυλίους όπου ο ένας θα είναι υπεύθυνος για την ρύθμιση της προέντασης στα έδρανα κύλισης και ο άλλος για το κλείσιμο του χώρου κάτω από τον άξονα. Αντίστοιχα, το κινητό μέρος περιλαμβάνει άξονα περιστροφής ο οποίος θα εδράζεται με δύο κωνικά έδρανα κύλισης επί της πλήμνης, φλάντζα η οποία θα συνδέει τον άξονα με τον περιστρεφόμενο δίσκο και κυλινδρικό δοκίμιο (ποτήρι) για την έδραση της στεγάνωσης. Τέλος, η περιστροφική κίνηση του μηχανισμού θα επιτυγχάνεται από δέσμη ισχύος νερού, η οποία θα αποδίδει την ενέργειά της σε πτερύγια δράσης τα οποία θα βρίσκονται συγκολλημένα στο κάτω μέρος του περιστρεφόμενου δίσκου.

4.2.2 Υλικό

Δεδομένου των συνθηκών πλυσίματος (θερμοκρασία & pH) και της φύσης του εργαζόμενου μέσου (νερό) το υλικό των μεταλλικών μερών του μηχανισμού που έρχονται σε επαφή με αυτό, επιλέγεται ανοξείδωτος χάλυβας (AISI 316) με τις ιδιότητες που φαίνονται στον *Πίνακα 4.1*. Αντίθετα, για εξαρτήματα του μηχανισμού που δεν έρχονται σε επαφή με το εργαζόμενο μέσο επιλέγεται υλικό κοινός χάλυβας κατασκευών.

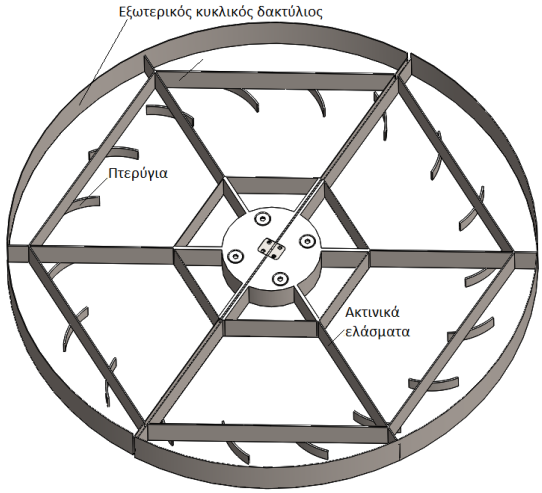
Elastic Modulus	193	GPa
Poisson's Ratio	0.3	[-]
Mass Density	8000	kg/m^3
Tensile Strength	550	MPa
Yield Strength	207	MPa
Thermal Expansion Coefficient	1.6e-005	/K
Specific Heat	460	J/(kg·K)

Πίνακας 4.1: Ιδιότητες Stainless Steel AISI-316:

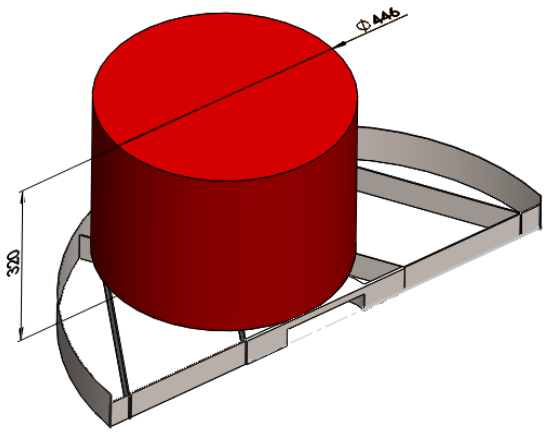
4.2.3 Σχεδιασμός περιστρεφόμενου δίσκου

Προδιαγραφή: Διάμετρος περιστρεφόμενου δίσκου 90cm, μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο 400kg.

Ο σχεδιασμός του περιστρεφόμενου δίσκου περιλαμβάνει στο κέντρο φλάντζα όπου θα γίνεται η σύνδεσή του με κοχλίες στον άξονα, εξωτερικά κυκλικό δακτύλιο ως τερματικό σύνορο, ενώ ενδιάμεσα η σύνδεση θα επιτελείται ακτινικά με ελάσματα τα οποία θα στηρίζονται μεταξύ τους με ενδιάμεσα νεύρα.



Εικόνα 4.11: Μέρη περιστρεφόμενου δίσκου

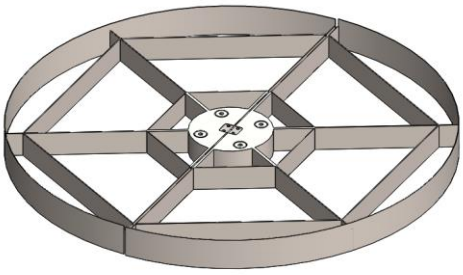


Εικόνα 4.12: Δυσμενέστερη περίπτωση φόρτωσης (κυλινδρικό μασίφ μεταλλικό δοκίμιο μάζας 400kg)

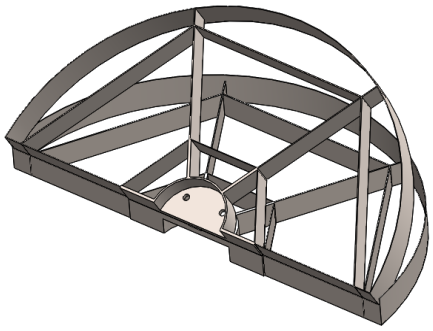
Εκτελώντας συνεχείς προσομοιώσεις (στο υπολογιστικό περιβάλλον του *ANSYS 16.2*) επί παραπλήσιων διατάξεων με τις ανωτέρω προέκυψαν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Κρίσιμο σημείο του μηχανισμού είναι το πάνω κι κάτω σημείο σύνδεσης του ακτινικού ελάσματος επί της φλάντζας.
- Τα νεύρα στήριξης έδωσαν μικρότερες εμφανιζόμενες τάσεις από την σύνδεση τον ακτινικών ελασμάτων με ένα ενιαίο εσωτερικό κυκλικό δακτύλιο.
- Η προσθήκη επιπλέον σειράς νεύρων στήριξης δεν επηρέασε ουσιαστικά την μέγιστη εμφανιζόμενη τάση.
- Η αύξηση της διαμέτρου της κεντρικής φλάντζας, του ύψους και του πάχους των ακτινικών ελασμάτων μείωνε τη μέγιστη εμφανιζόμενη τάση (ροπή αντίστασης σε κάμψη ορθογωνικής διατομής $w_y = bh^2/6$), ενώ η αύξηση του πάχους των ακτινικών ελασμάτων την μείωνε.
- Η απομάκρυνση των νευρών στήριξης από τον άξονα περιστροφής ανέβαζε την μέγιστη εμφανιζόμενη τάση.

Κατά τον τελικό σχεδιασμό, για να αντέξει η ο περιστρεφόμενος δίσκος το μη έκκεντρο φορτίο χωρίς την προσθήκη υπερβολικού βάρους αυξήθηκε το πάχος των ακτινικών ελασμάτων στην περιοχή των μέγιστων καταπονήσεων, ενώ προστέθηκε και άλλη μία σειρά με νεύρα στήριξης για να συγκολληθούν τα πτερύγια. Στη συνέχεια, ο δίσκος κόβεται στη μέση, και τα δύο τμήματα συνδέονται μεταξύ τους με άρθρωση με σκοπό την εύκολη πρόσβαση στα από κάτω τμήματα.

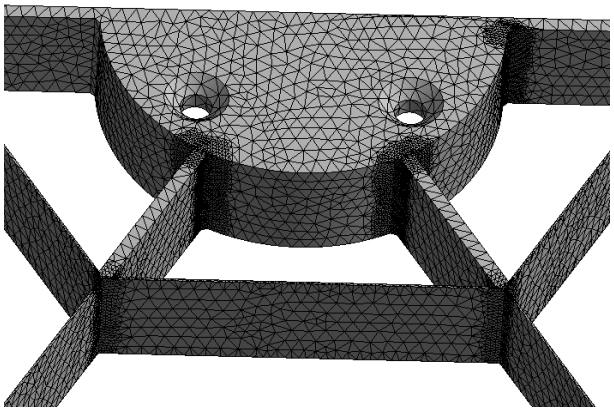


Εικόνα 4.13: Περιστρεφόμενος δίσκος-ανοικτή θέση

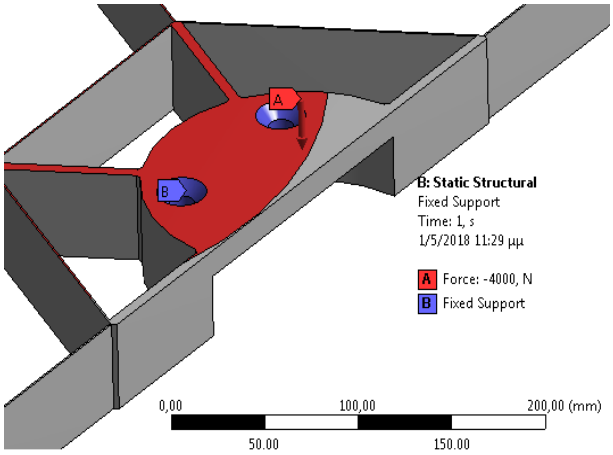


Εικόνα 4.14: Περιστρεφόμενος δίσκος-κλειστή θέση

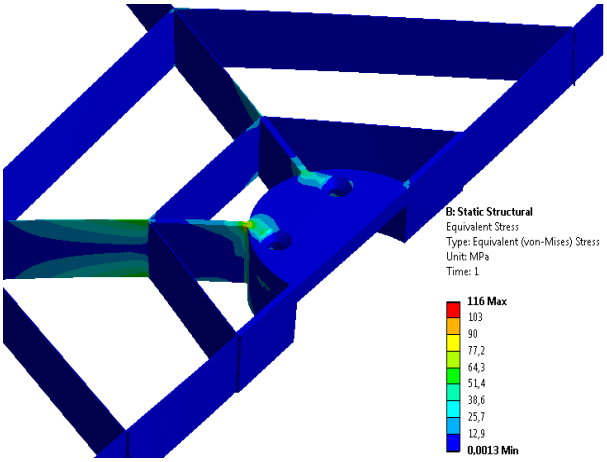
Αναλυτικά οι τάσεις και παραμορφώσεις στην τελική γεωμετρία παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα, με τη μέγιστη τάση να είναι μικρότερη του ορίου διαρροής.



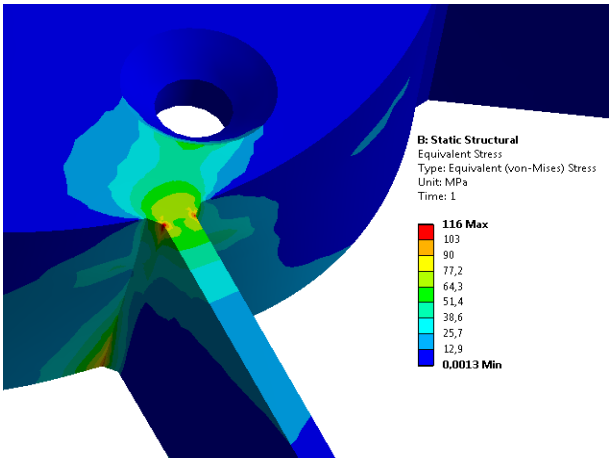
Εικόνα 4.15: Πλέγμα 266942 κόμβων , 160438 στοιχείων (basic element size 6mm)



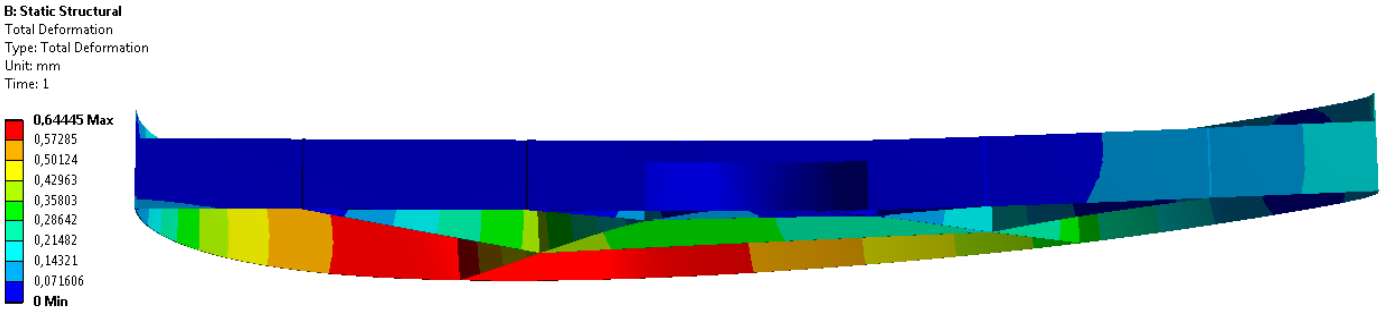
Εικόνα 4.16: Οριακές συνθήκες



Εικόνα 4.17: Κατανομή τάσεων (Von-Mises), σ_{eq}=116MPa<σ_Y



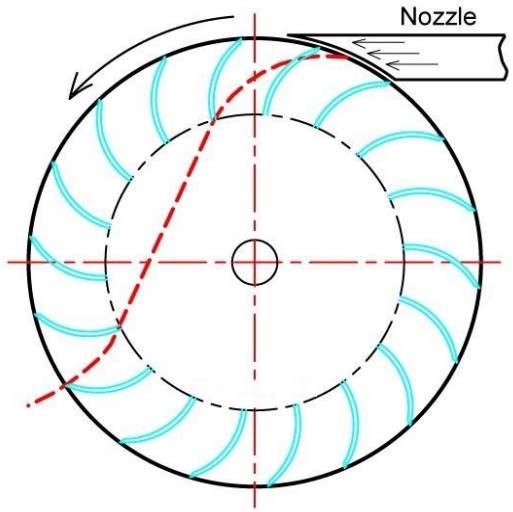
Εικόνα 4.18: Περιοχή μέγιστων εμφανιζόμενων τάσεων



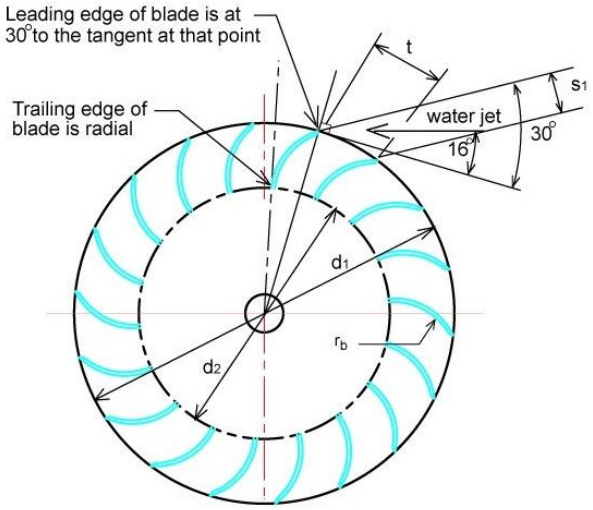
Εικόνα 4.19: Παραμόρφωση στρεφόμενου δίσκου

4.2.4 Πτερύγια για την περιστροφή του δίσκου

Τα πτερύγια για την περιστροφή προστίθενται στο κάτω μέρος του δίσκου δίνοντας του τη μορφή ενός υδροστροβίλου Mitchell – Banki με μέγιστο βαθμό απόδοσης 61°. Το πλεονέκτημα αυτή της διάταξης εκτός του ικανοποιητική βαθμού απόδοσης είναι η απλότητα κατασκευή των πτερυγίων που μπορούν να κατασκευαστούν από καμπύλα τμήμα σωλήνωσης.



Εικόνα 4.20: Αρχή λειτουργίας υδροστροβίλου Mitchell-Banki (κατά την πρώτη κρούση αποδίδεται το 72% της ενέργειας και το 28% από την δεύτερη κατά την έξοδο της δέσμη)



Εικόνα 21: Μεγέθη σχεδιασμού (οι γωνίες που αναγράφονται αναφέρονται σε όσο τον δυνατό πιο αποτελεσματική σχεδίαση)

Οι σχέσεις προσδιορισμού των γεωμετρικών παραμέτρων δίνονται παρακάτω με αρχική επιλογή διαμέτρου d_1.

- $d_2 = 0.66 \times d_1$ (4.1)
- $r_b = 0.326 \times d_1 / 2$ (4.2)
- $s_1 = 0.09 \times d_1$ (4.3)
- $t = s_1 / \sin \beta_1 = s_1 / \sin 30^o$ (4.4)

Δεδομένου ότι για εξωτερική διάμετρο $776mm$ όπου θα τοποθετηθούν τα πτερύγια είναι δύσκολη η εύρεση σωλήνα, επιλέγεται τα πτερύγια να κατασκευαστούν από τμήματα σωλήνα $d_1 = 8"$ $(219.08\ mm)$. Έτσι, προκύπτουν $d_2 = 144.6mm,\ r_b = 35.7mm,\ s_1 = 19.7\ και\ t = 39.4mm\ (18\ πτερύγια)$.

4.2.5 Στατικός υπολογισμός ατράκτου-έλεγχος αντοχής

Ροπές και εξωτερικές δυνάμεις μου ασκούνται πάνω στην άτρακτο:

- Ροπή στρέψης , $M_d < 2\ N \cdot m$ (ροπή στρέψης + ροπή υπερνίκησης μηχανικών απωλειών).
- Αξονική δύναμη λόγω ιδίου βάρος των περιστρεφόμενων μερών του μηχανισμού και το πρόσθετο βάρος του φορτίου, $F_i < 4000N$.
- Κάμψη από μη συμμετρική τοποθέτηση του φορτίου $M_y < 900\ N \cdot m$ $(400kg\ σε\ απόσταση\ 223mm)$.

Ως μέγεθος αναφοράς λαμβάνεται αρχική διάμετρος $d = 30mm$ στην οποία τα ρουλεμάν εδράζονται στην άτρακτο και το υλικό της ατράκτου επιλέγεται κράμα χάλυβα $(C45)$ με όριο διαρροής $\sigma_Y = 415\ Mpa$.

Η ισοδύναμη ορθή τάση λαμβάνεται σύμφωνα με το κριτήριο του *Von Mises* $(\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{23} = \sigma_{31} = 0)$ και άρα θα πρέπει:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau_{12}^2} < 415\,MPa \quad (4.5)$$

Η διατμητική τάση που ασκείται στην άτρακτο προκύπτει από τη ροπή στρέψης M_d και ισούται με:

$$\tau_{12} = \frac{M_d}{w_p} \tag{4.6}$$

όπου $w_p = \frac{\pi d^3}{16}$ η πολική ροπή αδράνειας της κυκλικής διατομής.

Η ορθή τάση υπολογίζεται ως

$$\sigma_1 = \frac{4F_i}{\pi d^2} + \frac{M_y}{I_y}\frac{d}{2} \tag{4.7}$$

Όπου $I_y = I_x = \frac{\pi d^4}{64}$ ροπή αδράνειας κυκλικής διατομής

Οπότε η ισοδύναμη τάση γράφεται:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\left(\frac{4F_i d + 32M_y}{\pi d^3}\right)^2 + 3\left(\frac{16M_d}{\pi d^3}\right)^2} \tag{4.8}$$

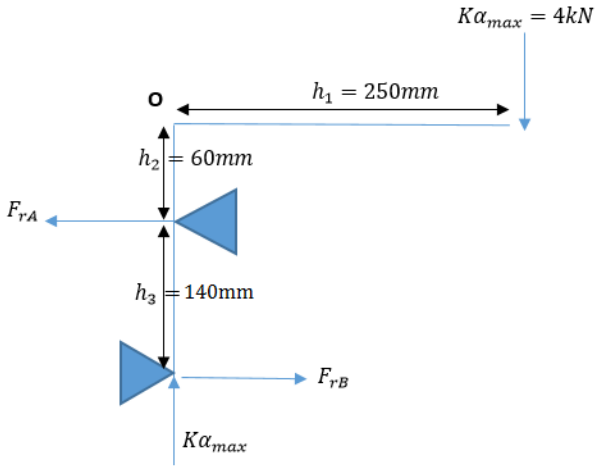
Για $F_i = 4000\ N,\ M_y = 900\ N \cdot m,\ M_d = 2\ N \cdot m$ και $d = 30mm$ προκύπτει $\sigma_{eq} = 346\ MPa < \sigma_Y = 414MPa$.

4.2.6 Υπολογισμός εδράνων κύλισης

Για την έδραση του κατακόρυφου φορτίου χρησιμοποιούνται δύο κωνικά ρουλεμάν (single row tapered roller bearing) σε διάταξη πρόσωπο με πρόσωπο και εσωτερική διάμετρο που να συναρμόζει με αυτή της ατράκτου $(d = 30mm)$.

Μέγεθος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδες
Inside diameter	d	30	[mm]
Outside diameter	D	55	[mm]
Width	T	17	[mm]
Basic load ratings-static (10^4 rpm)	C	40,5	[kN]
Basic load ratings-dynamic (10^4 rpm)	Co	44	[kN]
Fatigue load limit	Pu	4,55	[kN]
Calculation factors	Y	1,4	[-]
	e	0,43	[-]
	Y0	0,8	[-]

Πίνακας 4.2: Βασικές διαστάσεις και συντελεστές επιλεγόμενων εδράνων κύλισης



Εικόνα 4.22: Διάγραμμα ελεύθερου σώματος

Τυποποιημένοι υπολογισμοί επί των εδράνων

F_{rA}, F_{rB} : Ακτινικό φορτίο εδράνου A & B αντίστοιχα

$Ka_{max} = 4kN$: Εξωτερικά κάθετα επιβαλλόμενο μέγιστο φορτίο

$F_{aA} = 0,\ F_{aB} = Ka_{max}$, Αξονική δύναμη στο έδρανο A & B αντίστοιχα

Ισορροπία δυνάμεων και ροπών (διάγραμμα ελευθέρου σώματος):

$$\Sigma F_x = 0 \Rightarrow F_{rA} = F_{rB}$$

$$\Sigma \mathrm{M_O} = 0 \Rightarrow Ka_{\max}\,\mathrm{h}_1 + F_{rA}h_2 - F_{rB}(h_3 + h_2) = 0 \Rightarrow F_{rA} = F_{rB} = \frac{Ka_{\max}h_1}{h_3} = 7.14\,\mathrm{kN}$$

Έλεγχος αντοχής εδράνου Β

Ισοδύναμο στατικό φορτίο : $P = 0.5\mathrm{F}_r + \mathrm{Y}_0\mathrm{F}_a$:

Ισοδύναμο δυναμικό φορτίο : $P_0 = F_r \;\; \gamma\iota\alpha\, F_a / \mathrm{F}_r \le \mathrm{e} \;\; \acute{\eta} \;\; P_0 = 0.4F_r + YF_a \;\; \gamma\iota\alpha\, F_a / F_r > e$:

Είναι $P = 6.77\,kN < C$ και $\frac{F_a}{F_r} = 0.25 < e \Rightarrow P_0 = 7.14kN < C_0$

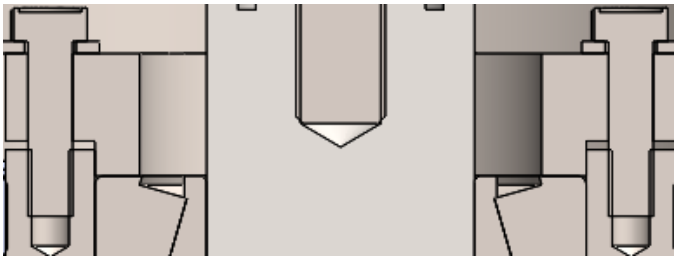
Προένταση εδράνων:

$F_{rm} = 0.02C = 810\,N$: Απαιτούμενη ελάχιστη ακτινική φόρτιση κάθε εδράνου

$T_{b(preload)} = K \cdot d_b \cdot F_{a(preload)}$: Ροπή σύσφιξης κοχλιοσύνδεσης, όπου K συντελεστής διόρθωσης (βλ. παρακάτω πίνακα) και d_b η ονομαστική διάσταση του σπειρώματος

K	Description
0,2	dry (un-lubricated) mid-size steel bolts
0,3	non-plated black finish
0,2	zinc-plated
0,16	cadmium-plated
0,15-0,18	lubricated

Πίνακας 4.3: Τυπικές τιμές συντελεστή διόρθωσης-Κ



Εικόνα 4.23: Κοχλίες προέντασης εδράνων

Η απαιτούμενη ελάχιστη ακτινική προένταση ισοδυναμεί σε συνολικό αξονικό φορτίο $F_{a(preload)} = 2 \cdot \frac{0.5F_r}{Y} = 579N$, οπότε αν χρησιμοποιηθούν 4 κοχλίες **M5**, χαλύβδινοι, χωρίς λίπανση ($\boldsymbol{K = 0.2}$), η ροπή σύσφιξης κάθε κοχλία θα είναι $T_{bi} \approx 0.150\;N \cdot m$.

4.2.7 Υπολογισμός ταχύτητας περιστροφής

Ροπή υπερνίκησης μηχανικών απωλειών

Για να μπορέσει να περιστραφεί ο δίσκος απαιτείται να του ασκηθεί ροπή μεγαλύτερη αυτή που παράγουν οι τριβές στα έδρανα και τη στεγάνωση. Ο ροπή που παράγεται από τις τριβές στο κάθε έδρανο υπολογίζεται από τη σχέση:

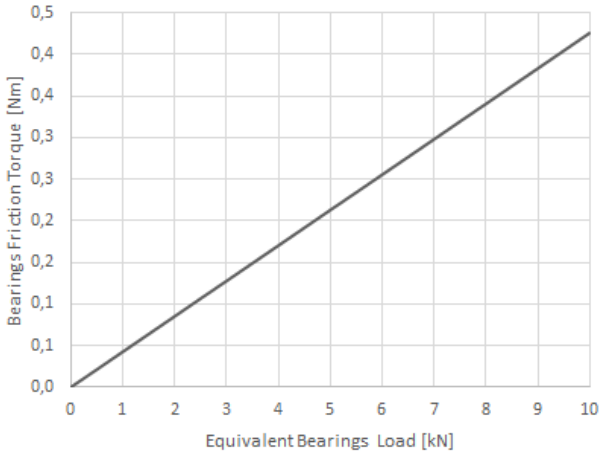
$$T_b = P_0 \times \mu \times dm / 2 \tag{4.9}$$

Όπου,

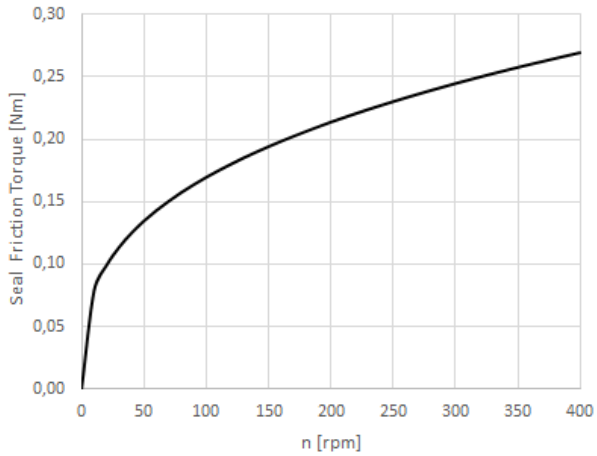
$\mu = 0.002$ (roller bearing friction coefficient)

P_0: Ισοδύναμο φορτίο που δέχονται κάθε στιγμή τα έδρανα

$dm = \frac{d+D}{2} = 42.5\;mm$: Μέση διάμετρος εδράνου



Εικόνα 4.24: Ροπή απωλειών και των 2 εδράνων συναρτήσει του φορτίου



Εικόνα 4.25: Ροπή τριβών τσιμούχας συναρτήσει των στροφών

Η ροπή αντίστασης στη φραγή δίνεται από την εμπειρική σχέση:

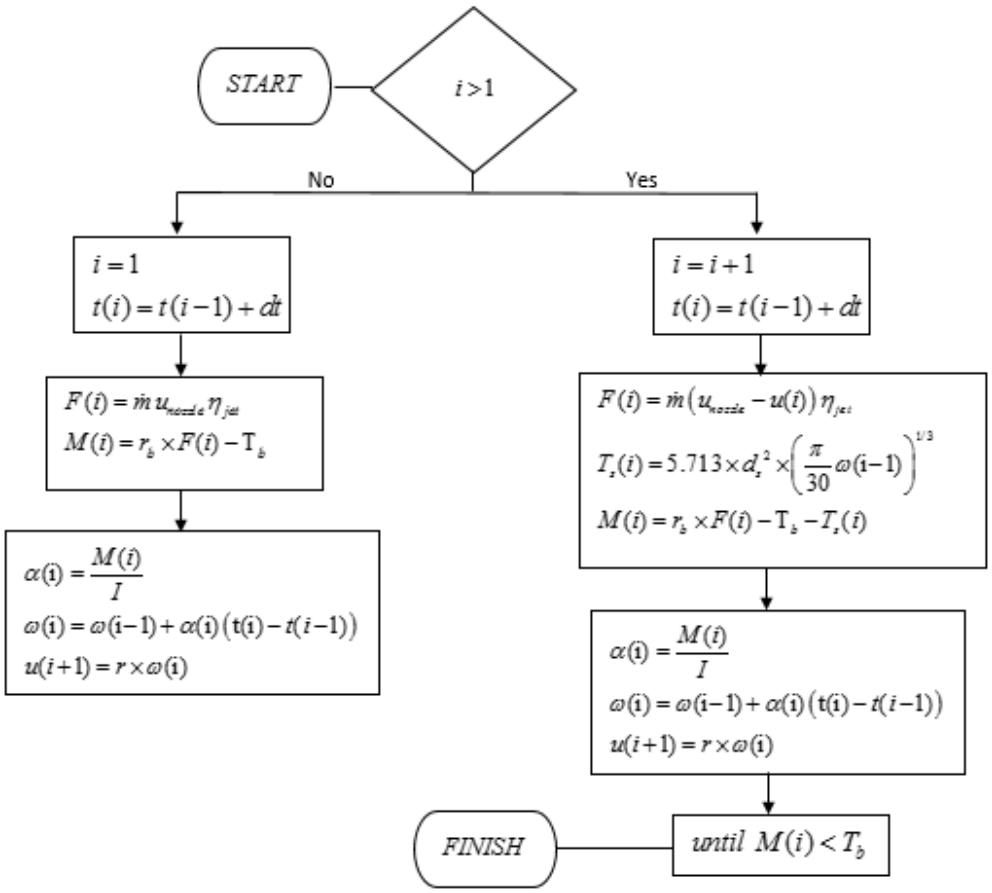
$$T_s = 5.713 \times d_s^{\,2} \times n^{1/3} \quad [N \cdot m] \tag{4.10}$$

Όπου,

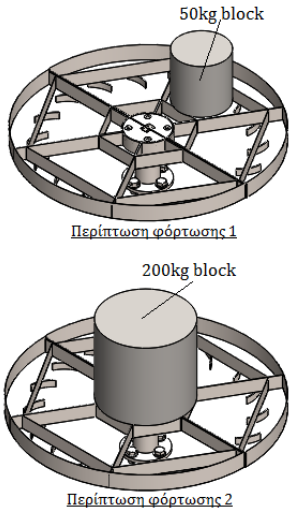
$d_s = 0.080m$ η εσωτερική διάμετρος της φραγής

n: ταχύτητα περιστροφής σε $[rpm]$

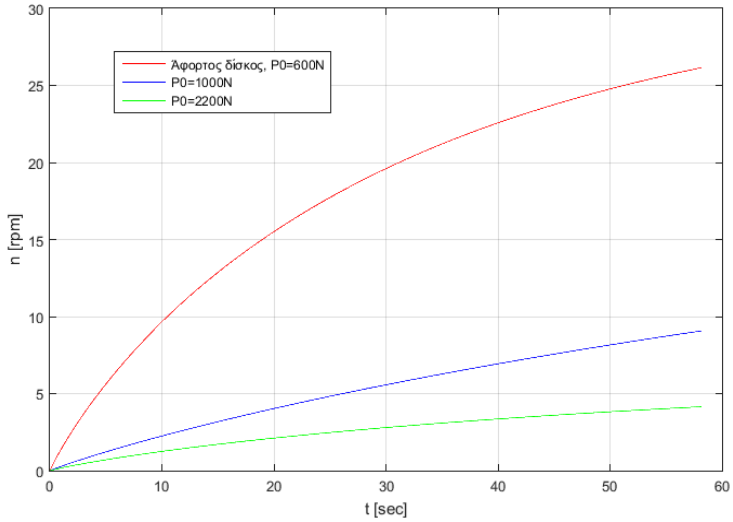
Η ταχύτητα περιστροφής του δίσκου υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω αλγόριθμος όπου u_{nozzle} η ταχύτητα εξόδου από το ακροφύσιο, η_{jet} βαθμός απόδοσης πτερυγίου, r_b η ακτίνα που είναι τοποθετημένα τα πτερύγια στον περιστρεφόμενο δίσκο και I η ροπή αδράνειας (φορτίου και μηχανισμού) ως προς άξονα περιστροφής.



Εικόνα 4.26: Αλγόριθμος υπολογισμού ταχύτητας περιστροφής δίσκου



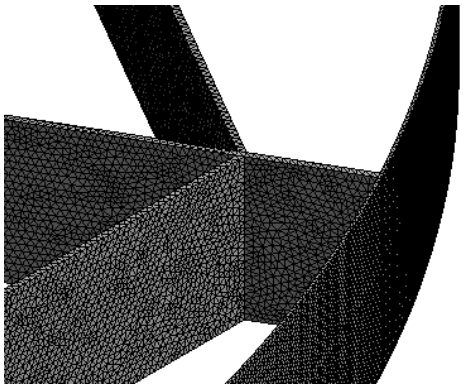
Εικόνα 4.27: Ενδεικτικές περιπτώσεις φόρτωσης, $I_{\chi\omega\rho\acute{\iota}\varsigma\ \varphi o\rho\tau\acute{\iota}o} = 0.77\ kgm^2, I_2 = 3.77\ kgm^2, I_3 = 3.40\ kgm^2$



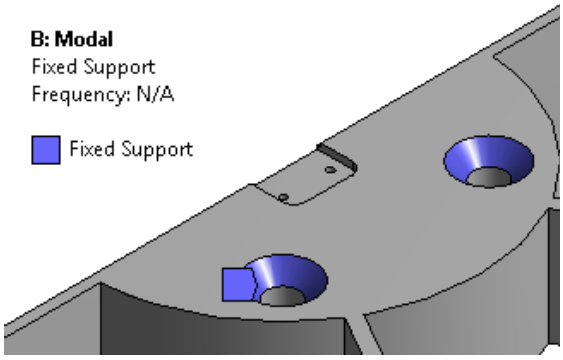
Εικόνα 4.28: Ταχύτητες περιστροφής δίσκου για ενδεικτικές περιπτώσεις φόρτισης, $dt = 0.01sec, u_{jet} = 6.7\frac{m}{sec},\ r = 0.0335m,\ \dot{m} = 0.07543\frac{kg}{sec}$

4.2.8 Ιδιοσυχνότητες περιστρεφόμενου δίσκου

Αφού ο δίσκος περιστρέφεται γίνεται έλεγχος αν οι ιδιοσυχνότητες είναι κοντά στις ταχύτητες περιστροφής του δίσκου.



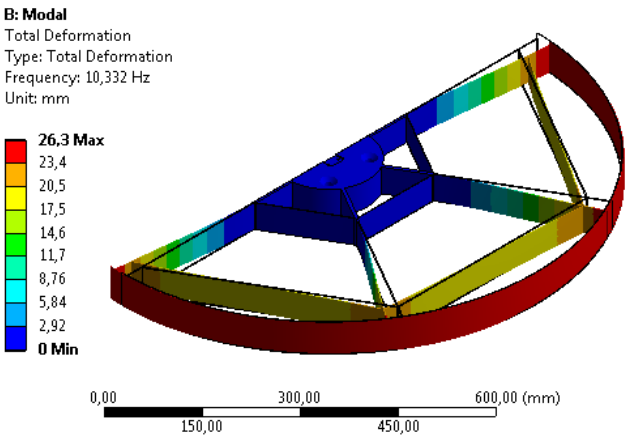
Εικόνα 4.29: Πλέγμα 2mm, 1313736 κόμβων, 761814 στοιχείων



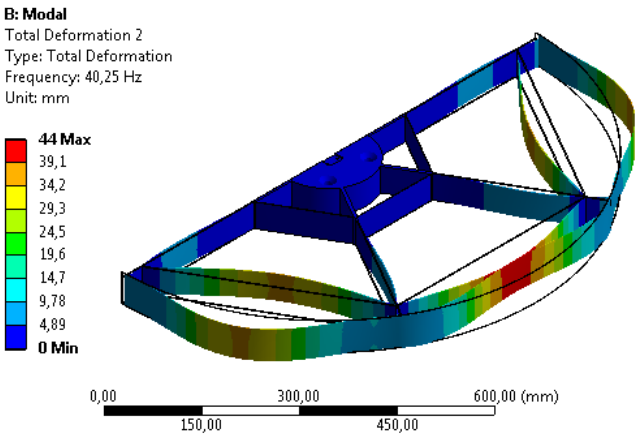
Εικόνα 4.30: Οριακές συνθήκες

	f [Hz]	ω [rad/sec]	n [rpm]
1	10,3	64,72	618
2	40,3	253,21	2418
3	44,9	282,12	2694
4	52,5	329,87	3150
5	56	351,86	3360
6	61,7	387,67	3702

Πίνακας 4.4: Ιδιοσυχνότητες περιστρεφόμενου δίσκου



Εικόνα 4.31: Συντονισμός στη 1^{η} ιδιοσυχνότητα

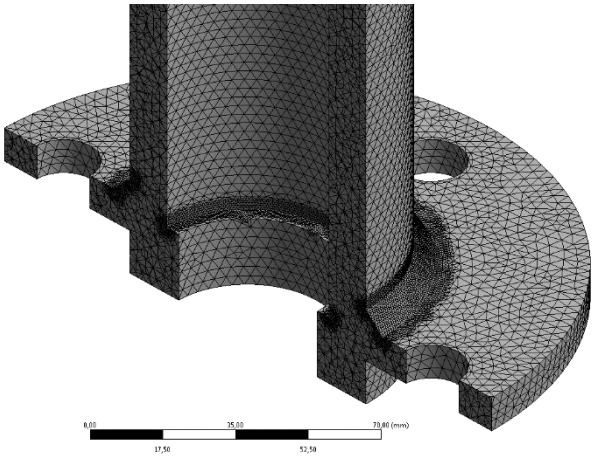


Εικόνα 32: Συντονισμός στη 2^{η} ιδιοσυχνότητα

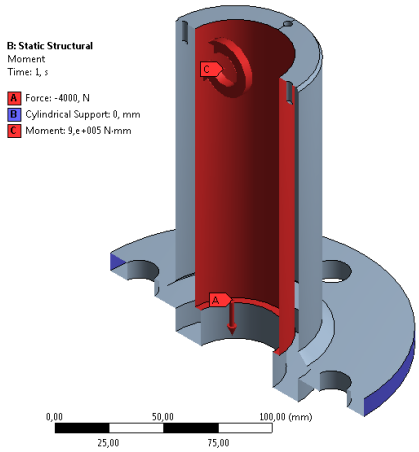
Δεδομένου του εύρους των ταχυτήτων περιστροφής ($< 30\ rpm$) δεν εγκυμονείτε ο κίνδυνος συντονισμού του δίσκου.

4.2.9 Έλεγχος αντοχής πλήμνης

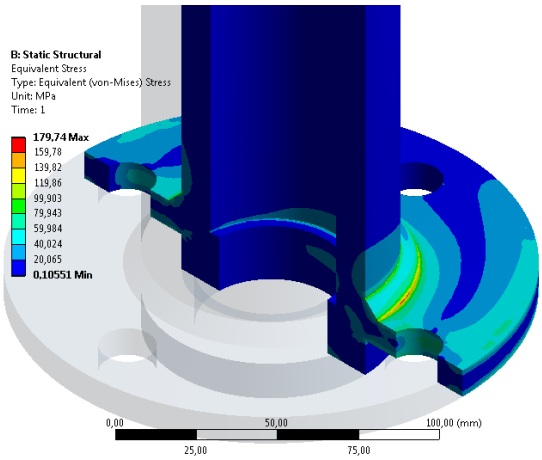
Η πλήμνη διαστασιολογείται έτσι ώστε να εδράζονται οι εξωτερικοί δακτύλιοι των εδράνων, ενώ στο κάτω μέρος της συγκολλάται φλάντζα για την σύνδεσή της με την κατασκευή. Οπότε κατά το σχεδιασμό προδιαγραφή η αντοχή της στην παραλαβή του μέγιστου φορτίου.



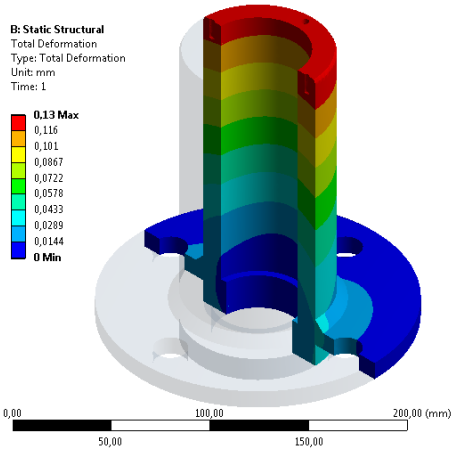
Εικόνα 4.33: Πλέγμα 497251 κόμβων , 344400 στοιχείων (basic element size 3mm)



Εικόνα 4.34: Οριακές συνθήκες



Εικόνα 4.35: Κατανομή τάσεων (Von Mises), σ_{eq}=180 MPa<207 (Yield Strength Stainless Steel)

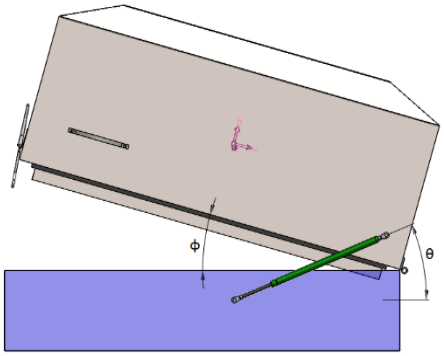


Εικόνα 4.36: Συνολική παραμόρφωση πλήμνης

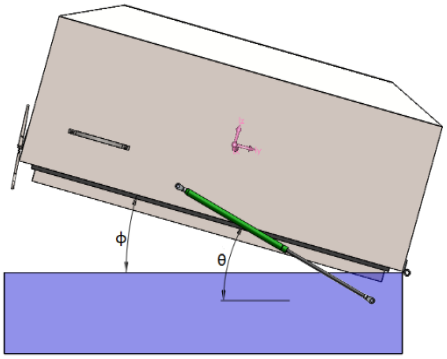
4.3 Καπάκι πλυντηρίου

4.3.1 Υπολογισμός-τοποθέτηση αμορτισέρ αερίου

Για εύκολο άνοιγμα του καπακιού λόγω της μεγάλη μάζας και δεδομένης της αρθρωτής του σύνδεσης, το άνοιγμα θα πραγματοποιείται υποβοηθούμενο από δύο αμορτισέρ αερίου. Αμφότερα τα άκρα του κάθε αμορτισέρ, θα είναι συνδεμένα σε σταθερά σημεία επί πλυντηρίου και καπακιού αντίστοιχα. Για την επίτευξη τροχιάς κυκλικού τόξου κατά το άνοιγμα, αναγκαία τίθεται η περιστροφή όλων των άκρων γύρω από άξονα προβαλλόμενο της επιφάνειας που ορίζει το σταθερό σημείο στήριξης. Οπότε για να επιτευχθεί ομαλά η διαδικασία του ανοιγοκλεισίματος και της στεγάνωσης ταυτόχρονα, είναι αναγκαίο στην κλειστή θέση το καπάκι να συμπιέζει με ένα μικρό μέρος του ιδίου βάρους του, το αφρώδες υλικό της στεγάνωσης και παράλληλα να ανοιγοκλείνει χωρίς την ανάγκη άσκησης μεγάλης σωματικής δύναμης.



Εικόνα 4.37: Περίπτωση 1 τοποθέτησης αμορτισέρ



Εικόνα 4.38: Περίπτωση 2 τοποθέτησης αμορτισέρ

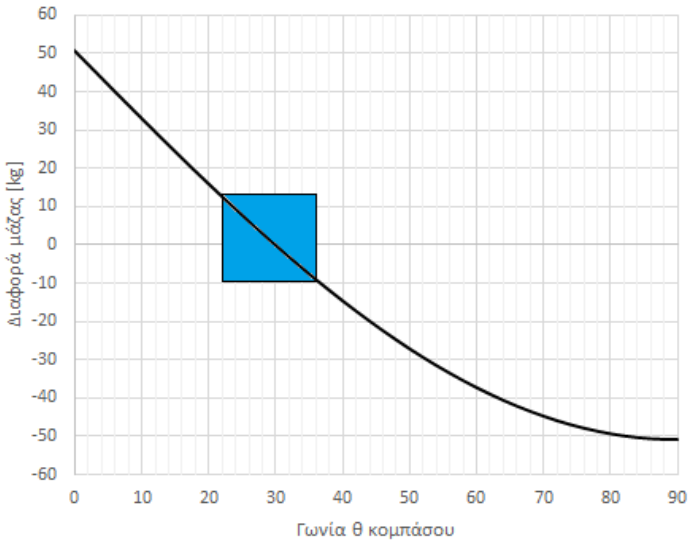
Η συνολική μάζα του καπακιού ανέρχεται στα $50kg$ (25kg για κάθε αμορτισέρ) για αυτό επιλέγεται το αμέσως επόμενο τυποποιημένο αμορτισέρ με δύναμη $500N$ (στην κατακόρυφη θέση, $\theta = 90^o$) και συνολικό μήκος στην πλήρως ανοιγμένη θέση $600mm$. Επίσης, Για να είναι υποφερτό το άνοιγμα και το κλείσιμο ορίζεται η μέγιστη ανθρώπινη ασκούμενη δύναμη να μην υπερβαίνει τα 15kg.

Χαρακτηριστικά μεγέθη προσδιορισμού θέσης τοποθέτησης αμορτισέρ:

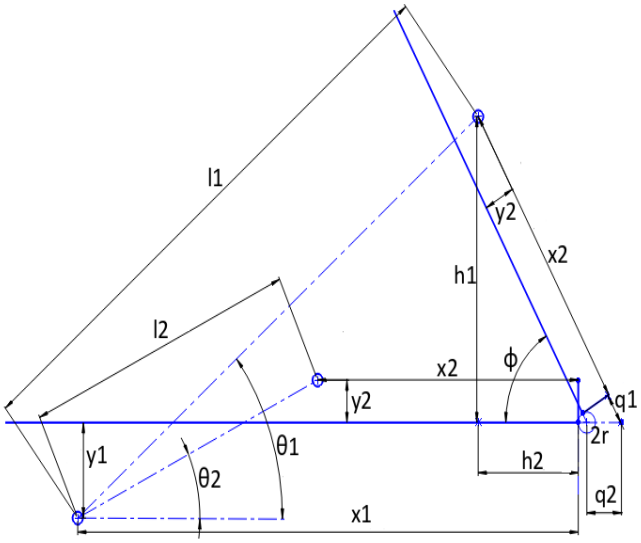
- $F_{gsy} = F_{gs} \cdot \sin\theta$: Κάθετη δύναμη αμορτισέρ
- $l_1 = 600mm,\ l_2 : 350\,\mathrm{mm}$: Απόσταση κέντρων στήριξης (αμορτισέρ πλήρως εκταμένο και κλειστό αντίστοιχα)

$\theta_1 = 36^o,\ \theta_2 = 22^o$: Γωνία αμορτισέρ με το οριζόντιο επίπεδο (πλήρως ανοιγμένο και κλειστό αντίστοιχα) ώστε να επιτυγχάνονται οι προβλεπόμενες δυνάμεις στο άνοιγμα και το κλείσιμο.

- $r = 16mm$: Επιβατική ακτίνα μεντεσέ
- φ: Μέγιστη δυνατή γωνία ανοίγματος καπακιού ώστε να επιτρέπεται όσο το δυνατόν καλύτερη η πρόσβαση από πάνω του περιστρεφόμενου δίσκου



Εικόνα 4.39: Διαφορά μάζας συναρτήσει γωνίας αμορτισέρ με ''+'' υπερισχύει η μάζα του καπακιού (μπλε χρώμα η περιοχή επιθυμητής λειτουργίας)



Εικόνα 4.40: Μεταβλητές για τον προσδιορισμό τοποθέτησης αμορτισέρ

Γεωμετρικές σχέσεις:

- $$\sin\theta_2 = \frac{y_1 + y_2}{l_2} \Rightarrow y_1 + y_2 - l_2 \sin\theta_2 = 0 \tag{4.11}$$
- $$\cos\theta_2 = \frac{x_1 - x_2}{l_2} \Rightarrow x_1 - x_2 = l_2 \cos\theta_2 \tag{4.12}$$

$$\tan\varphi = \frac{y_2}{q_1 + r} \Rightarrow q_1 = r + \frac{y_2}{\tan\varphi} \text{ οπότε } \sin\varphi = \frac{h_1}{q_1 + x_2} \Rightarrow h_1 = (x_2 + \mathrm{r})\sin\varphi + y_2\cos\varphi$$

- $$\sin\theta_1 = \frac{h_1 + y_1}{l_1} \Rightarrow x_2\sin\varphi + y_2\cos\varphi + y_1 - l_1\sin\theta_1 + r\sin\varphi = 0 \tag{4.13}$$

$$q_2 = \frac{y_2}{\sin\varphi} \text{ οπότε } \cos\varphi = \frac{h_2 + r + q_2}{x_2 + q_1} \Rightarrow h_2 = x_2\cos\varphi + r(\cos\varphi - 1) + \frac{\cos^2\varphi - 1}{\sin\varphi}y_2$$

- $$\cos\theta_1 = \frac{x_1 - h_2}{l_1} \Rightarrow x_1 + x_2\cos\varphi - \frac{\cos^2\varphi - 1}{\sin\varphi}y_2 - r(\cos\varphi - 1) - l_1\cos\theta_1 = 0 \tag{4.14}$$

Επιλύοντας το σύστημα των σχέσεων (4.11),(4.12),(4.13),(4.14) προκύπτουν οι αναλυτικές εκφράσεις για τα μεγέθη x_1, x_2, y_1, y_2:

$$y_2 = \frac{l_1\sin(\varphi + \theta_1) - l_2\sin(\varphi + \theta_2) - l_1\sin\theta_1 + l_2\sin\theta_2}{2(1 - \cos\varphi)} \tag{4.15}$$

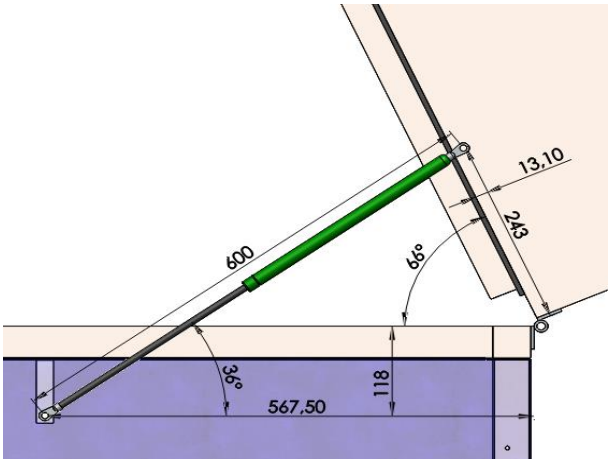
$$y_1 = l_2\sin\theta_2 - \frac{l_1\sin(\varphi + \theta_1) - l_2\sin(\varphi + \theta_2) - l_1\sin\theta_1 + l_2\sin\theta_2}{2(1 - \cos\varphi)} \tag{4.16}$$

$$x_2 = \frac{l_2\sin(\varphi + \theta_2) - l_1\sin(\varphi + \theta_1) + 2r\sin\varphi - l_1\sin\theta_1 + l_2\sin\theta_2}{-2\sin\varphi} \tag{4.17}$$

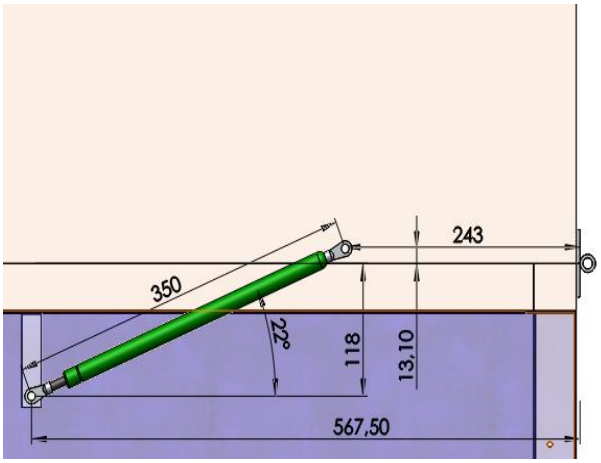
$$x_1 = l_2\cos\theta_2 + \frac{l_2\sin(\varphi + \theta_2) - l_1\sin(\varphi + \theta_1) + 2r\sin\varphi - l_1\sin\theta_1 + l_2\sin\theta_2}{-2\sin\varphi} \tag{4.18}$$

Για $\theta_1 = 40^o, \theta_2 = 22^o$ αυξάνοντας κατά μια μοίρα τη γωνία φ ωσότου οι λύσεις να είναι κατασκευαστικά αποδεκτές $(x_1, x_2, y_1, y_2 > 10mm)$ προκύπτει η $\varphi_{\max} = 66^o$.

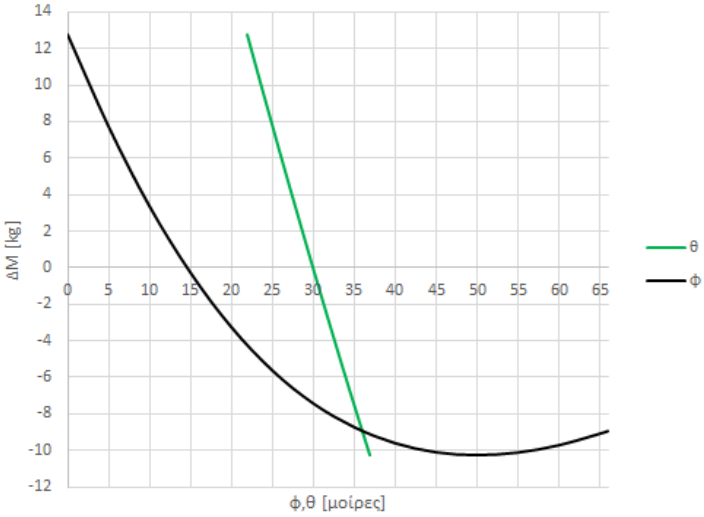
Για $\varphi_{\max} = 66^o$ είναι $x_1 = 567.5mm,\ x_2 = 243mm,\ y_1 = 118mm,\ y_2 = 13.1mm$



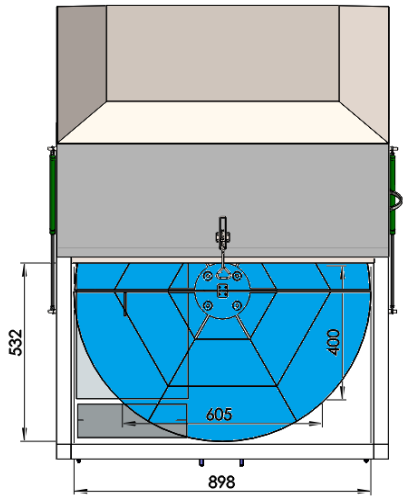
Εικόνα 4.41: Αμορτισέρ με το καπάκι στην πλήρη ανοικτή θέση



Εικόνα 4.42: Αμορτισέρ με το καπάκι κλειστό



Εικόνα 4.43: Διαφορά μάζας συναρτήσει γωνίας αμορτισέρ κατά το ανοιγοκλείσιμο του καπακιού (με "+" υπερισχύει η μάζα του καπακιού)

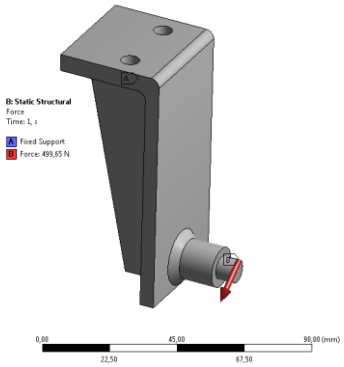


Εικόνα 4.44: Τμήμα στρεφόμενου δίσκου για τοποθέτηση αντικειμένων με τη χρήση γερανού ($\varphi_{max} = 66^o$)

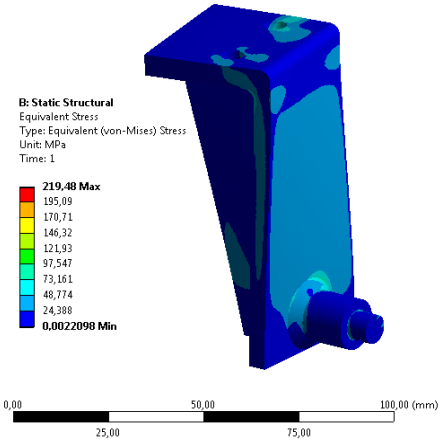
4.3.2 Στήριξη αμορτισέρ αερίου

Η στήριξη των αμορτισέρ στο σκελετό του πλυντηρίου γίνεται με τη χρήση κυλινδρικού άξονα συγκολλημένου πάνω σε χαλύβδινη προέκταση με σκοπό την ελάχιστη παραμόρφωσή τους ώστε οι αρθρώσεις να μην μετακινούνται κατά μήκος των αξόνων περιστροφής τους. Αντίστοιχα η σύνδεση στο καπάκι γίνεται μόνο με τον κυλινδρικό άξονα συγκολλημένο στην επιθυμητή θέση.

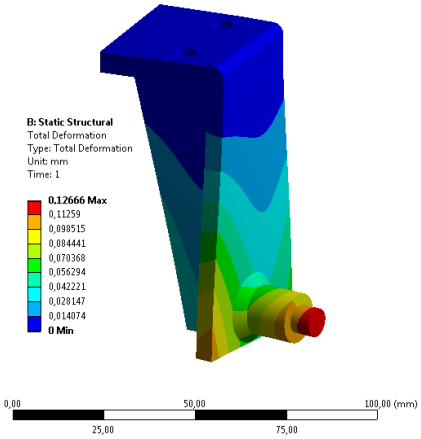
Εικόνα 4.45: Πλέγμα 431066 κόμβων , 297267 στοιχείων (basic element size 1mm)



Εικόνα 4.46: Οριακές συνθήκες



Εικόνα 4.47: Κατανομή τάσεων (Von-Mises), σ_{eq}<250 MPa (Yield strength structural steel)



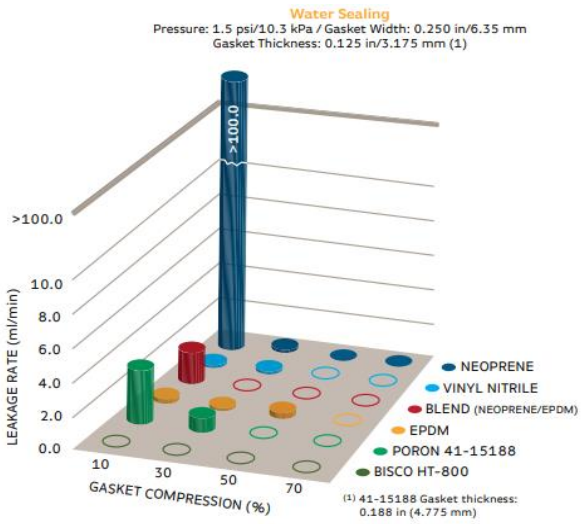
Εικόνα 4.48: Συνολική παραμόρφωση στηρίγματος

4.3.3 Στεγάνωση καπακιού

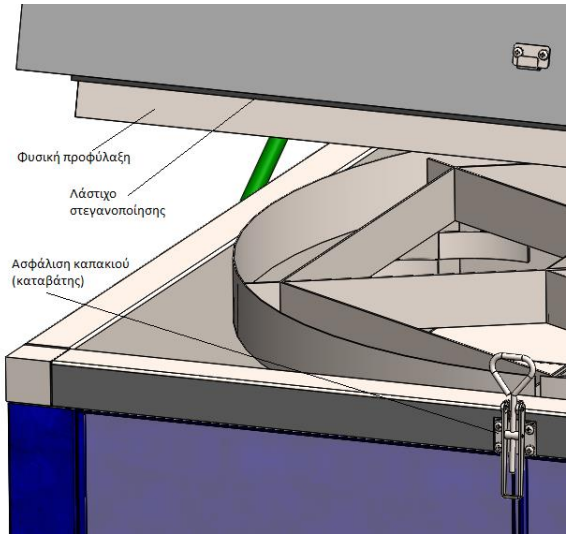
Το καπάκι στη κλειστή θέση στεγανώνεται με φυσική προφύλαξη και με τη χρήση στεγάνωσης. Για την επιτυχία της στεγάνωσης χωρίς μεγάλη επιπλέον σύσφιξη του καπακιού πρέπει να επιλεγεί υλικό που να συμπιέζεται σε αποτελεσματικό ποσοστό με τη δύναμη των 12kg (αφρώδες υλικό) και ταυτόχρονα να είναι ανθεκτικό στο αλκαλικό περιβάλλον του εργαζόμενου μέσου. Μια τέτοια κατηγορία υλικών είναι οι πορώδεις σιλικόνες ($cellular\ silicones$) με μικρή αναγκαία δύναμη για τη συμπίεση τους, όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

% Compressed	FORCE (kPa)					
	BF-2000	BF-1000	HT-870	HT-800	HT-820	HT-840
10	1.6	8.3	19.3	24.8	42.8	72.4
25	2.3	17.2	30.3	57.2	115.2	150.3
40	5.6	24.8	42.8	94.4	208.3	260.0
55	15.8	42.7	70.3	171.6	389.7	713.6
70	43.4	108.3	172.4	419.6	1037.9	---

Εικόνα 4.49: Πίεση επιφανείας και συμπίεση στεγανωτικού (πορώδεις σιλικόνες)



Εικόνα 4.50: Απώλειες νερού συναρτήσει συμπίεσης ελαστομερούς για διάφορα υλικά



Εικόνα 4.51: : Διαμόρφωση καπακιού για τη στεγάνωση του

Επομένως για τη δημιουργία πίεσης επιφανείας $0.1\,bar$ με ελάχιστο πλάτος ελαστικού $5mm$ (εμβαδού $A_s = 18420\,mm^2$) απαιτείται η δύναμη των $\sim 185\,N$ από τα οποία μόνο $60\,N$ χρειάζεται να προστεθούν κατά την ασφάλιση του καπακιού από το άγκιστρο ασφάλισης ($toggle\ latche$).

Κεφάλαιο 5
Συμπεράσματα-Προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τη μελέτη που έγινε και δεδομένου ότι τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλυντηρίου της παρούσας διπλωματικής εργασίας, βρίσκονται κοντά, εντός λογικών ορίων, με τα χαρακτηριστικά των πλυντηρίων της παγκόσμιας αγοράς, προκύπτει το συμπέρασμα ότι δύναται να λειτουργήσει αποτελεσματικά στην πράξη. Επιπλέον, από τα κατασκευαστικά σχέδια (Παράρτημα Β) φαίνεται ότι όλα σχεδόν τα μέρη που απαρτίζουν την κατασκευή υπάρχουν τυποποιημένα στην αγορά. Επιπλέον, οι απαιτούμενες κατεργασίες δεν έχουν υψηλές απαιτήσεις σε ανοχές και μπορούν να υλοποιηθούν με κοινές εργαλειομηχανές (τόρνος, στράντζα) άρα δεν απαιτείται ή χρήση εργαλειομηχανής CNC. Επίσης, δεν απαιτούνται σύνθετες κατεργασίες (βαθεία κοίλανση, ηλεκτροδιάβρωση κτλ.). Επομένως, εξάγεται το συμπέρασμα της οικονομικής κατασκευής του πλυντηρίου.

5.2 Προτάσεις για βελτίωση της κατασκευής

Μια λύση για να εξασφαλισθεί ότι κάθε σημείο των υπό πλύση εξαρτημάτων θα έρθει σε επαφή με το καθαριστικό υγρό είναι εκτός από την περιστροφή του δίσκου να στρέφεται ασύγχρονα και το σύστημα ψεκασμού, έτσι ώστε σε κάθε κύκλο οι δέσμες του ψεκαζόμενου υγρού να πετυχαίνουν τα εξαρτήματα σε διαφορετικό σημείο κάθε φορά. Με το σύστημα αυτό θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ακροφύσια με μηδενική γωνία δέσμης (μέγιστη συγκέντρωση ισχύος) με αποτέλεσμα να γίνεται μεγαλύτερη εκμετάλλευση της υδραυλικής ισχύος στην εξάρθρωση των ρύπων και άρα να εξοικονομείται απορρυπαντικό. Επομένως, πρόταση για βελτίωση αποτελεί ο σχεδιασμός του μηχανισμού που θα στρέφει σε συγκεκριμένο εύρος γωνιών το σύστημα ψεκασμού.

Επίσης, μια άλλη πρόταση είναι να αντικατασταθεί η φυγοκεντρική αντλία με αντλία θετικής μετατόπισης και να σχεδιαστεί σύστημα ψεκασμού με λίγα ακροφύσια (διάμετρος στομίου μικρότερη του 1mm). Έτσι, το εργαζόμενο μέσο θα ψεκάζεται με μικρή παροχή αλλά με μεγάλη πίεση (>15bar) με τον καθαρισμό να γίνεται μόνο από τη δύναμη της δέσμης του υγρού. Άρα σε αυτήν την περίπτωση δεν απαιτείται θέρμανση του νερού (θερμαίνεται με την αύξηση της πίεσης) και ανακύκλωση του εργαζόμενου μέσου (μικρή παροχή λειτουργίας) και άρα δεν απαιτείται ειδική σχεδίαση της δεξαμενής. Επομένως, πρόταση αποτελεί η μελέτη του ενδεχομένου να αντικατασταθεί η φυγοκεντρική αντλία από αντλία θετικής μετατόπισης και να σχεδιασθεί το αντίστοιχο σύστημα ψεκασμού.

Παράρτημα Α: Ιδιότητες Νερού για 0 − 100°C

- *Πυκνότητα συναρτήσει θερμοκρασίας*:

$$\rho(\mathrm{T}) = 1000(1 - \frac{T + 288.9414}{508929.2(T + 68.12963)}(T - 3.9863)^2)\ [\frac{kg}{m^3}],\quad T[^oC]$$

- *Δυναμικό ιξώδεις συναρτήσει θερμοκρασίας*:

Εξίσωση Vogel: $\mu(\mathrm{T}) = e^{A + \frac{B}{\Gamma + T}}\ [mPa \cdot \sec]\ ή\ [cP],\ T[K]$

Όπου, $A = -3.7188, B = 578.919, \Gamma = -137.546$

- *Κινηματικό ιξώδεις συναρτήσει θερμοκρασίας*:

$$\nu(T) = \mu(\mathrm{T}) \cdot \rho(\mathrm{T})\ [\frac{m^2}{\sec}]\ ή\ [10^{-6} cSt]$$

- *Πίεση κορεσμού νερού ατμού (πίεση ατμοποίησης ή πίεση ατμών),* $p_{ws}(T)$*, συναρτήσει θερμοκρασίας*:

$$\ln(\frac{p_{ws}}{p_c}) = \frac{T_c}{T}(C_1\theta + C_2\theta^{1.5} + C_3\theta^3 + C_4\theta^{3.5} + C_5\theta^4 + C_6\theta^{7.5})$$

  - $\theta = 1 - \frac{\mathrm{T}}{\mathrm{T}_c}$
  - $T[K]$: Θερμοκρασία νερού
  - $T_c = 647.096\ [K]\ \ (273.95\ ^oC)$: Κρίσιμη θερμοκρασία (θερμοκρασία πάνω από την οποία μια αέρια ουσία δεν υγροποιείται ανεξαρτήτως της πίεση που θα του ασκηθεί)
  - $p_c = 22.064\ [\mathrm{MPa}]$: Κρίσιμη πίεση (πίεση στην οποία το αέριο σε T_c οριακά υγροποιείται)
  - $C_i[-]$: Συντελεστές

    $C_1 = -7.85951793,\ C_2 = 1.84408259,\ C_3 = -11.7866497$

    $C_4 = 22.6807411,\ C_5 = -15.9618719,\ C_6 = 1.80122502$

- *Σχετική υγρασία (Relative Humidity):*

$$RH = \frac{p_w}{p_{ws}} 100\%\ [-]$$

- *Θερμοχωρητικότητα νερού συναρτήσει θερμοκρασίας* :

$$C_P(T) = H_4T^4 + H_3T^3 + H_2T^2 + H_1T + \mathrm{H}_0\ [\frac{J}{mole \cdot K}],\quad T[K]$$

Όπου, $H_0 = 4.217,\ \mathrm{H}_1 = -0.002997,\ H_2 = 7.747 \times 10^{-5},\ H_3 = -8.029 \times 10^{-7},\ H_4 = 3.289 \times 10^{-9}$

- *Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης συναρτήσει θερμοκρασίας*:

$$h_{ws}(\mathrm{T}) = c_1\mathrm{T} + c_0$$

Όπου, $c_0 = 2503\ \kappa\alpha\iota\ c_1 = -2.434$

- *Θερμική αγωγιμότητα συναρτήσει θερμοκρασίας*:

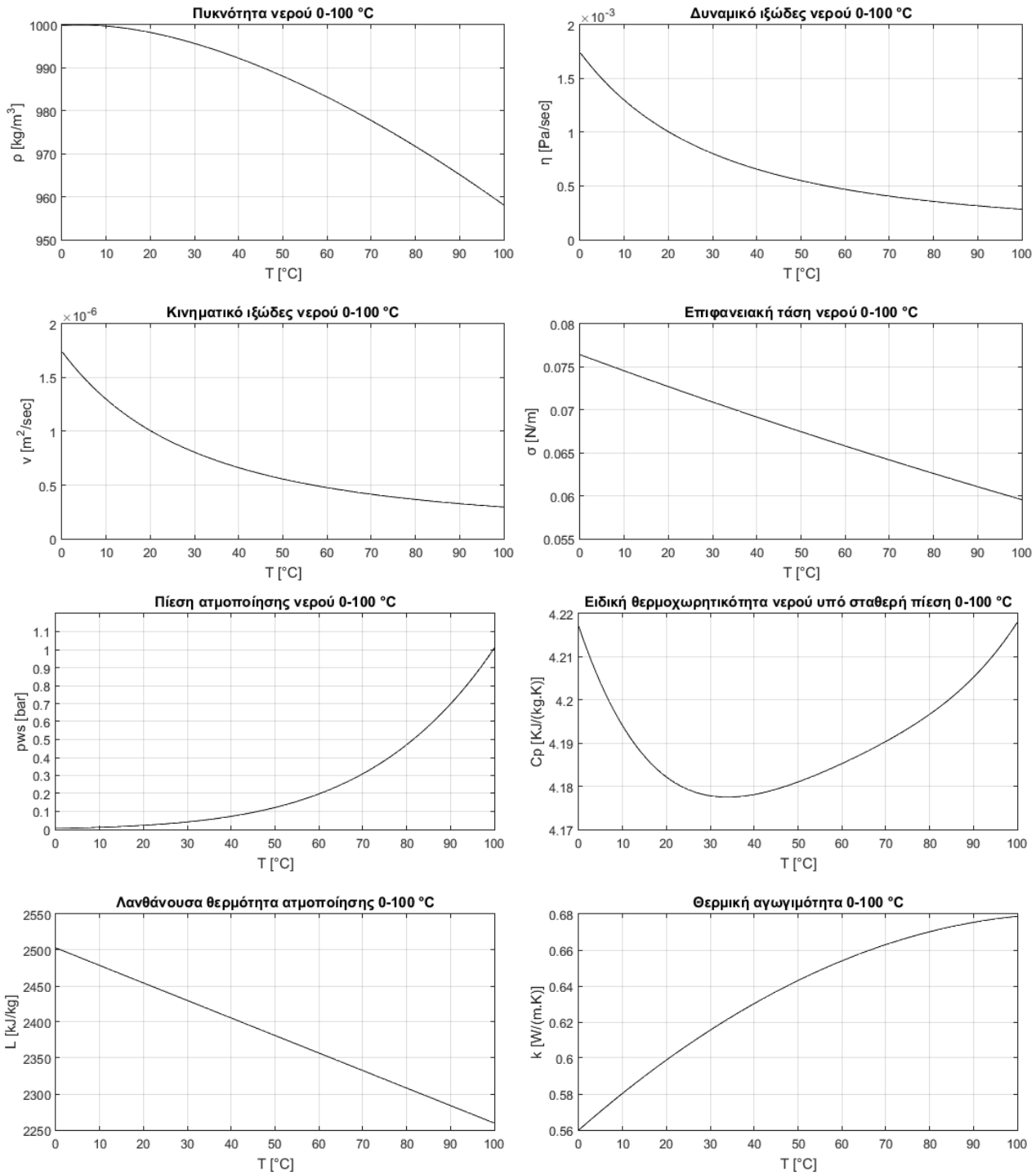
$$k(T) = k_2 T^2 + k_1 T + k_0\ [\frac{W}{m \cdot K}]$$

Όπου, $k_0 = 0.56,\ k_1 = 0.002136,\ k_2 = -9.484 \times 10^{-6}$

- *Αριθμός Prandtl συναρτήσει θερμοκρασίας*:

$$\Pr(T) = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu / \rho}{k / (C_p\ \rho)} = \frac{C_P \mu}{k} = p_4 T^4 + p_3 T^3 + p_2 T^2 + p_1 T + p_0 \quad [-],\ \ T[^o C]$$

Όπου, $p_0 = 13.61,\ \ p_1 = -0.4835,\ \ p_2 = 0.009304,\ \ p_3 = -8.919 \times 10^{-5},\ \ p_4 = 3.269 \times 10^{-7}$



Εικόνα A1: Ιδιότητες νερού συναρτήσει θερμοκρασίας

Βιβλιογραφία

Κεφάλαιο 1

[1] Durkee, J. B. (2002). Aqueous cleaning machines—Part II. *Metal finishing*, *100*(5), 54-59.

[2] Durkee, J. B. (2005). What's in your cleaning tank?. *Metal Finishing*, *103*(2), 46-48.

[3] Durkee, J. B. (2006). *Management of industrial cleaning technology and processes*. Elsevier.

[4] Durkee, J. B. (2007). To know cleaning you have to know soil—Especially particles. *Metal Finishing*, *105*(2), 54-57.

[5] Durkee, J. B. (2008). The second cleaning process: The oil skimmer—part II. *Metal Finishing*, *106*(7-8), 69-71.

[6] Durkee, J. B. (2011). Cleaning times: Go ahead, ti one on!. *Metal finishing*, *109*(1-2), 34-38.

[7] Abbott, S. (2015). Surfactant science: principles and practice. *Creative commons BY-ND, freely available at http://www. steve nabbott. co. uk/practical-surfactants/the-book. php*.

[8] Source Wikipedia. (2018). *Parts washers, Parts cleaning, Micelle, Surface tension, Surfactant, Emulsion, Detergent*

[9] Kanegsberg, B., & Kanegsberg, E. (2000). *Handbook for critical cleaning. Aqueous cleaning essentials.* CRC press.

[10] McLaughlin, M. C., & Zisman, A. S. (1998). *The Aqueous Cleaning Handbook: A Guide to Critical-cleaning Procedures, Techniques, and Validation*. AL Technical Communications.

[11] Zoller, U. (Ed.). (2008). *Handbook of detergents, part E: applications* (Vol. 141). CRC Press.

[12] Quitmeyer, J. (2008). Inhibiting metal corrosion: Identifying common causes of metal degradation is the key to developing and employing preventive measures. *Metal Finishing*, *106*(3), 33-39.

[13] Eastoe, J., & Dalton, J. S. (2000). Dynamic surface tension and adsorption mechanisms of surfactants at the air–water interface. *Advances in colloid and interface science*, *85*(2-3), 103-144.

[14] Noik, C., Baviere, M., & Defives, D. (1987). Anionic surfactant precipitation in hard water. *Journal of colloid and interface science*, *115*(1), 36-45.

[15] Glycol, I. P. P., & Oil, V. T. R. I-Antifoaming Agents.

[16] Miller, C. A. (2008). Antifoaming in aqueous foams. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, *13*(3), 177-182.

Κεφάλαιο 2

[17] Karimi, M., Akdogan, G., Dellimore, K. H., & Bradshaw, S. M. (2012, December). Comparison of different drag coefficient correlations in the CFD modelling of a laboratory-scale Rushton-turbine flotation tank. In *Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia* (pp. 10-12).

[18] Shields, A. (1936). Application of similarity mechanics and turbulence research on shear flow. *Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau (in German)*, (26).

[19] Hendricks, D. (2016). *Fundamentals of water treatment unit processes: physical, chemical, and biological*. Crc Press.

[20] De, A. (2017). *Sedimentation Process and Design of Settling Systems*. Springer India.

[21] He, C., Scott, E., & Rochfort, Q. (2015). Enhancing sedimentation by improving flow conditions using parallel retrofit baffles. *Journal of environmental management*, *160*, 1-6.

[22] Zhou, S., & McCorquodale, J. A. (1992). Modeling of rectangular settling tanks. *Journal of hydraulic engineering*, *118*(10), 1391-1405.

[23] Shahrokhi, M., Rostami, F., & Said, M. A. M. (2013). Numerical modeling of baffle location effects on the flow pattern of primary sedimentation tanks. *Applied Mathematical Modelling*, *37*(6), 4486-4496.

[24] Rostami, F., Shahrokhi, M., Said, M. A. M., & Abdullah, R. (2011). Numerical modeling on inlet aperture effects on flow pattern in primary settling tanks. *Applied Mathematical Modelling*, *35*(6), 3012-3020.

[25] Zhang, D. (2014). *Optimize sedimentation tank and lab flocculation unit by CFD* (Master's thesis, Norwegian University of Life Sciences).

[26] Weerasooriya, A. (2015). *Simulation of flow in sedimentation tank using FLUENT* (Master's thesis, Høgskolen i Telemark).

[27] Wisniewski, E. (2013). Sedimentation tank design for rural communities in the hilly regions of Nepal. *Journal of Humanitarian Engineering*, *2*(1).

[28] Tarpagkou, R., & Pantokratoras, A. (2014). The influence of lamellar settler in sedimentation tanks for potable water treatment—a computational fluid dynamic study. *Powder Technology*, *268*, 139-149.

[29] Yao, K. M. (1970). Theoretical study of high-rate sedimentation. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 218-228.

[30] Swamee, P. K., & Tyagi, A. (1996). Design of class-I sedimentation tanks. *Journal of Environmental Engineering*, *122*(1), 71-73.

[31] López, P. R., Lavín, A. G., Lopez, M. M. M., & de las Heras, J. L. B. (2008). Flow models for rectangular sedimentation tanks. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *47*(9-10), 1705-1716.

[32] Fantucci, S., Lorenzati, A., Kazas, G., Levchenko, D., & Serale, G. (2015). Thermal energy storage with super insulating materials: a parametrical analysis. *Energy Procedia*, *78*, 441-446.

Κεφάλαιο 3

[33] Kamil, B. K., AbdulRazzaq, A., & Hassan, J. M. (2008). Flow distribution in manifolds. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, *12*(4), 159-176.

[34] Wang, D., & Fan, L. S. (2013). Particle characterization and behavior relevant to fluidized bed combustion and gasification systems. In *Fluidized bed technologies for near-zero emission combustion and gasification* (pp. 42-76).

[35] Bajura, R. A., & Jones, E. H. (1976). Flow distribution manifolds. *Journal of Fluids engineering*, *98*(4), 654-665.

[36] Wang, J. (2008). Pressure drop and flow distribution in parallel-channel configurations of fuel cells: U-type arrangement. *International Journal of Hydrogen Energy*, *33*(21), 6339-6350.

[37] Wang, J. (2011). Theory of flow distribution in manifolds. *Chemical engineering journal*, *168*(3), 1331-1345.

[38] Wang, J., & Wang, H. (2015). Discrete method for design of flow distribution in manifolds. *Applied Thermal Engineering*, *89*, 927-945.

[39] Tomor, A., & Kristóf, G. (2016). Validation of a Discrete Model for Flow Distribution in Dividing-Flow Manifolds: Numerical and Experimental Studies. *Periodica Polytechnica. Engineering. Mechanical Engineering*, *60*(1), 41.

[40] Stahl, W. M. (2006). Choosing the right elastomer for the right application. *World Pumps*, *2006*(481), 30-33.

[41] Pruett, K. M. (1994). *Chemical resistance guide for elastomers II: a guide to chemical resistance of rubber and elastomeric compounds*. Compass Publications.

[42] Papantonis, D. E. (2010). *Hydrodynamic Engines-Pumps-Hydro turbines*. Symeon, Athens.

[43] Papantonis, D. E. (2015). *Hydrodynamic Installations*. Symeon, Athens.

[44] Hountalas, D. T. (1993). *Transport Phenomena,* NTUA, Athens.