



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Χημικών Μηχανικών
Τομέας Ανάλυσης, Σχεδιασμού και
Ανάπτυξης Διεργασιών και
Συστημάτων



Διπλωματική Εργασία

Μελέτη Παρεμβάσεων στην
Αειφορία και τη Βιωσιμότητα
Γαλακτοβιομηχανίας μέσω Ανάλυσης
Κύκλου Ζωής (LCA) και Ανάλυσης
Πλέγματος (Nexus)

Φραγκούλη Δήμητρα-Νεκταρία

Επιβλέπουσα καθηγήτρια:

Κροκίδα Μαγδαληνή

*Η διπλωματική μου εργασία
είναι αφιερωμένη στον άνθρωπο,
που λείπει από τη ζωή μου,
αλλά ποτέ από την καρδιά μου*



Ευχαριστίες

Το θέμα, που πραγματεύεται η διπλωματική μου εργασία, μου έδωσε τη δυνατότητα να διευρυνθούν οι γνώσεις μου ως προς τη Χημική Μηχανική, ενώ παράλληλα μου δόθηκε η ευκαιρία να έρθω σε επαφή με αρκετούς ανθρώπους του τομέα αυτού, καθώς πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο ενός ερευνητικού προγράμματος. Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω την καθηγήτρια Μαγδαληνή Κροκίδα, η οποία μου ανάθεσε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, με το οποίο «κλείνουν» οι προπτυχιακές μου σπουδές. Την ευχαριστώ για το ενδιαφέρον της ως προς την πρόοδο της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και για την υποστήριξη και την εμπιστοσύνη, που μου έδειξε.

Η καθηγήτρια Μαγδαληνή Κροκίδα διευθύνει το εργαστήριο Σχεδιασμού και Ανάλυσης Διεργασιών, τα μέλη του οποίου βοήθησαν επίσης στην περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας. Συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω το μέλος Εργαστηριακού και Διδακτικού Προσωπικού, κύριο Χρήστο Μπουκουβάλα, για την μεταλαμπάδευση μερικών από τις πολυάριθμες επιστημονικές γνώσεις που κατέχει, αλλά και για την καθοδήγηση και την υποστήριξή του. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δρ. Βασιλική Οικονομοπούλου και τον Δρ. Τρύφωνα Κεκέ, οι οποίοι παρά το πιεσμένο πρόγραμμά τους, έδωσαν τις κατευθυντήριες γραμμές, για την κατανόηση και την διεξαγωγή της διπλωματικής μου εργασίας. Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να αποδώσω στους υποψήφιους διδάκτορες Μαργαρίτα Παναγιωτοπούλου, Αλεξάνδρα Μάρη, Νάντια Λαϊνά, Σωκράτη Κοσκινάκη και Χριστόφορο Βασιλείου, για την άμεση ανταπόκριση στις πιθανές απορίες μου, αλλά και για το ευχάριστο κλίμα που δημιουργούν στο εργαστήριο.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον ομότιμο καθηγητή Διονύση Ασημακόπουλο, για το ενδιαφέρον, που έδειξε στη διπλωματική μου εργασία. Τον ευχαριστώ για τις εναλλακτικές ιδέες και για τον χρόνο, που διέθεσε προκειμένου να περατωθεί η διπλωματική μου εργασία ομαλότερα.

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου και ειδικότερα, στη μητέρα μου Μαργαρίτα Ροπαϊτού, στις αδερφές μου Ελένη Φραγκούλη και Βασιλική Φραγκούλη, στη γιαγιά μου Βασιλική Ροπαϊτού και στον παππού μου Γεώργιο Ροπαϊτή. Το κάθε μέλος της οικογένειάς μου με στήριξε με τον δικό του, ξεχωριστό τρόπο, κάνοντας τα φοιτητικά μου χρόνια πιο ευχάριστα, ενώ παράλληλα όλοι είχαν υπομονή και πίστη καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φυσικό Δημήτρη Δούκα, για την προτροπή του να φοιτήσω στη Σχολή Χημικών Μηχανικών, καθώς και για τις χρήσιμες συμβουλές του κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές και φίλους μου, Γιάννη Καββαδία, για την βοήθειά που μου παρείχε στην εκπλήρωση των υποχρεώσεων της σχολής, αλλά και για την υποστήριξη που μου έδειξε, Αγγελική Πετρίδη, για την ομαλή συνεργασία μας στο ίδιο ερευνητικό έργο και Χάρη Φάφαλη, για την υποστήριξή του, κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της διπλωματικής μου εργασίας.



Περιεχόμενα

Περίληψη	7
Abstract	8
1. Εισαγωγή	9
1.1. Εισαγωγικά στοιχεία	9
1.2. Αντικείμενο και στόχος	9
2. Περιγραφή βιομηχανίας	10
2.1. Γενικά στοιχεία	10
2.2. Περιγραφή διαγράμματος ροής – Ανάλυση διεργασιών	12
2.2.1. Γαλακτοβιομηχανία	12
2.2.2. Μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων	16
2.2.3. Συνολική υφιστάμενη κατάσταση	24
2.3. Προβλήματα αειφορίας και βιωσιμότητας	25
2.3.1. Εξοικονόμηση νερού	26
2.3.2. Εξοικονόμηση ενέργειας	26
2.3.3. Εκμετάλλευση παραπροϊόντων	27
3. Περιγραφή παρεμβάσεων για την εξασφάλιση αειφορίας και βιωσιμότητας	28
3.1. Παρεμβάσεις στο ρεύμα εξόδου της μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων	29
3.1.1. Μembrάνη υπερδιήθησης σε συνδυασμό με απολύμανση με υπεριώδη ακτινοβολία (UV)	29
3.2. Παρεμβάσεις στο ρεύμα εξόδου όξινου ορού γάλακτος από τη γαλακτοβιομηχανία	40
3.2.1. Μembrάνη υπερδιήθησης στο ρεύμα όξινου ορού	40
3.2.2. Ξήρανση με ψεκασμό	40
3.2.3. Αναερόβια χώνευση	48
4. Ανάλυση κύκλου ζωής (LCA)	54
4.1. Γενικά στοιχεία	54
4.2. Μεθοδολογία	54
5. Ανάλυση πλέγματος (NEXUS) Ενέργειας – Νερού – Υλικών	59
5.1. Γενικά στοιχεία	59
5.2. Μεθοδολογία	59
6. Αποτελέσματα – Συζήτηση αποτελεσμάτων	61
6.1. Παροχές και ενεργειακές απαιτήσεις	61
6.2. Ανάλυση κύκλου ζωής (LCA)	68
6.3. Ανάλυση πλέγματος (NEXUS) Ενέργειας – Νερού – Υλικών	77
7. Συμπεράσματα – Μελλοντικές προτάσεις	79
7.1. Συμπεράσματα	79
7.2. Μελλοντικές προτάσεις	79



8. Βιβλιογραφία	81
9. Παραρτήματα	85
9.1. Παράρτημα Α (Κώδικας στο Matlab για την υφιστάμενη μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και την μελλοντική μονάδα μεμβρανών υπερδιήθησης σε συνδυασμό με απολύμανση με UV)	85
9.2. Παράρτημα Β (Κώδικας στο Matlab για τις μελλοντικές μονάδες μεμβρανών υπερδιήθησης, ξήρανσης με ψεκασμό και αναερόβιας χώνευσης)	92



Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1: Τα συστατικά και τα οφέλη των γαλακτοκομικών προϊόντων [9].....	10
Εικόνα 2: Κατανομή νερού στις διεργασίες μίας γαλακτοβιομηχανίας [4]	11
Εικόνα 3: Κατανομή ενέργειας στις διεργασίες μίας γαλακτοβιομηχανίας [4]	12
Εικόνα 4: Παραγωγή και χρήση γάλακτος στην Ευρώπη το 2021 [6]	13
Εικόνα 5: Συνολικό διάγραμμα ροής παραγωγικής διαδικασίας της υπό μελέτη γαλακτοβιομηχανίας [12, 13].....	14
Εικόνα 6: Απεικόνιση λειτουργίας ενός πύργου ψύξης [15].....	15
Εικόνα 7: Διάγραμμα ροής μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων [12].....	17
Εικόνα 8: Σχηματική αναπαράσταση περιστρεφόμενου κόσκινου [22]	18
Εικόνα 9: Διάγραμμα ροής μονάδας ενεργού ιλύος [21].....	18
Εικόνα 10: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας ιλύος	22
Εικόνα 11: Πάχυνση με βαρύτητα [27].....	23
Εικόνα 12: Απεικόνιση αφυδάτωσης ιλύος με ταινιοφιλτρόπρεσσα [28]	23
Εικόνα 13: Κλειστό σύστημα ηλιακής ξήρανσης [29].....	24
Εικόνα 14: Διάγραμμα ροής υφιστάμενης κατάστασης.....	25
Εικόνα 15: Οι τρεις πυλώνες της βιωσιμότητας [31].....	26
Εικόνα 16: Απεικόνιση διαφορών στο ενεργειακό κόστος μεταξύ (Α) αγελάδων που βοσκούν σε βοσκότοπο και (Β) αγελάδων που αρμέγονται μηχανικά, το γάλα ψύχεται, αποθηκεύεται, μεταφέρεται πίσω στη φάρμα αναμιγνύεται με ζεστό νερό και ταΐζεται στο μοσχάρι γαλακτοπαραγωγής [31]	27
Εικόνα 17: Σχηματική απεικόνιση παραγωγής γαλακτοκομικών προϊόντων και παραπροϊόντων [32].....	27
Εικόνα 18: Διάγραμμα ροής μελλοντικής κατάστασης	28
Εικόνα 19: Σχηματική αναπαράσταση της διεργασίας απολύμανσης με UV σε συνδυασμό με μεμβράνες UF [2]	29
Εικόνα 20: Μήκη κύματος και εφαρμογές υπεριώδους ακτινοβολίας [5]	30
Εικόνα 21: Ταξινόμηση των μεμβρανών ως προς τα συγκρατούμενα είδη [3]	32
Εικόνα 22: Μονάδα μεμβρανών υπερδιήθησης με περισσότερες από μία μονάδες συνδεδεμένες μεταξύ τους παράλληλα.....	32
Εικόνα 23: Μονάδα μεμβρανών σπειροειδούς περιέλιξης [36]	34
Εικόνα 24: Διάγραμμα ροής λειτουργίας μίας μεμβράνης υπερδιήθησης	35
Εικόνα 25: Σχηματική αναπαράσταση της πόλωσης συγκέντρωσης και της φραγής στην επιφάνεια της μεμβράνης [43, 44].....	38
Εικόνα 26: Μηχανισμοί φραγής: (I) πλήρης φραγή, (II) ενδιάμεση φραγή, (III) σταθερή φραγή, (IV) σχηματισμός στρώματος φραγής [45].....	39
Εικόνα 27: Μέθοδοι θερμικής ξήρανσης [44]	41
Εικόνα 28: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας ξηραντήρα με ψεκασμό [51].....	42
Εικόνα 29: Διάγραμμα ροής ξηραντήρα δια ψεκασμού	45
Εικόνα 30: Μέθοδοι επαφής αερίου-στερεών σε ξηραντήρα με ψεκασμό [36]	47
Εικόνα 31: Διάγραμμα ροής αναερόβιας χώνευσης [54].....	48
Εικόνα 32: Απεικόνιση τουρμπίνας Rashton (1), κώπης (2) και προπέλας (3) [56]	51
Εικόνα 33: Συσχετισμός αριθμού Reynolds και αριθμού ισχύος κατά την ανάδευση νευτώνιων ρευστών με τουρμπίνα Rashton (1), κώπη (2) και προπέλα (3) [56]	52
Εικόνα 34: Διάγραμμα ροής συστήματος συμπαραγωγής	53
Εικόνα 35: Απεικόνιση ανάλυσης κύκλου ζωής [59]	54
Εικόνα 36: Απεικόνιση βημάτων ανάλυσης κύκλου ζωής [58]	55
Εικόνα 37: Κατηγορίες επιπτώσεων, που καλύπτονται από τη μέθοδο ReCiPe [60]	56
Εικόνα 38: Ανάλυση πλέγματος NEXUS μεταξύ των νερό – ενέργεια – απόβλητα [63].....	59
Εικόνα 39: Καύση του μεθανίου (πάνω διάγραμμα ροής) και σύστημα συμπαραγωγής (κάτω διάγραμμα ροής) στο υπολογιστικό εργαλείο Aspen Hysys.....	67
Εικόνα 40: Διάγραμμα ροής μελλοντικής κατάστασης στο υπολογιστικό εργαλείο Gabi LCA Software	69



Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1: Εισροές στην υπό μελέτη γαλακτοβιομηχανία [12].....	13
Πίνακας 2: Εκροές από την υπό μελέτη γαλακτοβιομηχανία [12].....	13
Πίνακας 3: Κατανομή ενεργειακής κατανάλωσης στην υπό μελέτη γαλακτοβιομηχανία [12].....	15
Πίνακας 4: Σύνθεση όξινου ορού γάλακτος [18].....	16
Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά εξερχόμενων υγρών αποβλήτων από την υπό μελέτη γαλακτοβιομηχανία	16
Πίνακας 6: Τιμές παραμέτρων σχεδιασμού συστημάτων ενεργού ιλύος [21]	19
Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά λαμπτήρων UV [23]	31
Πίνακας 8: Παράμετροι για τον υπολογισμό της συνολικής ογκομετρικής παροχής του διηθήματος από τις μεμβράνες υπερδιήθησης στη μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων	34
Πίνακας 9: Παράμετροι για τον υπολογισμό του οργανικού φορτίου του διηθήματος από τις μεμβράνες υπερδιήθησης στη μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων [35].....	37
Πίνακας 10: Ειδική θερμοχωρητικότητα ξηρού όξινου γάλακτος [52]	43
Πίνακας 11: Τιμές παραμέτρων μοντέλου αναερόβιας χώνευσης [54].....	49
Πίνακας 12: Δείκτες επιπέδου τελικού σημείου [60].....	55
Πίνακας 13: Αντιστοίχιση επιπτώσεων και δεικτών επιπέδου μεσαίου σημείου [60].....	57
Πίνακας 14: Αντιστοίχιση περιβαλλοντικού προβλήματος με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις [60]	58
Πίνακας 15: Εισροές, εκροές και ενεργειακή απαίτηση της γαλακτοβιομηχανίας	61
Πίνακας 16: Εισροές, εκροές, τα χαρακτηριστικά τους και ενεργειακή απαίτηση της μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, πριν τις παρεμβάσεις	62
Πίνακας 17: Εισροές, εκροές, τα χαρακτηριστικά τους και ενεργειακή απαίτηση της μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, μετά τις παρεμβάσεις	63
Πίνακας 18: Εισροές, εκροές, τα χαρακτηριστικά τους και ενεργειακή απαίτηση της μονάδας μεμβρανών υπερδιήθησης σε συνδυασμό με απολύμανση με ακτινοβολία UV.....	63
Πίνακας 19: Εισροές, εκροές, η σύνθεσή τους και ενεργειακή απαίτηση της μονάδας μεμβρανών υπερδιήθησης ...	66
Πίνακας 20: Εισροές, εκροές, τα χαρακτηριστικά τους και ενεργειακή απαίτηση της μονάδας ξήρανσης με ψεκασμό	67
Πίνακας 21: Εισροές, εκροές και ενεργειακή απαίτηση της μονάδας αναερόβιας χώνευσης.....	68
Πίνακας 22: Εισροές και παραγωγή ενέργειας της μονάδας συμπαραγωγής.....	68
Πίνακας 23: Δείκτες επιπέδου μεσαίου σημείου για την υφιστάμενη κατάσταση και τις επιμέρους διεργασίες της.	69
Πίνακας 24: Δείκτες επιπέδου μεσαίου σημείου για την μελλοντική κατάσταση και τις επιμέρους διεργασίες της ..	70
Πίνακας 25: Σύγκριση δεικτών επιπέδου μεσαίου σημείου υφιστάμενης και μελλοντικής κατάστασης	73
Πίνακας 26: Σύγκριση δεικτών επιπέδου τελικού σημείου υφιστάμενης και μελλοντικής κατάστασης.....	76
Πίνακας 27: Σύγκριση παραμέτρων υφιστάμενης και μελλοντικής κατάστασης	77
Πίνακας 28: Δείκτης Nexus Strength στην υφιστάμενη και στην μελλοντική κατάσταση.....	78



Περιεχόμενα διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: BOD ₅ συναρτήσει του χρόνου στο διήθημα των μεμβρανών υπερδιήθησης	64
Διάγραμμα 2: BOD ₅ συναρτήσει του χρόνου στο συμπύκνωμα των μεμβρανών υπερδιήθησης.....	64
Διάγραμμα 3: COD συναρτήσει του χρόνου στο διήθημα των μεμβρανών υπερδιήθησης.....	64
Διάγραμμα 4: COD συναρτήσει του χρόνου στο συμπύκνωμα των μεμβρανών υπερδιήθησης.....	65
Διάγραμμα 5: TSS συναρτήσει του χρόνου στο διήθημα των μεμβρανών υπερδιήθησης	65
Διάγραμμα 6: TSS συναρτήσει του χρόνου στο συμπύκνωμα των μεμβρανών υπερδιήθησης.....	65
Διάγραμμα 7: Κλιματική αλλαγή (δείκτης επιπέδου μεσαίου σημείου) στις επιμέρους μονάδες της μελλοντικής κατάστασης.....	71
Διάγραμμα 8: Κλιματική αλλαγή (δείκτης επιπέδου μεσαίου σημείου) στις επιμέρους μονάδες της μελλοντικής κατάστασης (εξαιρώντας τη γαλακτοβιομηχανία).....	72
Διάγραμμα 9: Κατανάλωση νερού (δείκτης επιπέδου μεσαίου σημείου) στις επιμέρους μονάδες της μελλοντικής κατάστασης.....	72
Διάγραμμα 10: Ευτροφισμός νερού (δείκτης επιπέδου μεσαίου σημείου) στις επιμέρους μονάδες της μελλοντικής κατάστασης.....	73
Διάγραμμα 11: Ευτροφισμός θάλασσας (δείκτης επιπέδου μεσαίου σημείου) στις επιμέρους μονάδες της μελλοντικής κατάστασης.....	74
Διάγραμμα 12: Μείωση στρατοσφαιρικού όζοντος (δείκτης επιπέδου μεσαίου σημείου) στις επιμέρους μονάδες της μελλοντικής κατάστασης.....	74
Διάγραμμα 13: Τοξικότητα προς τον άνθρωπο, εκτός του καρκίνου (δείκτης επιπέδου μεσαίου σημείου) στις επιμέρους μονάδες της μελλοντικής κατάστασης.....	74
Διάγραμμα 14: Μεταβολή δεικτών επιπέδου μεσαίου σημείου από την υφιστάμενη προς την μελλοντική κατάσταση	75
Διάγραμμα 15: Καταστροφή στην ανθρώπινη υγεία (δείκτης επιπέδου τελικού σημείου) στην υφιστάμενη και στη μελλοντική κατάσταση	76
Διάγραμμα 16: Καταστροφή στα οικοσυστήματα (δείκτης επιπέδου τελικού σημείου) στην υφιστάμενη και στη μελλοντική κατάσταση	76
Διάγραμμα 17: Καταστροφή στους πόρους (δείκτης επιπέδου τελικού σημείου) στην υφιστάμενη και στη μελλοντική κατάσταση	77
Διάγραμμα 18: Γραφική απεικόνιση σύγκρισης δεικτών Nexus Strength στην υφιστάμενη και τη μελλοντική κατάσταση	78
Διάγραμμα 19: Μεταβολή παραμέτρων υφιστάμενης και μελλοντικής κατάστασης.....	78



Περίληψη

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα, που έχουν προκύψει τα τελευταία χρόνια, βλάπτουν σοβαρά τον πλανήτη αλλά και τους ίδιους τους ανθρώπους. Έτσι, η προστασία του περιβάλλοντος κρίνεται απαραίτητη τόσο σε ατομικό όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται μία γαλακτοβιομηχανία, η οποία εδράζεται στην Ελλάδα. Η κατανάλωση νερού και ενέργειας, αλλά και η παραγωγή αποβλήτων, αποτέλεσαν τους κύριους παράγοντες εξέτασης. Η γαλακτοβιομηχανία αποτελείται από τη παραγωγική διαδικασία και από τη μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Εξετάσθηκαν λοιπόν, ορισμένες παρεμβάσεις με σκοπό την ανάκτηση καθαρού νερού, ενός μέρους των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων, την ανάκτηση πρωτεϊνών και την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, από τον όξινο ορό γάλακτος. Η μοντελοποίηση των νέων μονάδων έγινε με τη βοήθεια των υπολογιστικών εργαλείων MATLAB R2019b και Aspen HYSYS V11. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως μετά την εγκατάσταση των νέων μονάδων η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται, όπως και η παραγωγή αποβλήτων, ενώ η κατανάλωση νερού μειώνεται. Βέβαια παράλληλα γίνεται ανάκτηση πρωτεϊνών, οι οποίες θεωρούνται προϊόντα προστιθέμενης αξίας. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων γίνεται με ανάλυση κύκλου ζωής (LCA) και ανάλυση πλέγματος. Η ανάλυση κύκλου ζωής πραγματοποιήθηκε με το υπολογιστικό εργαλείο Gabi, τα αποτελέσματα του οποίου έδειξαν ότι το περιβαλλοντικό αντίκτυπο μειώνεται με την προσθήκη των παρεμβάσεων, ανεβάζοντας όμως τον κίνδυνο τοξικότητας στον άνθρωπο, με εξαίρεση την ασθένεια του καρκίνου. Ταυτόχρονα μέσω της ανάλυσης πλέγματος συμπεραίνεται ότι ο συνδυασμός ενέργεια – νερό – απόβλητα αποδυναμώνεται, εξαιρώντας αυτόν μεταξύ της ενέργειας και των αποβλήτων, που φαίνεται να γίνεται πιο ισχυρός. Παρά τα θετικά αποτελέσματα που προέκυψαν, θεωρείται απαραίτητη η οικονομική ανάλυση και η βελτιστοποίηση των νέων μονάδων, έτσι ώστε να ληφθεί η σωστή απόφαση για την εγκατάσταση των νέων μονάδων.



Abstract

The environmental problems that have arisen in recent years are seriously harming the planet and people themselves. Thus, environmental protection is necessary both at the individual and industrial levels. In this thesis, a dairy industry based in Greece is examined. Water and energy consumption, as well as waste production, were the main factors considered. The dairy industry consists of the production process and the wastewater treatment plant. Therefore, a number of interventions were considered to recover clean water, a portion of the treated wastewater, to recover proteins, and to produce electricity and thermal energy from whey. The modeling of the new plants was carried out with the help of the computer tools MATLAB R2019b and Aspen HYSYS V11. The results showed that after the installation of the new units, energy consumption increases, as well as waste production, while water consumption decreases. Of course, at the same time, proteins are recovered, which are considered value-added products. The results are evaluated by means of life cycle analysis (LCA) and nexus analysis. The life cycle analysis was carried out with the Gabi computer tool, the results of which showed that the environmental impact decreases with the addition of the interventions, but increases the risk of toxicity to humans, with the exception of cancer. At the same time, through matrix analysis, it is concluded that the energy-water-waste combination is weakened, excluding the one between energy and waste, which seems to become stronger. Despite the positive results obtained, an economic analysis and optimization of the new plants are considered necessary in order to make the right decision for the installation of the new plants.



1. Εισαγωγή

1.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Τα παλαιότερα χρόνια, η καταστροφή του περιβάλλοντος αγνοούταν από τους ανθρώπους και δεν θεωρούταν σημαντικό πρόβλημα. Όμως με το πέρασμα των χρόνων άρχισαν να γίνονται ολοένα και πιο έντονα η ρύπανση του νερού και της ατμόσφαιρας, καθώς και το φαινόμενο του θερμοκηπίου. [1] Η αύξηση του πληθυσμού και η κλιματική αλλαγή αποτέλεσαν παγκόσμια προβλήματα, τα οποία πλήττουν τον πλανήτη μέχρι και σήμερα. [2] Αυτά και άλλα περιβαλλοντικά ζητήματα έχουν πλέον ευαισθητοποιήσει τον ανθρώπινο πληθυσμό, αφού είναι πλέον εμφανές ότι επηρεάζουν αρνητικά τη ζωή και την ευημερία του. Έχουν ληφθεί δηλαδή μέτρα, όπως η ανακύκλωση και η αποφυγή προϊόντων, που βλάπτουν το περιβάλλον. [1]

Βέβαια, η υποβάθμιση της ποιότητας του περιβάλλοντος δεν προκαλείται μόνο από τον κάθε άνθρωπο μεμονωμένα. Η παγκόσμια εκβιομηχάνιση έχει προκαλέσει σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα, μεταξύ των οποίων είναι και η έλλειψη νερού. [3] Ειδικότερα, όσον αφορά στην κατανάλωση νερού και στην απόρριψη υγρών αποβλήτων, οι βιομηχανίες τροφίμων κατέχουν τη τρίτη θέση μετά από τις χημικές βιομηχανίες και τα διυλιστήρια. Επιπρόσθετα, οι βιομηχανίες τροφίμων είναι ένας κλάδος, που εκτός από νερό, καταναλώνει και πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας. Η χρήση του νερού και της ενέργειας, καθώς και η παραγωγή αποβλήτων είναι έννοιες αλληλένδετες μεταξύ τους, γεγονός που προκύπτει από έναν φαύλο κύκλο, στον οποίο η συλλογή και η επεξεργασία των λυμάτων απαιτούν ενέργεια, ενώ η παραγωγή της ενέργειας απαιτεί κατανάλωση νερού. [4]

Η έλλειψη νερού θεωρείται ένας από τους πέντε μεγαλύτερους κινδύνους για τον άνθρωπο τον τρέχοντα αιώνα, ενώ ταυτόχρονα πρόσφατα έχουν προκληθεί ανησυχίες ως προς τη μείωση των ενεργειακών αποθεμάτων και την υπερεκμετάλλευση των αποθεμάτων νερού. Εκτός από το ζήτημα της ύδρευσης, που προκύπτει, παράγονται συχνά παρόμοιες ποσότητες υγρών αποβλήτων, τα οποία πρέπει να επεξεργαστούν, ώστε να πληρούν τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά πριν την τελική απόρριψή τους. [4] Ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες, η ασφάλεια του πόσιμου νερού αποτελεί σημαντικό ζήτημα [5], αφού, τα ανεπεξέργαστα υγρά απόβλητα καταλήγουν στα ποτάμια και στις θάλασσες, με αποτέλεσμα τη μόλυνση των υπόγειων υδάτων και την περιορισμένη παροχή καθαρού νερού. [3]

1.2. Αντικείμενο και στόχος

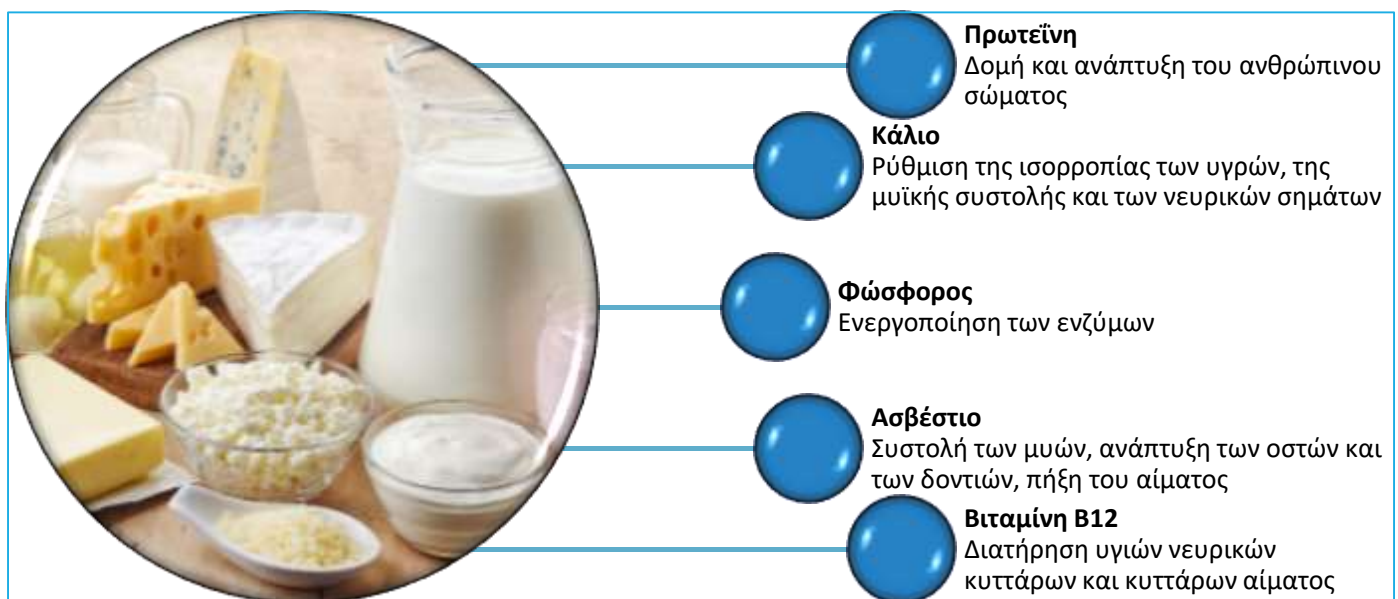
Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθούν πιθανές παρεμβάσεις σε γαλακτοβιομηχανία, η οποία εδράζεται στην Ελλάδα. Οι παρεμβάσεις έχουν ως σκοπό την αξιοποίηση των παραπροϊόντων και μέρους των υγρών αποβλήτων. Συγκεκριμένα, προβλέπεται η απομόνωση πρωτεϊνών καθώς και η παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από τον όξινο ορό γάλακτος και η περαιτέρω επεξεργασία μέρους των υγρών αποβλήτων, για επαναχρησιμοποίηση στους πύργους ψύξης της γαλακτοβιομηχανίας. Γενικός στόχος είναι η μείωση της κατανάλωσης νερού και ενέργειας και της παραγωγής υγρών αποβλήτων, η επίτευξη του οποίου εξετάζεται με ανάλυση κύκλου ζωής και ανάλυση πλέγματος. Η διπλωματική αυτή εργασία έχει βασιστεί στο ερευνητικό έργο Accel Water.

2. Περιγραφή βιομηχανίας

2.1. Γενικά στοιχεία

Η παραγωγή νωπού γάλακτος στις φάρμες της Ευρωπαϊκής Ένωσης εκτιμήθηκε στους 161 εκατ. τόνους το 2021. Μάλιστα, υπάρχουν μερικά κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όπου ζώα, εκτός από τις αγελάδες, συμβάλλουν σημαντικά στη συνολική παραγωγή γάλακτος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. Για παράδειγμα, το 2021 η Ισπανία παρήγαγε 1 εκατ. τόνους αιγοπρόβειο γάλα, ενώ η Ελλάδα παρήγαγε 0,9 εκατ. τόνους. Το αγελαδινό γάλα κατέχει τη συντριπτική πλειοψηφία του γάλακτος, που παραδίδεται στα γαλακτοκομεία της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ωστόσο, η πλειοψηφία του γάλακτος που παραδόθηκε από την Ελλάδα το 2021 ήταν αιγοπρόβειο (56,7%), όπως και ένα μεγάλο ποσοστό από το γάλα της Κύπρου (21,4%). [6]

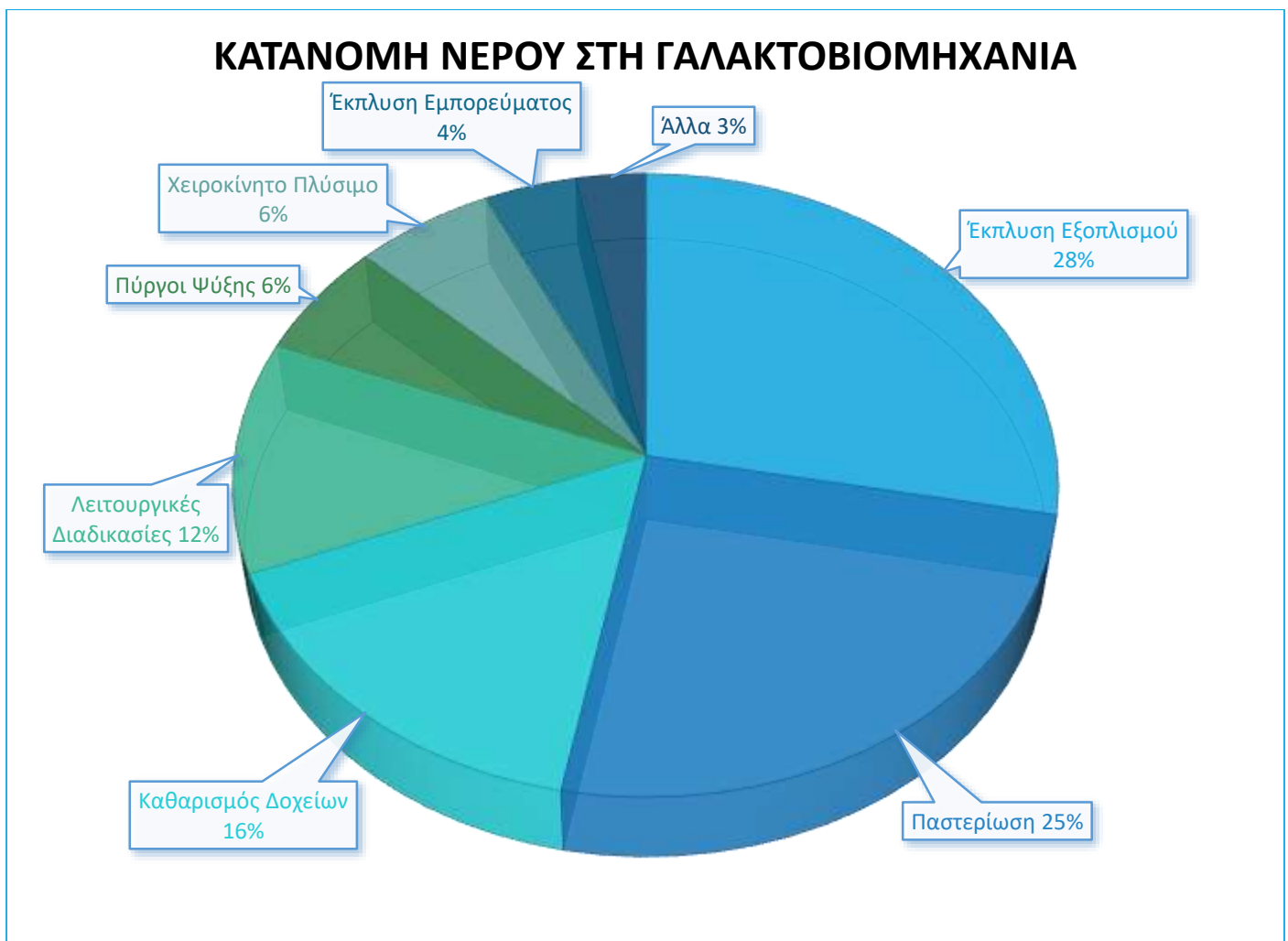
Το γάλα που παραδίδεται στις γαλακτοβιομηχανίες μεταποιείται σε διάφορα νωπά και βιομηχανικά προϊόντα, ώστε να διατεθούν τελικά στο καταναλωτικό κοινό. [6] Έχει αποδειχθεί πως το γάλα και τα προϊόντα του είναι ωφέλιμα για τον ανθρώπινο οργανισμό, λόγω των θρεπτικών συστατικών που περιέχουν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Ειδικότερα, η πρόσληψη γαλακτοκομικών προϊόντων σε παιδική ηλικία μειώνει τον κίνδυνο για παιδική παχυσαρκία, ενώ σε μεγαλύτερη ηλικία βοηθάει στη σύνθεση του σώματος, διευκολύνει την απώλεια βάρους και επιδρά ευεργετικά στην οστική πυκνότητα. Επιπρόσθετα, με κατανάλωση γαλακτοκομικών προϊόντων έχει παρατηρηθεί ουδέτερος ή μειωμένος κίνδυνος διαβήτη τύπου 2 και καρδιαγγειακών παθήσεων, όπως το εγκεφαλικό επεισόδιο, ενώ αρκετά ενδιαφέρουσα είναι η σχέση μεταξύ της κατανάλωσης γάλακτος και της εμφάνισης καρκίνου του παχέος εντέρου, της ουροδόχου κύστης, του στομάχου και του μαστού, καθώς είναι αντιστρόφως ανάλογη. [7, 8]



Εικόνα 1: Τα συστατικά και τα οφέλη των γαλακτοκομικών προϊόντων [9]

Παρά τα πλεονεκτήματα του γάλακτος, που αναφέρθηκαν παραπάνω, η ανάγκη των γαλακτοβιομηχανιών για νερό και ενέργεια είναι τεράστια, όπως και η παραγωγή αποβλήτων εξίσου ογκώδης. Το νερό χρησιμοποιείται σε όλα τα στάδια της γαλακτοβιομηχανίας, συμπεριλαμβανομένου του καθαρισμού, της απολύμανσης, της θέρμανσης, της ψύξης και του πλυσίματος των δαπέδων. [10] Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, ο καθαρισμός είναι ο κύριος καταναλωτής νερού στις γαλακτοβιομηχανίες. Μάλιστα, σύμφωνα με τη Διεύθυνση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής το εύρος κατανάλωσης νερού κυμαίνεται μεταξύ 1 – 60 L νερού/kg γάλακτος, συμπεριλαμβανομένου του νερού ψύξης, για την επεξεργασία τυριού και του ορού γάλακτος. Γενικά, ως χαμηλή και ως υψηλή κατανάλωση νερού σε μία γαλακτοβιομηχανία θεωρούνται τα 2,21 L νερού/kg γάλακτος και 9,44 L νερού/kg γάλακτος, αντίστοιχα. [4]

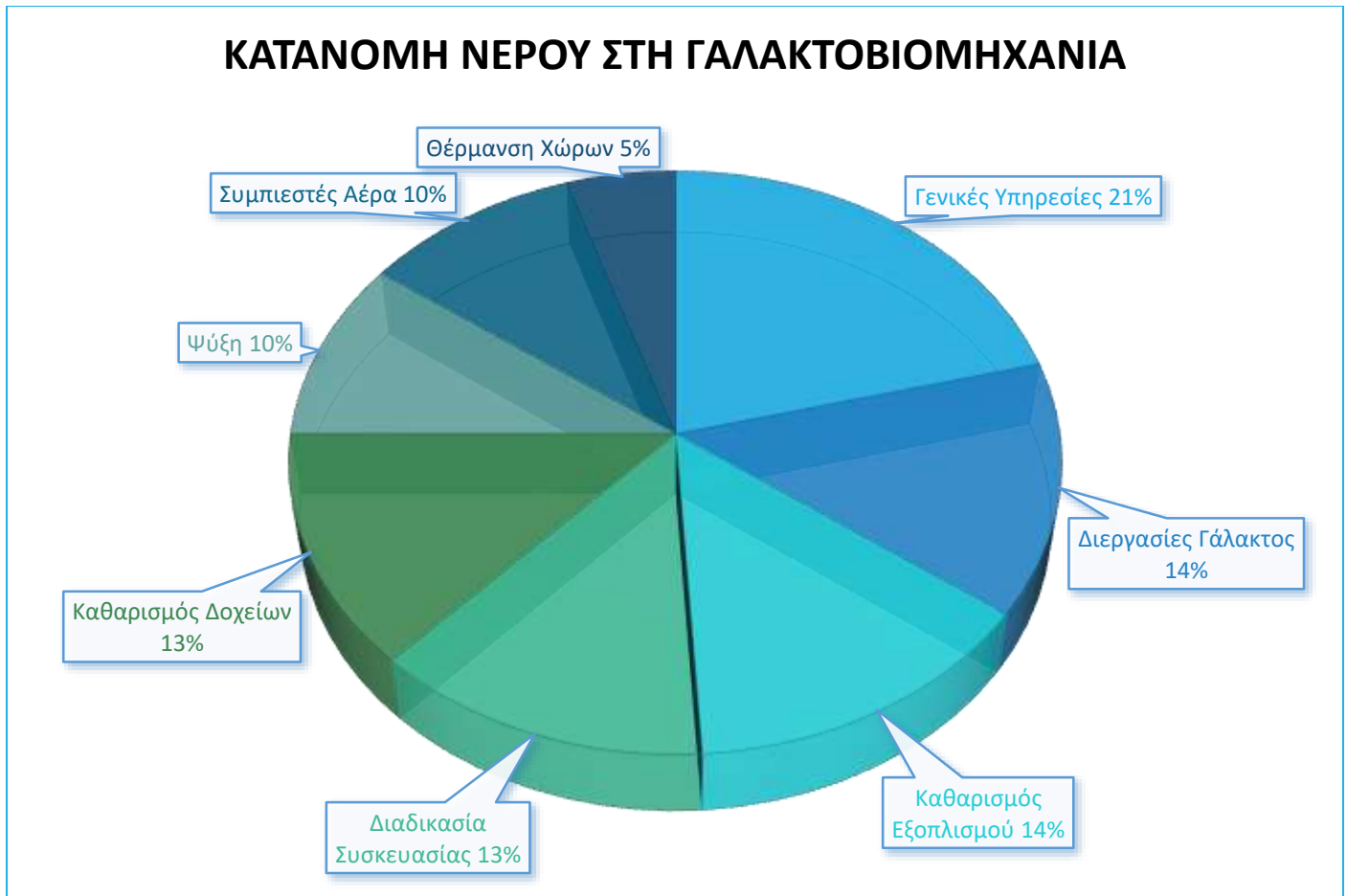
Η ενέργεια είναι ένα ακόμα αγαθό, το οποίο καταναλώνεται σε πολύ μεγάλες ποσότητες στις γαλακτοβιομηχανίες. Συνήθως, το 80% της παρεχόμενης ενέργειας προσφέρεται για τις θερμικές ανάγκες, για την παραγωγή ζεστού νερού και ατμού για εφαρμογές διεργασιών, όπως η παστερίωση, η εξάτμιση και η ξήρανση του γάλακτος, καθώς και για τον καθαρισμό. Το υπόλοιπο 20% καταναλώνεται με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία των μηχανημάτων επεξεργασίας, την ψύξη, τον εξαερισμό και τον φωτισμό. Βέβαια, η κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται από την ηλικία και το μέγεθος της βιομηχανίας, καθώς και από τον βαθμό αυτοματοποίησης και την ποικιλία παραγόμενων προϊόντων. Ο καταμερισμός της ενέργειας, που καταναλώνεται σε μία γαλακτοβιομηχανία, απεικονίζεται στην Εικόνα 3. Το εύρος, στο οποίο κυμαίνεται η κατανάλωση ενέργειας στις γαλακτοβιομηχανίες είναι 0,5 – 1,2 GJ/kg γάλακτος. Η απαίτηση σε ενέργεια διαφέρει σε κάθε γαλακτοβιομηχανία, λόγω των διαφορετικών προϊόντων που παράγονται στην καθεμία. Αυτό αποδεικνύεται από το γεγονός ότι η χρήση ενέργειας για 1kg γιαούρτι είναι λίγο υψηλότερη από ότι για 1kg γάλα, ενώ η ενέργεια για 1kg κρέμα γάλακτος είναι περίπου 2,5 φορές υψηλότερη από εκείνη για 1kg γάλακτος. [4]



Εικόνα 2: Κατανομή νερού στις διεργασίες μίας γαλακτοβιομηχανίας [4]

Επιπλέον, κατά την επεξεργασία του γάλακτος παράγεται τεράστια ποσότητα αποβλήτων για την επίτευξη των υψηλών επιπέδων απολύμανσης και καθαριότητας, [4] γεγονός που καθιστά, σε πολλές χώρες, τις γαλακτοβιομηχανίες ως τη μεγαλύτερη πηγή υγρών αποβλήτων στον κλάδο βιομηχανιών επεξεργασίας τροφίμων. Τα ρεύματα αποβλήτων, που προέρχονται από τις γαλακτοβιομηχανίες μπορεί να προκαλέσουν σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα, λόγω του υψηλού οργανικού φορτίου, του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD) και του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD), που προέρχονται κυρίως από πρωτεΐνες, λίπη και λακτόζη. Επίσης, τα υγρά απόβλητα μπορεί να περιέχουν μεγάλο μικροβιολογικό φορτίο καθώς και παθογόνους ιούς και βακτήρια. [10, 4] Ο όγκος, η συγκέντρωση και η σύνθεση των παραγόμενων υγρών αποβλήτων εξαρτώνται από τον τύπο του προϊόντος που παρασκευάζεται, το πρόγραμμα παραγωγής, τις διαδικασίες λειτουργίας, τον σχεδιασμό της μονάδας

επεξεργασίας και το επίπεδο διαχείρισης του νερού που εφαρμόζεται και κατά συνέπεια τη ποσότητα του νερού που εξοικονομείται. Το εύρος παραγωγής υγρών αποβλήτων κυμαίνεται στα 1,1 – 6,8 L αποβλήτων/L γάλακτος. [4]



Εικόνα 3: Κατανομή ενέργειας στις διεργασίες μίας γαλακτοβιομηχανίας [4]

2.2. Περιγραφή διαγράμματος ροής – Ανάλυση διεργασιών

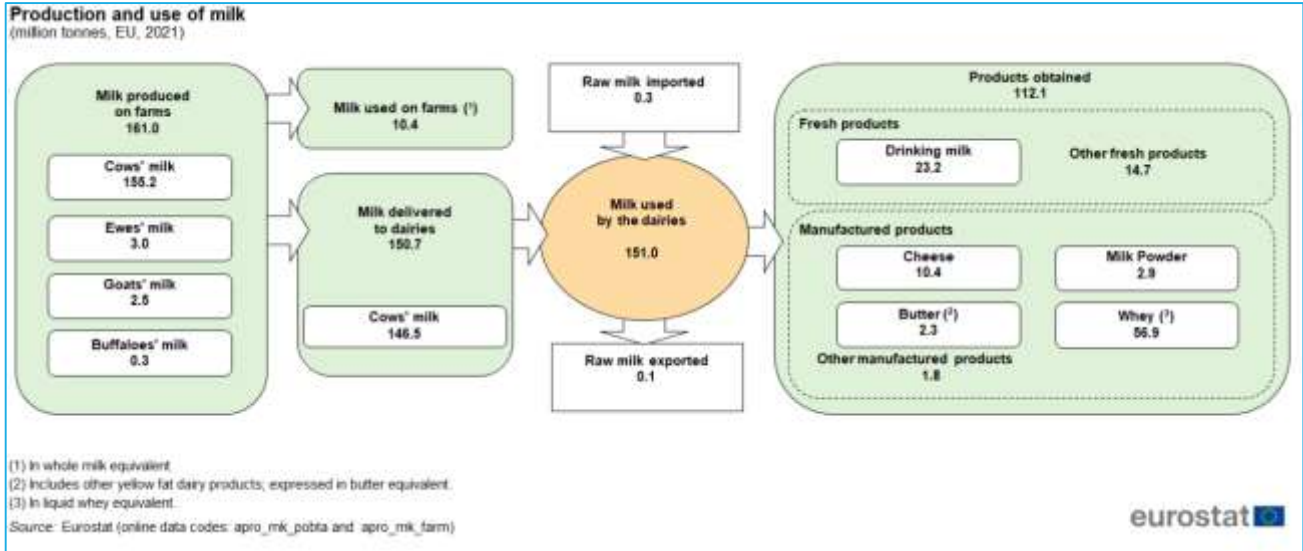
2.2.1. Γαλακτοβιομηχανία

Η περιεκτικότητα του γάλακτος σε λιπαρά ποικίλλει μεταξύ των γαλακτοκομικών προϊόντων. Το νωπό γάλα, το πλήρες γάλα, το ημι-αποβουτυρωμένο γάλα και το αποβουτυρωμένο γάλα έχουν το καθένα διαφορετικό ποσοστό λίπους. Το νωπό γάλα έχει συνήθως περιεκτικότητα ~4,4 g λίπους/100g γάλακτος. Το πλήρες γάλα και το ημι-αποβουτυρωμένο γάλα τυποποιούνται, έτσι ώστε να έχουν ~3,5 g λίπους/100g γάλακτος και ~1,5 g λίπους/100g γάλακτος, αντίστοιχα. Το αποβουτυρωμένο γάλα περιέχει πολύ μικρό ποσοστό λίπους (0,1 – 0,2%). [11]

Όταν το γάλα φθάνει στην γαλακτοβιομηχανία ζυγίζεται, αναλύεται, έτσι ώστε να καταγραφούν τα χαρακτηριστικά του, και αποθηκεύεται στους 4 – 6°C. Στη συνέχεια, το γάλα περνά από πολλές διεργασίες, προκειμένου να παραχθούν τα επιθυμητά γαλακτοκομικά προϊόντα της κάθε γαλακτοβιομηχανίας. [11]

Αρχικά, το γάλα χρειάζεται να διαυγαστεί, για να απομακρυνθούν τυχόν σωματίδια ρύπων, όπως άμμος, χώμα και σκόνη, ενώ στη συνέχεια με τις μεθόδους της φυγοκέντρισης και της μικροδιήθησης απομακρύνονται βακτήρια, σπόρια και σωματικά κύτταρα, αφού με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται η διάρκεια ζωής και οι οργανοληπτικές ιδιότητες των γαλακτοκομικών προϊόντων. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η αποβουτύρωση του γάλακτος, κατά την οποία διαχωρίζεται το σφαιρικό λίπος από τον ορό. Η διαδικασία αυτή συνδυάζεται με την παστερίωση και ένα σύστημα

τυποποίησης λίπους, για το γάλα και την κρέμα γάλακτος. Αυτό πραγματοποιείται, για την παραγωγή άλλων γαλακτοκομικών προϊόντων όπως το συμπυκνωμένο γάλα, το γάλα σε σκόνη, το παγωτό, το τυρί και άλλα. Το σημερινό επίσημο πρότυπο για την παστερίωση απαιτεί θέρμανση στους 71,7°C για 15 δευτερόλεπτα. Έπειτα από τις παραπάνω διαδικασίες το γάλα είναι έτοιμο να υποστεί τις κατάλληλες διεργασίες, ώστε να παραχθούν τα επιθυμητά γαλακτοκομικά προϊόντα. [11]



Εικόνα 4: Παραγωγή και χρήση γάλακτος στην Ευρώπη το 2021 [6]

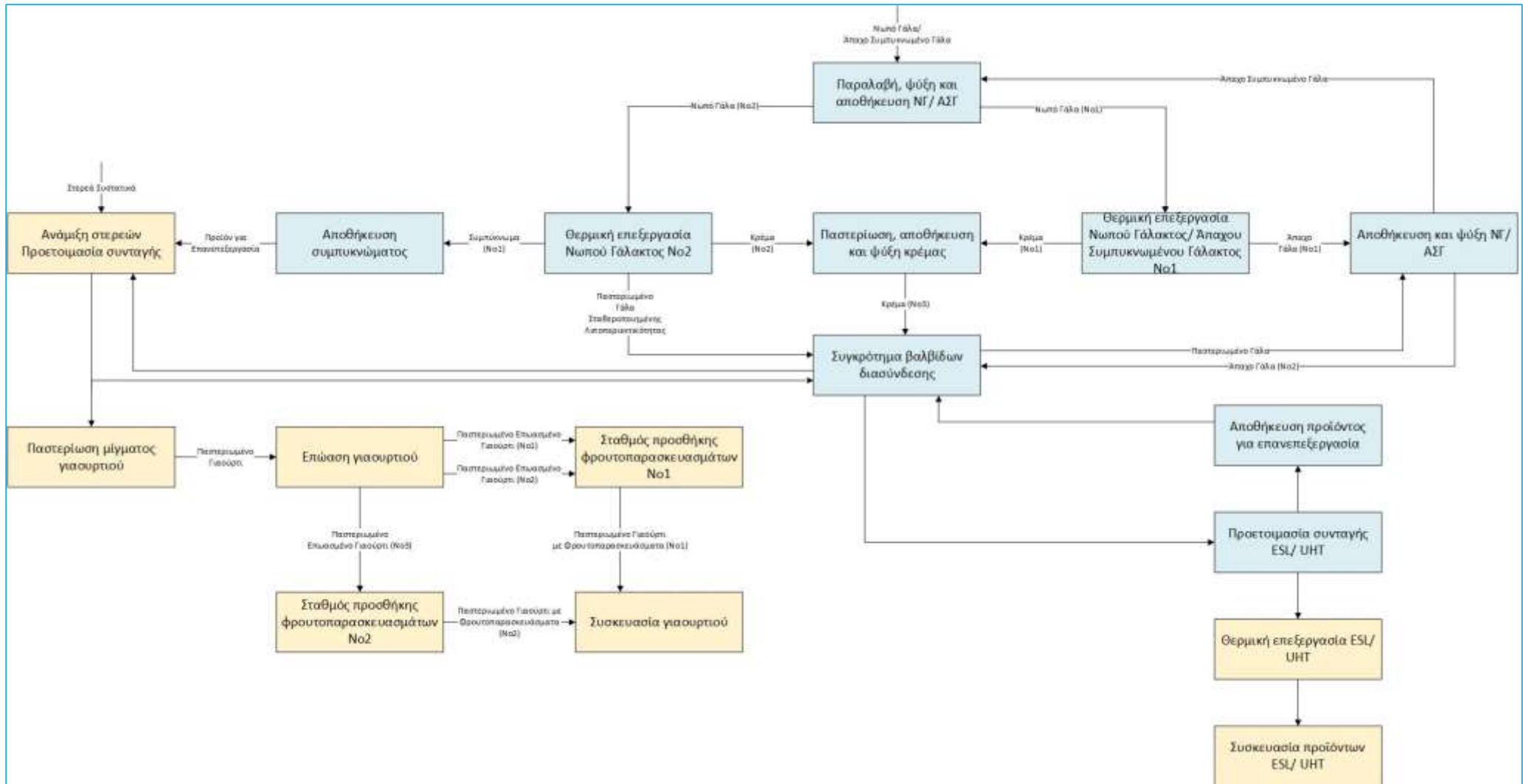
Οι εισροές και εκροές της υπό μελέτη γαλακτοβιομηχανίας αναγράφονται στον Πίνακα 1 και στον Πίνακα 2, αντίστοιχα, ενώ ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός της αναγράφεται στον Πίνακα 3. Επιπλέον, το διάγραμμα ροής της παραγωγικής διαδικασίας φαίνεται στην Εικόνα 5. [12]

Πίνακας 1: Εισροές στην υπό μελέτη γαλακτοβιομηχανία [12]

Εισροές	[tn/year]	
	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
Γάλα	25000	27000
Κρέμα γάλακτος	1000	1300
Πρωτεΐνες γάλακτος	2050	2170
Φρουτοπαρασκευάσματα/ Βοηθητικές ύλες	275	300
Βοηθητικές ύλες (γλυκόζη, σάκχαρα, βιταμίνες κ.α.)	1400	1400
Σύνολο	29725	32170

Πίνακας 2: Εκροές από την υπό μελέτη γαλακτοβιομηχανία [12]

Εκροές	[tn/year]
Γιαούρτια και επιδόρπια γιαουρτιών (στραγγιστά)	5675
Επιδόρπια γιαουρτιών (στραγγιστά), εμπλουτισμένα ή με (φρούτο)παρασκευάσματα	3405
Επιδόρπια γιαουρτιών εμπλουτισμένα, για ηλικίες από τον 6ο μήνα με (φρούτο)παρασκευάσματα	1135
Επιδόρπια γιαουρτιών για παιδιά, με (φρούτο)παρασκευάσματα και onecups με δημητριακά	1135
Γάλατα υψηλής παστερίωσης διαφορετικής λιποπεριεκτικότητας	10425
Γάλατα υψηλής παστερίωσης με κακάο	1050
Εμπλουτισμένα γάλατα υψηλής παστερίωσης	1740
Ροφήματα γάλακτος υψηλής παστερίωσης για παιδιά	2085
Κρέμες γάλακτος UHT	5550
ΣΥΝΟΛΑ	32200

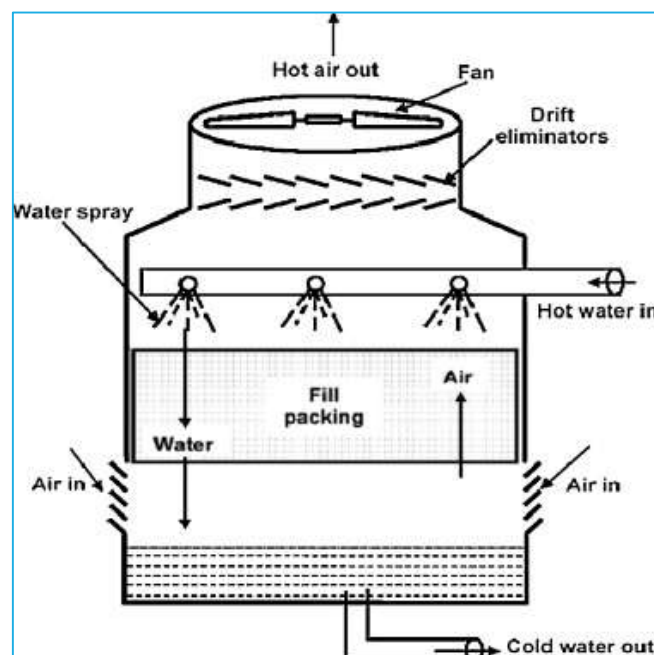


Εικόνα 5: Συνολικό διάγραμμα ροής παραγωγικής διαδικασίας της υπό μελέτη γαλακτοβιομηχανίας [12, 13]

Πίνακας 3: Κατανομή ενεργειακής κατανάλωσης στην υπό μελέτη γαλακτοβιομηχανία [12]

A/A	Εξοπλισμός	Κατανάλωση ενέργειας [kWh/day]
1	Παραλαβή και αποθήκευση νωπού	892,8
2	Παστερίωση γάλακτος	4785,6
3	Παστερίωση και αποθήκευση κρέμας	460,8
4	Προετοιμασία μιγμάτων	1382,4
5	Παστερίωση γιαουρτιού	1672,8
6	Ετοιμασία συνταγής γάλακτος	696,0
7	Θερμική επεξεργασία UHT/ESL γάλακτος και κρέμας γάλακτος	7833,6
8	Ωρίμανση γιαουρτιού	1800,0
9	Συσκευασία γιαουρτιού	3423,6
10	Συσκευασία γάλακτος – κρέμας	7248,0
11	Ψύξη και αποθήκευση γιαουρτιού	2688,0
12	Παραγωγή και διανομή διαλυμάτων καθαρισμού	1514,4
13	Συγκρότημα κεντρικής ψύξης εργοστασίου	28518,0
14	Συγκρότημα ψύξης αποθήκης πρώτων υλών	914,4
15	Λεβητοστάσιο	1627,2
16	Συγκρότημα πεπιεσμένου αέρα	6108,0
17	Εγκατάσταση κεντρικής επεξεργασίας νερού	2068,8
18	Πυροσβεστικό δίκτυο	636,0
19	Συγκρότημα επεξεργασίας αποβλήτων	4459,2
20	Παροχή εφεδρικής ισχύος	16320,0
21	Μεταφορικά συστήματα	180,0
	Σύνολο	95229,6

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3, το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας καταναλώνεται στο συγκρότημα κεντρικής ψύξης του εργοστασίου, όπου κατατάσσονται και οι πύργοι ψύξης. [12] Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το γάλα θα πρέπει να διατηρηθεί σε χαμηλή θερμοκρασία, [11] με σκοπό την αποφυγή ανάπτυξης βακτηρίων. Οι πύργοι ψύξης λειτουργούν με βάση την αρχή ψύξης με εξάτμιση και έχουν την ικανότητα να μειώνουν αποτελεσματικά τη θερμοκρασία του γάλακτος. [14] Γενικά, οι πύργοι ψύξης λειτουργούν με νερό, το οποίο ψύχεται μέσω εξάτμισης με άμεση επαφή με τον περιβάλλοντα αέρα. [15]



Εικόνα 6: Απεικόνιση λειτουργίας ενός πύργου ψύξης [15]



Εκτός από τα επιθυμητά προϊόντα, παράγονται και ορισμένα παραπροϊόντα σε μία γαλακτοβιομηχανία, όπως και ο ορός γάλακτος. Ως «ορός γάλακτος» ορίζεται συνήθως το υγρό μέρος του γάλακτος, που δεν περιέχει καζεΐνες και λίπος. Στη γαλακτοβιομηχανία ο ορός γάλακτος χαρακτηρίζεται ως γλυκός ή όξινος, στις περιπτώσεις που παράγεται κατά την παραγωγή σκληρών τυριών ή φρέσκων τυριών, κρεμών και στραγγιστών γιαουρτιών, αντίστοιχα. [16] Ο όξινος ορός γάλακτος αποτελεί το κύριο παραπροϊόν της παραγωγής τυριού και περιέχει υψηλά ποσοστά οργανικού φορτίου. [17] Συγκεκριμένα, στην υπό μελέτη γαλακτοβιομηχανία παράγονται 25 tons/week όξινου ορού γάλακτος, το οποίο παράγεται από τις διεργασίες της γαλακτοβιομηχανίας, που έχουν κίτρινο χρώμα στην Εικόνα 5. [13] Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η σύνθεση του όξινου ορού γάλακτος είναι αυτή, που αναγράφεται στον Πίνακα 4. [18]

Πίνακας 4: Σύνθεση όξινου ορού γάλακτος [18]

Συστατικό	Επί τοις εκατό περιεκτικότητα
Νερό	94-95
Ξηρή ύλη	5-6
Λακτόζη	3,8-4,3
Γαλακτικό οξύ	έως 0,8
Ολική πρωτεΐνη	0,8-1,0
Πρωτεΐνη ορού γάλακτος	0,6-0,65
Κιτρικό οξύ	0,1
Μέταλλα	0,5-0,7

2.2.2. Μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Τα υγρά απόβλητα, που εξέρχονται από την υπό μελέτη γαλακτοβιομηχανία, είναι τα εξής:

- Απόβλητα από έκπλυση γραμμής παραγωγής και τυποποίησης γιαουρτιού και κρέμας (54,05%)
- Απόβλητα από τα έκπλυση χώρων, πατωμάτων κλπ. (10,81%)
- Λύματα προσωπικού (4,73%)
- Απόβλητα από τη γραμμή εμφιάλωσης γάλακτος, εμπλουτισμένου γάλακτος και ροφημάτων από γάλα υψηλής παστερίωσης (30,41%)

Όλα τα παραπάνω υγρά απόβλητα, εκτός από τα λύματα του προσωπικού, οδηγούνται σε μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, που βρίσκεται εντός του χώρου εγκατάστασης. Τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων, που επεξεργάζονται στην μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, αναγράφονται στον Πίνακα 5, ενώ οι επιμέρους μονάδες, που περιέχονται σε αυτή, απεικονίζονται στην Εικόνα 7 και περιγράφονται παρακάτω. Τα λύματα του προσωπικού και τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα, που εξέρχονται από τη μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, οδηγούνται σε εξωτερική μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Προκειμένου να αποθεθούν στην εξωτερική αυτή μονάδα, τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα θα πρέπει να τηρούν τις παρακάτω προδιαγραφές: [12]

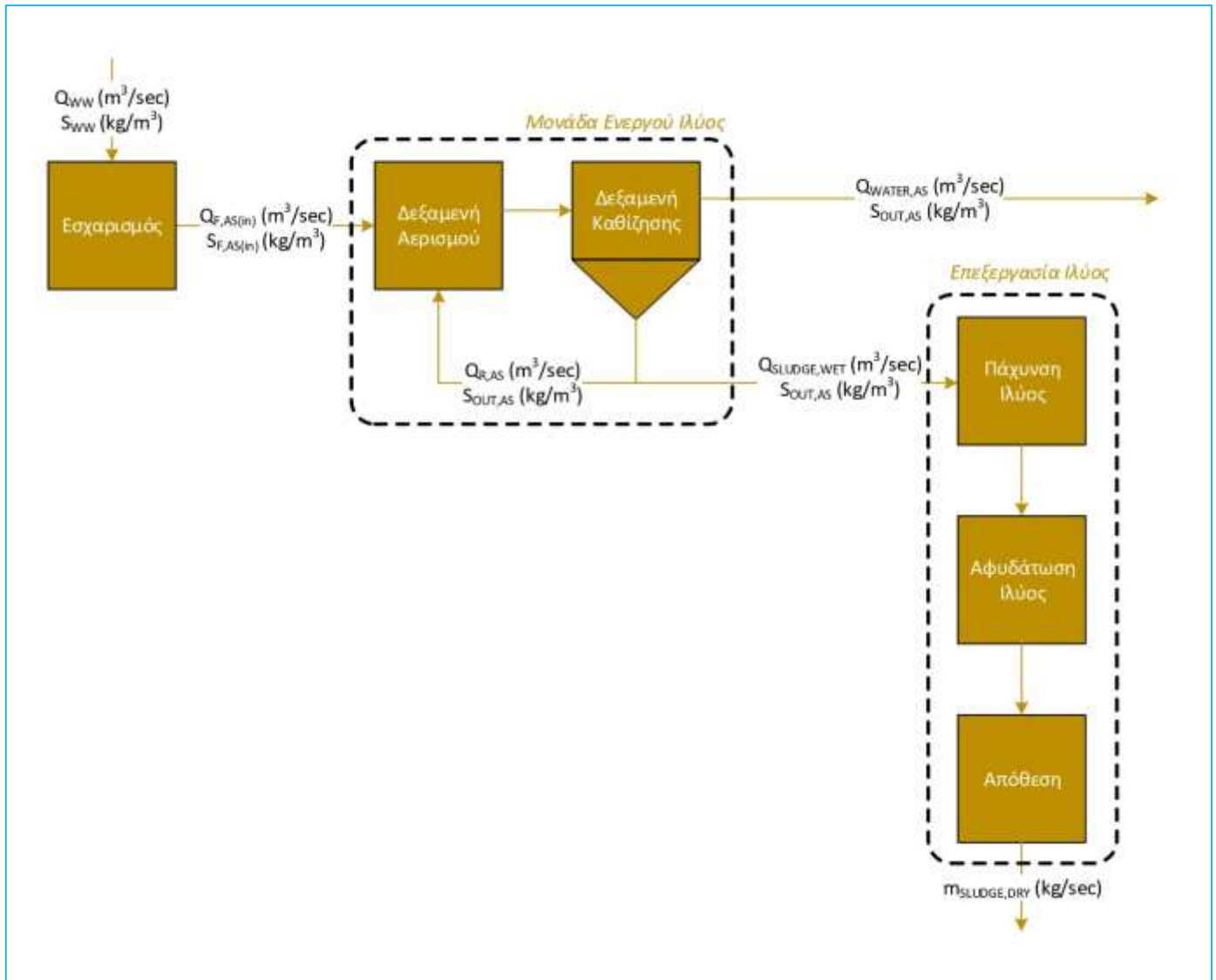
$$\text{BOD}_5 < 0,5 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{COD} < 1,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{TSS} < 0,5 \text{ kg/m}^3$$

Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά εξερχόμενων υγρών αποβλήτων από την υπό μελέτη γαλακτοβιομηχανία

Αναφορά	Q_{ww} (m^3/day)	BOD_{5ww} (kg/m^3)	COD_{ww} (kg/m^3)	TSS_{ww} (kg/m^3)
[12]	141	1,267	2,189	1,004
[19]	488	1,211	1,640	1,250
[19]		1,751	2,166	4,220
[19]		1,197	1,618	0,950
[20]		1,403	2,545	0,742
[20]	498	0,844	1,434	0,685
[20]		1,080	2,560	0,875
[20]		1,052	1,788	0,750
[20]		1,052	1,788	0,750
Μέση τιμή	375,7	1,226	1,993	1,309



Εικόνα 7: Διάγραμμα ροής μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων [12]

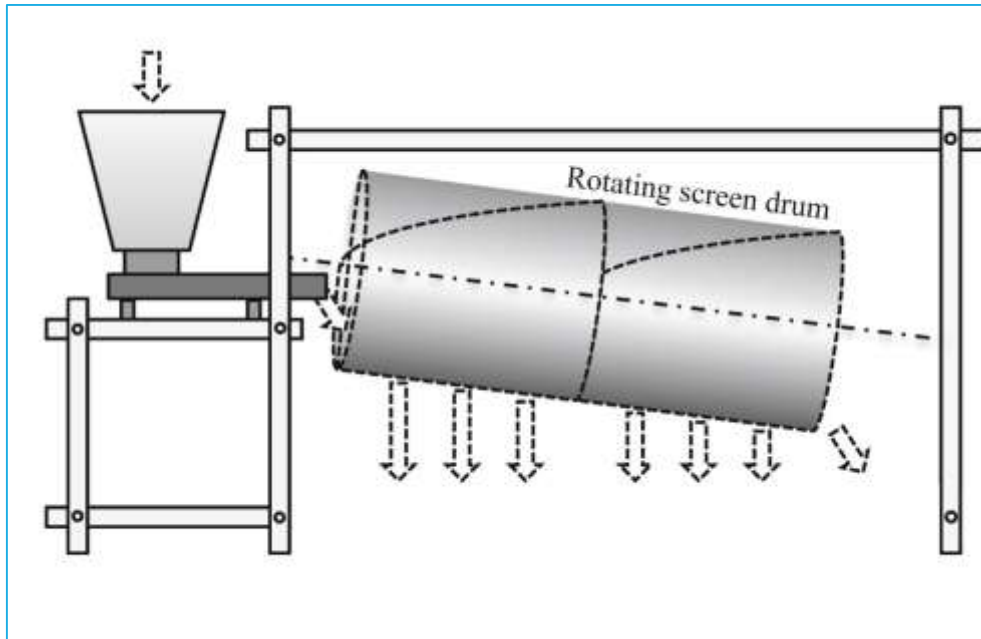
2.2.2.1. Εσχαρισμός

Το πρώτο στάδιο επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων της υπό μελέτη γαλακτοβιομηχανίας είναι ο εσχαρισμός. [12] Το στάδιο αυτό κρίνεται απαραίτητο, ως μία πρωτογενής επεξεργασία, διότι τα ογκώδη στερεά που πιθανόν να περιέχονται στα απόβλητα προκαλούν ζημιά στις αντλίες και στον υπόλοιπο εξοπλισμό των μονάδων επεξεργασίας αποβλήτων. Γενικά, η απομάκρυνση γίνεται με διατάξεις εσχαρισμού, που είναι είτε στοιχεία με παράλληλες ράβδους ή σύρματα, είτε κόσκινα, είτε διάτρητοι δίσκοι. Τα ανοίγματα μπορεί να έχουν οποιοδήποτε σχήμα, συνήθως όμως είναι είτε παραλληλόγραμμα είτε κυκλικά. Οι χονδρές σκάρες έχουν διάκενα από 1 έως 5cm, ενώ τα λεπτά κόσκινα έχουν διάκενα μικρότερα του 1,5cm έως μερικά μικρά. [21]

Οι βασικοί παράγοντες για την επιλογή διάταξης εσχαρισμού είναι η παροχή του απόβλητου, τα στερεά που χρειάζεται να κατακρατηθούν (συνεπώς το άνοιγμα των διακένων της) και ο τρόπος λειτουργίας (συνεχής ή περιοδικός καθαρισμός, αυτόματος ή χειροκίνητος). [21]

Στην προκειμένη περίπτωση, η διάταξη αποτελείται από ένα περιστρεφόμενο κόσκινο, το οποίο είναι υπεύθυνο για τον διαχωρισμό των σωματιδίων με βάση το μέγεθός τους. Οι οπές στον κύλινδρο επιτρέπουν στα μικρότερα σωματίδια να πέφτουν έξω κατά τη διάρκεια της περιστροφής, ενώ τα μεγαλύτερα κατακρατούνται στο εσωτερικό του. Η απόδοση του κόσκινου είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη ροή του προϊόντος και την ταχύτητα περιστροφής του. Επιπλέον, με αύξηση της γωνίας κλίσης του κόσκινου βελτιώνεται η απόδοση διαλογής, έως μία κρίσιμη γωνία, στην οποία δημιουργείται πολύ υψηλή ταχύτητα οριζόντιας κίνησης των σωματιδίων. [22] Το κόσκινο κατακρατά

στερεά σωματίδια μεγαλύτερα από 1,5mm, είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να είναι αυτοκαθαριζόμενο, ενώ τα εσχαρίσματα συλλέγονται σε ανοιξείδωτη σκάφη, η οποία απομακρύνεται με βαρούλκο. [12]



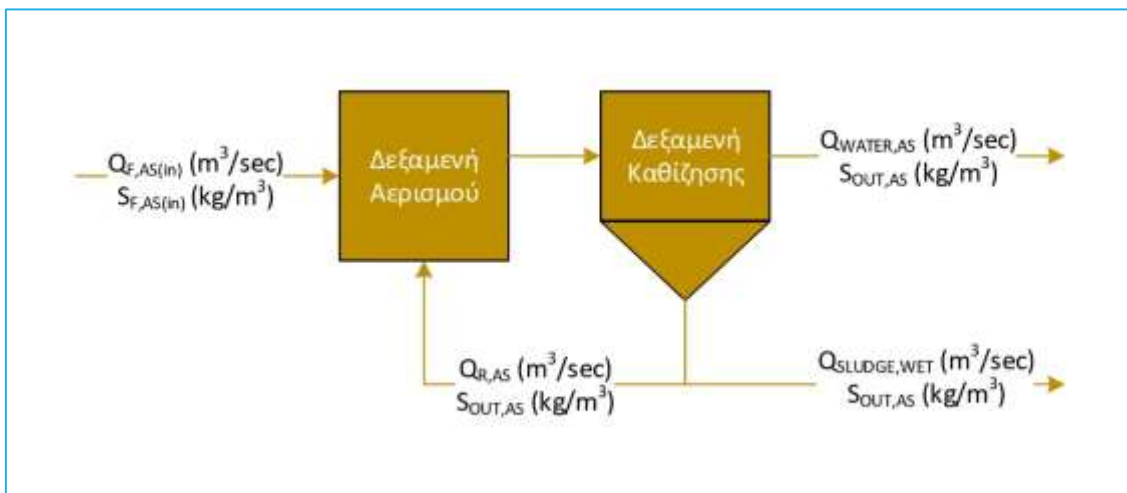
Εικόνα 8: Σχηματική αναπαράσταση περιστρεφόμενου κόσκινου [22]

2.2.2.2. Μονάδα ενεργού ιλύος

Η διεργασία της ενεργού ιλύος τυπικά περιλαμβάνει μία δεξαμενή αερισμού, όπου γίνεται και η βιολογική οξείδωση των οργανικών, και μία δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης, όπου καθιζάνουν οι μικροοργανισμοί, όπως φαίνεται στην Εικόνα 9. [21, 23]

Τα οργανικά λύματα εισέρχονται στην δεξαμενή αερισμού, όπου οξειδώνονται από μικροοργανισμούς. Το οξυγόνο παρέχεται είτε με διαχύτες είτε με επιφανειακούς αεριστήρες. Η παροχή αερισμού εξασφαλίζει και την καλή ανάμιξη του υγρού, το οποίο ονομάζεται ανάμικτο. Η βιολογική οξείδωση οδηγεί σε ανάπτυξη μικροοργανισμών, που συνοδεύεται από παραγωγή μεταβολικών προϊόντων, CO_2 , NO_3^- και SO_4^{2-} . [21, 23]

Τα κυριότερα είδη μικροοργανισμών σε μία διεργασία ενεργού ιλύος αποτελούνται από βακτήρια και μύκητες, και παράγουν λιποπολυσακχαρίτες και άλλες ουσίες, οι οποίες προκαλούν τη συσσωμάτωσή τους σε κροκίδες, που αποτελούν την ενεργό ιλύ. Η παρουσία των μυκήτων, καθώς και των νηματοειδών βακτηρίων επηρεάζει τα χαρακτηριστικά καθίζησης ιλύος στη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης δυσμενώς, μιας και εμποδίζουν το σχηματισμό κροκίδων με ικανοποιητικά χαρακτηριστικά καθίζησης. [21, 23]



Εικόνα 9: Διάγραμμα ροής μονάδας ενεργού ιλύος [21]



Η ιλύς απορροφά τα διαλυμένα και αιωρούμενα οργανικά (και ανόργανα) στερεά, τα οποία και οξειδώνει βιολογικά. Έχει παρατηρηθεί, ότι για να έχει η ιλύς καλά χαρακτηριστικά καθίζησης, πρέπει να παραμένει στο σύστημα τουλάχιστον 4 ημέρες. Οι βιολογικές κροκίδες που περιέχουν τους παραχθέντες μικροοργανισμούς καθιζάνουν σε δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης και εν μέρει ανακυκλοφορούνται, ενώ το υπόλοιπο της ιλύος απομακρύνεται (περίσσεια ιλύος), για να αποφευχθεί συσσώρευση μικροοργανισμών. Η ανακυκλοφορία επιτρέπει την διατήρηση μεγάλου χρόνου παραμονής των στερεών σε σχέση με τον υδραυλικό χρόνο παραμονής, μειώνοντας έτσι τον συνολικά απαιτούμενο όγκο για την επιθυμητή απομάκρυνση του οργανικού φορτίου. [21, 23]

Τα δεδομένα που παρέχονται από την υπό εξέταση βιομηχανία για τη μονάδα ενεργού ιλύος είναι: [12]

- Η συγκέντρωση της βιομάζας στη δεξαμενή αερισμού: $X = 3 \text{ kg MLVSS}/\text{m}^3$
- Ο λόγος τροφής/μικροοργανισμών: $F/M = 0,09 \text{ kg BOD}_5/\text{kg MLVSS day} = 1,04 \cdot 10^{-6} \text{ kg BOD}_5/\text{kg MLVSS s}$
- Ο λόγος ανακυκλοφορίας στη μονάδα ενεργού ιλύος: $R_{AS} = 150\%$

Πίνακας 6: Τιμές παραμέτρων σχεδιασμού συστημάτων ενεργού ιλύος [21]

Τύπος διεργασίας	Συμβατική	Τροποποιημένου αέρα	Ταχύρρυθμη	Εκτεταμένου αερισμού
F/M ($\text{kg BOD}_5/\text{kg MLVSS day}$)	0,2-0,5	1,5-5,0	0,4-1,5	0,05-0,15
X ($\text{kg MLVSS}/\text{m}^3$)	1,5-3,0	0,2-0,5	4,0-10,0	3,0-6,0
R_{AS} (%)	25-50	5-15	100-500	75-150

Σύμφωνα με τον Πίνακα 6 και τα δεδομένα που δίνονται για την υφιστάμενη μονάδα ενεργού ιλύος, [12] συμπεραίνεται πως η ίδια χαρακτηρίζεται ως εκτεταμένου αερισμού. Μία διεργασία ενεργού ιλύος μπορεί να μοντελοποιηθεί σύμφωνα με το μοντέλο Monod. [21, 23] Βρέθηκαν λοιπόν, βιβλιογραφικά οι παράμετροι του μοντέλου αυτού για υγρά απόβλητα που προέρχονται από γαλακτοβιομηχανία: [24]

- Ο συντελεστής απόδοσης: $Y = 0,933 \text{ mg MLVSS}/\text{mg BOD}_5 = 0,933 \text{ kg MLVSS}/\text{kg BOD}_5$
- Η σταθερά κορεσμού: $K_s = 867,76 \text{ mg}/\text{L} = 0,86776 \text{ kg}/\text{m}^3$
- Ο συντελεστής ρυθμού αφαίρεσης υποστρώματος: $k = 2,5 \text{ 1}/\text{day} = 2,89 \cdot 10^{-5} \text{ 1}/\text{s}$
- Ο μέγιστος ειδικός ρυθμός μικροβιακής ανάπτυξης: $\mu_{\max} = k \cdot Y = 2,70 \cdot 10^{-5} \text{ 1}/\text{s}$
- Ο συντελεστής ενδογενούς αναπνοής: $k_d = 0,015 \text{ 1}/\text{day} = 1,74 \cdot 10^{-7} \text{ 1}/\text{s}$

Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορεί να υπολογισθεί αρχικά ο μέσος χρόνος υδραυλικής παραμονής, μέσω της σχέσης που δίνει τον λόγο τροφής/μικροοργανισμών, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 1. [21, 23]

$$F/M = \frac{S_{F,AS}}{\theta X} \Rightarrow \theta = \frac{S_{F,AS}}{F/M X}$$

Εξίσωση 1

όπου θ : ο μέσος χρόνος υδραυλικής παραμονής [s]

$S_{F,AS}$: το οργανικό φορτίο ($\text{BOD}_{5F,AS}$, $\text{COD}_{F,AS}$, $\text{TSS}_{F,AS}$) των υγρών αποβλήτων που εισέρχονται στη



μονάδα ενεργού ιλύος $[\text{kg BOD}_5/\text{m}^3]$

X: η συγκέντρωση της βιομάζας στη δεξαμενή αερισμού $[\text{kg MLVSS}/\text{m}^3]$

F/M: ο λόγος τροφής/μικροοργανισμών $[\text{kg BOD}_5/\text{kg MLVSS s}]$

Στη συνέχεια, από τον ορισμό του μέσου χρόνου υδραυλικής παραμονής μπορεί να υπολογισθεί ο όγκος του υγρού στη δεξαμενή αερισμού, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 2. [21, 23]

$$\theta = \frac{V}{Q_{F,AS}} \Rightarrow V = Q_{F,AS}\theta \quad \text{Εξίσωση 2}$$

όπου V: ο όγκος του υγρού στη δεξαμενή αερισμού $[\text{m}^3]$

θ: ο μέσος χρόνος υδραυλικής παραμονής $[\text{s}]$

$Q_{F,AS}$: η ογκομετρική παροχή των υγρών αποβλήτων που εισέρχονται στη μονάδα ενεργού ιλύος $[\text{m}^3/\text{s}]$

Υπολογίζεται επίσης, η ογκομετρική παροχή της λάσπης που ανακυκλοφορείται στη δεξαμενή αερισμού από τον ορισμό του λόγου ανακυκλοφορίας, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 3. [21, 23]

$$R_{AS} = \frac{Q_{R,AS}}{Q_{F,AS}} \Rightarrow Q_{R,AS} = R_{AS}Q_{F,AS} \quad \text{Εξίσωση 3}$$

όπου $Q_{R,AS}$: η ογκομετρική παροχή της λάσπης που ανακυκλοφορείται στη μονάδα ενεργού ιλύος $[\text{m}^3/\text{s}]$

R_{AS} : ο λόγος ανακυκλοφορίας στη μονάδα ενεργού ιλύος $[\%]$

$Q_{F,AS}$: η ογκομετρική παροχή των υγρών αποβλήτων που εισέρχονται στη μονάδα ενεργού ιλύος $[\text{m}^3/\text{s}]$

Εφόσον θεωρήθηκε ότι το μοντέλο Monod περιγράφει ικανοποιητικά τη βιολογική διεργασία, που εκτυλίσσεται στη μονάδα ενεργού ιλύος, και σύμφωνα με τα ισοζύγια μάζας που εφαρμόζονται σε αυτή, καταστρώνονται η Εξίσωση 4 και η Εξίσωση 5, όπως φαίνεται παρακάτω. Με τις δύο αυτές εξισώσεις είναι πλέον δυνατόν να υπολογισθεί το οργανικό φορτίο του υγρού που εξέρχεται από τη μονάδα ενεργού ιλύος $S_{OUT,AS}$, αφού οι μόνοι άγνωστοι είναι το $S_{OUT,AS}$ και το θ_c . [21, 23]

$$S_{OUT,AS} = \frac{\left(\frac{1 + R_{AS}}{\theta + R_{AS}\theta_c} + k_d\right) K_s}{\mu_{\max} - k_d - \frac{1 + R_{AS}}{\theta + R_{AS}\theta_c}} \quad \text{Εξίσωση 4}$$

$$X = \frac{Y(S_{F,AS} - S_{OUT,AS})}{\frac{1 + R_{AS}}{\theta + R_{AS}\theta_c} + k_d} \frac{1}{\theta} \Rightarrow \theta_c = \frac{\frac{Y(S_{F,AS} - S_{OUT,AS})}{X\theta} - k_d}{R_{AS}} \quad \text{Εξίσωση 5}$$

όπου $S_{OUT,AS}$: το οργανικό φορτίο ($\text{BOD}_{5,F,AS}$, $\text{COD}_{F,AS}$, $\text{TSS}_{F,AS}$) των υγρών αποβλήτων που εξέρχονται από τη μονάδα ενεργού ιλύος $[\text{kg}/\text{m}^3]$

R_{AS} : ο λόγος ανακυκλοφορίας στη μονάδα ενεργού ιλύος $[\%]$

X: η συγκέντρωση της βιομάζας στη δεξαμενή αερισμού $[\text{kg}/\text{m}^3]$

$S_{F,AS}$: το οργανικό φορτίο ($\text{BOD}_{5,F,AS}$, $\text{COD}_{F,AS}$, $\text{TSS}_{F,AS}$) των υγρών αποβλήτων που εισέρχονται στη μονάδα ενεργού ιλύος $[\text{kg}/\text{m}^3]$

θ: ο μέσος χρόνος υδραυλικής παραμονής $[\text{s}]$



θ_c :	παράμετρος της μονάδας ενεργού ιλύος [s]
μ_{\max} :	ο μέγιστος ειδικός ρυθμός μικροβιακής ανάπτυξης [$1/s$]
K_S :	η σταθερά κορεσμού [kg/m^3]
k_d :	ο συντελεστής ενδογενούς αναπνοής [$1/s$]

Σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις υπολογίζεται το BOD_5 στην έξοδο της μονάδας ενεργού ιλύος, αφού οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν αντιστοιχούν στο μέγεθος αυτό. Επομένως, θεωρείται ότι το οργανικό φορτίο μειώνεται στο ίδιο ποσοστό, με αποτέλεσμα να υπολογίζονται τελικά τα COD και TSS.

Η παράμετρος θ_c δίνεται από την Εξίσωση 6, σύμφωνα με την οποία υπολογίζεται η ογκομετρική παροχή της λάσπης που εξέρχεται από τη μονάδα ενεργού ιλύος. [21, 23]

$$\theta_c = \frac{V}{Q_{SLUDGE,WET}} \Rightarrow Q_{SLUDGE,WET} = \frac{V}{\theta_c} \quad \text{Εξίσωση 6}$$

όπου $Q_{SLUDGE,WET}$:	η ογκομετρική παροχή της λάσπης που εξέρχεται από τη μονάδα ενεργού ιλύος [m^3/s]
V :	ο όγκος του υγρού στη δεξαμενή αερισμού [m^3]
θ_c :	παράμετρος της μονάδας ενεργού ιλύος [s]

Τέλος, το οργανικό φορτίο του καθαρού ρευστού είναι ίσο με $S_{OUT,AS}$, ενώ η ογκομετρική ροή του υπολογίζεται από το ισοζύγιο μάζας, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 7.

$$Q_{F,AS} = Q_{SLUDGE,WET} + Q_{WATER,AS} \quad \text{Εξίσωση 7}$$

όπου $Q_{F,AS}$:	η ογκομετρική παροχή των υγρών αποβλήτων που εισέρχονται στη μονάδα ενεργού ιλύος [m^3/s]
$Q_{SLUDGE,WET}$:	η ογκομετρική παροχή της λάσπης που εξέρχεται από τη μονάδα ενεργού ιλύος [m^3/s]
$Q_{WATER,AS}$:	η ογκομετρική παροχή του ρευστού που εξέρχεται από τη μονάδα ενεργού ιλύος [m^3/s]

Επομένως, με δεδομένα την ογκομετρική παροχή $Q_{F,AS}$ και το οργανικό φορτίο $S_{F,AS}$, που εισέρχονται στη μονάδα ενεργού ιλύος, και σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις μπορούν να υπολογιστούν η ογκομετρική παροχή $Q_{WATER,AS}$ του καθαρισμένου υγρού, η ογκομετρική παροχή $Q_{SLUDGE,WET}$ της λάσπης και το οργανικό φορτίο $S_{OUT,AS}$ των δύο αυτών ροών.

Επιπλέον, μπορεί να υπολογιστεί η συγκέντρωση εξόδου λάσπης, σύμφωνα με την Εξίσωση 8, η οποία απλοποιείται λόγω της Εξίσωσης 5. [23]

$$X_U = \frac{(1 + R_{AS})\theta_c}{\theta + R_{AS}\theta_c} \left(\frac{Y(S_{F,AS} - S_{OUT,AS})1}{\frac{1 + R_{AS}}{\theta + R_{AS}\theta_c} + k_d} \frac{1}{\theta} \right) = \frac{(1 + R_{AS})\theta_c}{\theta + R_{AS}\theta_c} X \quad \text{Εξίσωση 8}$$

όπου X_U :	η συγκέντρωση εξόδου λάσπης [kg/m^3]
$S_{OUT,AS}$:	το οργανικό φορτίο ($BOD_{5,F,AS}$, $COD_{F,AS}$, $TSS_{F,AS}$) των υγρών αποβλήτων που εξέρχονται από τη μονάδα ενεργού ιλύος [kg/m^3]
R_{AS} :	ο λόγος ανακυκλοφορίας στη μονάδα ενεργού ιλύος [%]
X :	η συγκέντρωση της βιομάζας στη δεξαμενή αερισμού [kg/m^3]

- $S_{F,AS}$: το οργανικό φορτίο ($BOD_{5F,AS}$, $COD_{F,AS}$, $TSS_{F,AS}$) των υγρών αποβλήτων που εισέρχονται στη μονάδα ενεργού ιλύος [kg/m^3]
- θ : ο μέσος χρόνος υδραυλικής παραμονής [s]
- θ_c : παράμετρος της μονάδας ενεργού ιλύος [s]

Τέλος, μπορεί να υπολογισθεί η ενέργεια που απαιτείται, σύμφωνα με την Εξίσωση 9. [25]

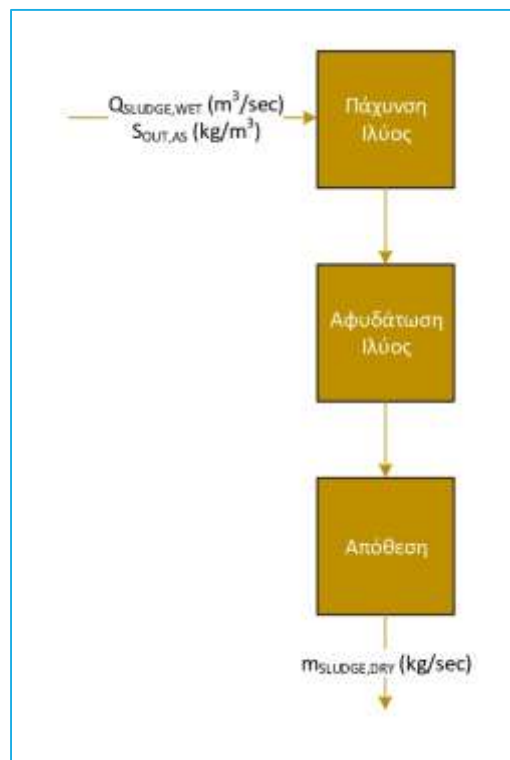
$$E_{AS} = (-0,294 \cdot \ln(Q_{F,AS}) + 3,1891)Q_{F,AS} \quad \text{Εξίσωση 9}$$

όπου E_{AS} : η ενέργεια που καταναλώνεται στη μονάδα ενεργού ιλύος [kWh/s]

$Q_{F,AS}$: η ογκομετρική παροχή των υγρών αποβλήτων που εισέρχονται στη μονάδα ενεργού ιλύος [m^3/s]

2.2.2.3. Πάχυνση, αφυδάτωση και απόθεση ιλύος

Η περίσσεια λάσπης οδηγείται για περαιτέρω επεξεργασία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10. [12]



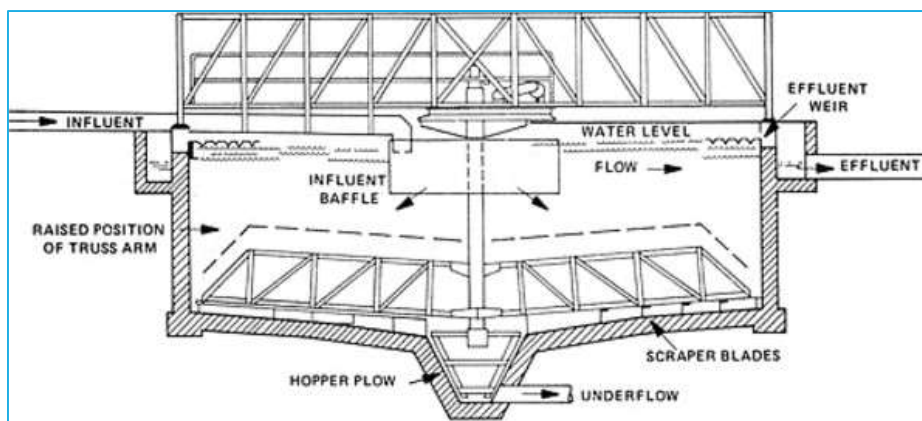
Εικόνα 10: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας ιλύος

Αρχικά, η περίσσεια λάσπης της δεξαμενής καθίζησης καταλήγει στη δεξαμενή πάχυνσης. [12] Γενικά, υπάρχουν διάφοροι τρόποι πάχυνσης, όπως αυτοί που αναγράφονται στη συνέχεια.

- Για παράδειγμα, η πάχυνση με φυγοκέντρωση χρησιμοποιείται συνήθως για την αφυδάτωση της ιλύος, ενώ συνήθως δεν χρησιμοποιείται για ενεργοποιημένες ιλύες.
- Η πάχυνση με ταινία βαρύτητας, επιτυγχάνει το διαχωρισμό των στερεών της ιλύος, με χρήση ενός αργά κινούμενου υφασμάτινου ιμάντα.
- Όσον αφορά στην πάχυνση με περιστρεφόμενο κόσκινο, η ιλύς εισέρχεται στο σύστημα ως εναιώρημα στην εσωτερική επιφάνειά του και στραγγίζεται φυσικά για το διαχωρισμό του ελεύθερου νερού.
- Η πάχυνση με βαρύτητα χρησιμοποιείται κυρίως για πρωτογενή ιλύ και μείγματα πρωτογενούς ιλύος και ενεργοποιημένης ιλύος.

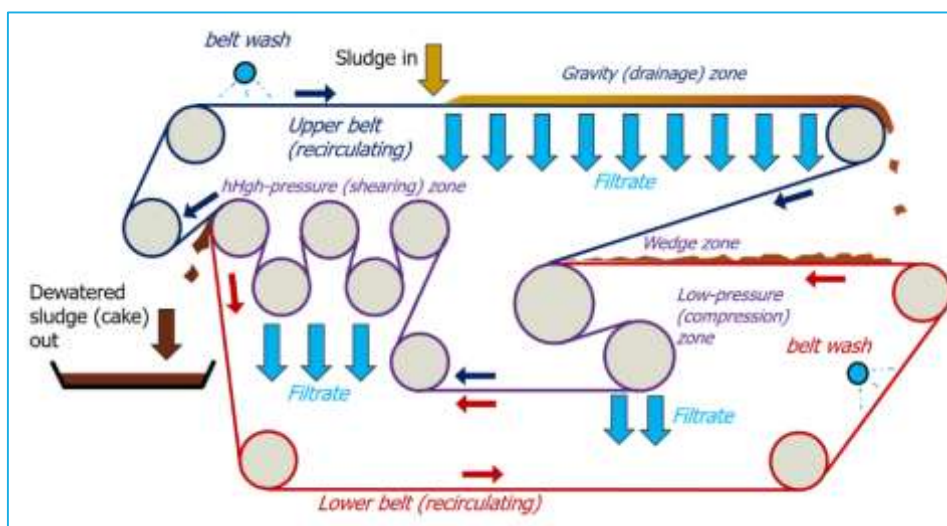
- Τέλος, η πάχυνση σε δεξαμενή επίπλευσης είναι χρήσιμη για ελαφριές ιλύες και όχι για βαριές (πρωτογενείς και ενεργοποιημένες). Στην περίπτωση επεξεργασίας δευτεροβάθμιας ιλύος παράγονται υψηλότερες συγκεντρώσεις ιλύος και δεσμεύονται καλύτερα τα στερεά.

Σε κάθε περίπτωση χρειάζεται να ληφθεί υπόψιν ο δείκτης SVI (Sludge Volume Index), αφού οι διατάξεις πάχυνσης επηρεάζονται αρνητικά αν ο δείκτης αυτός λάβει υψηλές τιμές. [26] Ο δείκτης SVI εκφράζει την ικανότητα ενός αιωρήματος οργανικών στερεών να συμπυκνώνεται με απλή καθίζηση με βαρύτητα επί 30min. [21] Η πάχυνση της ιλύος στην παρούσα μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων γίνεται με βαρύτητα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 11. [12] Ένα συνηθισμένο σύστημα πάχυνσης δια βαρύτητας αποτελείται από μία κυκλική δεξαμενή με παράπλευρο βάθος 3 έως 3,7m. Για να μπορεί η συμπυκνωμένη λάσπη να «κατρακυλά» εύκολα προς το κέντρο του πυθμένα χωρίς να κολλά στα τοιχώματα, πρέπει η κλίση του πυθμένα να είναι 60°. Το περιστρεφόμενο ξέστρο, συνήθως φέρει κάθετες βέργες, οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν την κροκίδωση της λάσπης, και ειδικό μηχανισμό συλλογής των επιπλευσάντων, που δημιουργούνται στην υγρή επιφάνεια του παχυντή. [21]



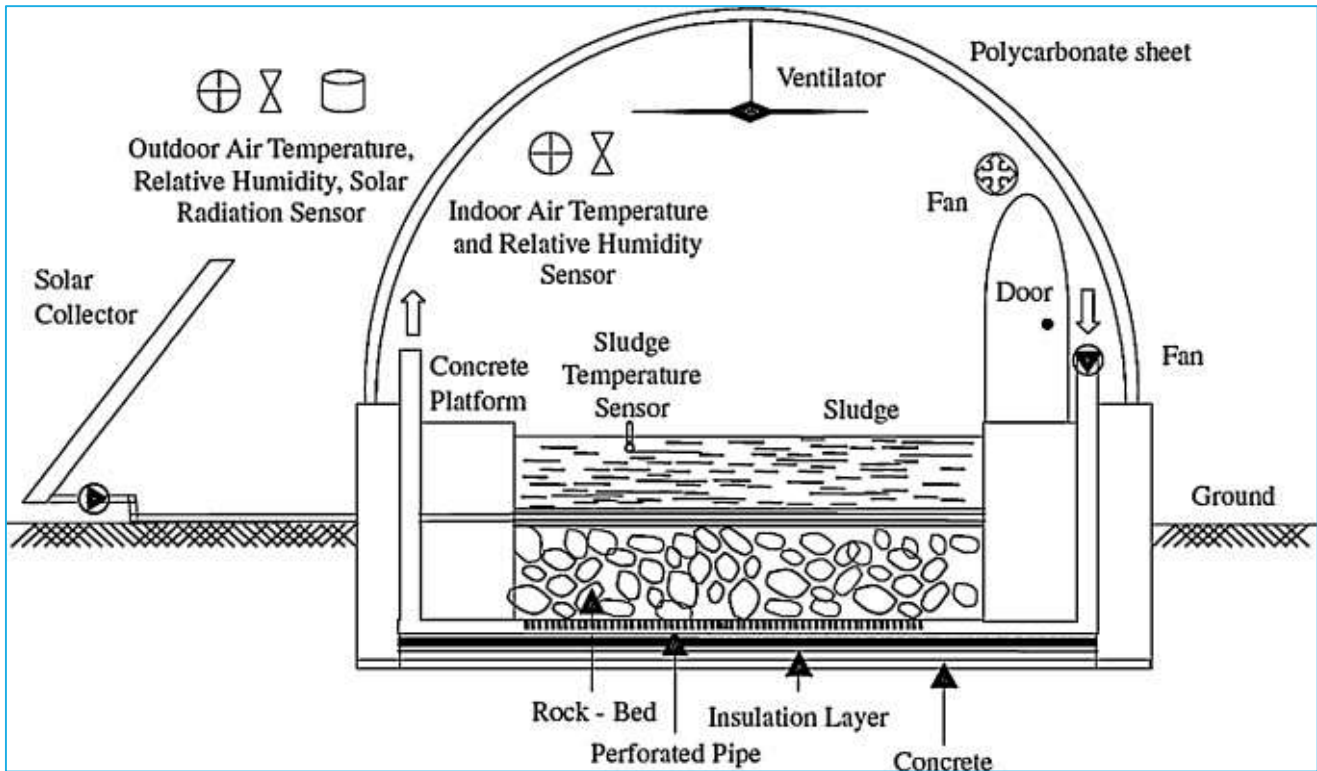
Εικόνα 11: Πάχυνση με βαρύτητα [27]

Μετά την δεξαμενή πάχυνσης ακολουθεί η αφυδάτωση της συμπυκνωμένης ιλύος. [12] Η αφυδάτωση είναι μία βασική επεξεργασία της ιλύος, γιατί διευκολύνει τη μεταφορά και το χειρισμό της και ελαττώνει τη δυνατότητα σήψης. [23] Η αφυδάτωση γίνεται είτε με φιλτρόπρεσες, είτε με ταινιοφιλτρόπρεσες, είτε με φυγοκέντριση, είτε με φίλτρα κενού. Επιπλέον, όπως και στα συστήματα πάχυνσης, η ιλύς χρειάζεται να προεπεξεργαστεί, ώστε να αποφευχθεί η καταστροφή του εξοπλισμού. [26] Στην περίπτωση που εξετάζεται χρησιμοποιείται ταινιοφιλτρόπρεσα για την αφυδάτωση της ιλύος. [12] Η διάταξη αποτελείται από δύο ιμάντες μεταξύ των οποίων περιορίζεται η ιλύς, έτσι ώστε να της ασκείται πίεση, αφυδατώνοντάς την. Ειδικότερα, υπάρχουν τρεις διακριτές ζώνες αφυδάτωσης, οι οποίες είναι η ζώνη βαρύτητας, η ζώνη πίεσης και η ζώνη διάτμισης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 12. Οι ταινιοφιλτρόπρεσες έχουν καλύτερες αποδόσεις από αυτές των φίλτρων κενού, αφού χρησιμοποιούν μόλις το 1/3 της ισχύος τους. [26]



Εικόνα 12: Απεικόνιση αφυδάτωσης ιλύος με ταινιοφιλτρόπρεσα [28]

Στη συνέχεια, η αφυδατωμένη ιλύς αποτίθεται για ηλιακή ξήρανση. [12] Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του όγκου των βιοστερεών, αποκλειστικά μέσω της ηλιακής ενέργειας, χωρίς τη χρήση προσθέτων υλικών. Η ιλύς απλώνεται σε θερμοκήπιο, όπου επιτυγχάνεται ξήρανση σε ποσοστό τουλάχιστον 70%. Επίσης, λόγω της ανάπτυξης θερμοκρασιών άνω των 50°C, η ιλύς υγιεινοποιείται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό. [23] Στην προκειμένη περίπτωση βέβαια αποτίθεται απλώς στο έδαφος ως χώμα. [12] Η ηλιακή ξήρανση μπορεί να εφαρμοστεί είτε σε παχυμένη ιλύ (περιεκτικότητα σε στερεά 2-5%), είτε σε αφυδατωμένη ιλύ (περιεκτικότητα σε στερεά έως 45%). [23]



Εικόνα 13: Κλειστό σύστημα ηλιακής ξήρανσης [29]

Θεωρείται ότι, έπειτα από τα παραπάνω στάδια, εξέρχεται ξηρή λάσπη, η μαζική παροχή της οποίας υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 10.

$$\dot{m}_{\text{SLUDGE, DRY}} = Q_{\text{SLUDGE, WET}} X_U$$

Εξίσωση 10

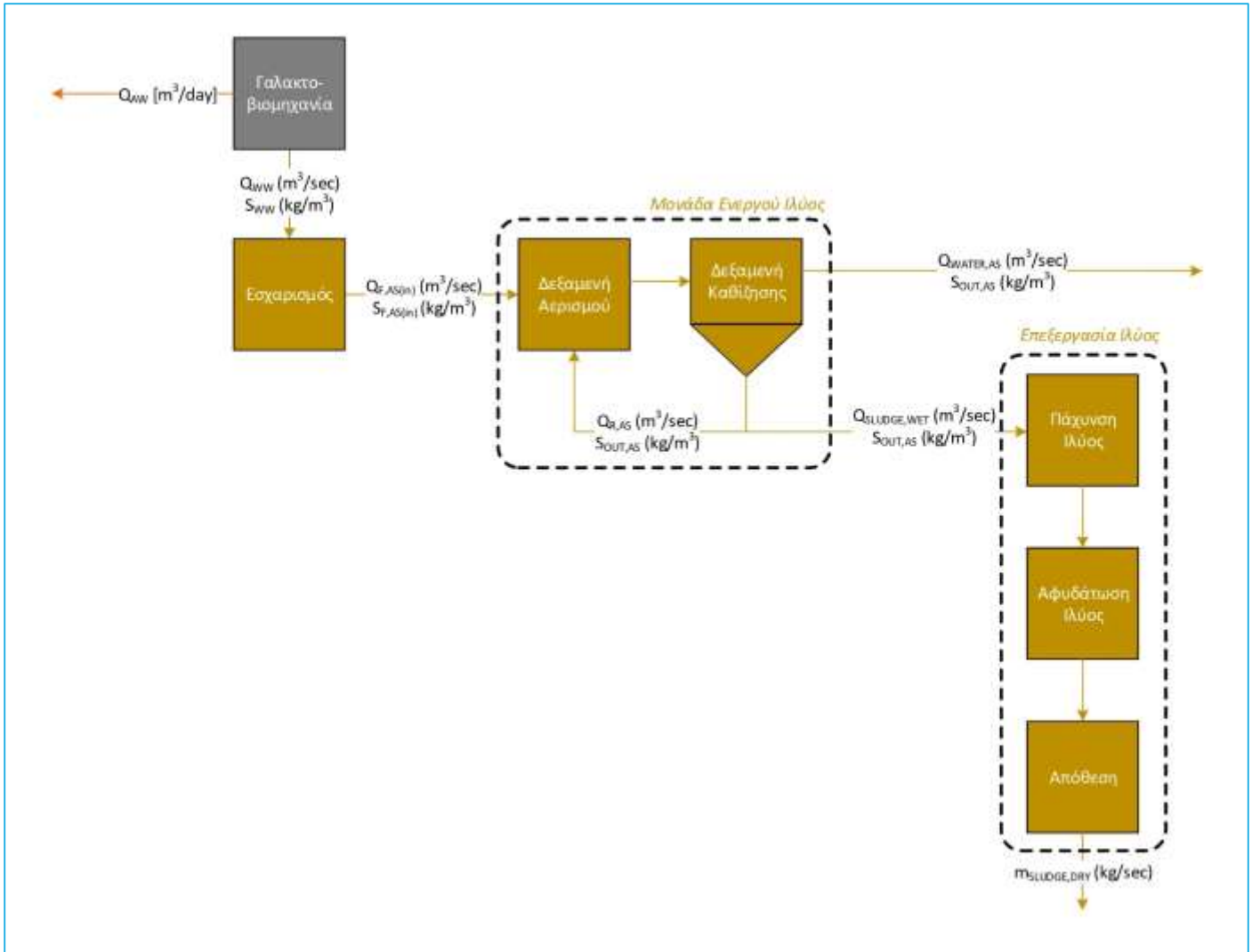
όπου $\dot{m}_{\text{SLUDGE, DRY}}$: η μαζική παροχή της ξηρής λάσπης $[\text{kg}/\text{s}]$

$Q_{\text{SLUDGE, WET}}$: η ογκομετρική παροχή της λάσπης που εξέρχεται από τη μονάδα ενεργού ιλύος $[\text{m}^3/\text{s}]$

X_U : η συγκέντρωση εξόδου λάσπης $[\text{kg}/\text{m}^3]$

2.2.3. Συνολική υφιστάμενη κατάσταση

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω η συνολική υφιστάμενη κατάσταση μπορεί να απεικονιστεί, όπως φαίνεται στην Εικόνα 14. Στο διάγραμμα αυτό η γαλακτοβιομηχανία φαίνεται σαν μία διεργασία, ενώ στην πραγματικότητα περιλαμβάνει πολλές διεργασίες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5. Επιπλέον, αγνοούνται οι εισροές και οι εκροές, που εισέρχονται και εξέρχονται αντίστοιχα, από τη γαλακτοβιομηχανία, ενώ φαίνονται οι ροές που έχουν ενδιαφέρον στην παρούσα διπλωματική εργασία. Οι ροές αυτές είναι αυτή των υγρών αποβλήτων και αυτή του όξινου ορού γάλακτος. Επιπρόσθετα, φαίνεται αναλυτικά η μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με διαφορετικό χρώμα, ώστε να είναι ευδιάκριτος ο διαχωρισμός με τη γαλακτοβιομηχανία. [12]



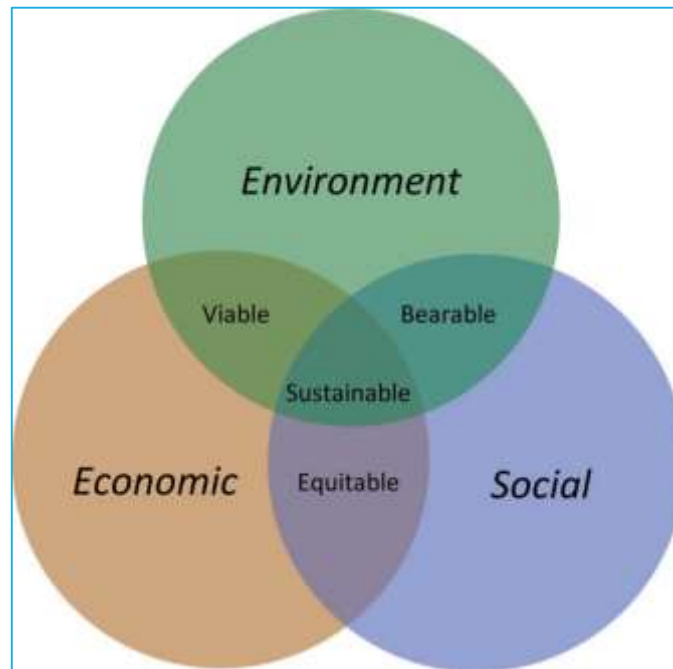
Εικόνα 14: Διάγραμμα ροής υφιστάμενης κατάστασης

2.3. Προβλήματα αειφορίας και βιωσιμότητας

Ιστορικά η βιωσιμότητα είχε συνδεθεί με το οικονομικό ζήτημα, αφού βιώσιμο σύστημα χαρακτηριζόταν αυτό που παρήγαγε τρόφιμα σε τιμή προσιτή για τους καταναλωτές, ενώ ταυτόχρονα παρείχε επαρκές εισόδημα στον παραγωγό. Πλέον, η βιώσιμη παραγωγή ανήκει σε ένα ευρύτερο πλαίσιο και αντιπροσωπεύει ένα σύστημα, που εξισορροπεί την οικονομική βιωσιμότητα, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την κοινωνική αποδοχή. Συνοπτικά ένα βιώσιμο γεωργικό-κτηνοτροφικό σύστημα είναι αυτό που παρέχει τις βασικές ανθρώπινες ανάγκες, είναι οικονομικά βιώσιμο και βελτιώνει την ποιότητα ζωής των παραγωγών και της κοινωνίας στο σύνολό της, διατηρώντας παράλληλα σταθερές τη βάση των πόρων και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. [30]

Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, έχει παρατηρηθεί αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια και στους ωκεανούς της Γης, άνοδος της στάθμης της θάλασσας, καθώς και αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί αύξηση της απορρόφησης CO₂ από τους ωκεανούς, προκαλώντας την ραγδαία μείωση των παγετώνων στον πλανήτη. Αυτές οι σημαντικές αλλαγές έχουν προκύψει κυρίως από ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, οι οποίες αυξάνονται σταθερά από την αρχή της βιομηχανικής επανάστασης, τη δεκαετία του 1750. Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι η κτηνοτροφική παραγωγή, συμπεριλαμβανομένων των σταδίων της καλλιέργειας, της μεταφοράς και της κατανάλωσης, έχει μεγάλο αντίκτυπο στην κλιματική αλλαγή. Ειδικότερα, τα βοοειδή, που έχουν τη δυνατότητα να παράγουν γάλα, επηρεάζουν σημαντικά το περιβάλλον μέσω της αρνητικής συμβολής τους στον αέρα, το νερό και το έδαφος. [8]

Η παραγωγή του γάλακτος εξακολουθεί να επηρεάζει το περιβάλλον μέσω των εκπομπών του θερμοκηπίου από την εντερική ζύμωση, τη διαχείριση της κοπριάς, την παραγωγή ζωοτροφών, τη χρήση νερού και την επεξεργασία γάλακτος. Εκτός από τις άμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις των παραπάνω, υπάρχουν επίσης επιπτώσεις που σχετίζονται με την επεξεργασία των γαλακτοκομικών προϊόντων και την επακόλουθη παραγωγή. [8]



Εικόνα 15: Οι τρεις πυλώνες της βιωσιμότητας [31]

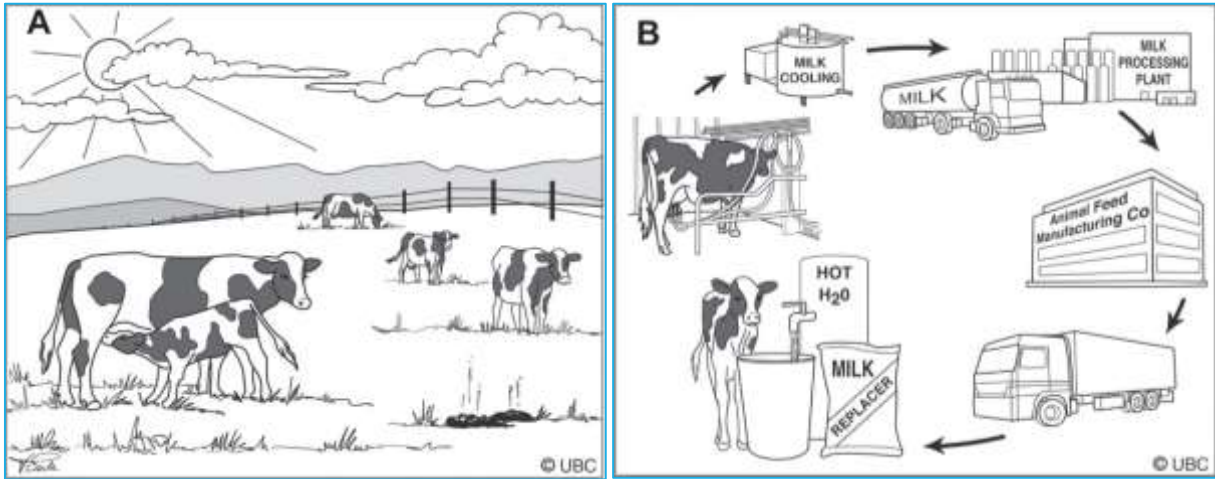
2.3.1. Εξοικονόμηση νερού

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η γεωργία-κτηνοτροφία είναι ένας από τους μεγαλύτερους καταναλωτές νερού, ενώ παράλληλα η έλλειψη νερού μπορεί να έχει βαθιές επιπτώσεις στην παραγωγή τροφίμων. Η αυξημένη χρήση του νερού συνεπάγεται αυξημένους κινδύνους, που συνδέονται με τη μόλυνση του πλανήτη. Με την αύξηση του πληθυσμού και την αυξανόμενη ζήτηση για μη αγροτικές χρήσεις του νερού, υπάρχει πίεση για μεταρρύθμιση της πολιτικής στη χρήση του νερού. Η άρδευση γίνεται όλο και πιο αμφιλεγόμενη, καθώς οι παγκόσμιοι υδροφόροι ορίζοντες εξαντλούνται. Η κτηνοτροφία παγκοσμίως αντιπροσωπεύει περίπου το ένα τρίτο του υδατικού αποτυπώματος της ανθρώπινης δραστηριότητας, ενώ το 98% του υδατικού αποτυπώματος της ζωικής παραγωγής οφείλεται στο νερό που απαιτείται για την παραγωγή ζωοτροφών. [31] Συγκεκριμένα, ο τομέας των γαλακτοκομικών προϊόντων και της επεξεργασίας γάλακτος παράγει τεράστιες ποσότητες υγρών αποβλήτων, λόγω της μεγάλης κατανάλωσης νερού για τη διατήρηση του απαιτούμενου βαθμού υγιεινής και καθαριότητας. [4]

2.3.2. Εξοικονόμηση ενέργειας

Η γαλακτοβιομηχανία έχει λάβει αρνητικές διαστάσεις όσον αφορά στο αποτύπωμα άνθρακα, ιδίως στην εξάρτησή του από μη ανανεώσιμους πόρους. Η εξάρτηση από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι εξ ορισμού μη βιώσιμη. Μια απεικόνιση της γαλακτοπαραγωγής που παρατηρείται συνήθως σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες, όπου το κόστος που συνδέεται με τη χρήση ενέργειας είναι χαμηλό, έχει μεγάλα βοσκοτόπια, όπου βόσκουν αγελάδες, η κοπριά των οποίων βοηθά στην ανάπτυξη της χλωρίδας, η οποία με τη βοήθεια του ηλίου θα συντελέσει στην τροφή των βοοειδών και κατ' επέκταση στην παραγωγή γάλακτος. Στην κατάσταση αυτή τα μοσχάρια έχουν περιορισμένη πρόσβαση στις μητέρες τους, θηλάζοντας μόνο δύο φορές την ημέρα για 30 λεπτά, μειώνοντας έτσι το εργατικό και ενεργειακό κόστος που συνδέεται με τη σίτιση των μοσχαριών μεμονωμένα με το χέρι ή με αυτοματοποιημένα συστήματα σίτισης γάλακτος. Σε ένα αντίθετο παράδειγμα η αγελάδα αρμέγεται μηχανικά και το γάλα ψύχεται, αποθηκεύεται, μεταφέρεται, ξηραίνεται, επεξεργάζεται (αφαιρώντας ορισμένα συστατικά και προσθέτοντας άλλα), διατίθεται στο εμπόριο, μεταφέρεται πίσω στη φάρμα, αναμιγνύεται με ζεστό νερό και ταΐζεται

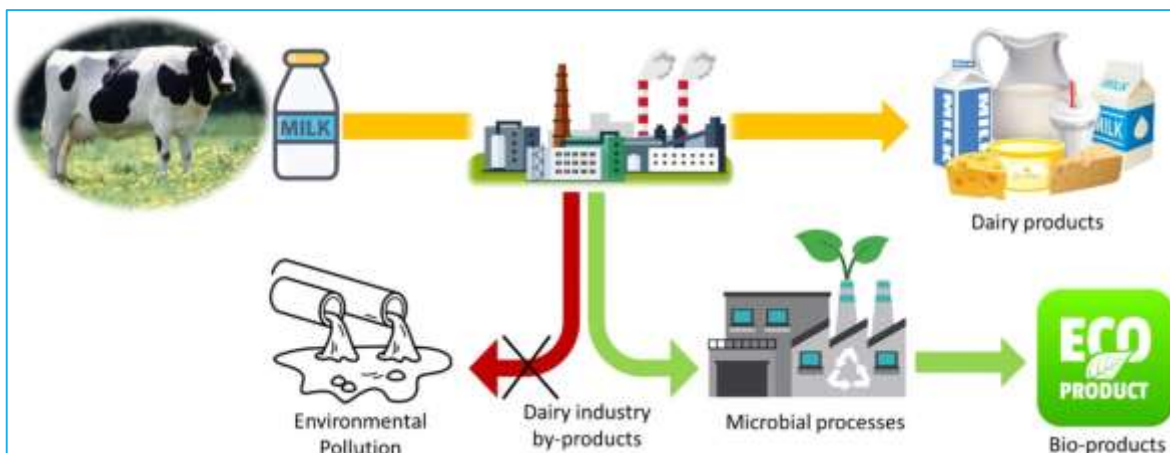
στο μοσχάρι γαλακτοπαραγωγής. Το παράδειγμα αυτό δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ενεργειακά αποδοτικό, αφού κάθε βήμα απαιτεί κατανάλωση ενέργειας. Επομένως, η βελτίωση της αποδοτικότητας της χρήσης ενέργειας στη γαλακτοβιομηχανία γίνεται όλο και πιο σημαντική, ιδίως όσον αφορά στη χρήση ενέργειας που προέρχεται από μη ανανεώσιμες πηγές, όπως το πετρέλαιο και ο άνθρακας. [31]



Εικόνα 16: Απεικόνιση διαφορών στο ενεργειακό κόστος μεταξύ (Α) αγελάδων που βοσκούν σε βοσκότοπο και (Β) αγελάδων που αρμέγονται μηχανικά, το γάλα ψύχεται, αποθηκεύεται, μεταφέρεται πίσω στη φάρμα αναμιγνύεται με ζεστό νερό και ταΐζεται στο μοσχάρι γαλακτοπαραγωγής [31]

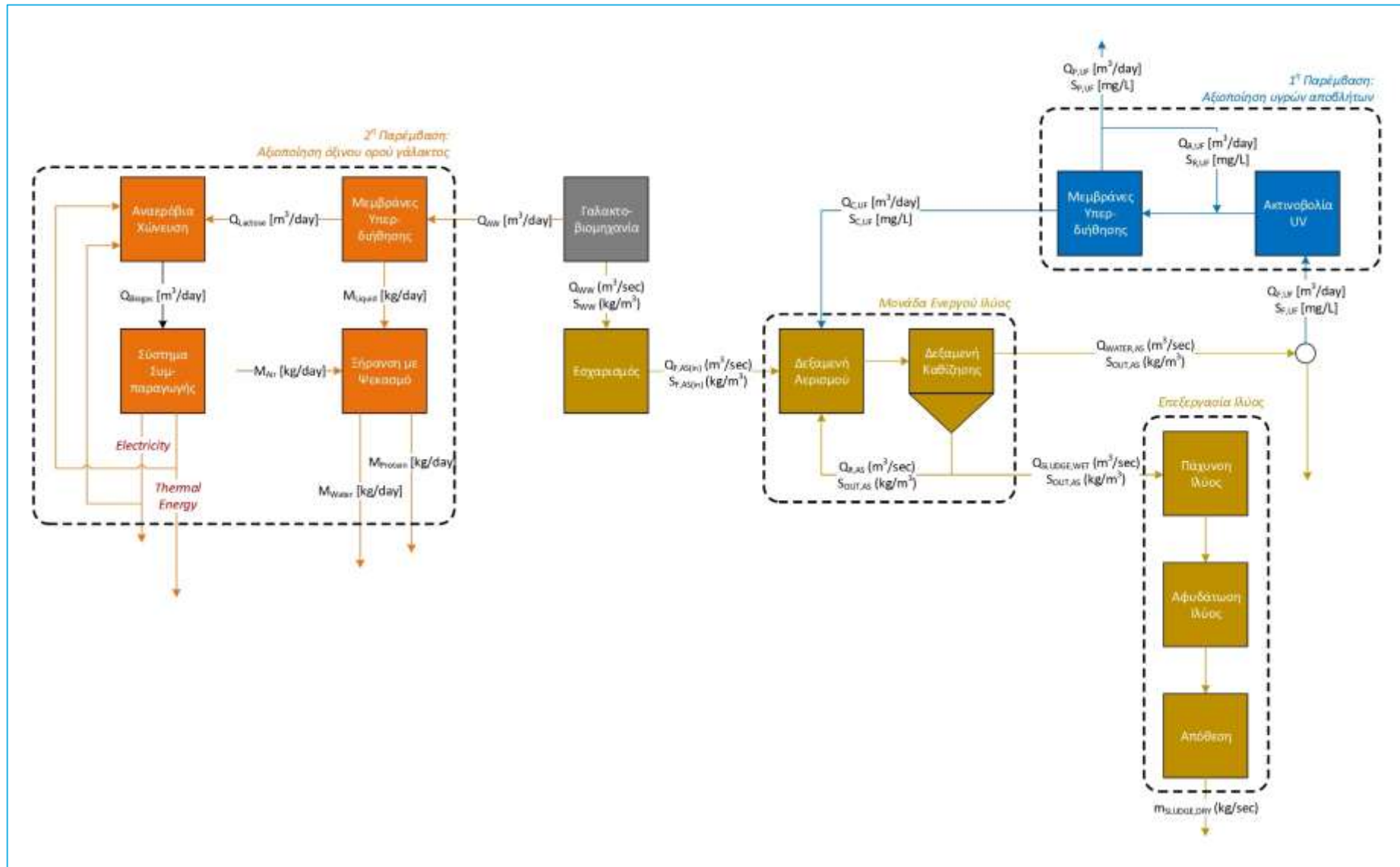
2.3.3. Εκμετάλλευση παραπροϊόντων

Ως παραπροϊόντα μίας γαλακτοβιομηχανίας θεωρούνται το τυρόγαλα, το χυμένο γάλα και τα κομμάτια τυροπήγατος. Μεταξύ αυτών είναι και ο ορός γάλακτος, ο οποίος παράγεται σε μεγάλες ποσότητες (περίπου 9L ανά 1kg παραγωγής τυριού) και προκαλεί σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα. Άλλα απόβλητα και παραπροϊόντα, που περιέχουν υψηλή περιεκτικότητα σε λίπος, καθιστούν επίσης δύσκολη την επεξεργασία αυτών των αποβλήτων. Επιπλέον, τα απόβλητα έχουν υψηλά επίπεδα BOD₅ και COD, λόγω των πρωτεϊνών γάλακτος και λακτόζης, που περιέχουν. Λαμβάνοντας υπόψιν το υψηλό οργανικό φορτίο των αποβλήτων, η επεξεργασία τους θεωρείται απαραίτητη για το περιβάλλον. Τα απόβλητα και τα παραπροϊόντα της γαλακτοβιομηχανίας αποτελούν δυνητικές πρώτες ύλες για την παραγωγή μίας ποικιλίας προϊόντων βιολογικής βάσης, μειώνοντας ταυτόχρονα το αποτύπωμα άνθρακα. [32]



Εικόνα 17: Σχηματική απεικόνιση παραγωγής γαλακτοκομικών προϊόντων και παραπροϊόντων [32]

3. Περιγραφή παρεμβάσεων για την εξασφάλιση αειφορίας και βιωσιμότητας



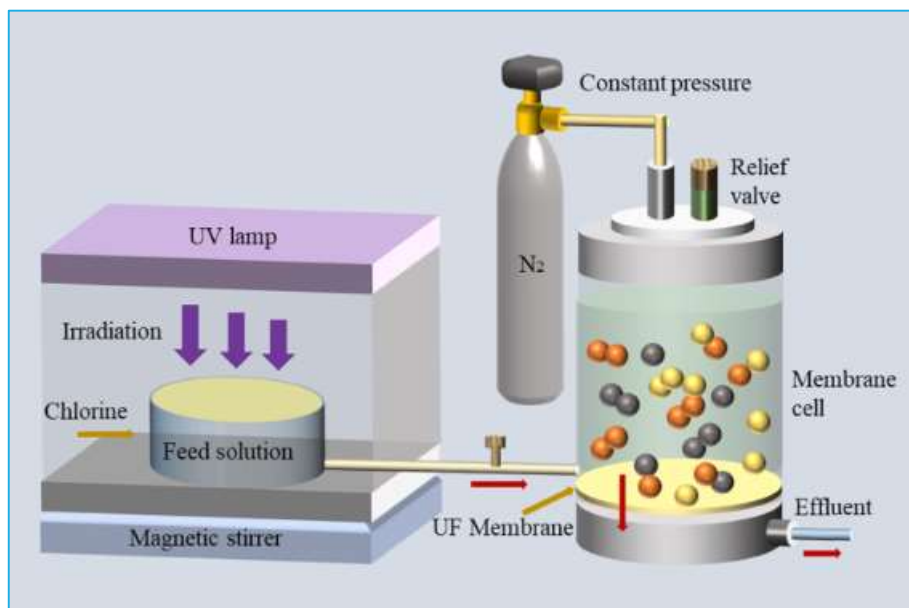
Εικόνα 18: Διάγραμμα ροής μελλοντικής κατάστασης

Η παρούσα διπλωματική είναι βασισμένη στο ερευνητικό έργο *Accel Water*. Η υπό μελέτη γαλακτοβιομηχανία, που συμμετείχε σε αυτό το ερευνητικό έργο, θεωρήθηκε ότι χρειάζεται ορισμένες παρεμβάσεις, προκειμένου να εξασφαλιστεί η αιεφορία και η βιωσιμότητά της. Το εσωτερικό της γαλακτοβιομηχανίας, αλλά και η μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων παραμένουν ως έχουν. Όμως, μέρος του καθαρισμένου νερού, που εξέρχεται από τη μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, καθώς και ο όξινος ορός γάλακτος προτείνεται να επεξεργαστούν περαιτέρω, με σκοπό να μειωθεί ο όγκος των αποβλήτων και να ανακτηθούν οι πρωτεΐνες από τον όξινο ορό γάλακτος. Συγκεκριμένα, το καθαρισμένο νερό πρόκειται να επεξεργαστεί περαιτέρω με τη βοήθεια μίας μονάδας μεμβρανών υπερδιήθησης σε συνδυασμό με απολύμανση με υπεριώδη ακτινοβολία. Παράλληλα, ο όξινος ορός γάλακτος πρόκειται να εισαχθεί αρχικά σε μία μονάδα μεμβρανών υπερδιήθησης, από τον οποίο ο συμπυκνωμένος όξινος ορός γάλακτος, που παραλαμβάνεται, ξηραίνεται με ψεκασμό, όπου συλλέγονται οι πρωτεΐνες. Τέλος, το διήθημα των μεμβρανών υπερδιήθησης οδηγείται σε μονάδα αναερόβιας χώνευσης, στην οποία παράγεται βιοαέριο, που στη συνέχεια χρησιμοποιείται σε σύστημα συμπαραγωγής, για παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Το μελλοντικό διάγραμμα ροής είναι αυτό που φαίνεται στην Εικόνα 18. [13]

3.1. Παρεμβάσεις στο ρεύμα εξόδου της μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

3.1.1. Μεμβράνη υπερδιήθησης σε συνδυασμό με απολύμανση με υπεριώδη ακτινοβολία (UV)

Οι μεμβράνες υπερδιήθησης χρησιμοποιούνται παγκοσμίως στον καθαρισμό του νερού, [2, 23] λόγω της ικανότητάς τους να κατακρατούν κολλοειδή σωματίδια και μικροοργανισμούς. Παρ' όλ' αυτά η ρύπανση της μεμβράνης από διαλυτούς οργανικούς ρύπους, όπως οι χουμικές ουσίες, οι πρωτεΐνες και οι πολυσακχαρίτες, αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα κατά τη λειτουργία τους, αφού η οργανική ύλη προκαλεί πολύπλοκους μηχανισμούς ρύπανσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται προεπεξεργασία πριν τη διαδικασία της διήθησης, με σκοπό τη μεταβολή των ιδιοτήτων και τη μείωση των συγκεντρώσεων των οργανικών ρύπων. Η οξείδωση με βάση την υπεριώδη ακτινοβολία αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη μέθοδο προεπεξεργασίας διήθησης. [2]



Εικόνα 19: Σχηματική αναπαράσταση της διεργασίας απολύμανσης με UV σε συνδυασμό με μεμβράνες UF [2]

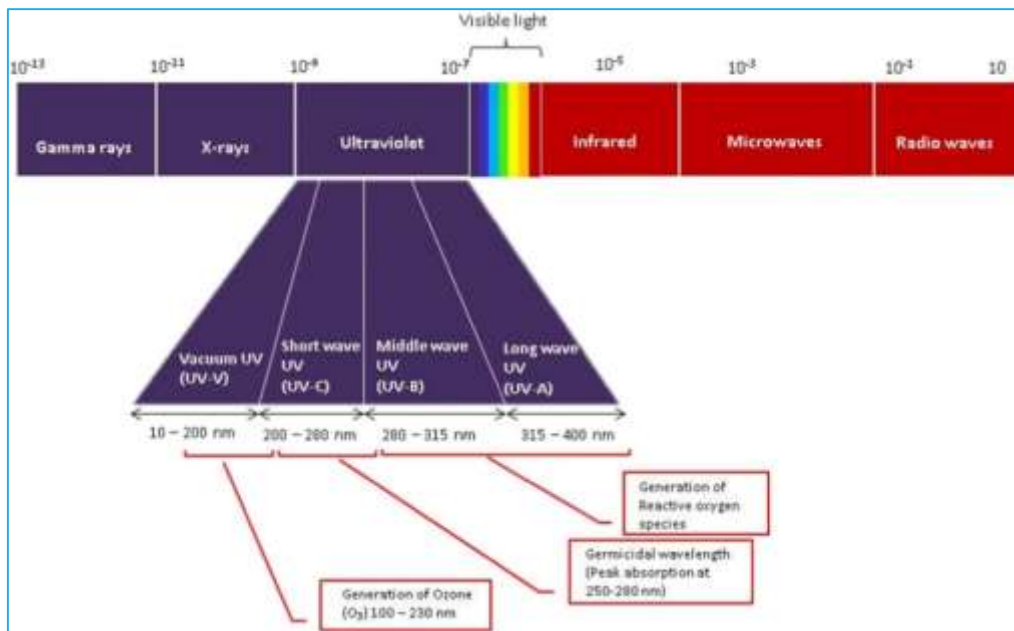
3.1.1.1. Απολύμανση με UV

Η θερμική παστερίωση μπορεί να εφαρμοστεί με διάφορες μεθόδους, όπως με επεξεργασία υπό υψηλή πίεση, με παλμικό ηλεκτρικό πεδίο, με ψυχρές πλασματικές διεργασίες, με υπερήχους και με ακτινοβολία. Μεταξύ των

προαναφερθέντων τεχνολογιών προτιμώνται αυτές που βασίζονται στην ακτινοβολία. Συγκεκριμένα, η υπεριώδης ακτινοβολία χρησιμοποιείται ήδη σε εμπορικό επίπεδο, όπως στην απολύμανση επιφανειών, όπου παρασκευάζονται τρόφιμα, καθώς και στην επεξεργασία του αέρα και του νερού. [5]

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε για την απολύμανση των υγρών αποβλήτων τη δεκαετία του 1990 όταν εξελίχθηκαν τεχνολογικά οι λάμπες και ο αντίστοιχος εξοπλισμός. Έχει πλέον αποδειχθεί ότι η κατάλληλη δόση υπεριώδους ακτινοβολίας καταπολεμά βακτήρια και ιούς, ενώ παράλληλα δημιουργεί τοξικά παραπροϊόντα. Η υπεριώδης ακτινοβολία δρα «στειρώνοντας» τους μικροοργανισμούς και συγκεκριμένα αλλοιώνοντας το DNA και το RNA εμποδίζει τη μεταφορά γενετικού υλικού και άρα την αναπαραγωγή των μικροοργανισμών. [23]

Το μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος όπου εκπέμπει η UV ακτινοβολία είναι μεταξύ 10 και 400 nm, δηλαδή μεταξύ του φάσματος των ακτίνων X και του ορατού φωτός. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 20, το υπεριώδες φάσμα μπορεί να υποδιαιρεθεί με βάση το μήκος κύματος και τις εφαρμογές, στις οποίες συναντάται. Ειδικότερα, κατανέμεται στην UVA (315 – 400nm), στην UVB (280 – 315nm) και στην UVC (< 280nm), ενώ στα μήκη κύματος μικρότερα των 200nm χαρακτηρίζεται ως υπεριώδες κενό. Η UVC είναι γνωστή ως μικροβιοκτόνος, αφού στα αντίστοιχα μήκη κύματος υφίσταται η μέγιστη απορρόφηση του DNA, με αποτέλεσμα να βλάπτει και αυτό των παθογόνων μικροοργανισμών. [5]



Εικόνα 20: Μήκη κύματος και εφαρμογές υπεριώδους ακτινοβολίας [5]

Για να παραχθεί UV ακτινοβολία, φορτίζονται λάμπες που περιέχουν ατμούς υδραργύρου ενεργοποιώντας ένα ηλεκτρικό τόξο. Η ενέργεια που παράγεται από τη διέγερση των ατμών υδραργύρου που περιέχεται στις λάμπες είναι η εκπομπή του UV φωτός. [23] Βέβαια, με τον τρόπο αυτό δεν μπορεί να ελεγχθεί το ποσό του υπεριώδους φωτός, που ακτινοβολείται, ενώ ταυτόχρονα παραμονεύουν κίνδυνοι έκθεσης των αναλώσιμων σε τοξικό υδράργυρο. Έτσι, οι λάμπες LED (Light Emitting Diodes) θεωρούνται καταλληλότερες σε σύγκριση με τις λάμπες UV, λόγω των μειωμένων εκπομπών θερμότητας, της αυξημένης διάρκειας ζωής και της μειωμένης απαιτούμενης ενέργειας. [5]

Γενικά τα συστήματα απολύμανσης με UV εντάσσονται σε 3 κατηγορίες ανάλογα με τις εσωτερικές λειτουργικές παραμέτρους των λαμπτήρων:

- Χαμηλής πίεσης και χαμηλής έντασης
- Χαμηλής πίεσης και υψηλής έντασης
- Μέσης πίεσης και υψηλής έντασης

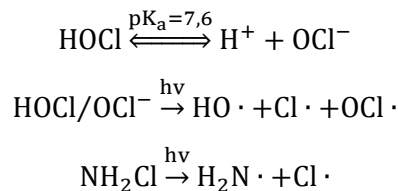
Επίσης, ανάλογα με τα υδραυλικά χαρακτηριστικά τους, τα συστήματα απολύμανσης UV κατηγοριοποιούνται ως ανοιχτού καναλιού ή κλειστού σωλήνα. [23]



Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά λαμπτήρων UV [23]

Χαρακτηριστικά	Λυχνίες χαμηλής πίεσης	Λυχνίες μέσης πίεσης
Πίεση (bar)	0,001	1-20
Θερμοκρασία (°C)	40-100	600-900
Κατανάλωση ισχύος (W)	10-500	1000-20000
Πτώση ισχύος στη διάρκεια ζωής (%)	30-40	25-40
Χρόνος ζωής (h)	8000-15000	3000-8000

Ειδικότερα, κατά την διάρκεια της φωτόλυσης με υπεριώδες φως παράγονται άφθονες ρίζες $\text{OH}\cdot$ και $\text{Cl}\cdot$, οι οποίες είναι εξαιρετικά εκλεκτικές και δραστικές ουσίες. Προτιμάται η εφαρμογή της έπειτα από βιολογικές διεργασίες, όπως συμβαίνει και στη παρούσα διπλωματική εργασία, αφού η μέθοδος αυτή υπερτερεί στην αποικοδόμηση μικρορυπαντών, λόγω του ισχυρού δυναμικού του $\text{OH}\cdot$ και της προτίμησης του $\text{Cl}\cdot$ σε ομάδες πλούσιες σε ηλεκτρόνια. Όπως φαίνεται και στις χημικές αντιδράσεις, που αναγράφονται παρακάτω, η ενέργεια της υπεριώδους ακτινοβολίας προκαλεί την παραγωγή των ριζών $\text{OH}\cdot$, $\text{Cl}\cdot$ και $\text{OCl}\cdot$, οι οποίες συμβάλλουν στην αναγωγή των διαλυμένων οργανικών ουσιών.



Βρέθηκε πως όταν εφαρμόζεται φωτόλυση με υπεριώδες φως σε συνδυασμό με μεμβράνες υπερδιήθησης, παρουσιάζεται μικρότερη αντίσταση στη ροή των μεμβρανών υπερδιήθησης, όταν προστίθεται στην τροφοδοσία της φωτόλυσης υποχλωριώδες νάτριο NaClO , έτσι ώστε η συγκέντρωση του ενεργού χλωρίου να είναι 10 mg/L , ενώ ο βέλτιστος χρόνος λειτουργίας των λαμπών υπεριώδους ακτινοβολίας είναι 8min. [2]

Επιπλέον, μία λυχνία LED των 280nm είναι αρκετά αποτελεσματική στην απολύμανση νερού, λόγω του υψηλού ρυθμού αδρανοποίησης και της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, η οποία βρέθηκε $< 1,04 \text{ kWh/m}^3$. [5] Επομένως, η ενέργεια που καταναλώνεται στις λάμπες απολύμανσης με UV υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 11.

$$E_{UV} = 1,04 Q_{F,UF}$$

Εξίσωση 11

όπου E_{UV} : η ενέργεια που καταναλώνεται στις λάμπες απολύμανσης με UV [kWh/s]

$Q_{F,UF}$: η ογκομετρική παροχή του ρευστού που εισέρχεται στη μονάδα απολύμανσης με UV [m^3/s]

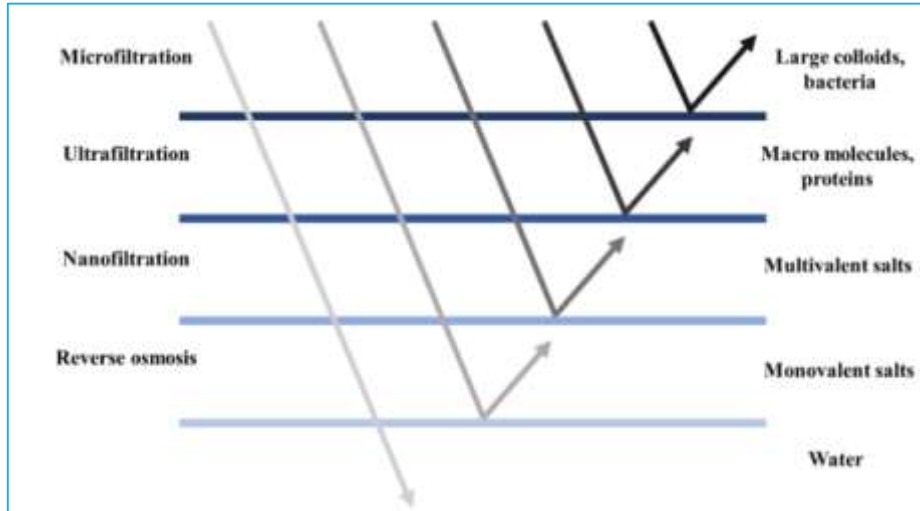
3.1.1.2. Μεμβράνες υπερδιήθησης

Σύμφωνα με το μέγεθος των σωματιδίων των συγκρατούμενων ειδών, τα συστήματα καθαρισμού νερού ταξινομούνται στην αντίστροφη ώσμωση (RO), στη νανοδιήθηση (NF), στην υπερδιήθηση (UF) και στη μικροδιήθηση (MF). [3, 33] Οι τρεις τελευταίες μπορούν να ταξινομηθούν στις μεθόδους διαχωρισμού στερεών-υγρών σωματιδίων και διαχωρισμού διαλυτών μακρομορίων, συμπεριλαμβανομένων των ιών και των βακτηρίων. [23, 34, 35]

Η υπερδιήθηση αποτελεί σημαντική διεργασία για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων (ονομαζόμενη ως «Βιοαντιδραστήρας Μεμβράνης»), όπου μολυσμένα ρεύματα καθαρίζονται, έτσι ώστε να επιστρέφεται ακόμα πιο καθαρό νερό στον υδροφόρο ορίζοντα. [34, 35] Όπως την περίπτωση που μελετάται στην παρούσα διπλωματική, η υπερδιήθηση συνδυάζεται με τη μονάδα ενεργού ιλύος, γεγονός που εξαλείφει την ανάγκη για τριτοβάθμια επεξεργασία. [34]

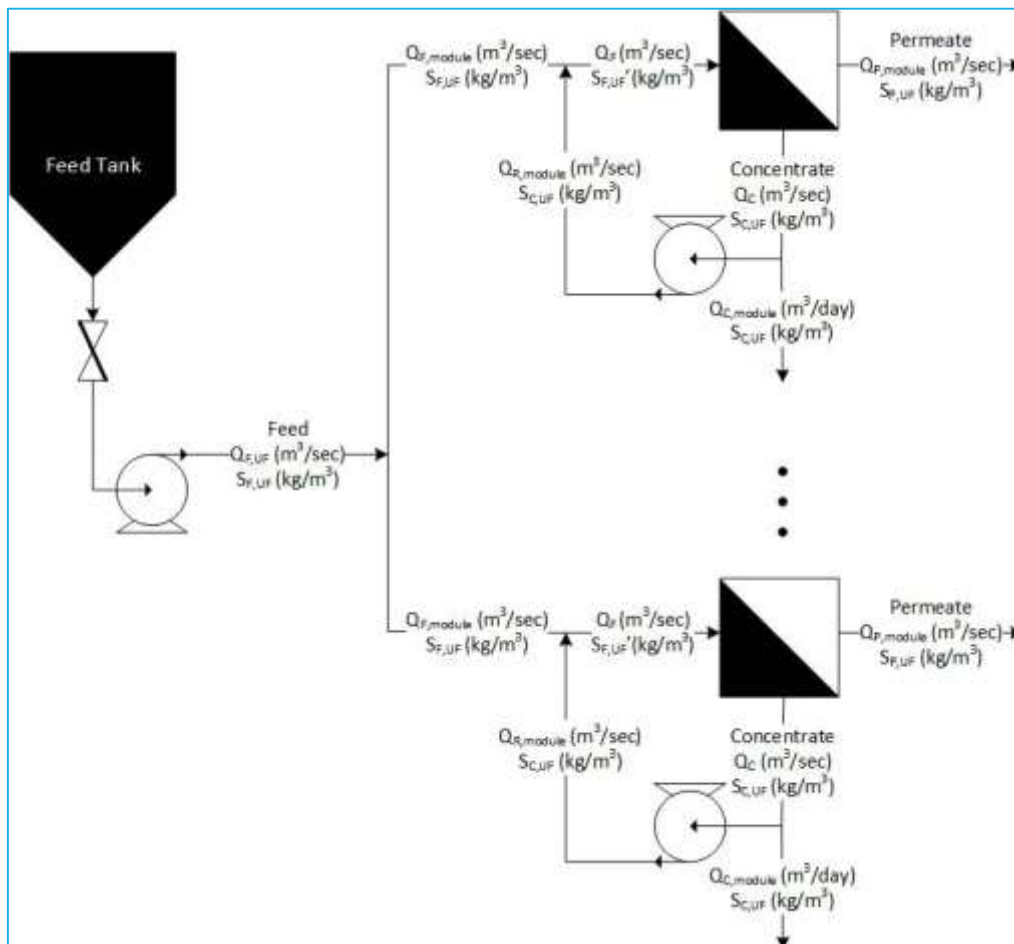
Οι μεμβράνες υπερδιήθησης χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό διαλυτών μακρομορίων, την απομάκρυνση πρωτεϊνών, ιών και βακτηρίων όσο και λιπόφωβων και λιπόφιλων πολυμερών. [23] Τα στοιχεία, τα οποία δεν

συγκρατούνται από τις μεμβράνες υπερδιήθησης είναι οι διαλύτες, τα ιόντα και άλλα μικρά διαλυτά είδη. [36] Κριτήριο διαχωρισμού αποτελεί το μοριακό βάρος των ενώσεων. Ωστόσο το σχήμα, το μέγεθος και το είδος της προς διαχωρισμό ένωσης, είναι εξίσου σημαντικές παράμετροι. [23] Συνήθως, η λειτουργία των μεμβρανών υπερδιήθησης πραγματοποιείται εξαναγκασμένα, με τη βοήθεια αντλίας, ώστε να δημιουργείται διαφορά πίεσης. [36] Η πίεση λειτουργίας κυμαίνεται μεταξύ 1 και 10 bar, ενώ το ονομαστικό μέγεθος πόρων κυμαίνεται μεταξύ 20 και 200Å. [23]



Εικόνα 21: Ταξινόμηση των μεμβρανών ως προς τα συγκρατούμενα είδη [3]

Ο χρόνος ικανοποιητικής απόδοσης των μεμβρανών εξαρτάται από το μέγεθος και τη συγκέντρωση των σωματιδίων, από το μέγεθος των πόρων της μεμβράνης και από την ταχύτητα ροής. Στα συστήματα υπερδιήθησης, εφαρμόζεται διαχωρισμός μετωπικής ροής και γενικά λόγω των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους, οι μεμβράνες είναι ανθεκτικές σε υψηλές θερμοκρασίες και ακραίες τιμές pH. [23]



Εικόνα 22: Μονάδα μεμβρανών υπερδιήθησης με περισσότερες από μία μονάδες συνδεδεμένες μεταξύ τους παράλληλα



Η ογκομετρική ροή του διηθήματος (permeate), που διαπερνά έναν πόρο, δίνεται από την εξίσωση Hagen-Poiseuille, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 12: [34, 37]

$$Q_{P(1)} = \frac{\pi d^4 \Delta P}{128 \mu \Delta x} \quad \text{Εξίσωση 12}$$

- όπου $Q_{P(1)}$: η ογκομετρική παροχή του διηθήματος διαμέσου ενός πόρου [m^3/s]
 d : η διάμετρος του πόρου [m]
 ΔP : η πτώση πίεσης [N/m^2]
 μ : το δυναμικό ιξώδες του ρεύματος τροφοδοσίας [Ns/m^2]
 Δx : το μήκος του πόρου [m]

Όπως είναι λογικό από την Εξίσωση 12, με αύξηση της πτώσης της πίεσης, αυξάνεται η ογκομετρική παροχή του διηθήματος $Q_{P(1)}$ γραμμικά έως ένα σημείο, ενώ σε υψηλότερες πιέσεις δημιουργείται πλατό, δηλαδή δημιουργείται φραγή της μεμβράνης. [33, 37] Άλλη μία παράμετρος που επηρεάζει την ογκομετρική παροχή του διηθήματος $Q_{P(1)}$ είναι η θερμοκρασία παρ' όλο που δεν περιέχεται άμεσα στην Εξίσωση 12. Βρέθηκε λοιπόν, ότι με αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται η ογκομετρική παροχή του διηθήματος $Q_{P(1)}$, γεγονός που οφείλεται στη μείωση του ιξώδους του ρευστού. [37]

Η συνολική ροή του διηθήματος ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από την Εξίσωση 13: [34, 37]

$$J = \frac{Q_{P(1)} n}{A} = Q_{P(1)} N \quad \text{Εξίσωση 13}$$

- όπου J : η συνολική ροή του διηθήματος ανά μονάδα επιφάνειας [$\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$]
 $Q_{P(1)}$: η ογκομετρική παροχή του διηθήματος διαμέσου ενός πόρου [m^3/s]
 n : ο συνολικός αριθμός πόρων [#pores]
 A : η επιφάνεια της μεμβράνης υπερδιήθησης [m^2]
 N : η πυκνότητα των πόρων [$\text{\#pores}/\text{m}^2$]

Επομένως, η συνολική ογκομετρική παροχή του διηθήματος που εγκαταλείπει μία μονάδα υπερδιήθησης θα υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 14:

$$Q_{P, \text{module}} = JA \quad \text{Εξίσωση 14}$$

- όπου $Q_{P, \text{module}}$: η ογκομετρική παροχή του διηθήματος που εγκαταλείπει μία μονάδα υπερδιήθησης [m^3/s]
 J : η συνολική ροή του διηθήματος ανά μονάδα επιφάνειας [$\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$]
 A : η επιφάνεια της μεμβράνης υπερδιήθησης [m^2]

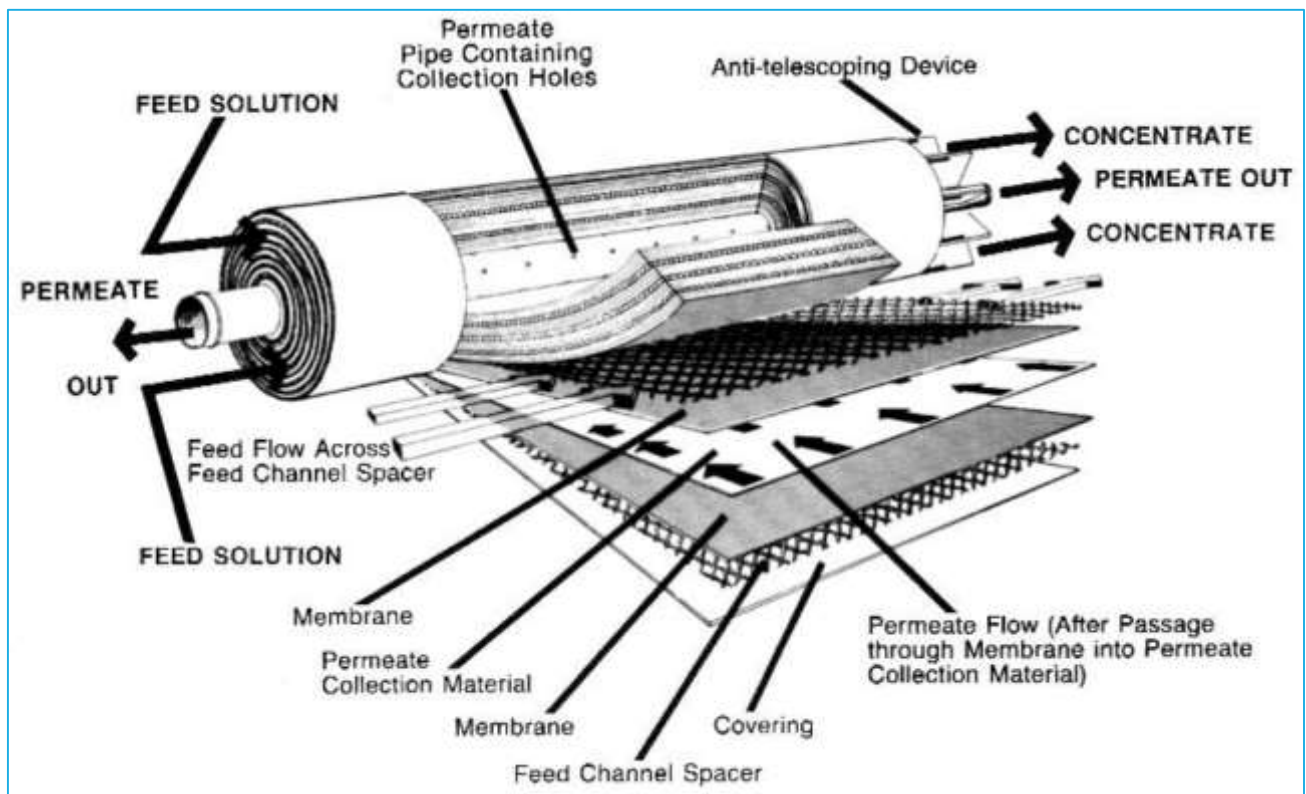
Προκειμένου να υπολογιστεί λοιπόν, η συνολική ογκομετρική παροχή του διηθήματος $Q_{P, \text{module}}$ από την Εξίσωση 14, θα πρέπει να προσδιοριστούν οι παράμετροι που περιέχονται στις Εξισώσεις Εξίσωση 12 και Εξίσωση 13, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.

Οι μεμβράνες από πολυμερή χρησιμοποιούνται πλέον στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων, λόγω των ανεπτυγμένων και εξαιρετικών αποδόσεών τους. [3] Θεωρείται λοιπόν ότι η μεμβράνη υπερδιήθησης που χρησιμοποιείται είναι κατασκευασμένη από PVDF (PolyVinylidene Fluoride), όπως προτιμάται και στην βιβλιογραφία [35, 37]. Τα εύρη των τιμών της διαμέτρου των πόρων και της πτώσης πίεσης για μεμβράνες υπερδιήθησης βρέθηκαν βιβλιογραφικά. [23, 34], όπως και οι τιμές του μήκους και της πυκνότητας των πόρων για μεμβράνες υπερδιήθησης κατασκευασμένες από PVDF. [38] Η επιφάνεια των μεμβρανών υπερδιήθησης αποτελεί μεταβλητή σχεδιασμού, ενώ

το δυναμικό ιζώδες του ρευστού θεωρείται ότι είναι ίσο με αυτό του καθαρού νερού, αφού το ρεύμα τροφοδοσίας προέρχεται από μονάδα ενεργού ιλύος.

Πίνακας 8: Παράμετροι για τον υπολογισμό της συνολικής ογκομετρικής παροχής του διηθήματος από τις μεμβράνες υπερδιήθησης στη μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Περιγραφή μεγέθους	Συμβολισμός μεγέθους	Εύρος τιμών μεγέθους	Επιλογή τιμής μεγέθους	Μονάδα μέτρησης μεγέθους
Διάμετρος πόρων [23, 34]	d	$(10^{-2} - 10^{-1} \mu\text{m}) \frac{1\text{m}}{10^6 \mu\text{m}}$	$2 \cdot 10^{-2} \mu\text{m} \frac{1\text{m}}{10^6 \mu\text{m}}$	[m]
Πτώση πίεσης [23]	ΔP	$(1 - 10\text{bar}) \frac{10^5 \text{N/m}^2}{1 \text{bar}}$	$1 \text{bar} \frac{10^5 \text{N/m}^2}{1 \text{bar}}$	[N/m ²]
Μήκος πόρων [38]	Δx	$125,3 \mu\text{m} \frac{1\text{m}}{10^6 \mu\text{m}}$	$125,3 \mu\text{m} \frac{1\text{m}}{10^6 \mu\text{m}}$	[m]
Πυκνότητα πόρων [38]	N	$(1,7 - 2,3) \cdot 10^{14}$	$1,7 \cdot 10^{14}$	[#pores/m ²]
Επιφάνεια μεμβράνης	A	Μεταβλητή σχεδιασμού	1	[m ²]
Δυναμικό ιζώδες του ρευστού [39]	μ	$1,002 \cdot 10^{-3}$	$1,002 \cdot 10^{-3}$	[Ns/m ²]



Εικόνα 23: Μονάδα μεμβρανών σπειροειδούς περιέλιξης [36]

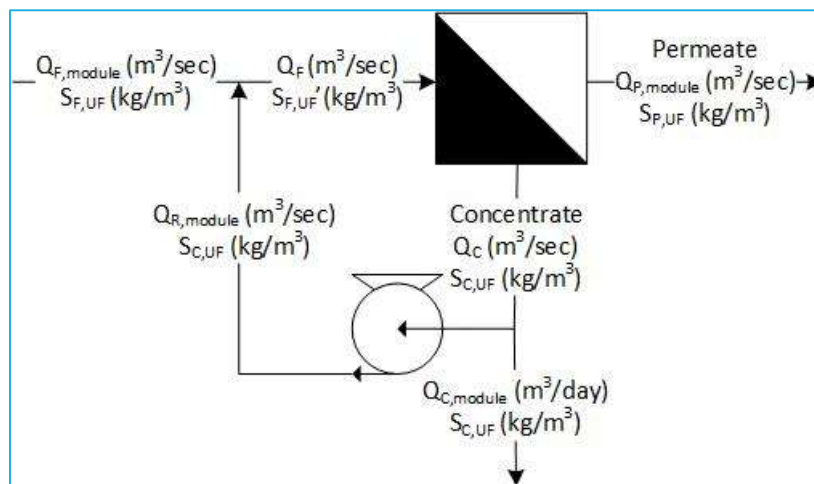
Εφόσον έχει υπολογισθεί η ογκομετρική παροχή του διηθήματος σε κάθε μονάδα, μπορεί να υπολογισθεί ο συνολικός αριθμός μονάδων, που απαιτείται, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η ογκομετρική παροχή του διηθήματος,



όπως φαίνεται στην Εξίσωση 15. Ο αριθμός των μονάδων υπερδιήθησης μπορεί να ξεπεράσει τις 3200, όπως αναγράφεται και στη βιβλιογραφία. [35]

$$M = \frac{Q_{F,UF}}{Q_{P,module}} \quad \text{Εξίσωση 15}$$

- όπου M : ο αριθμός των μονάδων υπερδιήθησης ($\in \mathbb{Z}$)
 $Q_{P,module}$: η ογκομετρική παροχή του διηθήματος που εγκαταλείπει μία μονάδα υπερδιήθησης [m^3/s]
 $Q_{F,UF}$: η συνολική ογκομετρική παροχή της τροφοδοσίας στις μονάδες υπερδιήθησης [m^3/s]



Εικόνα 24: Διάγραμμα ροής λειτουργίας μίας μεμβράνης υπερδιήθησης

Με τον τρόπο αυτό μπορεί πλέον να υπολογισθεί η ογκομετρική παροχή του ρεύματος τροφοδοσίας σε κάθε μονάδα $Q_{F,module}$. Θεωρώντας ότι οι πυκνότητες του ρεύματος τροφοδοσίας, του ρεύματος διηθήματος και του ρεύματος συμπυκνώματος (concentrate) είναι ίσες, καταστρώνεται το ισοζύγιο ογκομετρικών παροχών, προκειμένου να υπολογιστεί αυτή του συμπυκνώματος, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 16.

$$Q_{F,module} = Q_{P,module} + Q_{C,module} \Rightarrow Q_{C,module} = Q_{F,module} - Q_{P,module} \quad \text{Εξίσωση 16}$$

- όπου $Q_{F,module}$: η ογκομετρική παροχή της τροφοδοσίας σε μία μονάδα υπερδιήθησης [m^3/s]
 $Q_{P,module}$: η ογκομετρική παροχή του διηθήματος που εγκαταλείπει μία μονάδα υπερδιήθησης [m^3/s]
 $Q_{C,module}$: η ογκομετρική παροχή του συμπυκνώματος που εγκαταλείπει μία μονάδα υπερδιήθησης [m^3/s]

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 24, θεωρείται ότι μέρος του συμπυκνώματος επιστρέφει στο ρεύμα τροφοδοσίας. [36] Το ποσοστό του συμπυκνώματος που επιστρέφει αποτελεί μεταβλητή σχεδιασμού, σύμφωνα με το οποίο υπολογίζεται η παροχή του ρεύματος ανακυκλοφορίας, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 17.

$$Q_{R,module} = R_{UF} Q_{C,module} \quad \text{Εξίσωση 17}$$

- όπου $Q_{R,module}$: η ογκομετρική παροχή του ρεύματος ανακυκλοφορίας σε μία μονάδα υπερδιήθησης [m^3/s]
 R_{UF} : το ποσοστό ανακυκλοφορίας του συμπυκνώματος [%]



$Q_{C,module}$: η ογκομετρική παροχή του συμπυκνώματος που εγκαταλείπει μία μονάδα υπερδιήθησης $[m^3/s]$

Με απλά ισοζύγια όγκου, θεωρώντας και πάλι πως οι πυκνότητες όλων των ρευμάτων είναι ίσες, υπολογίζονται οι ροές Q_F και Q_C , όπως φαίνεται στην Εξίσωση 18 και στην Εξίσωση 19, αντίστοιχα. Στην συνέχεια, είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η συγκέντρωση οργανικού φορτίου που εισέρχεται στη μεμβράνη υπερδιήθησης $S'_{F,UF}$, το οποίο γίνεται σύμφωνα με την Εξίσωση 20 και την Εξίσωση 21. Πριν γίνει άμεση χρήση των δύο τελευταίων εξισώσεων, θα πρέπει η Εξίσωση 21 να αντικατασταθεί στην Εξίσωση 22, προκειμένου να υπολογιστεί το οργανικό φορτίο του διηθήματος.

$$Q_F = Q_{F,module} + Q_{R,module} \quad \text{Εξίσωση 18}$$

$$Q_F = Q_C + Q_{P,module} \Rightarrow Q_C = Q_F - Q_{P,module} \quad \text{Εξίσωση 19}$$

$$Q_{F,module}S_{F,UF} = Q_{P,module}S_{P,UF} + Q_{C,module}S_{C,UF} \Rightarrow S_{C,UF} = \frac{Q_{F,module}S_{F,UF} - Q_{P,module}S_{P,UF}}{Q_{C,module}} \quad \text{Εξίσωση 20}$$

$$Q_{F,module}S_{F,UF} + Q_{R,module}S_{C,UF} = Q_F S'_{F,UF} \Rightarrow S'_{F,UF} = \frac{Q_{F,module}S_{F,UF} + Q_{R,module} \left(\frac{Q_{F,module}S_{F,UF} - Q_{P,module}S_{P,UF}}{Q_{C,module}} \right)}{Q_F} \quad \text{Εξίσωση 21}$$

όπου	$Q_{F,module}$:	η ογκομετρική παροχή της τροφοδοσίας σε μία μονάδα υπερδιήθησης $[m^3/s]$
	$Q_{P,module}$:	η ογκομετρική παροχή του διηθήματος που εγκαταλείπει μία μονάδα υπερδιήθησης $[m^3/s]$
	$Q_{C,module}$:	η ογκομετρική παροχή του συμπυκνώματος που εγκαταλείπει μία μονάδα υπερδιήθησης $[m^3/s]$
	$Q_{R,module}$:	η ογκομετρική παροχή του ρεύματος ανακυκλοφορίας σε μία μονάδα υπερδιήθησης $[m^3/s]$
	Q_F :	η ογκομετρική παροχή της τροφοδοσίας σε συνδυασμό με την ανακυκλοφορία σε μία μονάδα υπερδιήθησης $[m^3/s]$
	Q_C :	η ογκομετρική παροχή του συμπυκνώματος πριν χωριστεί το ρεύμα για ανακυκλοφορία $[m^3/s]$
	$S_{F,UF}$:	το οργανικό φορτίο της τροφοδοσίας (BOD ₅ , COD, TSS) $[kg/m^3]$ ($= S_{OUT,AS}$)
	$S_{P,UF}$:	το οργανικό φορτίο του διηθήματος (BOD ₅ , COD, TSS) $[kg/m^3]$
	$S_{C,UF}$:	το οργανικό φορτίο του συμπυκνώματος (BOD ₅ , COD, TSS) $[kg/m^3]$
	$S'_{F,UF}$:	το οργανικό φορτίο της τροφοδοσίας σε συνδυασμό με την ανακυκλοφορία (BOD ₅ , COD, TSS) $[kg/m^3]$

Αφού η εγκατάσταση μεμβρανών υπερδιήθησης θα έχει ως σκοπό τη διαύγαση του νερού, μία ακόμη σημαντική παράμετρος που θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι το οργανικό φορτίο (BOD₅, COD, TSS). Βρέθηκε βιβλιογραφικά λοιπόν, ένα μοντέλο, το οποίο προβλέπει τη συμπεριφορά του οργανικού φορτίου στην έξοδο των μεμβρανών υπερδιήθησης, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 22. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψιν τη μόλυνση της μεμβράνης, λόγω των φαινομένων της πόλωσης της συγκέντρωσης, και τη φραγή της μεμβράνης.



$$\frac{A_0}{\Delta x Q_{F,UF}} f(S_{F,UF} - S_{P,UF})(1 - at + bt^2 - ct^3) = t \frac{dS_{P,UF}}{dt} + S_{P,UF}$$

Εξίσωση 22

- όπου A_0 : η αρχική αποτελεσματική επιφάνεια της μεμβράνης υπερδιήθησης [m^2]
 Δx : το μήκος του πόρου [m]
 $Q_{F,UF}$: η συνολική ογκομετρική παροχή της τροφοδοσίας στις μονάδες υπερδιήθησης [m^3/s]
 $S'_{F,UF}$: το οργανικό φορτίο της τροφοδοσίας σε συνδυασμό με την ανακυκλοφορία (BOD₅, COD, TSS) [kg/m^3]
 $S_{P,UF}$: το οργανικό φορτίο του διηθήματος σε χρόνο t (BOD₅, COD, TSS) [kg/m^3]
t: ο χρόνος [s]
a, b, c, f: οι παράμετροι του μοντέλου

Οι παράμετροι a, b, c αφορούν στον ρυθμό φραγής των πόρων, ενώ η παράμετρος f αφορά στις επιρροές των χαρακτηριστικών της διαλυμένης ουσίας, της υδραυλικής κατάστασης και των συνθηκών λειτουργίας. Το εύρος των παραμέτρων a, b, c, f της Εξίσωση 22 προσδιορίζονται βιβλιογραφικά και αναγράφονται στον Πίνακα 9. Η επιλογή των τιμών τους επιλέχθηκε με βάση τη μελέτη που έγινε στη βιβλιογραφία. [35]

Πίνακας 9: Παράμετροι για τον υπολογισμό του οργανικού φορτίου του διηθήματος από τις μεμβράνες υπερδιήθησης στη μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων [35]

Παράμετρος	Εύρος παραμέτρου	Επιλογή τιμής παραμέτρου	Μονάδες παραμέτρου
a	$0 - 1 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	[1/s]
b	$0 - 5 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	[1/s ²]
c	$0 - 1 \cdot 10^{-9}$	$0,2 \cdot 10^{-9}$	[1/s ³]
f	$0 - 7 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	[m ² /s]

Η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία των μεμβρανών υπερδιήθησης αποδίδεται κυρίως στις αντλίες, οι οποίες εξαναγκάζουν το ρευστό να ρέει διαμέσου των πόρων των μεμβρανών. Οι αντλίες είναι δύο και είναι αυτή της τροφοδοσίας και αυτή της ανακυκλοφορίας. Η ενέργεια των αντλιών υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 23. [33]

$$E_{UF} = (W_{F,UF} + W_{R,UF}) \frac{1}{3600 \cdot 1000} \frac{kWh/s}{W} = (Q_{P,UF}P_2 + Q_{R,UF}(P_1 - P_2)) \frac{1}{3600 \cdot 1000} \frac{kWh/s}{W}$$

Εξίσωση 23

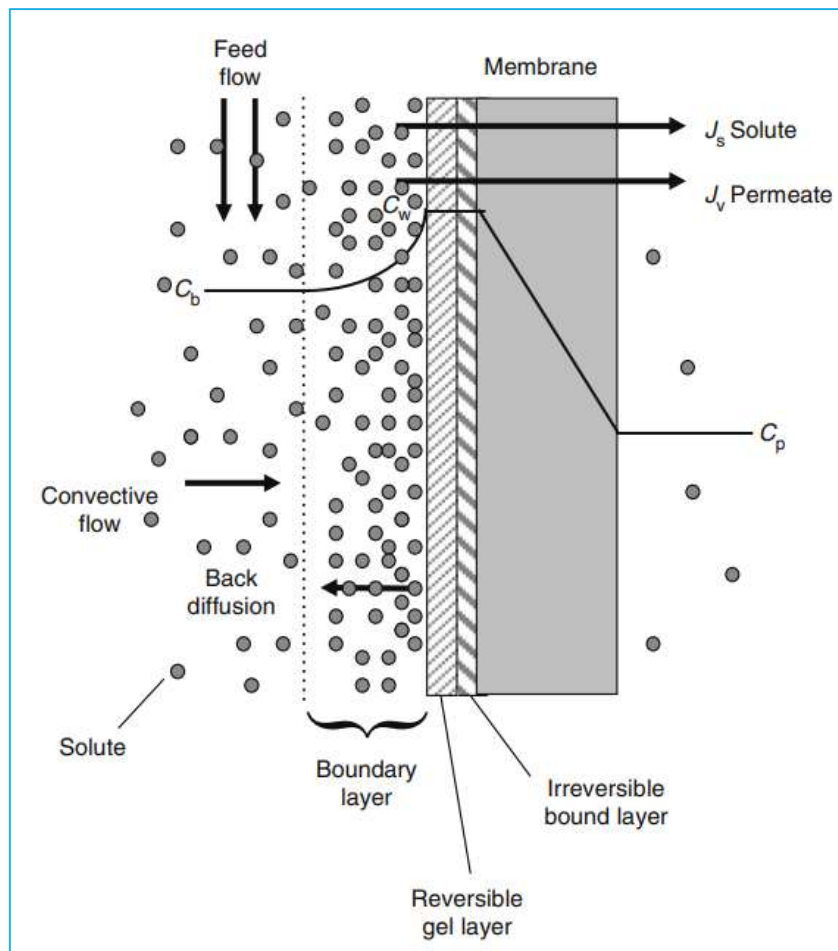
- όπου E_{UF} : η ενέργεια που καταναλώνεται στις μονάδες υπερδιήθησης [kWh/s]
 $W_{F,UF}$: η ισχύς της αντλίας τροφοδοσίας [W]
 $W_{R,UF}$: η ισχύς της αντλίας ανακυκλοφορίας [W]
 $Q_{P,UF}$: η συνολική ογκομετρική παροχή του διηθήματος [m^3/s]
 $Q_{R,UF}$: η συνολική ογκομετρική παροχή του ρεύματος ανακυκλοφορίας [m^3/s]
 P_1 : η πίεση στην είσοδο των μεμβρανών υπερδιήθησης [kg/ms^2]
 P_2 : η πίεση στην έξοδο των μεμβρανών υπερδιήθησης [kg/ms^2]

Θεωρείται ότι η πίεση στην είσοδο των μεμβρανών είναι ατμοσφαιρική και ίση με $P_1 = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$, [40] ενώ η πίεση εξόδου υπολογίζεται με βάση τη πτώση πίεσης που αναγράφεται στον Πίνακα 8.

Σκοπός της μονάδας μεμβρανών υπερδιήθησης είναι το νερό να είναι απαλλαγμένο από το μεγάλο οργανικό φορτίο, έτσι ώστε να επαναχρησιμοποιηθεί στους πύργους ψύξης της βιομηχανίας. [13] Για τον σκοπό αυτό τα όρια του οργανικού φορτίου είναι $BOD_5 < 0,01 \text{ kg/m}^3$, [41] $COD < 0,075 \text{ kg/m}^3$ [42] και $TSS < 0,01 \text{ kg/m}^3$. [41]

Η πόλωση της συγκέντρωσης είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το φαινόμενο της συσσώρευσης των μορίων της διαλυμένης ουσίας και της εμφάνισης βαθμίδας συγκέντρωσης, σε ένα λεπτό στρώμα κοντά στην επιφάνεια της μεμβράνης. Στην πλευρά της τροφοδοσίας, και σε επαφή με την επιφάνεια της μεμβράνης, θεωρείται ότι υπάρχει ένα υγρό οριακό στρώμα, όπου το ρευστό είναι σχεδόν στάσιμο. Αυτό σημαίνει ότι η μεταφορά μάζας της διαλυμένης ουσίας στο εσωτερικό του οριακού στρώματος οφείλεται σε φαινόμενα μοριακής διάχυσης και μόνο. Η μεταφορά μάζας λόγω διάχυσης είναι σημαντικά βραδύτερη της μεταφοράς, λόγω συναγωγής που επικρατεί στον κύριο όγκο του ρευστού. [23]

Η πόλωση συγκέντρωσης ευνοεί την εναπόθεση ειδών χαμηλής διαλυτότητας πάνω στη μεμβράνη και υποβοηθά την αύξηση της συγκέντρωσης κολλοειδών και αιωρούμενων υλικών στην επιφάνειά της. Η επικάλυψη μη διαπερατών διαλυτών οργανικών ειδών στη διεπιφάνεια μεμβράνης-διαλύματος οδηγεί στο σχηματισμό μίας στιβάδας ζελατινής που μπορεί να εμφανίζει μεγαλύτερη εκλεκτικότητα διαχωρισμού και χαμηλότερη διαπερατότητα από αυτή καθ' αυτή τη μεμβράνη. [23]



Εικόνα 25: Σχηματική αναπαράσταση της πόλωσης συγκέντρωσης και της φραγής στην επιφάνεια της μεμβράνης [43, 44]

Το σημαντικότερο πρόβλημα των μεμβρανών υπερδιήθησης είναι η φραγή τους, καθώς το βιολογικό περιβάλλον περιέχει μεγάλο εύρος μικροοργανισμών ικανών να προσκολληθούν στη μεμβράνη και να προάγουν σημαντική αντίσταση στη μεταφορά νερού. [34]

Φραγή ονομάζεται η διεργασία κατά την οποία στερεά συστατικά, τα οποία βρίσκονται στο προς επεξεργασία υγρό, προσροφούνται ή απορροφούνται στην επιφάνεια ή μέσα στο σώμα της μεμβράνης αυξάνοντας της αντίστασή της, με αποτέλεσμα να μειώνονται τα διάκενα των πόρων ή να φράζουν ολοσχερώς. Το φαινόμενο της φραγής

οφείλεται σε φυσικοχημικούς και βιολογικούς μηχανισμούς. Η φραγή επιτείνεται με την εμφάνιση της πόλωσης συγκέντρωσης, αφού έτσι αυξάνεται η συγκέντρωση των στερεών στην επιφάνεια της μεμβράνης. [23]

Στη συμβατική διήθηση η συχνή φραγή των πόρων της μεμβράνης αποτελεί σημαντικό πρόβλημα. Αντίθετα στη διήθηση εφαπτομενικής ροής οι πόροι δεν φράζουν εύκολα και για αυτό το λόγο είναι ο κύριος τύπος διαχωρισμού που χρησιμοποιείται στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων. [23]

Η φραγή των πόρων προβλέπεται από το μοντέλο Hermia, για κάθε πιθανό μηχανισμό φραγής. [2, 37, 45] Οι μηχανισμοί αυτοί απεικονίζονται στην Εικόνα 26. [45]

$$\frac{d^2t}{dV^2} = k \left(\frac{dt}{dV} \right)^n \quad \text{Εξίσωση 24}$$

Πλήρης φραγή ($n = 2$):

$$\ln(J) = \ln(J_0) - kt \quad \text{Εξίσωση 25}$$

Σταθερή φραγή ($n = 3/2$):

$$\frac{1}{J} = \frac{1}{J_0} - kt \quad \text{Εξίσωση 26}$$

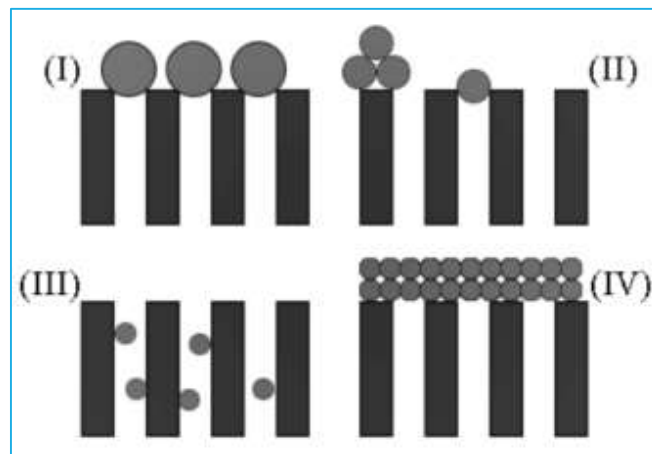
Ενδιάμεση φραγή ($n = 1$):

$$\frac{1}{\sqrt{J}} = \frac{1}{\sqrt{J_0}} - kt \quad \text{Εξίσωση 27}$$

Σχηματισμός στρώματος φραγής ($n = 0$):

$$\frac{1}{J^2} = \frac{1}{J_0^2} - kt \quad \text{Εξίσωση 28}$$

- όπου J : η ροή του διηθήματος ανά μονάδα επιφάνειας σε χρόνο t [$\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$]
 J_0 : η ροή του διηθήματος ανά μονάδα επιφάνειας σε χρόνο $t = 0$ [$\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$]
 t : ο χρόνος [s]
 k : η σταθερά του μοντέλου Hermia



Εικόνα 26: Μηχανισμοί φραγής: (I) πλήρης φραγή, (II) ενδιάμεση φραγή, (III) σταθερή φραγή, (IV) σχηματισμός στρώματος φραγής [45]

Για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που δημιουργούνται με τη φραγή των μεμβρανών απαιτείται συχνό καθάρισμα, γεγονός που αυξάνει το κόστος λειτουργίας, λόγω των απαιτούμενων καθαριστικών και του χρόνου που παραμένει το σύστημα εκτός λειτουργίας. Επίσης, αναμενόμενη είναι και η αντικατάσταση των μεμβρανών μέσα σε κάποιο χρονικό διάστημα. [23] Μάλιστα, στη βιβλιογραφία αναφέρεται πως κάθε μονάδα μεμβρανών υπερδιήθησης απαιτεί 29 καθαρισμούς τη μέρα. [35]

Ο αέρας που εισέρχεται μαζί με τη τροφοδοσία στα συστήματα εφαπτομενικής ροής απομακρύνει τις επικαθίσεις από τις μεμβράνες και περιορίζει σημαντικά τη φραγή τους. Το ζητούμενο είναι η βέλτιστη παροχή αέρα, καθώς και το μέγεθος της φυσαλίδας, ώστε να διατηρείται ο απαιτούμενος αριθμός Reynolds για τυρβώδη ροή, να υπάρχει ικανοποιητική διάχυση οξυγόνου και ταυτόχρονα να ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ενέργειας.

Μερικές από τις στρατηγικές καθαρισμού είναι αυτές που αναγράφονται παρακάτω:



- Διαλείπουσα λειτουργία, όπου διακόπτεται η διήθηση περιοδικά για 2 περίπου λεπτά. Τα σωματίδια που έχουν επικαθίσει στη μεμβράνη τείνουν να διαχυθούν πίσω στο υγρό ρεύμα. Αυτό το φαινόμενο εντείνεται με συνεχή αερισμό που εφαρμόζεται κατά την περίοδο ανάπαυσης του συστήματος.
- Αντίστροφη πλύση της μεμβράνης, όπου το διήθημα αντλείται πίσω στη μεμβράνη και ρέει μέσα από τους πόρους της προς το ρεύμα τροφοδοσίας, απομακρύνοντας έτσι σωματίδια και από τις δύο πλευρές της μεμβράνης.
- Αντίστροφη πλύση με αέρα, όπου χρησιμοποιείται πιεσμένος αέρας στη μεριά του διηθήματος για μικρό χρονικό διάστημα. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει οι μεμβράνες να εσωκλείονται σε πιεστικά δοχεία και να υπάρχει και σύστημα εκτόνωσης. Ο αέρας συνήθως δεν διέρχεται μέσα από τη μεμβράνη για να μη τη στεγνώσει.

Χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι χημικού καθαρισμού, όπως αυτοί που αναγράφονται παρακάτω. Τα βασικά χημικά καθαριστικά που χρησιμοποιούνται είναι το υποχλωριώδες νάτριο και το κιτρικό οξύ.

- Αντίστροφη πλύση με χημικά (σε καθημερινή βάση)
- Καθαρισμός συντήρησης με υψηλότερες συγκεντρώσεις χημικών (σε εβδομαδιαία βάση)
- Εντατικό καθάρισμα με χημικά (μία ή δύο φορές το χρόνο). [23]

Βιβλιογραφικά βρέθηκε ότι για λειτουργικό χρόνο ίσο με 40min, ο βέλτιστος χρόνος καθαρισμού είναι 30s. [46] Επομένως, θεωρείται ότι η ενέργεια που χρειάζεται για τον καθαρισμό των μεμβρανών υπερδιήθησης είναι αμελητέα σε σύγκριση με αυτή που αντιστοιχεί στον λειτουργικό χρόνο. Θεωρώντας επίσης, ότι η στρατηγική καθαρισμού που ακολουθείται είναι η αντίστροφη πλύση μεμβράνης, συμπεραίνεται ότι δεν απαιτούνται επιπλέον χημικά σε συχνή βάση.

3.2. Παρεμβάσεις στο ρεύμα εξόδου όξινου ορού γάλακτος από τη γαλακτοβιομηχανία

3.2.1. Μεμβράνη υπερδιήθησης στο ρεύμα όξινου ορού

Εκτός από την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, η υπερδιήθηση εφαρμόζεται και στη συμπύκνωση πρωτεϊνούχων διαλυμάτων. [33] Η εφαρμογή μεμβρανών υπερδιήθησης σε όξινο ορό γάλακτος συγκρατεί τις πρωτεΐνες, οι οποίες είναι η α -λακταλβουμίνη, με μοριακό βάρος 17000daltons, και η β -λακτογλουμπλίνη, με μοριακό βάρος 36000daltons. [36]

Η ογκομετρική παροχή του διηθήματος που εξέρχεται από μία μεμβράνη υπερδιήθησης υπολογίζεται σύμφωνα με τις Εξισώσεις Εξίσωση 12-Εξίσωση 14. Οι παράμετροι που είναι απαραίτητοι για τους υπολογισμούς των εξισώσεων αυτών αντλούνται από τον Πίνακα 8, εκτός από το δυναμικό ιξώδες του ρευστού, το οποίο θα πρέπει να αντιστοιχεί σε αυτό του όξινου ορού γάλακτος, δηλαδή να είναι ίσο με $1,09cP = 0,00109 \frac{Ns}{m^2}$. [47] Επιπλέον, είναι απαραίτητη η πυκνότητα του όξινου ορού γάλακτος, η οποία είναι ίση με $1030 \frac{kg}{m^3}$. [48]

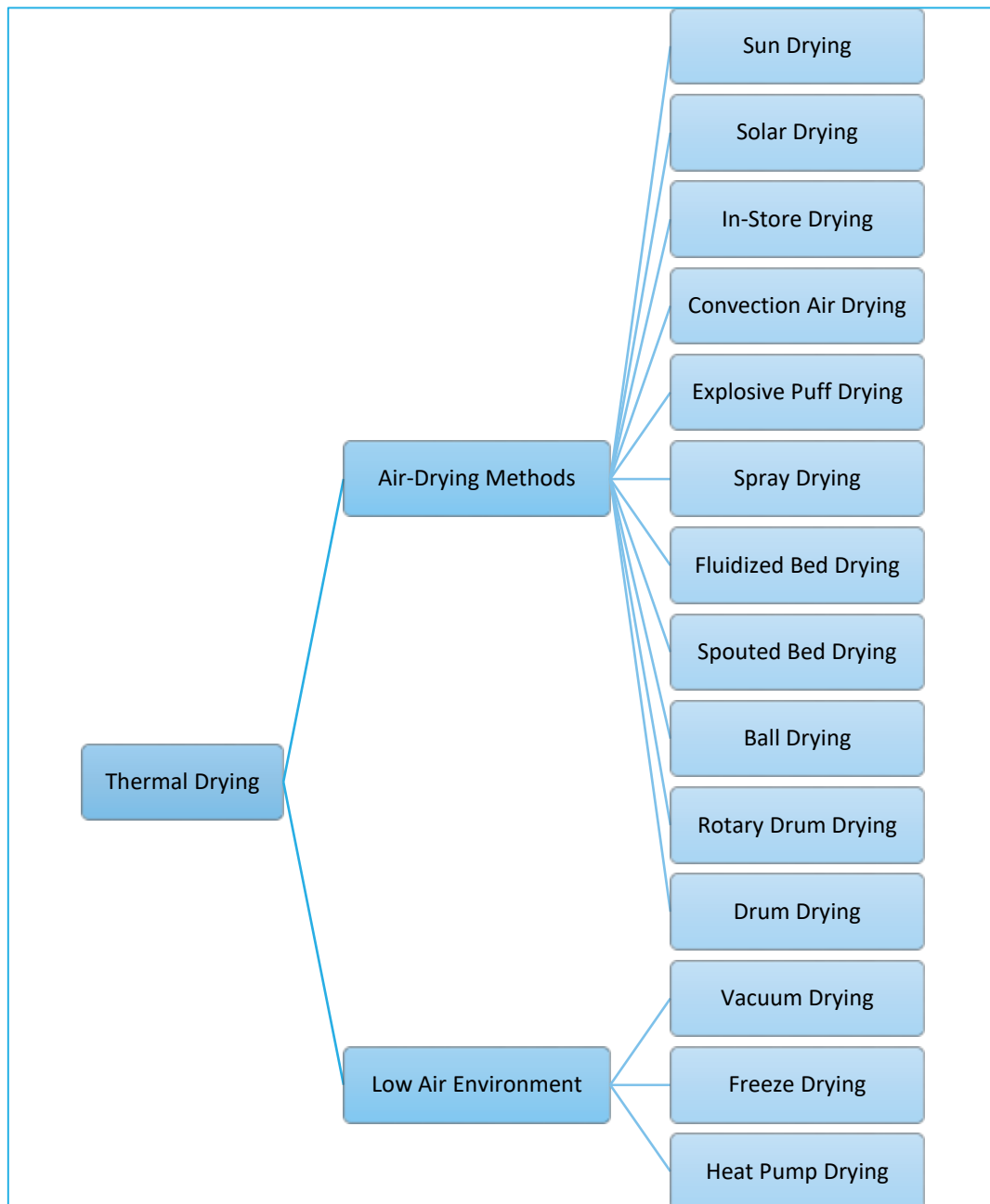
Όσον αφορά στη σύνθεση του διηθήματος και του συμπυκνώματος, γίνεται η υπόθεση ότι οι πρωτεΐνες συγκρατούνται, ενώ όλα τα υπόλοιπα συστατικά διαπερνούν τους πόρους, με την σύνθεση να θεωρείται ότι διατηρείται αναλογικά σταθερή.

3.2.2. Ξήρανση με ψεκασμό

Η ξήρανση με ψεκασμό ανήκει στις θερμικές μεθόδους ξήρανσης. Μερικά παραδείγματα τέτοιων μεθόδων είναι η ξήρανση στον ήλιο, η ξήρανση με αέρα συναγωγής, η ξήρανση με κατάψυξη και άλλες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 27. [44]

Η ξήρανση με ψεκασμό εφαρμόζεται με σκοπό την απομάκρυνση του νερού από ένα υγρό μίγμα, μετατρέποντάς το έτσι σε μορφή σκόνης. [44] Ένας βασικός ξηραντήρας με ψεκασμό αποτελείται από ένα θάλαμο ξήρανσης, που περιέχει έναν ψεκαστήρα, ο οποίος διασπά την υγρή τροφοδοσία σε μυριάδες μικροσκοπικά σταγονίδια, όπως

φαίνεται στην Εικόνα 28. [44, 49] Τα σταγονίδια έρχονται άμεσα σε επαφή με ένα θερμό αέριο ξήρανσης, το οποίο συνήθως είναι αέρας. Με τον τρόπο αυτό, το υγρό εξατμίζεται πολύ γρήγορα, με πολύ μικρό χρόνο επαφής με το θερμό αέριο ξήρανσης, γεγονός που οδηγεί στην ελαχιστοποίηση της θερμικής βλάβης. [44]



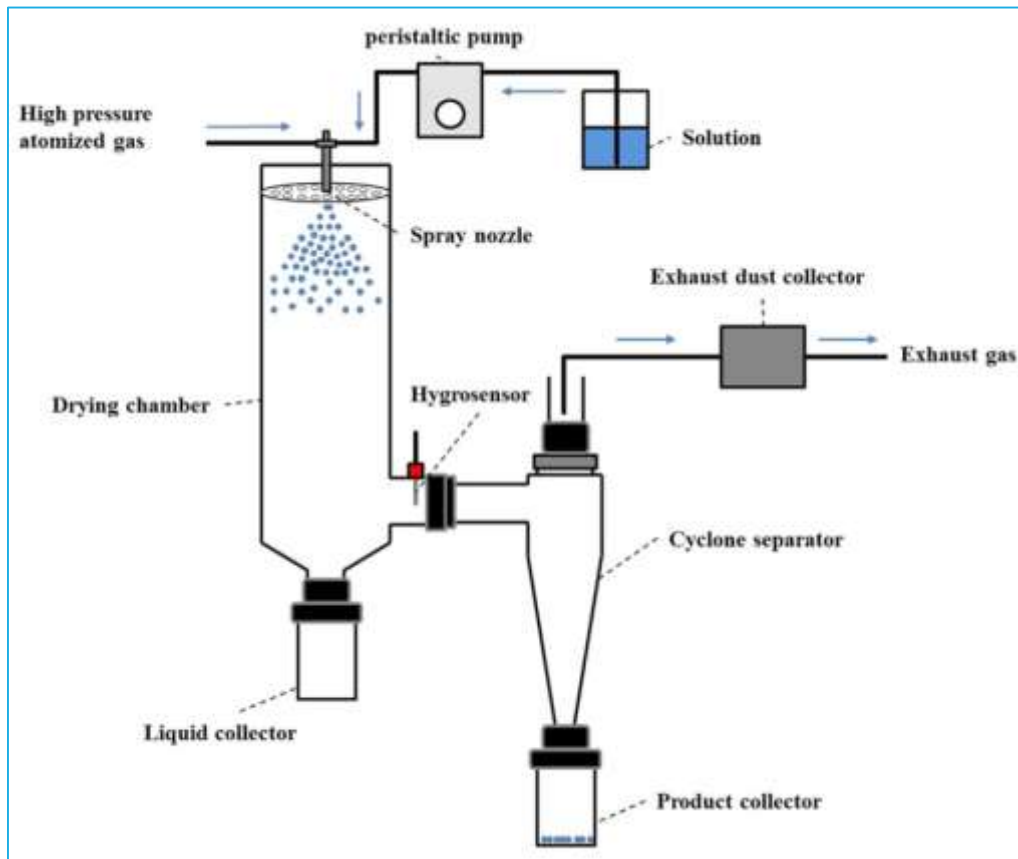
Εικόνα 27: Μέθοδοι θερμικής ξήρανσης [44]

Μετά την ολοκλήρωση της ξήρανσης, το ψυχρό αέριο και τα στερεά διαχωρίζονται. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εν μέρει στον πυθμένα του θαλάμου ξήρανσης με ταξινόμηση και διαχωρισμό των χονδρόκοκκων σωματιδίων. Τα λεπτά σωματίδια διαχωρίζονται από το αέριο σε εξωτερικούς κυκλώνες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 28. Οι ξηραντήρες με ψεκασμό μπορεί να λειτουργούν με ταυτόχρονη, μικτή ή αντίθετη ροή αερίου και στερεών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 30, ενώ οι θερμοκρασίες εισερχόμενου αερίου μπορεί να κυμαίνονται από 425 έως 1100K. [36]

Η ξήρανση με ψεκασμό εφαρμόζεται σε διαλύματα και πολτούς, τα οποία είτε δεν μπορούν να αφυδατωθούν μηχανικά, είτε είναι θερμοευαίσθητα και δεν μπορούν να εκτεθούν σε υψηλές θερμοκρασίες, είτε περιέχουν εξαιρετικά λεπτά σωματίδια. Για παράδειγμα, η ξήρανση με ψεκασμό εφαρμόζεται στις σκόνες γάλακτος ή ακόμη και σε φαρμακευτικά προϊόντα, λόγω του σύντομου χρόνου επαφής, που συνιστάται, με το θερμό ρεύμα. [36]

Εκ πρώτης όψεως μπορεί να φαίνεται ότι η διαδικασία της ξήρανσης με ψεκασμό είναι μία απλή διαδικασία, με ένα υγρό διάλυμα ή αιώρημα να διοχετεύεται μέσω συσκευής ψεκασμού σε ρεύμα θερμού αερίου, με τα αποξηραμένα σωματίδια στη συνέχεια να διαχωρίζονται από το αέριο. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει πολλές πτυχές της μηχανικής ρευστών, της μεταφοράς μάζας και θερμότητας, της τεχνολογίας σωματιδίων, της μηχανικής αντιδράσεων και της επιστήμης των υλικών. [50]

Στην προσέγγιση που περιγράφεται παρακάτω γίνεται χρήση ισοζυγίων μάζας και ενέργειας. Γίνεται η παραδοχή ότι επικρατούν ομοιόμορφες συνθήκες αερίων στο εσωτερικό του ξηραντήρα και ότι το αέριο και τα σωματίδια εξόδου είναι σε ισορροπία μεταξύ τους, έτσι ώστε το αέριο και τα στερεά να έχουν σχεδόν ίσες θερμοκρασίες. [50]



Εικόνα 28: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας ξηραντήρα με ψεκασμό [51]

Το υγρό διάλυμα που εισέρχεται στον ξηραντήρα με ψεκασμό είναι το συμπύκνωμα των μεμβρανών υπερδιήθησης, το οποίο είναι πλούσιο σε πρωτεΐνες όξινου ορού γάλακτος. Επομένως, με βάση τα αποτελέσματα που θα δώσει η μοντελοποίηση των μεμβρανών υπερδιήθησης θα είναι γνωστά το ποσοστό του νερού στο συμπύκνωμα $W\%$ και η ογκομετρική παροχή του συμπυκνώματος Q_{Liquid} , η οποία μετατρέπεται σε μαζική παροχή M_{Liquid} μέσω της πυκνότητας του όξινου ορού γάλακτος. Δύο χαρακτηριστικά επιπλέον που είναι απαραίτητα για τη μοντελοποίηση της ξήρανσης με ψεκασμό είναι η θερμοκρασία του συμπυκνώματος, η οποία θεωρείται ίση με $T_{\text{Liquid}} = 30^{\circ}\text{C}$, και η θερμοχωρητικότητα των ξηρών πρωτεϊνών του όξινου ορού γάλακτος, η οποία προσδιορίζεται βιβλιογραφικά, όπως φαίνεται στον Πίνακα 10. [52]

Επιπλέον, θα πρέπει να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά του ζεστού ρεύματος αέρα, τα οποία ορίζονται όπως φαίνεται παρακάτω: [50]

- Μαζική παροχή αέρα $M_{\text{Air}} = 10000 \text{ kg air/s}$
- Θερμοκρασία αέρα $T_{\text{Air(in)}} = 200^{\circ}\text{C}$
- Υγρασία αέρα $Y_{\text{Air(in)}} = 0,01 \text{ kg water/kg air}$



Πίνακας 10: Ειδική θερμοχωρητικότητα ξηρού όξινου γάλακτος [52]

T (°C)	c_p (kJ/kg K)
25	1,884
30	2,119
35	2,468
40	2,706
45	2,786
50	2,871
55	2,871
60	3,072
65	3,184
70	3,274
75	3,405
80	3,525
85	3,664
90	3,878
95	4,147
100	4,435

Εφόσον έχουν οριστεί όλα τα παραπάνω, μπορούν να γίνουν οι παρακάτω υπολογισμοί, σύμφωνα με τους οποίους γίνεται η μοντελοποίηση του ξηραντήρα με ψεκασμό. Αρχικά, υπολογίζονται η μαζική παροχή του ξηρού αέρα, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 29, καθώς και οι μαζικές παροχές του νερού και των στερεών, που περιέχονται στο υγρό διάλυμα, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 30 και στην Εξίσωση 31, αντίστοιχα. [50]

$$M_{\text{Dry Air}} = M_{\text{Air}} \frac{1 \text{ kg dry air}}{(1 + Y_{\text{air(in)}}) \text{ kg total air}} \quad \text{Εξίσωση 29}$$

$$M_{\text{Water}} = W\% M_{\text{Liquid}} \quad \text{Εξίσωση 30}$$

$$M_{\text{Solids}} = (1 - W\%) M_{\text{Liquid}} \quad \text{Εξίσωση 31}$$

όπου $M_{\text{Dry Air}}$:	η μαζική παροχή του ξηρού αέρα [kg dry air/s]
M_{Air} :	η μαζική παροχή του αέρα [kg air/s]
$Y_{\text{air(in)}}$:	η υγρασία του αέρα [kg water/kg air]
M_{Water} :	η μαζική παροχή του νερού [kg water/s]
M_{Solids} :	η μαζική παροχή των στερεών [kg solids/s]
$W\%$:	το ποσοστό του νερού στο συμπύκνωμα [%]
M_{Liquid} :	η μαζική παροχή του υγρού προς ξήρανση [kg liquid/s]

Η περιεχόμενη υγρασία στα στερεά του υγρού προς ξήρανση υπολογίζεται όπως φαίνεται στην Εξίσωση 32: [50]

$$X_{\text{(in)}} = \frac{M_{\text{Water}}}{M_{\text{Solids}}} \quad \text{Εξίσωση 32}$$

όπου $X_{\text{(in)}}$:	η περιεχόμενη υγρασία του υγρού προς ξήρανση [kg water/kg solids]
M_{Water} :	η μαζική παροχή του νερού [kg water/s]
M_{Solids} :	η μαζική παροχή των στερεών [kg solids/s]



Στη συνέχεια, ακολουθεί επαναληπτική μέθοδος με σκοπό τον υπολογισμό της περιεχόμενης υγρασίας στην έξοδο $X_{(out)}$. Το ρεύμα αερίου απορροφά όλη την υγρασία που εξατμίζεται από τα στερεά. Ως εκ τούτου, η περιεκτικότητα των στερεών σε υγρασία εξόδου μπορεί να συσχετιστεί με την υγρασία εξόδου του αερίου μέσω ενός ισοζυγίου μάζας, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 33. Κάνοντας έτσι μία αρχική εκτίμηση της περιεχόμενης υγρασίας στην έξοδο, υπολογίζεται η υγρασία του αέρα στην έξοδο. Επιπλέον, υπολογίζονται οι ενθαλπίες του αέρα, του νερού και των στερεών σύμφωνα με την Εξίσωση 34, την Εξίσωση 35 και την Εξίσωση 36 αντίστοιχα. [50]

$$M_{Dry\ Air}(Y_{Air(out)} - Y_{Air(in)}) = M_{Solids}(X_{(in)} - X_{(out)}) \quad \text{Εξίσωση 33}$$

όπου $M_{Dry\ Air}$:	η μαζική παροχή του ξηρού αέρα $[\text{kg dry air}/\text{s}]$
M_{Solids} :	η μαζική παροχή των στερεών $[\text{kg solids}/\text{s}]$
$Y_{Air(in)}$:	η υγρασία του αέρα στην είσοδο $[\text{kg water}/\text{kg air}]$
$Y_{Air(out)}$:	η υγρασία του αέρα στην έξοδο $[\text{kg water}/\text{kg air}]$
$X_{(in)}$:	η περιεχόμενη υγρασία του υγρού προς ξήρανση στην είσοδο $[\text{kg water}/\text{kg solids}]$
$X_{(out)}$:	η περιεχόμενη υγρασία του υγρού προς ξήρανση στην έξοδο $[\text{kg water}/\text{kg solids}]$

$$H_{Dry\ Air} = c_{P(Air)}(T_{Air} - T_{ref}) + Y_{Air}(\lambda + c_{P(V)}(T_{Air} - T_{ref})) \quad \text{Εξίσωση 34}$$

$$H_{Water} = c_{P(Water)}(T_{Liquid} - T_{ref}) \quad \text{Εξίσωση 35}$$

$$H_{Solids} = c_{P(Solids)}(T_{Solids} - T_{ref}) \quad \text{Εξίσωση 36}$$

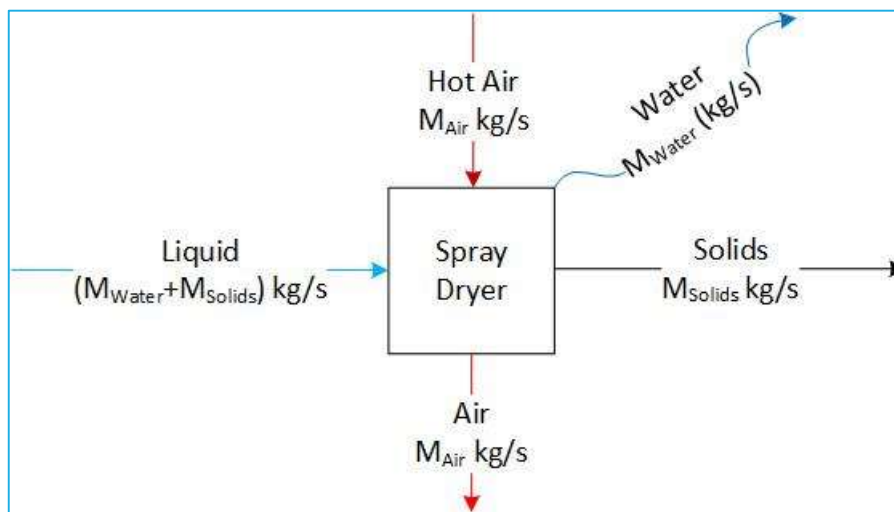
όπου $H_{Dry\ Air}$:	η ενθαλπία του ξηρού αέρα $[\text{kJ}/\text{kg dry air}]$
$c_{P(Air)}$:	η ειδική θερμοχωρητικότητα του ξηρού αέρα ($= 1 \text{ kJ}/\text{kg K}$)
$c_{P(V)}$:	η ειδική θερμοχωρητικότητα του ατμού νερού ($= 1,8 \text{ kJ}/\text{kg K}$)
T_{Air} :	η θερμοκρασία του αέρα $[\text{°C}]$
T_{ref} :	η θερμοκρασία αναφοράς ($= 0\text{°C}$)
Y_{Air} :	η υγρασία του αέρα $[\text{kg water}/\text{kg air}]$
λ :	η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης ($= 2500 \text{ kJ}/\text{kg}$)
H_{Water} :	η ενθαλπία του νερού $[\text{kJ}/\text{kg water}]$
$c_{P(Water)}$:	η ειδική θερμοχωρητικότητα του υγρού νερού ($= 4,2 \text{ kJ}/\text{kg K}$)
T_{Liquid} :	η θερμοκρασία του υγρού προς ξήρανση $[\text{°C}]$
H_{Solids} :	η ενθαλπία των στερεών $[\text{kJ}/\text{kg solids}]$
$c_{P(Solids)}$:	η ειδική θερμοχωρητικότητα των στερεών (Πίνακας 10) $[\text{kJ}/\text{kg K}]$
T_{Solids} :	η θερμοκρασία των στερεών $[\text{°C}]$

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω μπορεί πλέον να καταστρωθεί το ισοζύγιο ενέργειας, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 37. Σύμφωνα με τις παραδοχές που έχουν αναφερθεί παραπάνω, θεωρείται ότι το υγρό που εισέρχεται έχει ομογενή θερμοκρασία, με αποτέλεσμα το νερό και τα στερεά να έχουν ίσες θερμοκρασίες ($T_{Liquid(in)} = T_{Solids(in)}$). Θεωρείται επίσης ότι ο αέρας και τα στερεά που εξέρχονται έχουν ίσες θερμοκρασίες ($T_{Air(out)} = T_{Solids(out)} = T_{out}$). [50]



$$M_{\text{Dry Air}}H_{\text{Air(in)}} + M_{\text{Water}}H_{\text{Water(in)}} + M_{\text{Solids}}H_{\text{Solids(in)}} = M_{\text{Dry Air}}H_{\text{Air(out)}} + M_{\text{Solids}}H_{\text{Solids(out)}} \quad \text{Εξίσωση 37}$$

- όπου $M_{\text{Dry Air}}$: η μαζική παροχή του ξηρού αέρα [kg dry air/s]
 M_{Water} : η μαζική παροχή του νερού [kg water/s]
 M_{Solids} : η μαζική παροχή των στερεών [kg solids/s]
 $H_{\text{Dry Air}}$: η ενθαλπία του αέρα [kJ/kg dry air]
 H_{Water} : η ενθαλπία του νερού [kJ/kg water]
 H_{Solids} : η ενθαλπία των στερεών [kJ/kg solids]



Εικόνα 29: Διάγραμμα ροής ξηραντήρα δια ψεκασμού

Έπειτα υπολογίζεται η πίεση των ατμών σύμφωνα με την Εξίσωση 38: [50]

$$P_V = \frac{Y_{\text{Air(out)}} P_{\text{atm}}}{1 + \frac{Y_{\text{Air(out)}}}{0,622}} \quad \text{Εξίσωση 38}$$

- όπου P_V : η πίεση των ατμών [Pa]
 P_{atm} : η ατμοσφαιρική πίεση (= $1,01325 \cdot 10^5$ Pa) [40]
 $Y_{\text{Air(out)}}$: η υγρασία του αέρα στην έξοδο [kg water/kg air]

Η μέγιστη πίεση ατμών στη θερμοκρασία εξόδου του αερίου είναι η πίεση κορεσμού, η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση Antoine, σύμφωνα με την Εξίσωση 39: [50]

$$P_{V(\text{sat})} = 133,3 \exp\left(18,3036 - \frac{3816,44}{T_{\text{out}} + 229,02}\right) \quad \text{Εξίσωση 39}$$

- όπου $P_{V(\text{sat})}$: η πίεση κορεσμού [Pa]
 T_{out} : η θερμοκρασία του αέρα και των στερεών που εξέρχονται [°C]

Η σχετική υγρασία υπολογίζεται από τον λόγο της πίεσης των ατμών προς την πίεση κορεσμού, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 40: [50]



$$\psi = \frac{P_V}{P_{V(\text{sat})}} \quad \text{Εξίσωση 40}$$

όπου ψ : η σχετική υγρασία [–]
 P_V : η πίεση των ατμών [Pa]
 $P_{V(\text{sat})}$: η πίεση κορεσμού [Pa]

Τέλος, σύμφωνα με τις ισόθερμες προσρόφησης για όξινο ορό γάλακτος, υπολογίζεται η περιεχόμενη υγρασία στην έξοδο. Το μοντέλο αυτό ονομάζεται GAB (Guggenheim–Anderson–de Boer) και δίνεται από την Εξίσωση 41. [53]

$$X_{(\text{out})} = W_m(T_{\text{out}}) \frac{C(T_{\text{out}}) k(T_{\text{out}}) \psi}{(1 - k(T_{\text{out}}) \psi)(1 - k(T_{\text{out}}) \psi + C(T_{\text{out}}) k(T_{\text{out}}) \psi)} \quad \text{Εξίσωση 41}$$

$$W_m(T) = 0,3969 e^{\frac{6,462 \cdot 10^3}{R \cdot T}} \quad \text{Εξίσωση 42}$$

$$C(T) = 42 e^{-\frac{13,17 \cdot 10^3}{R \cdot T}} \quad \text{Εξίσωση 43}$$

$$k(T) = 1,1016 e^{-\frac{1,059 \cdot 10^3}{R \cdot T}} \quad \text{Εξίσωση 44}$$

όπου $X_{(\text{out})}$: η περιεχόμενη υγρασία του υγρού στην έξοδο [$\text{kg water} / \text{kg solids}$]
 ψ : η σχετική υγρασία [–]
 T_{out} : η θερμοκρασία του αέρα και των στερεών που εξέρχονται [$^{\circ}\text{C}$]
 R : η παγκόσμια σταθερά των αερίων ($8,314 \text{ J} / \text{mol K}$)

Η τιμή της περιεχόμενης υγρασίας του υγρού στην έξοδο εισάγεται στην Εξίσωση 33 και η επαναληπτική αυτή μέθοδος συνεχίζεται μέχρις ότου υπάρχει σύγκλιση με το μικρότερο δυνατό σφάλμα, μεταξύ των επαναλήψεων.

Όπως όλοι οι ξηραντήρες, οι ξηραντήρες με ψεκασμό καταναλώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας για τη λειτουργία τους. Η θερμική απόδοση ενός ξηραντήρα με ψεκασμό ορίζεται συνήθως με βάση την ειδική κατανάλωση ενέργειας. Σαφώς, οι ξηραντήρες υψηλής απόδοσης χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές ειδικής κατανάλωσης ενέργειας και αντίστροφα. Η μέτρηση της κατανάλωσης ενέργειας είναι αρκετά δύσκολη, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η εύρεση μίας εξίσωσης, η οποία θα υπολογίζει την ενέργεια αυτή. [49]

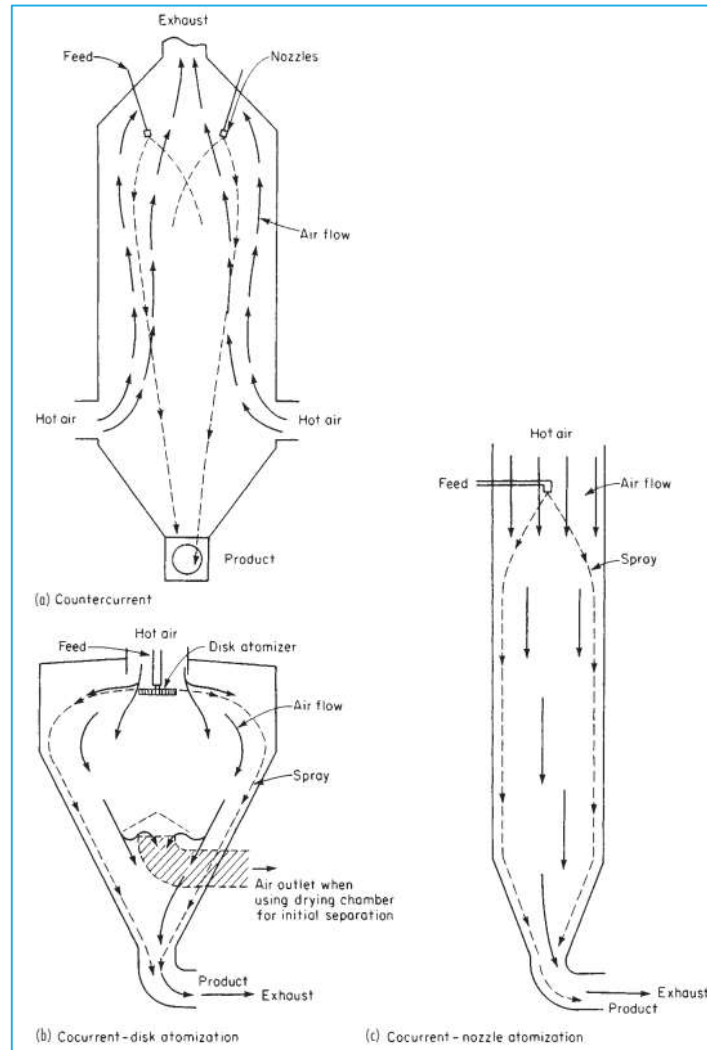
Ενέργεια καταναλώνεται ακόμη και με μηδενικό ποσοστό εξάτμισης, λόγω της περιόδου προθέρμανσης, κατά τη διάρκεια της οποίας επιτυγχάνονται συνθήκες σταθερής λειτουργίας. Επιπλέον, βρέθηκε βιβλιογραφικά ότι η ειδική κατανάλωση ενέργειας μειώνεται με αύξηση του ρυθμού εξάτμισης, γεγονός που πιθανόν να οφείλεται στο ότι η απώλεια θερμότητας από μεγάλους ξηραντήρες με ψεκασμό είναι αναλογικά μικρότερη από εκείνη των μικρότερων ξηραντήρων, επειδή η επιφάνεια του θαλάμου ξήρανσης ανά μονάδα όγκου μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους. [49]

Η συνολική ενέργεια που καταναλώνει ένας ξηραντήρας με ψεκασμό αποδίδεται στη θερμική ενέργεια, που απαιτείται για να θερμανθεί η τροφοδοσία, και στην ηλεκτρική ενέργεια, που απαιτείται για τη λειτουργία του ανεμιστήρα και του ατμοποιητή. [49]

Η θερμική ενέργεια που απαιτείται για να εξατμιστεί το νερό υπολογίζεται όπως φαίνεται στην Εξίσωση 45. [49]

$$E_{\text{Thermal,SD}} = \frac{H_{\text{Water(in)}} M_{\text{Water}} + H_{\text{Solids(in)}} M_{\text{Solids}} - H_{\text{Solids(out)}} M_{\text{Solids}}}{3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} \eta} \quad \text{Εξίσωση 45}$$

- όπου $E_{\text{Thermal,SD}}$: η απαιτούμενη θερμική ενέργεια ενός ξηραντήρα δια ψεκασμού [kWh/s]
 M_{Water} : η μαζική παροχή του νερού [kg water/s]
 M_{Solids} : η μαζική παροχή των στερεών [kg solids/s]
 H_{Water} : η ενθαλπία του νερού [kJ/kg water]
 H_{Solids} : η ενθαλπία των στερεών [kJ/kg solids]
 η : ο συντελεστής θερμικών απωλειών (= 0,306)



Εικόνα 30: Μέθοδοι επαφής αερίου-στερεών σε ξηραντήρα με ψεκασμό [36]

Η ηλεκτρική ενέργεια, που απαιτείται για τη λειτουργία του ανεμιστήρα, υπολογίζεται όπως φαίνεται στην Εξίσωση 46. Η εξίσωση αυτή φαίνεται να απλοποιείται, αφού βρέθηκε βιβλιογραφικά ότι η σχέση της ηλεκτρικής ενέργειας, που απαιτείται για τη λειτουργία του ανεμιστήρα, με τη μαζική παροχή του αέρα είναι γραμμική. [49]

$$E_{\text{Electric,Fan}} = \frac{M_{\text{Air}} \Delta P}{35,5 \rho_a \epsilon_f} \cong (2,42 M_{\text{Air}} \text{ kW}) \frac{1 \text{ kWh/s}}{3600 \text{ kW}} \quad \text{Εξίσωση 46}$$

- όπου $E_{\text{Electric,Fan}}$: η ηλεκτρική ενέργεια, που απαιτείται για τη λειτουργία του ανεμιστήρα [kWh/s]
 M_{Air} : η μαζική παροχή του αέρα [t/h]
 ΔP : η πίεση εξόδου [mbar]

ρ_a : η πυκνότητα του υγρού αέρα [kg/m^3]
 ϵ_f : η απόδοση του ανεμιστήρα [%]

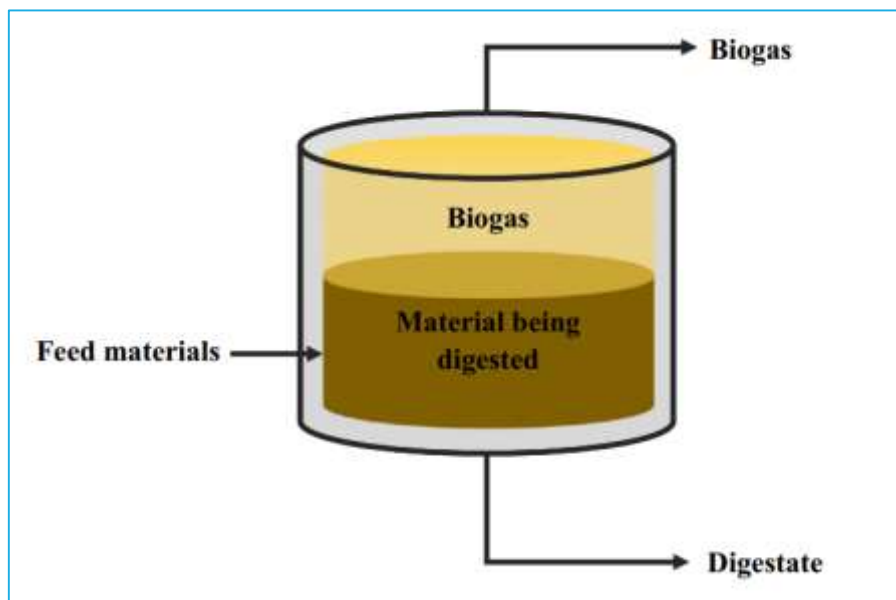
Η ηλεκτρική ενέργεια, που απαιτείται για τη λειτουργία του ατμοποιητή, υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 47. Η εξίσωση αυτή, ομοίως με την παραπάνω, φαίνεται να απλοποιείται, αφού βρέθηκε βιβλιογραφικά ότι η σχέση της ηλεκτρικής ενέργειας, που απαιτείται για τη λειτουργία του ατμοποιητή, είναι γραμμική με τη μαζική παροχή του συμπυκνώματος. [49]

$$E_{\text{Electric,atomizer}} = 3,8 \cdot 10^{-7} M_{\text{Liquid}} N^2 (2d^2 - d_d^2) \cong (8,40 M_{\text{Liquid}} \text{ kW}) \frac{1 \text{ kWh/s}}{3600 \text{ kW}} \quad \text{Εξίσωση 47}$$

όπου $E_{\text{Electric,atomizer}}$: η ηλεκτρική ενέργεια, που απαιτείται για τη λειτουργία του ατμοποιητή [kWh/s]
 M_{Liquid} : η μαζική παροχή του συμπυκνώματος [t/h]
 N : η ταχύτητα περιστροφής [rpm]
 d : η διάμετρος του δίσκου του περιστροφικού ψεκαστήρα [m]
 d_d : η διάμετρος του ατμοποιητή [m]

3.2.3. Αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση είναι μία βιολογική διεργασία, κατά την οποία διασπώνται βιοαποικοδομήσιμα υλικά, απουσία οξυγόνου, ενώ παράλληλα παράγεται βιοαέριο και χωνεμένο υπόλειμμα. Το βιοαέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα και υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας. Το χωνεμένο υπόλειμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα. Η αναερόβια χώνευση θεωρείται ανανεώσιμη τεχνολογία, καθώς η τροφοδοσία συνήθως αποτελείται από απόβλητα προς υγειονομική ταφή ή αποτέφρωση. [17, 54]



Εικόνα 31: Διάγραμμα ροής αναερόβιας χώνευσης [54]

Στο μοντέλο που περιγράφεται παρακάτω, η παραγωγή βιοαερίου εκτιμάται χρησιμοποιώντας την απόδοση του βιοαερίου, η οποία εκτιμάται από το ποσοστό καταστροφής των πτητικών στερεών, που κατ' επέκταση, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, εξαρτάται από τον χρόνο παραμονής, τον χρόνο θανάτου, την θερμοκρασία και το προφίλ ανάμιξης. [54]

Αρχικά, υπολογίζεται ο χρόνος παραμονής, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 48: [54]



$$RT = \frac{V_{\text{Dig}}}{Q_{\text{Feed}}} \quad \text{Εξίσωση 48}$$

όπου RT: ο χρόνος παραμονής [day]

V_{Dig} : ο όγκος του αντιδραστήρα αναερόβιας χώνευσης [m^3]

Q_{Feed} : η ογκομετρική παροχή της τροφοδοσίας στον αντιδραστήρα αναερόβιας χώνευσης [m^3/day]

Τα πτητικά στερεά, που καταστρέφονται, υπολογίζονται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις: [54]

$$B = k_4 e^{k_5(T-k_8)} - k_6 e^{k_7(T-k_8)} \quad \text{Εξίσωση 49}$$

$$[\text{VSD}]_{A_1}^{\text{RT},T} = \frac{B k_1 (RT - DT)}{1 + B k_1 (RT - DT)} \cdot 100\% \quad \text{Εξίσωση 50}$$

$$[\text{VSD}]_{A_2}^{\text{RT},T} = k_2 \ln(B(RT - DT)) + k_3 \quad \text{Εξίσωση 51}$$

$$[\text{VSD}]_{A_1 \text{ or } A_2} = k_9 [\text{VSD}]_{A_1}^{\text{RT},T} + k_{10} [\text{VSD}]_{A_2}^{\text{RT},T} + (1 - k_9 - k_{10}) [\text{VSD}]^{\text{RT},T} \quad \text{Εξίσωση 52}$$

$$[\text{VSD}] = k_{11} [\text{VSD}]_{A_1} + (1 - k_{11}) [\text{VSD}]_{A_2} \quad \text{Εξίσωση 53}$$

όπου [VSD]: το ποσοστό της καταστροφής των πτητικών στερεών [%]

$[\text{VSD}]_{i,A_i}^{\text{RT},T}$: το ποσοστό της καταστροφής των πτητικών στερεών σύμφωνα με τη μέθοδο i για χρόνο παραμονής RT και θερμοκρασία T [%]

B: ο σχετικός παράγοντας βακτηριδιακής ενεργότητας [-]

T: η θερμοκρασία λειτουργίας [$^{\circ}\text{C}$]

RT: ο χρόνος παραμονής [day]

DT: ο χρόνος θανάτου [day]

k_{1-11} : παράμετροι μοντέλου

Οι τιμές των παραμέτρων των παραπάνω εξισώσεων αναγράφονται στον Πίνακα 11.

Πίνακας 11: Τιμές παραμέτρων μοντέλου αναερόβιας χώνευσης [54]

Παράμετρος	Τιμή	
	Μεσόφιλοι	Θερμόφιλοι
DT	4	
k_1	0,2	
k_2	13,7	
k_3	18,9	
k_4	0,494	22,8
k_5	0,0704	0,107
k_6	0,00233	21,0
k_7	0,323	0,113
k_8	23,8	58,6
k_9	0,39	
k_{10}	0,13	
k_{11}	0,8	



Οι μικροοργανισμοί σε έναν αναερόβιο χωνευτή χαρακτηρίζονται ως μεσόφιλοι ή θερμόφιλοι ανάλογα με το εύρος τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας. Έτσι στο εύρος 25 – 45°C οι μικροοργανισμοί χαρακτηρίζονται μεσόφιλοι, ενώ στο εύρος 50 – 60°C χαρακτηρίζονται ως θερμόφιλοι. [54]

Θεωρείται ότι η παραγωγή βιοαερίου εξαρτάται γραμμικά από το ποσοστό καταστροφής των πτητικών στερεών, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 54: [54]

$$Y_{BG} = Y_{BG}^p [VSD]$$

Εξίσωση 54

όπου Y_{BG} :	η πραγματική απόδοση του ρεύματος τροφοδοσίας σε βιοαέριο [m ³ biogas/kg volatile solids]
Y_{BG}^p :	η θεωρητική απόδοση του ρεύματος τροφοδοσίας σε βιοαέριο [m ³ biogas/kg volatile solids]
[VSD]:	το ποσοστό της καταστροφής των πτητικών στερεών [%]

Στη βιβλιογραφία έγινε σύγκριση ενός αναερόβιου χωνευτή, ο οποίος τροφοδοτήθηκε με όξινο ορό γάλακτος, στους 26°C και στους 32°C. Αναφέρεται ότι η παραγωγή βιοαερίου σε αυτές τις θερμοκρασίες είναι 171 L biogas/kg volatile solids και 270 L biogas/kg volatile solids, αντίστοιχα. Επομένως, ως θερμοκρασία λειτουργίας του αναερόβιου χωνευτή επιλέγονται οι T = 32°C με θεωρητική απόδοση του ρεύματος τροφοδοσίας σε βιοαέριο $Y_{BG}^p = 270 \text{ L biogas/kg volatile solids} = 0,27 \text{ m}^3 \text{ biogas/kg volatile solids}$. Επιπλέον, στην ίδια θερμοκρασία βρέθηκε ότι η περιεκτικότητα του όξινου ορού γάλακτος σε μεθάνιο είναι 63,33% και η συγκέντρωση των πτητικών στερεών του όξινου ορού γάλακτος είναι $24,50 \text{ g/L} = 24,50 \text{ kg/m}^3$. [17] Επομένως, εφόσον η ογκομετρική παροχή της τροφοδοσίας είναι γνωστή από τα αποτελέσματα των μεμβρανών υπερδιήθησης, μπορεί να υπολογιστεί η μαζική παροχή των πτητικών στερεών.

Η ογκομετρική παροχή του βιοαερίου που παράγεται υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 55: [54]

$$Q_{BG} = M_{VS} Y_{BG}$$

Εξίσωση 55

όπου Q_{BG} :	η ογκομετρική παροχή του παραγόμενου βιοαερίου [m ³ /s]
M_{VS} :	η μαζική παροχή των πτητικών στερεών στη τροφοδοσία [kg/s]
Y_{BG} :	η απόδοση του ρεύματος τροφοδοσίας σε βιοαέριο [m ³ /kg]

Το μεθάνιο είναι το συστατικό του βιοαερίου, το οποίο παράγει ενέργεια, και η παραγωγή του υπολογίζεται όπως φαίνεται στην Εξίσωση 56: [54]

$$Q_{CH_4} = Q_{BG} x_{CH_4}$$

Εξίσωση 56

όπου Q_{CH_4} :	η ογκομετρική παροχή του παραγόμενου μεθανίου [m ³ /s]
Q_{BG} :	η ογκομετρική παροχή του παραγόμενου βιοαερίου [m ³ /s]
x_{CH_4} :	η περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο [%]

Μία μονάδα αναερόβιας χώνευσης καταναλώνει θερμότητα για τη θέρμανση της τροφοδοσίας καθώς παράλληλα υπάρχουν μερικές απώλειες από τα τοιχώματα του αναερόβιου χωνευτή προς το περιβάλλον. Έτσι, οι ενέργειες αυτές υπολογίζονται στην Εξίσωση 57 και στην Εξίσωση 58, αντίστοιχα.

Η θερμότητα που απαιτείται για να θερμανθεί η τροφοδοσία υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 57. [54]

$$E_{AD} = \left(M_{Feed} c_p (T - T_{amb}) \text{ kJ/day} \right) \frac{1 \text{ kWh}}{3600 \text{ kJ}} \frac{1 \text{ day}}{24 \cdot 3600 \text{ sec}} \quad \text{Εξίσωση 57}$$

όπου E_{AD} : η ενέργεια που απαιτείται για να θερμανθεί η τροφοδοσία [kWh/sec]

M_{Feed} : η μαζική παροχή της τροφοδοσίας [kg/day]

c_p : η ειδική θερμοχωρητικότητα της τροφοδοσίας [kJ/kg K]

T : η θερμοκρασία λειτουργίας [$^{\circ}\text{C}$]

T_{amb} : η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($= 25^{\circ}\text{C}$)

Οι θερμικές απώλειες από τον αναερόβιο χωνευτή υπολογίζονται σύμφωνα με την Εξίσωση 58. [54]

$$E_{AD, Loss} = (U A (T - T_{amb}) \text{ Watt}) \frac{1 \text{ kWh/s}}{3600 \cdot 1000 \text{ W}} \quad \text{Εξίσωση 58}$$

όπου $E_{AD, Loss}$: οι θερμικές απώλειες [kWh/sec]

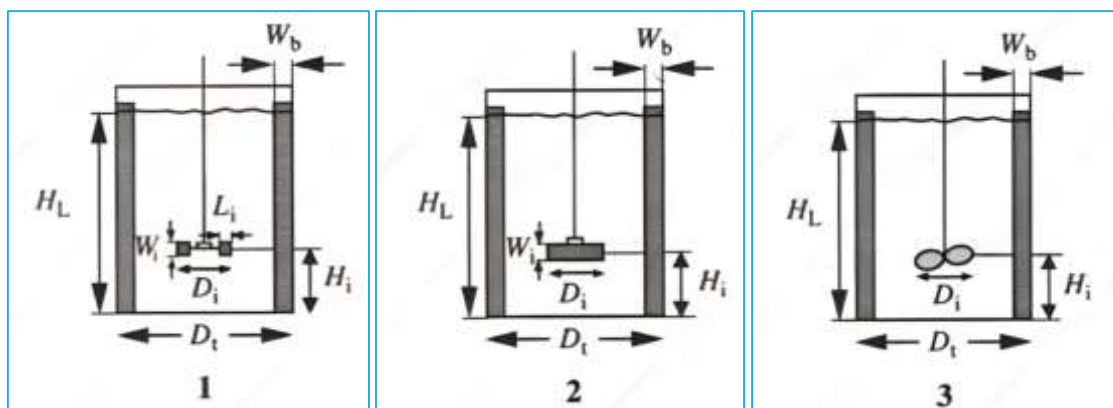
U : ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας [$\text{W/m}^2\text{C}$]

A : η επιφάνεια του αναερόβιου χωνευτή [m^2]

T : η θερμοκρασία λειτουργίας [$^{\circ}\text{C}$]

T_{amb} : η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($= 25^{\circ}\text{C}$)

Θεωρείται ότι ο αναερόβιος χωνευτής είναι κατασκευασμένος από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 25cm και είναι μονωμένος με πολυστυρένιο πάχους 10cm. Με αυτά τα υλικά κατασκευής λοιπόν ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας βρέθηκε ίσος με $0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$. [55] Εκτός από τη θερμική ενέργεια, που απαιτείται για να θερμανθεί η τροφοδοσία, χρειάζεται επίσης ηλεκτρική ενέργεια, με τη βοήθεια της οποίας θα αναδεύεται το υγρό διάλυμα, που περιέχεται στο εσωτερικό του αναερόβιου χωνευτή. Υπάρχουν διάφοροι τύποι αναδευτήρων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 32. Ανάλογα λοιπόν, με τον τύπο του αναδευτήρα που επιλέγεται μεταβάλλεται ο αριθμός ισχύος N_p και κατ' επέκταση η απαιτούμενη ισχύς για την ανάμειξη. [56]



Εικόνα 32: Απεικόνιση τουρμπίνας Rashton (1), κώπης (2) και προπέλας (3) [56]

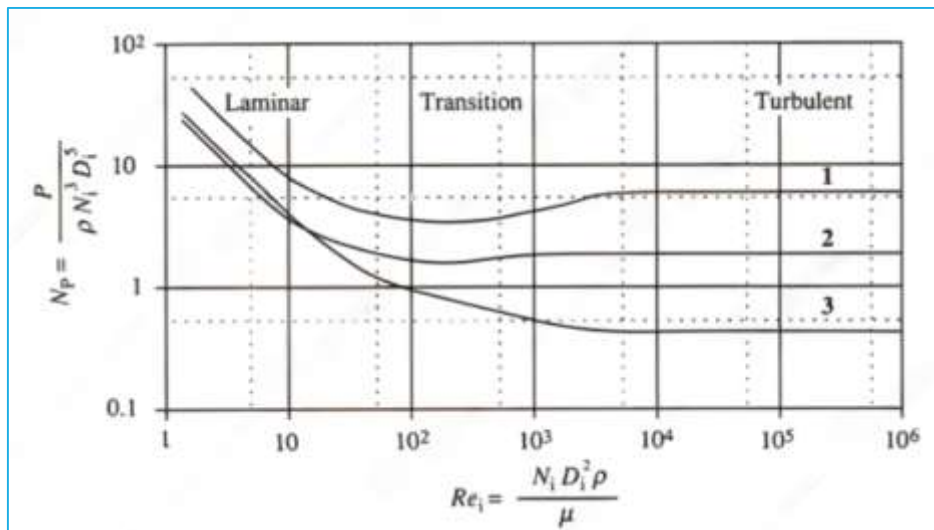
Η απαιτούμενη ισχύς εξαρτάται από την αντίσταση που προβάλλει το μέσο στην περιστροφή του ταράκτρου. Η απαιτούμενη ισχύς για την ανάμειξη νευτώνειων ρευστών εξαρτάται από παράγοντες, όπως η ταχύτητα περιστροφής, η διάμετρος και η γεωμετρία του ταράκτρου και ιδιότητες του ρευστού, όπως το ιξώδες και η πυκνότητα. Έτσι λοιπόν, υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 59. [56]

$$E_{\text{Mix}} = \left(\frac{\rho N_i^3 D_i^5 N_p}{g} \text{ Watt} \right) \frac{1 \text{ kWh/s}}{3600 \cdot 1000 \text{ W}}$$

Εξίσωση 59

- όπου E_{Mix} : η απαιτούμενη ισχύς του αναδευτήρα [kWh/s]
 ρ : η πυκνότητα του ρευστού που αναδεύεται [kg/m^3]
 N_i : η ταχύτητα περιστροφής αναδευτήρα [rps]
 D_i : η διάμετρος του τaráκτρου [m]
 N_p : ο αριθμός ισχύος [-]
 g : η επιτάχυνση της βαρύτητας ($9,81 \text{ m}/\text{s}^2$)

Σύμφωνα με την Εξίσωση 59, η απαιτούμενη ισχύς του αναδευτήρα εξαρτάται αναλογικά από τον αριθμό ισχύος. Επομένως, θα πρέπει να επιλεγθεί ο τύπος αναδευτήρα με τον μικρότερο αριθμό ισχύος. Ο αριθμός ισχύος είναι ένα αδιάστατο μέγεθος, που εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds, ο οποίος υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 60.



Εικόνα 33: Συσχετισμός αριθμού Reynolds και αριθμού ισχύος κατά την ανάδευση νευτώνιων ρευστών με τουρμπίνα Rashton (1), κώπη (2) και προπέλα (3) [56]

$$Re = \frac{N_i D_i^2 \rho}{\mu}$$

Εξίσωση 60

- όπου Re : ο αριθμός Reynolds [-]
 N_i : η ταχύτητα περιστροφής αναδευτήρα [rps]
 D_i : η διάμετρος του τaráκτρου [m]
 ρ : η πυκνότητα του ρευστού που αναδεύεται [kg/m^3]
 μ : το δυναμικό ιξώδες του ρευστού που αναδεύεται [$\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$]

Στην Εικόνα 33 φαίνεται η γραφική απεικόνιση του συσχετισμού του αριθμού Reynolds με τον αριθμό ισχύος για τρεις τύπους αναδευτήρων. Θα επιλεγθεί να χρησιμοποιηθεί η προπέλα, διότι με τον τύπο αυτό ο αριθμός ισχύος είναι μικρότερος σε σχέση με τους άλλους δύο. Επιπλέον, θα επιλεγθούν τέτοια χαρακτηριστικά, έτσι ώστε η ροή να είναι τυρβώδης ($Re > 10^4$), αφού στην περιοχή αυτή παρατηρούνται μικρότεροι αριθμοί ισχύος. [56] Το δυναμικό ιξώδες και η πυκνότητα του ρευστού, που βρίσκεται στο εσωτερικό του αναερόβιου χωνευτή, θεωρείται ότι είναι ίσα με αυτά του όξινου ορού γάλακτος, δηλαδή $0,00109 \text{ Ns}/\text{m}^2$ [47] και $1,03 \text{ kg}/\text{m}^3$ [48] αντίστοιχα.

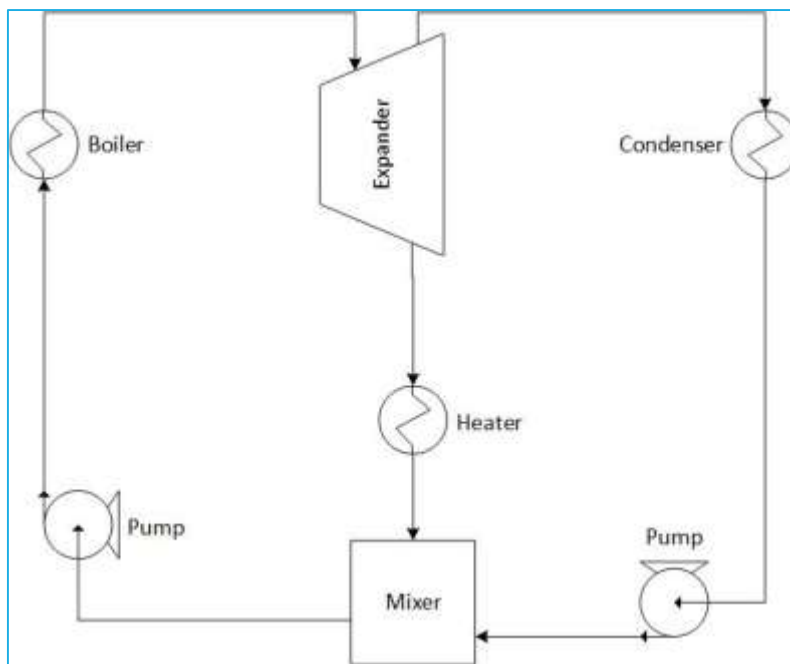
Συνήθως ένα δοχείο, το εσωτερικό του οποίου χρειάζεται ανάδευση, είναι εφοδιασμένο με βοηθητικές για την ανάδευση διατάξεις, που ονομάζονται εκτροπείς. Πρόκειται για μεταλλικές λωρίδες τοποθετημένες κάθετα κοντά

στο εσωτερικό τοίχωμα του δοχείου, με τις οποίες μειώνεται η δημιουργία δινών και ο στροβιλισμός. Η απαιτούμενη ισχύς, που υπολογίσθηκε σύμφωνα με την Εξίσωση 59, ισχύει για τα ακόλουθα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός βιοαντιδραστήρα: [56]

$$\frac{D_t}{D_i} = \frac{H_L}{D_i} = 3 \qquad \frac{H_i}{D_i} = 1 \qquad \frac{W_b}{D_t} = 0,1 \qquad \text{Εξίσωση 61}$$

- όπου D_t : η διάμετρος του δοχείου [m]
 D_i : η διάμετρος ταράκτρου [m]
 H_L : το ύψος του υγρού [m]
 H_i : η απόσταση ταράκτρου-πυθμένα [m]
 W_b : το πλάτος του εκτροπέα [m]

Επομένως, η διάμετρος του δοχείου θα πρέπει να είναι η τριπλάσια αυτής του ταράκτρου ($D_i = D_t/3$). Παράλληλα θα πρέπει να ικανοποιούνται και οι υπόλοιπες σχέσεις, μέσω των οποίων καθορίζεται η γεωμετρία του αναερόβιου χωνευτή, με δεδομένο τον όγκο του V_{Dig} και το γεγονός ότι είναι πληρωμένος έως το 80% του ύψους του. Τέλος, η ταχύτητα περιστροφής του αναδευτήρα επιλέγεται, έτσι ώστε η ροή του υγρού να είναι τυρβώδης.



Εικόνα 34: Διάγραμμα ροής συστήματος συμπαραγωγής

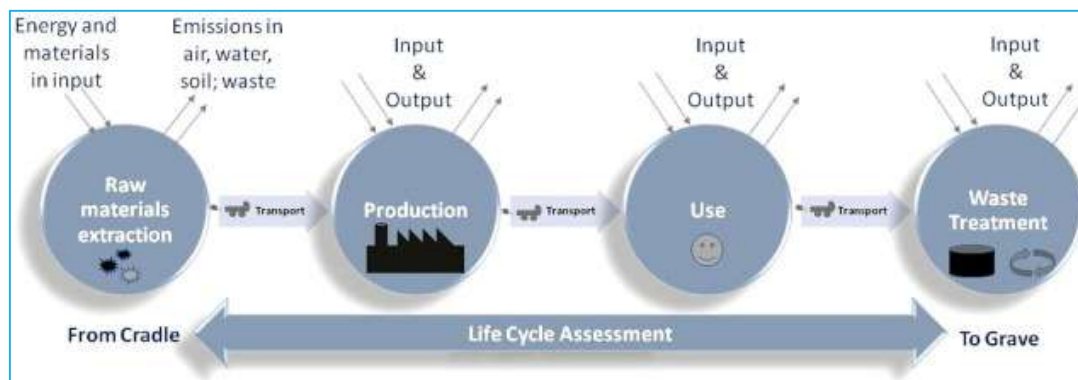
Η απαιτούμενη θερμική και ηλεκτρική ενέργεια, που απαιτείται για τη λειτουργία του αναερόβιου χωνευτή θεωρείται ότι προσφέρεται από σύστημα συμπαραγωγής, στον λέβητα του οποίου καίγεται το βιοαέριο που παράχθηκε στον ίδιο αναερόβιο χωνευτή. Συγκεκριμένα, αυτό που καίγεται είναι το μεθάνιο, του οποίου η μαζική παροχή υπολογίζεται μέσω της πυκνότητάς του, που είναι $0,667 \text{ kg/m}^3$. [57]

4. Ανάλυση κύκλου ζωής (LCA)

4.1. Γενικά στοιχεία

Ο κύκλος ζωής αναφέρεται στη διάρκεια ζωής ενός προϊόντος, από τη συλλογή πόρων, την κατασκευή, τη χρήση, έως και την τελική διάθεση. Ο κύκλος ζωής ουσιαστικά «ακολουθεί» τα υλικά από την στιγμή που εξάγονται από το περιβάλλον, έως ότου επιστρέψουν και πάλι σε αυτό. Η ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment) αφορά στην ανάλυση και στην αξιολόγηση των κύκλων ζωής των προϊόντων, ως προς τα περιβαλλοντικά ζητήματα. Η προσέγγιση της ανάλυσης κύκλου ζωής έχει ως επίκεντρο ένα προϊόν και εξετάζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτού. Τα προϊόντα μπορεί να είναι είτε φυσικά αντικείμενα (μολύβια, πατάτες, αυτοκίνητα) είτε διεργασίες (μεταφορές, υγειονομική περίθαλψη). Βέβαια, στην πραγματικότητα, δεν είναι το προϊόν ή η διεργασία, αυτά που είναι στο επίκεντρο της ανάλυσης κύκλου ζωής. Αυτό συμβαίνει διότι τα προϊόντα παρέχονται από συστήματα, τα οποία πραγματοποιούν μία συγκεκριμένη λειτουργία. Για παράδειγμα, στα ενεργειακά συστήματα, το προϊόν είναι η παρεχόμενη ενέργεια, που παρέχεται από συστήματα παροχής ενέργειας από πρωτογενείς φορείς ενέργειας (π.χ. με τη μορφή πετρελαίου, ηλεκτρισμού ή θερμότητας), ενώ τελικά η παρεχόμενη ενέργεια χρησιμοποιείται για την παροχή ενεργειακών λειτουργιών (π.χ. φωτισμός, μηχανικό έργο, παραγωγή υλικών). [58]

Άλλο ένα χαρακτηριστικό, που είναι εξίσου σημαντικό είναι ότι η ανάλυση κύκλου ζωής λαμβάνει υπόψιν μία αλυσίδα διαδικασιών, αφού η αξιολόγηση αφορά όλες τις διαδικασίες, από την εξόρυξη των πόρων μέχρι την παραγωγή, την κατανάλωση και τελικά τη διαχείριση των αποβλήτων (cradle-to-grave analysis). Έτσι, ως επί το πλείστον οι διεργασίες στον κύκλο ζωής δεν ελέγχονται από μία μόνο εταιρία ή καταναλωτή. Αντιθέτως, το περιβαλλοντικό αντίκτυπο ενός προϊόντος εξαρτάται από το περιβαλλοντικό αποτύπωμα πολλών εταιριών. [58]



Εικόνα 35: Απεικόνιση ανάλυσης κύκλου ζωής [59]

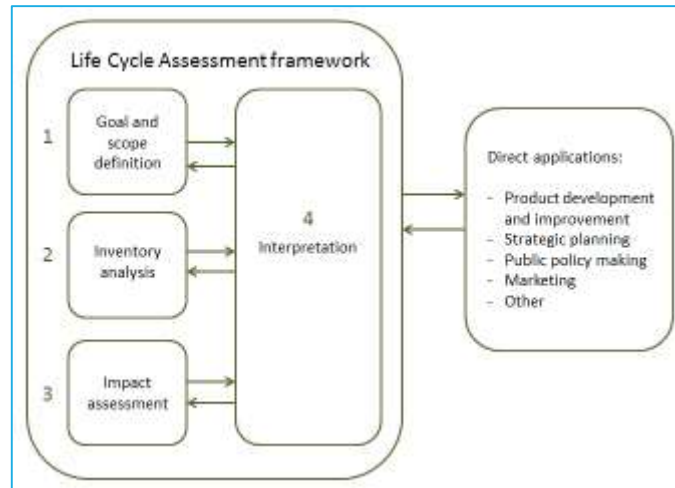
Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που αξιολογούνται από την ανάλυση κύκλου ζωής σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή, την εξάντληση των πρωτογενών φορέων ενέργειας και την τοξικότητα για τον άνθρωπο και τα οικοσυστήματα. [58]

4.2. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία της ανάλυσης κύκλου ζωής αναπτύχθηκε από τη δεκαετία του 1990, ενώ εξακολουθεί να βρίσκεται σε διαρκή ανάπτυξη. Ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (International Organization for Standardization) ανέπτυξε τα πρότυπα ISO-14040, στα οποία αναγράφονται τα βήματα που ακολουθούνται στην ανάλυση κύκλου ζωής, όπως περιγράφονται παρακάτω:

1. Καθορισμός στόχων. Στο βήμα αυτό περιγράφονται η εφαρμογή και ο τύπος της ανάλυσης κύκλου ζωής, ορίζονται τα συστήματα που πρόκειται να αξιολογηθούν και καθορίζονται το γεωγραφικό και το χρονικό πεδίο, στο οποίο θα γίνει η αξιολόγηση. Περιλαμβάνεται επίσης, ο ορισμός της λειτουργικής μονάδας, η οποία αποτελεί σημείο αναφοράς για τα επόμενα βήματα.

2. Ανάλυση αποθεμάτων. Προσδιορίζονται οι περιβαλλοντικές εκλύσεις (όπως εκπομπές ή εξορύξεις πόρων) για τα συστήματα και τη λειτουργική μονάδα, που μελετώνται.
3. Εκτίμηση επιπτώσεων. Στο βήμα αυτό προσδιορίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, που προκαλούνται από τις περιβαλλοντικές εκλύσεις, που τέθηκαν στο 2^ο βήμα.
4. Ερμηνεία. Στο τελευταίο αυτό βήμα αναλύονται τα αποτελέσματα, γίνεται εκτίμηση των επιπτώσεων και εξάγονται τα συμπεράσματα. [58]

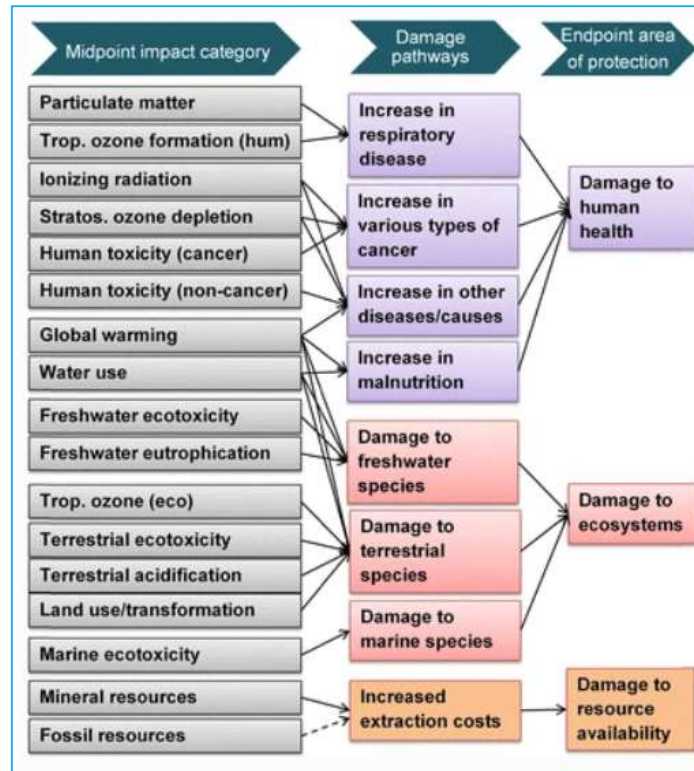


Εικόνα 36: Απεικόνιση βημάτων ανάλυσης κύκλου ζωής [58]

Η ανάλυση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Assessment) δίνει ερμηνεία στα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής, μεταφράζοντας τις εκπομπές και τις εξορύξεις πόρων σε δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Αυτό πραγματοποιείται με τη βοήθεια χαρακτηριστικών συντελεστών, οι οποίοι εκφράζουν το περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Υπάρχουν δύο επικρατέστεροι τρόποι για την εξαγωγή των συντελεστών αυτών, σε επίπεδο μέσου σημείου και σε επίπεδο τελικού σημείου. Το επίπεδο μέσου σημείου αφορά τη σύνδεση μεταξύ των αιτιών και των επιπτώσεων, ενώ το επίπεδο τελικού σημείου αντικατοπτρίζει συνήθως τη ζημία σε έναν από τους τρεις τομείς της ανθρώπινης υγείας, της ποιότητας του οικοσυστήματος και της έλλειψης πόρων. Η μέθοδος, που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών συντελεστών αυτών, ονομάζεται ReCiPe2016. Τέλος, οι συντελεστές που αφορούν στο επίπεδο τελικού σημείου εξάγονται από αυτούς του επιπέδου μεσαίου σημείου, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 37. Οι συντελεστές αυτοί αναγράφονται στον Πίνακα 12. [60]

Πίνακας 12: Δείκτες επιπέδου τελικού σημείου [60]

Περιβαλλοντική επίπτωση	Μονάδα Μέτρησης
Damage to Human Health	DALY
Damage to ecosystems	species.yr
Damage to resource availability	\$



Εικόνα 37: Κατηγορίες επιπτώσεων, που καλύπτονται από τη μέθοδο ReCiPe [60]



Πίνακας 13: Αντιστοίχιση επιπτώσεων και δεικτών επιπέδου μεσαίου σημείου [60]

Επιπτώσεις επιπέδου μεσαίου σημείου	Δείκτης	Χαρακτηριστικοί Συντελεστές	Μονάδες μέτρησης
Climate change	Infrared radiative forcing increase	Global warming potential (GWP)	kg CO ₂ -eq to air
Ozone depletion	Stratospheric ozone decrease	Ozone depletion potential (ODP)	kg CFC-11-eq to air
Ionising radiation	Absorbed dose increase	Ionising radiation potential (IRP)	kBq Co-60-eq to air
Fine particulate matter formation	PM _{2.5} population intake increase	Particulate matter formation potential (PMFP)	kg PM _{2.5} -eq to air
Photochemical oxidant formation: terrestrial ecosystems	Tropospheric ozone increase	Photochemical oxidant formation potential: ecosystems (EOPF)	kg NO _x -eq to air
Photochemical oxidant formation: human health	Tropospheric ozone population intake increase	Photochemical oxidant formation potential: humans (HOFP)	kg NO _x -eq to air
Terrestrial acidification	Proton increase in natural soils	Terrestrial acidification potential (TAP)	kg SO ₂ -eq to air
Freshwater eutrophication	Phosphorus increase in freshwater	Freshwater eutrophication potential (FEP)	kg P-eq to freshwater
Human toxicity: cancer	Risk increase of cancer disease incidence	Human toxicity potential (HTP _c)	kg 1,4-DCB-eq to urban air
Human toxicity: non-cancer	Risk increase of non-cancer disease incidence	Human toxicity potential (HTP _{nc})	kg 1,4-DCB-eq to urban air
Terrestrial ecotoxicity	Hazard-weighted increase in natural soils	Terrestrial ecotoxicity potential (TETP)	kg 1,4-DCB-eq to industrial soil
Freshwater ecotoxicity	Hazard-weighted increase in freshwaters	Freshwater ecotoxicity potential (FETP)	kg 1,4-DCB-eq to freshwater
Marine ecotoxicity	Hazard-weighted increase in marine water	Marine ecotoxicity potential (METP)	kg 1,4-DCB-eq to marine water
Land use	Occupation and time-integrated land transformation	Agricultural land occupation potential (LOP)	m ² × yr annual cropland-eq
Water use	Increase of water consumed	Water consumption potential (WCP)	m ³ water-eq consumed
Mineral resource scarcity	Increase of ore extracted	Surplus ore potential (SOP)	kg Cu-eq
Fossil resource scarcity	Upper heating value	Fossil fuel potential (FFP)	kg oil-eq



Πίνακας 14: Αντιστοίχιση περιβαλλοντικού προβλήματος με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις [60]

Περιβαλλοντικό πρόβλημα	Κατηγορία επιπτώσεων	Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις
Climate change	Human health	Years of life lost and disabled related to increased malaria, diarrhoea, malnutrition and natural disasters due to increased global mean temperature
	Ecosystems (terrestrial)	Species loss related to changing biome distributions due to increased global temperature
	Ecosystems (freshwater)	Fish species loss due to decrease river discharge
Stratospheric ozone depletion	Human health	Years of life lost and disabled related to increased skin cancer and cataract due to UV-exposure
Ionising radiation	Human health	Years of life lost and disabled related to an increase in cancer and hereditary diseases due to exposure to radiation
Particulate matter formation	Human health	Years of life lost related to an increase in cardiopulmonary and lung cancer caused by exposure to primary and secondary aerosols
Photochemical ozone formation	Human health	Years of life lost related to an increase in respiratory diseases caused by exposure to ozone
	Ecosystems (terrestrial)	Loss of plant species due to increase in ozone exposure
Terrestrial acidification	Ecosystems (terrestrial)	Loss of plant species due to decrease in soil pH
Freshwater eutrophication	Ecosystems (aquatic)	Loss of aquatic species due to increased phosphorus concentrations
Toxicity	Human health	Years of life lost and disabled due to cancer and non-cancer effects due to ingestion and inhalation of toxic substances
	Ecosystems (marine)	Species loss due to chemical exposure in marine waters
	Ecosystems (terrestrial)	Species loss due to chemical exposure in soils
	Ecosystems (freshwater)	Species loss due to chemical exposure in freshwater
Water consumption	Human health	Malnutrition caused by water shortage
	Ecosystems (terrestrial)	Decrease in Net Primary Productivity because of water shortage as proxy for total species loss
	Ecosystems (aquatic)	Fish species loss due to decreased river discharge
Land use	Ecosystems (terrestrial)	Species loss due to different types of land use (agriculture, forestry, built up). Species loss caused by transformation of natural land to used land, including the time it takes to back-transform to natural land
Mineral resource scarcity	Resource scarcity	Cost increase due to mineral extraction increase
Fossil resource scarcity	Resource scarcity	Cost increase due to fossil extraction increase

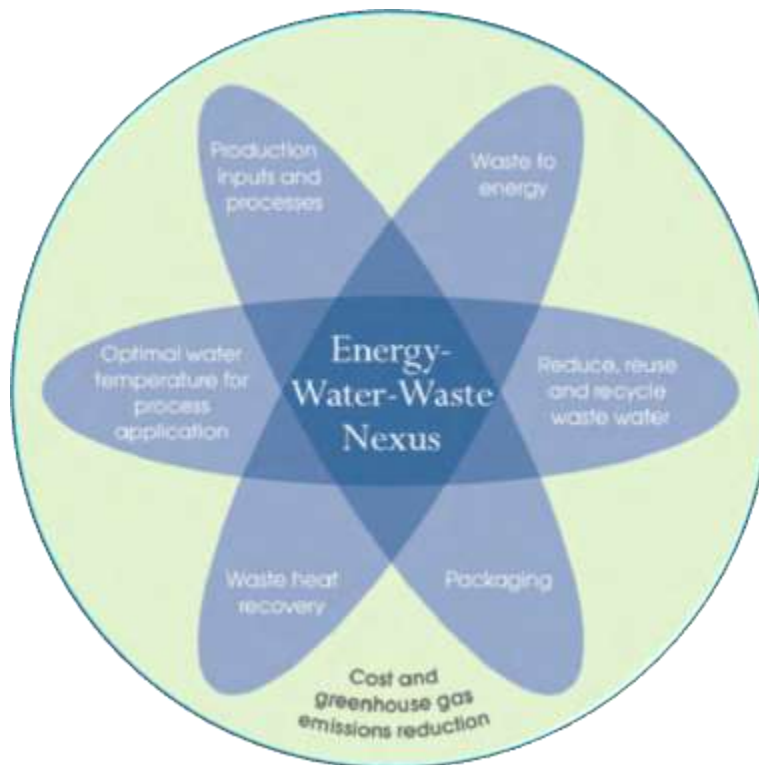
5. Ανάλυση πλέγματος (NEXUS) Ενέργειας – Νερού – Υλικών

5.1. Γενικά στοιχεία

Το πλαίσιο της ανάλυσης πλέγματος (NEXUS) περιλαμβάνει τη συσχέτιση των κοινωνικών και οικολογικών συστημάτων, ενώ μπορεί να προβλέψει απρόβλεπτες συνέπειες, να εντοπίσει αντισταθμίσεις και συν-ωφέληματα και να εντοπίσει βέλτιστες λύσεις μεταξύ ανταγωνιστικών συμφερόντων. Ειδικότερα, η ανάλυση πλέγματος NEXUS αφορά στις αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των καθορισμένων κόμβων (π.χ. φυσικοί πόροι) και των κοινωνικό-οικονομικών παραγόντων (π.χ. βιομηχανίες). Για παράδειγμα, όταν μελετάται η σχέση νερού – ενέργειας, η ανάλυση πλέγματος αφορά στο νερό που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας και/ή την ενέργεια που χρησιμοποιείται για την παροχή νερού. Βέβαια, είναι δυνατή η ανάλυση πλέγματος για παραπάνω από 2 κόμβους. [61]

Η ανάγκη για την ανάλυση πλέγματος NEXUS έχει προκύψει από τα παρακάτω φαινόμενα:

1. Εμφάνιση ακραίων κλιματικών και καιρικών φαινομένων
2. Τεχνολογικές ανακαλύψεις
3. Ανάπτυξη υποδομών μεγάλης κλίμακας
4. Στόχος για βιώσιμη ανάπτυξη [62]



Εικόνα 38: Ανάλυση πλέγματος NEXUS μεταξύ των νερό – ενέργεια – απόβλητα [63]

5.2. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία της ανάλυσης πλέγματος NEXUS βασίζεται σε ορισμένους δείκτες, σύμφωνα με τους οποίους μελετάται η σύνδεση των πόρων, όσον αφορά στην παραγωγή, αλλά και στην κατανάλωση. Ένας από τους δείκτες, που χρησιμοποιούνται, ονομάζεται Nexus Strength και αποσκοπεί στον εντοπισμό των ισχυρότερων δεσμών μεταξύ πόρων. Δηλαδή, εκφράζει ποιους δεσμοί πόρων ενός προϊόντος, ενός κλάδου, μίας χώρας ή ακόμη και του κόσμου συμβάλλουν περισσότερο στην παγκόσμια χρήση φυσικών πόρων. Ο δείκτης Nexus Strength υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 62. [61]



$$NS_j = \sum_i p_i d_{ij}$$

Εξίσωση 62

όπου NS_j : ο δείκτης Nexus Strength για την κατάσταση j
 p_i : ο συντελεστής βαρύτητας του πόρου i
 d_{ij} : η αδιάστατη μεταβλητή (Εξίσωση 63)

$$d_{ij} = \frac{q_i}{\max_j(q_i)}$$

Εξίσωση 63

όπου d_{ij} : η αδιάστατη μεταβλητή
 q_i : η ποσότητα του πόρου i

Οι τιμές που παίρνει ο συντελεστής NS κυμαίνονται από 0-1, με το 1 να υποδεικνύει πλήρη χρήση και αλληλεξάρτηση των πόρων, ενώ το 0 να συμβολίζει μηδενική χρήση και αλληλεξάρτηση των πόρων. [61]



6. Αποτελέσματα – Συζήτηση αποτελεσμάτων

6.1. Παροχές και ενεργειακές απαιτήσεις

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι συγκεντρωτικοί πίνακες με τις εισροές, τις εκροές και τις ενεργειακές απαιτήσεις της κάθε διεργασίας ή του κάθε συγκροτήματος διεργασιών. Αρχικά, στον Πίνακα 15 αναγράφονται τα χαρακτηριστικά της γαλακτοβιομηχανίας, θεωρώντας την ως ένα συγκρότημα διεργασιών. Οι τιμές, που αναγράφονται στον πίνακα αυτόν είναι δεδομένες, αφού έχουν δοθεί από την υπό εξέταση γαλακτοβιομηχανία. Όσον αφορά στις εισροές, είχε δοθεί η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1. Ωστόσο, στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε η μέγιστη τιμή, για την διευκόλυνση των μετέπειτα υπολογισμών. Επίσης, η μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων έχει εξαιρεθεί από τις ενεργειακές καταναλώσεις της γαλακτοβιομηχανίας, διότι εξετάζεται αργότερα σε ανεξάρτητο βαθμό. Τέλος, εφόσον οι παρεμβάσεις που πρόκειται να γίνουν δεν αφορούν το εσωτερικό της γαλακτοβιομηχανίας, οι τιμές αυτές διατηρούνται σταθερές πριν και μετά την εφαρμογή των παρεμβάσεων.

Πίνακας 15: Εισροές, εκροές και ενεργειακή απαίτηση της γαλακτοβιομηχανίας

Γαλακτοβιομηχανία		
Εισροές		
Γάλα	73972,6	kg/day
Κρέμα γάλακτος	3561,6	kg/day
Πρωτεΐνες γάλακτος	5945,2	kg/day
Φρουτοπαρασκευάσματα/βοηθητικές ύλες	821,9	kg/day
Βοηθητικές ύλες (γλυκόζη, σάκχαρα, βιταμίνες κ.α.)	3835,6	kg/day
Φρέσκο νερό	379320,3	kg/day
Μαζούτ (προς λέβητες)	383,6	kg/day
Εκροές		
Γιαούρτια και επιδόρπια γιαουρτιών (στραγγιστά)	15547,9	kg/day
Επιδόρπια γιαουρτιών (στραγγιστά), εμπλουτισμένα ή με (φρούτο)παρασκευάσματα	9328,8	kg/day
Επιδόρπια γιαουρτιών εμπλουτισμένα, για ηλικίες από τον 6ο μήνα με (φρούτο)παρασκευάσματα	3109,6	kg/day
Επιδόρπια γιαουρτιών για παιδιά, με (φρούτο)παρασκευάσματα και overcups με δημητριακά	3109,6	kg/day
Γάλατα υψηλής παστερίωσης διαφορετικής λιποπεριεκτικότητας	28561,6	kg/day
Γάλατα υψηλής παστερίωσης με κακάο	2876,7	kg/day
Εμπλουτισμένα γάλατα υψηλής παστερίωσης	4767,1	kg/day
Ροφήματα γάλακτος υψηλής παστερίωσης για παιδιά	5712,3	kg/day
Κρέμες γάλακτος UHT	15205,5	kg/day
Όξινος ορός γάλακτος	3571,4	kg/day
Υγρά απόβλητα	375666,7	kg/day
Ενεργειακή κατανάλωση		
Ηλεκτρική ενέργεια	90770,4	kWh/day

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 16 αναγράφονται οι εισροές, οι εκροές, τα χαρακτηριστικά τους και οι ενεργειακές απαιτήσεις της μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Οι τιμές, που αναγράφονται στον πίνακα αυτό αναφέρονται στην υφιστάμενη κατάσταση, όταν ακόμα δεν έχουν υλοποιηθεί οι παρεμβάσεις. Όσον αφορά στην



συνολική ενεργειακή κατανάλωση, είναι δεδομένη από την υπό εξέταση βιομηχανία. Ωστόσο έχει υπολογισθεί η ενεργειακή κατανάλωση, που αντιστοιχεί στην διεργασία ενεργού ιλύος, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία. Έτσι το υπόλοιπο της ηλεκτρικής ενέργειας, που προσφέρεται, αντιστοιχεί στις διεργασίες του εσχαρισμού και της επεξεργασίας της ιλύος (πάχυνση, αφυδάτωση, απόθεση). Οι υπολογισμοί των τιμών που αναγράφονται στον Πίνακα 16 υπολογίστηκαν με τη βοήθεια κώδικα, ο οποίος είναι γραμμένος στη γλώσσα του Matlab, όπως φαίνεται στο Παράρτημα 9.1. Εκτός από τα μεγέθη που αναγράφονται στον Πίνακα 16, υπολογίστηκε επίσης και ο όγκος των υγρών αποβλήτων, που περιέχονται στην δεξαμενή αερισμού, και είναι ίσος με $1705,96\text{m}^3$. Σύμφωνα με την επιθυμητή πληρότητα λοιπόν, μπορεί να υπολογιστεί και να σχεδιαστεί ο όγκος της δεξαμενής αερισμού, έτσι ώστε να μειώνεται ικανοποιητικά το οργανικό φορτίο.

Πίνακας 16: Εισροές, εκροές, τα χαρακτηριστικά τους και ενεργειακή απαίτηση της μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, πριν τις παρεμβάσεις

Μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων		
Εισροές		
Υγρά απόβλητα	375,7	m^3/day
BOD ₅	1,226	kg/m^3
COD	1,993	kg/m^3
TSS	1,309	kg/m^3
Εκροές		
Καθαρό νερό	297,8	m^3/day
BOD ₅	0,031542	kg/m^3
COD	0,051275	kg/m^3
TSS	0,033677	kg/m^3
Αφυδατωμένη Ιλύς	341,92	kg/day
Ενεργειακή κατανάλωση		
Ηλεκτρική ενέργεια (Διεργασία ενεργού ιλύος)	1798,8	kWh/day
Ηλεκτρική ενέργεια (Εσχαρισμός & Επεξεργασία ιλύς)	2660,4	kWh/day

Βέβαια, σύμφωνα με το διάγραμμα ροής της μελλοντικής κατάστασης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 18, η διεργασία ενεργού ιλύος επηρεάζεται από τις παρεμβάσεις. Συγκεκριμένα, το συμπύκνωμα που εξέρχεται από τις μεμβράνες υπερδιήθησης επιστρέφει εξ ολοκλήρου στην δεξαμενή αερισμού. Οι τιμές, που περιγράφουν τη μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, μεταβάλλονται ελάχιστα, λόγω των παρεμβάσεων, αφού η ποσότητα του συμπυκνώματος είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με την ροή των υγρών αποβλήτων, που εξέρχεται από τη γαλακτοβιομηχανία. Συγκρίνοντας, τον Πίνακα 16 και τον Πίνακα 17, παρατηρείται ότι η εισροή των υγρών αποβλήτων αυξάνεται, όπως ήταν αναμενόμενο. Ταυτόχρονα αυξάνεται η εκροή της αφυδατωμένης ιλύος, ενώ μειώνεται η εκροή του καθαρού νερού. Αυτό συμβαίνει, διότι όπως θα φανεί και παρακάτω, το συμπύκνωμα που εξέρχεται από τις μεμβράνες υπερδιήθησης έχει μεγάλο οργανικό φορτίο, με αποτέλεσμα να συμβάλλει τελικά στην παραγωγή περισσότερης ιλύος. Για τον ίδιο λόγο αυξάνεται και το οργανικό φορτίο που εισέρχεται και εξέρχεται από την μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Οι υπολογισμοί των τιμών που αναγράφονται στον Πίνακα 17 υπολογίστηκαν με τη βοήθεια κώδικα, ο οποίος είναι γραμμένος στη γλώσσα του Matlab, όπως φαίνεται στο Παράρτημα 9.1. Στην περίπτωση αυτή ο όγκος των υγρών αποβλήτων στη δεξαμενή αερισμού υπολογίστηκε ίσος με $1708,52\text{m}^3$. Είναι δηλαδή λίγο μεγαλύτερος από αυτόν πριν την εφαρμογή των παρεμβάσεων. Ωστόσο δεν είναι τόσο μεγαλύτερος, ώστε να θεωρηθεί πως θα χρειαστεί επέκταση της δεξαμενής αερισμού.



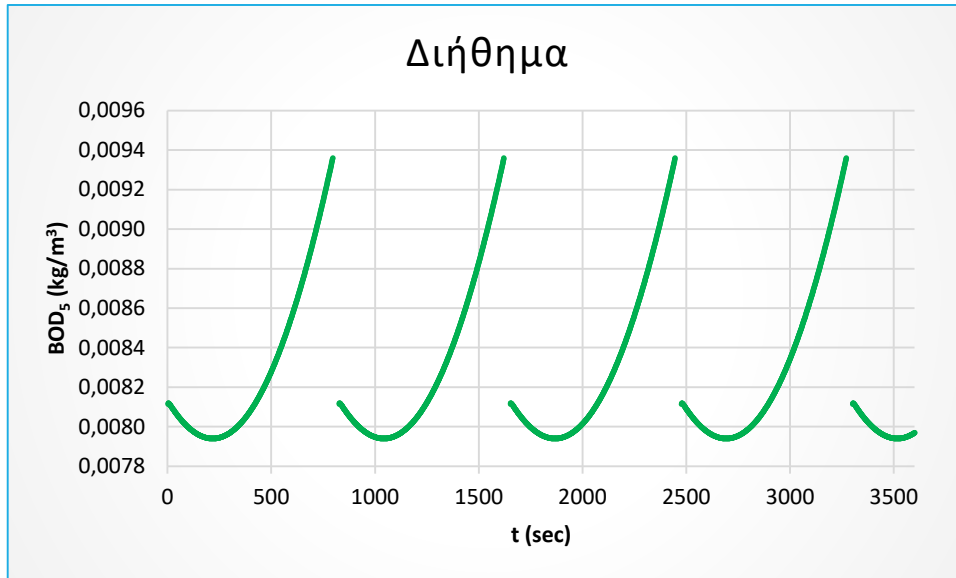
Πίνακας 17: Εισροές, εκροές, τα χαρακτηριστικά τους και ενεργειακή απαίτηση της μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, μετά τις παρεμβάσεις

Μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων		
Εισροές		
Υγρά απόβλητα	375,72	m ³ /day
BOD ₅	1,2278	kg/m ³
COD	1,9959	kg/m ³
TSS	1,3109	kg/m ³
Εκροές		
Καθαρό νερό	297,75	m ³ /day
BOD ₅	0,031543	kg/m ³
COD	0,051277	kg/m ³
TSS	0,033679	kg/m ³
Αφυδατωμένη ίλύς	342,45	kg/day
Ενεργειακή κατανάλωση		
Ηλεκτρική ενέργεια (Διεργασία ενεργού ιλύος)	1798,9	kWh/day
Ηλεκτρική ενέργεια (Εσχαρισμός & Επεξεργασία ιλύς)	2660,4	kWh/day

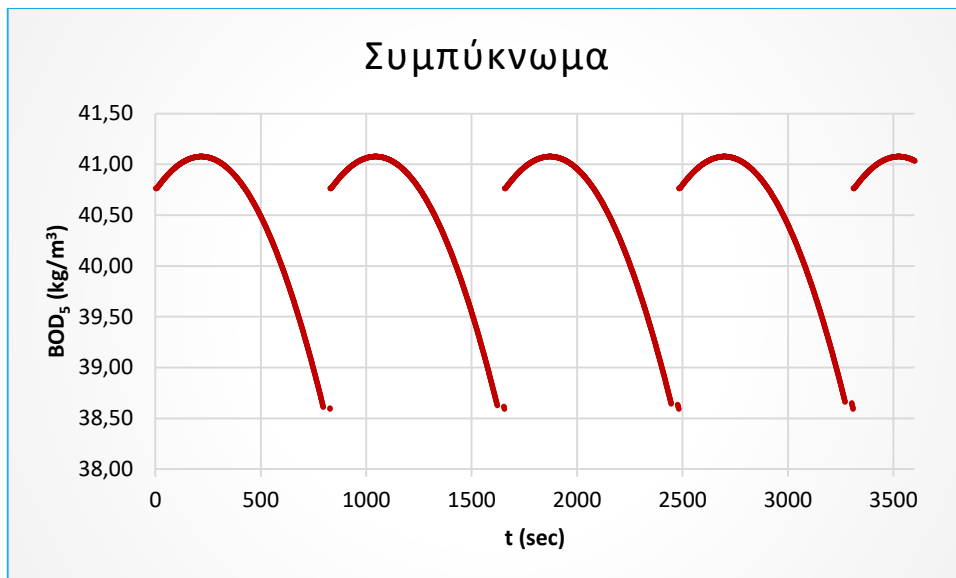
Στον Πίνακα 18 αναγράφονται οι εισροές, οι εκροές, τα χαρακτηριστικά και οι ενεργειακές απαιτήσεις της μονάδας μεμβρανών υπερδιήθησης, σε συνδυασμό με απολύμανση με ακτινοβολία UV. Θεωρείται ότι ένα μέρος του καθαρού νερού, που εξέρχεται από τη διεργασία ενεργού ιλύος εισέρχεται αρχικά στη μονάδα απολύμανσης με ακτινοβολία UV και στη συνέχεια διέρχεται από τις μεμβράνες υπερδιήθησης. Το μέρος αυτό τέθηκε ίσο με το 10% του συνολικού καθαρού νερού. Έχει θεωρηθεί πως οι ροές του διηθήματος και του συμπυκνώματος είναι σταθερές. Ωστόσο, το οργανικό φορτίο μεταβάλλεται με το πέρασμα του χρόνου, γεγονός που οδηγεί στην ανάγκη του καθαρισμού των μεμβρανών. Τα διαγράμματα, όπου φαίνεται η συμπεριφορά του οργανικού φορτίου συναρτήσει του χρόνου, φαίνονται παρακάτω. Η μορφή των διαγραμμάτων είναι ίδια ποιοτικά, αφού η εξίσωση (Εξίσωση 22) που χρησιμοποιήθηκε αφορά και τα 3 μεγέθη (BOD₅, COD, TSS), σύμφωνα με τα οποία μελετάται το οργανικό φορτίο. Ωστόσο, έχουν εισαχθεί έτσι ώστε να γίνονται αντιληπτές οι τιμές τους με το πέρασμα του χρόνου, αφού αυτές διαφέρουν μεταξύ τους. Το πλύσιμο των μεμβρανών γίνεται κάθε φορά, που κάποιο από τα 3 μεγέθη (BOD₅, COD, TSS) φτάνει το όριο, για χρήση στη βιομηχανία. Στην περίπτωση αυτή, φαίνεται στο Διάγραμμα 5 ότι τα ολικά στερεά είναι αυτά που ελέγχουν τον καθαρισμό των μεμβρανών υπερδιήθησης, αφού αυτά είναι που φτάνουν στο άνω όριό τους (0,01 kg/m³) πιο γρήγορα. Οι υπολογισμοί των τιμών που αναγράφονται στον Πίνακα 18 υπολογίστηκαν με τη βοήθεια κώδικα, ο οποίος είναι γραμμένος στη γλώσσα του Matlab, όπως φαίνεται στο Παράρτημα 9.1. Επιπλέον, υπολογίστηκε ο αριθμός των απαιτούμενων μεμβρανών υπερδιήθησης, με τα χαρακτηριστικά που αναγράφονται στον Πίνακα 8, και είναι ίσος με 648.

Πίνακας 18: Εισροές, εκροές, τα χαρακτηριστικά τους και ενεργειακή απαίτηση της μονάδας μεμβρανών υπερδιήθησης σε συνδυασμό με απολύμανση με ακτινοβολία UV

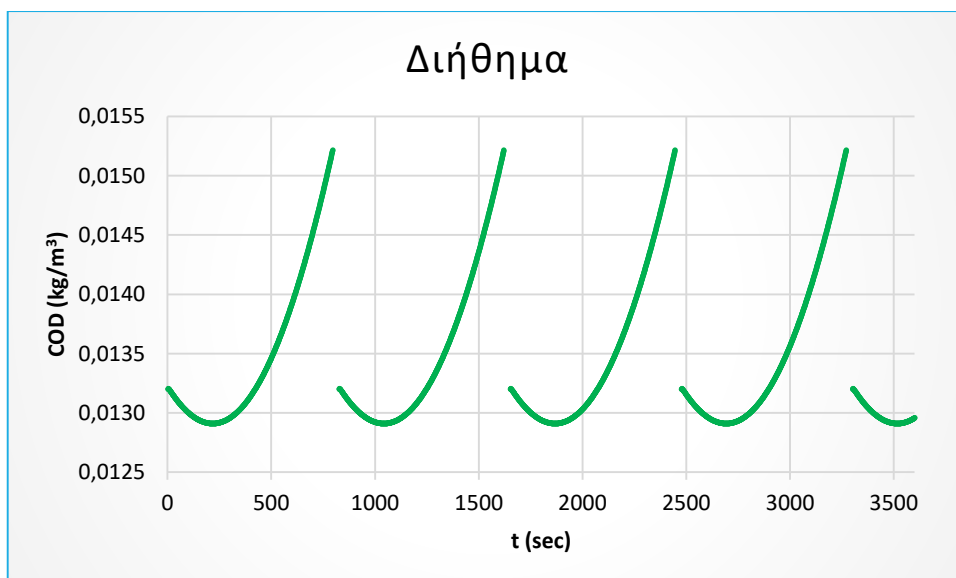
Μονάδα μεμβρανών υπερδιήθησης σε συνδυασμό με απολύμανση με ακτινοβολία UV		
Εισροές		
Καθαρό νερό	29,775	m ³ /day
BOD ₅	0,031543	kg/m ³
COD	0,051277	kg/m ³
TSS	0,033679	kg/m ³
Εκροές		
Διήθημα	29,77	m ³ /day
Συμπύκνωμα	0,0051416	m ³ /day
Ενεργειακή κατανάλωση		
Ηλεκτρική ενέργεια (Απολύμανση με ακτινοβολία UV)	30,966	kWh/day
Ηλεκτρική ενέργεια (Μεμβράνες υπερδιήθησης)	0,011028	kWh/day



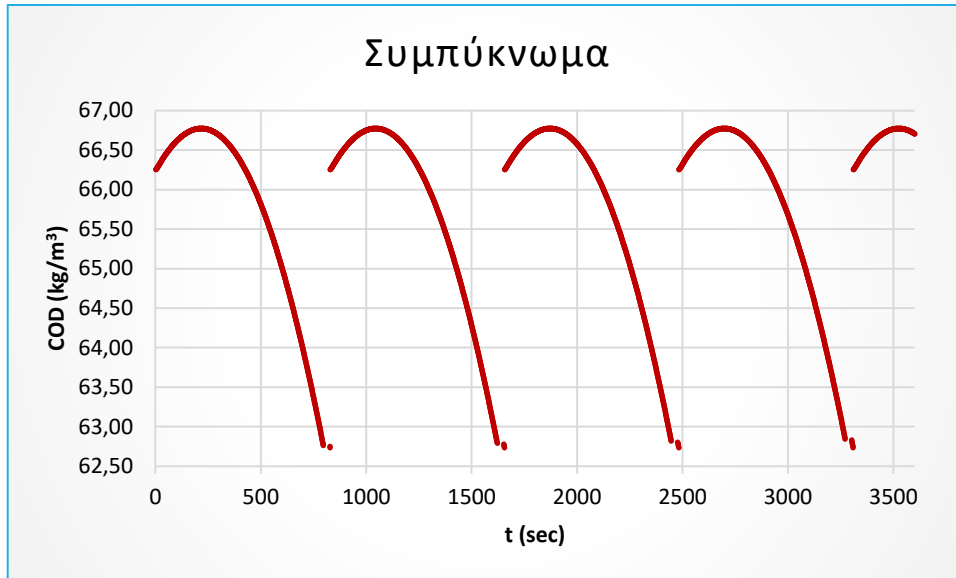
Διάγραμμα 1: BOD₅ συναρτήσει του χρόνου στο διήθημα των μεμβρανών υπερδιήθησης



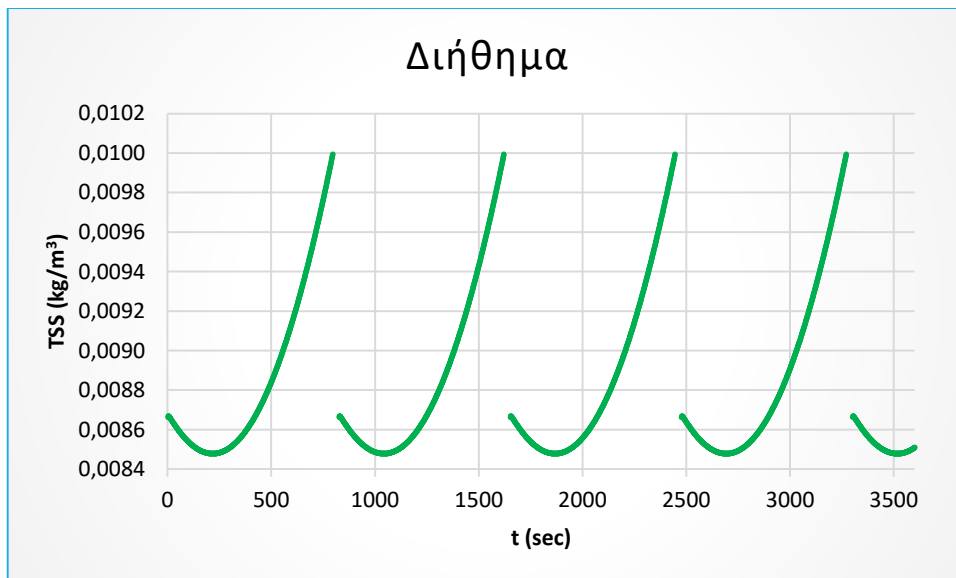
Διάγραμμα 2: BOD₅ συναρτήσει του χρόνου στο συμπύκνωμα των μεμβρανών υπερδιήθησης



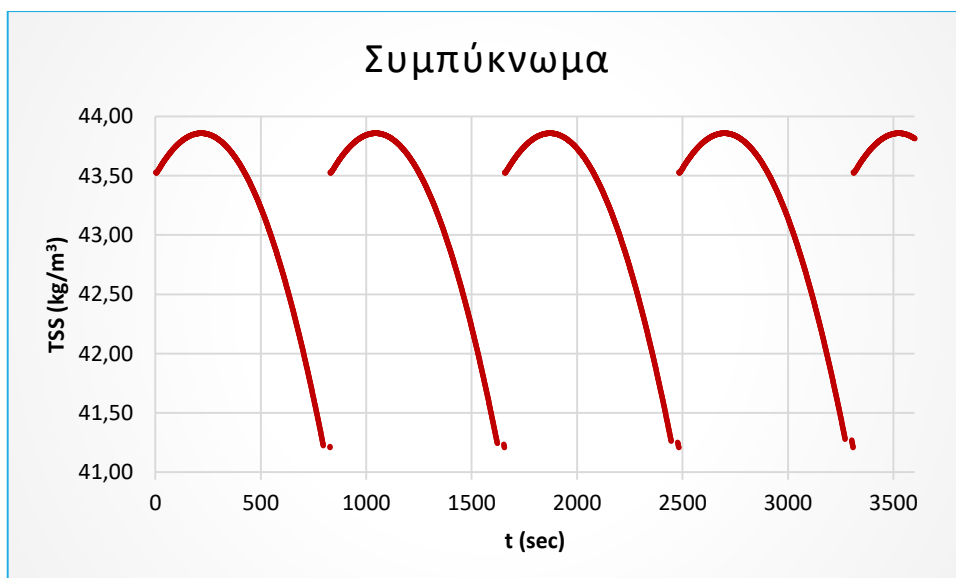
Διάγραμμα 3: COD συναρτήσει του χρόνου στο διήθημα των μεμβρανών υπερδιήθησης



Διάγραμμα 4: COD συναρτήσει του χρόνου στο συμπύκνωμα των μεμβρανών υπερδιήθησης



Διάγραμμα 5: TSS συναρτήσει του χρόνου στο διήθημα των μεμβρανών υπερδιήθησης



Διάγραμμα 6: TSS συναρτήσει του χρόνου στο συμπύκνωμα των μεμβρανών υπερδιήθησης



Όσον αφορά στις εισροές, τις εκροές, τη σύστασή τους και τις ενεργειακές απαιτήσεις των μεμβρανών υπερδιήθησης, που εφαρμόζονται στον όξινο ορό γάλακτος, αναγράφονται στον Πίνακα 19. Το μόνο συστατικό που συγκρατείται από τις μεμβράνες υπερδιήθησης είναι οι πρωτεΐνες. Τα υπόλοιπα συστατικά έχουν την δυνατότητα να διαπερνούν τους πόρους των μεμβρανών. Έτσι, επιλέγεται η επιθυμητή συγκέντρωση των πρωτεϊνών στο συμπύκνωμα, ώστε να υπολογιστεί η συγκέντρωση των υπόλοιπων συστατικών στο διήθημα και στο συμπύκνωμα. Οι υπολογισμοί των τιμών που αναγράφονται στον Πίνακα 19 υπολογίσθηκαν με τη βοήθεια κώδικα, ο οποίος είναι γραμμένος στη γλώσσα του Matlab, όπως φαίνεται στο Παράρτημα 9.2. Ο απαιτούμενος αριθμός μεμβρανών υπερδιήθησης με τα χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν είναι ίσος με 6.

Πίνακας 19: Εισροές, εκροές, η σύνθεσή τους και ενεργειακή απαίτηση της μονάδας μεμβρανών υπερδιήθησης

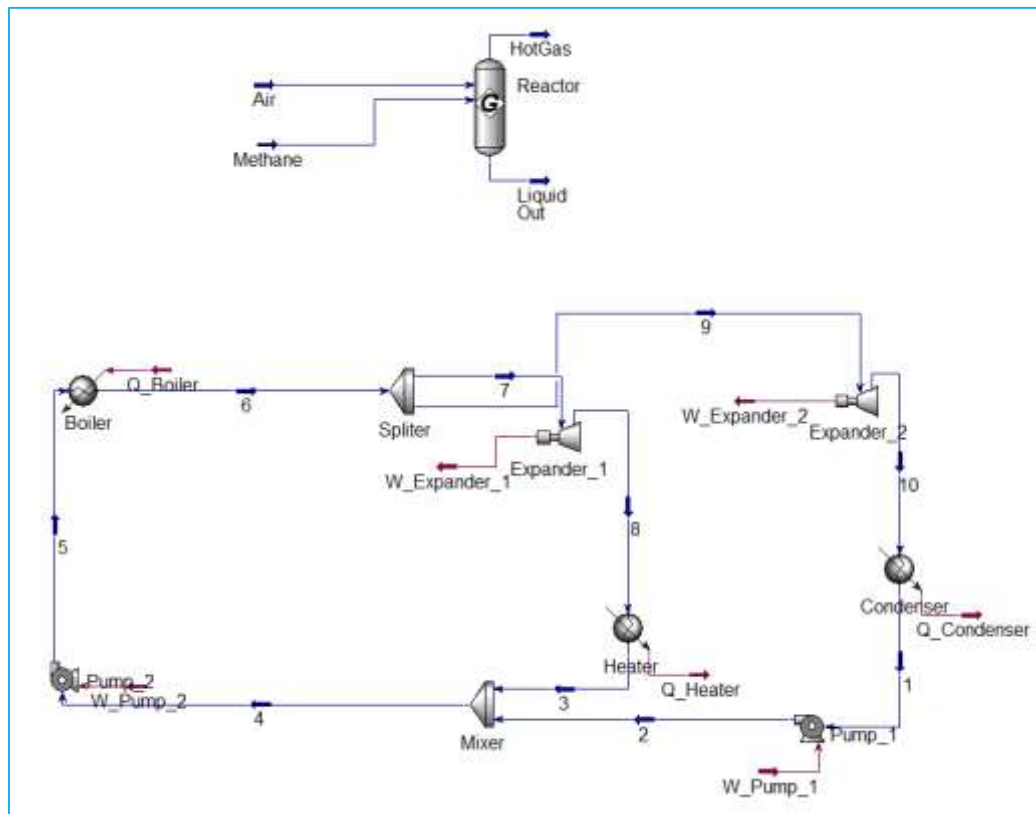
Μονάδα μεμβρανών υπερδιήθησης		
Εισροές		
Όξινος ορός γάλακτος	3,4674	m ³ /day
Νερό	94,00%	-
Λακτόζη	3,80%	-
Γαλακτικό οξύ	0,80%	-
Κιτρικό οξύ	0,10%	-
Μέταλλα	0,50%	-
Πρωτεΐνες	0,80%	-
Εκροές		
Όξινος ορός γάλακτος απαλλαγμένος από πρωτεΐνες	2,7739	m ³ /day
Νερό	94,76%	-
Λακτόζη	3,83%	-
Γαλακτικό οξύ	0,81%	-
Κιτρικό οξύ	0,10%	-
Μέταλλα	0,50%	-
Πρωτεΐνες	0,00%	-
Συμπυκνωμένος όξινος ορός γάλακτος	0,69348	m ³ /day
Νερό	90,97%	-
Λακτόζη	3,68%	-
Γαλακτικό οξύ	0,77%	-
Κιτρικό οξύ	0,10%	-
Μέταλλα	0,48%	-
Πρωτεΐνες	4,00%	-
Ενεργειακή κατανάλωση		
Ηλεκτρική ενέργεια	0,001021	kWh/day

Στη συνέχεια, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, το συμπύκνωμα, το οποίο περιέχει τις πρωτεΐνες, οδηγείται προς ξήρανση με ψεκασμό. Στη ξήρανση με ψεκασμό θεωρείται ότι το νερό εξατμίζεται, ώστε τελικά να απομείνει η επιθυμητή ουσία. Στην προκειμένη περίπτωση, συμπυκνωμένος όξινος ορός γάλακτος περιέχει σε ένα μεγάλο ποσοστό νερό, ενώ ακολουθούν οι πρωτεΐνες και στη συνέχεια η λακτόζη. Όλα τα υπόλοιπα συστατικά θεωρούνται σχεδόν αμελητέα. Λόγω αυτών λοιπόν, αγνοούνται τα υπόλοιπα συστατικά, έτσι ώστε τελικά ο συμπυκνωμένος όξινος ορός γάλακτος να αποτελείται θεωρητικά μόνο από νερό και πρωτεΐνες. Οι υπολογισμοί των τιμών που αναγράφονται στον Πίνακα 20 υπολογίσθηκαν με τη βοήθεια κώδικα, ο οποίος είναι γραμμένος στη γλώσσα του Matlab, όπως φαίνεται στο Παράρτημα 9.2.

Πίνακας 20: Εισροές, εκροές, τα χαρακτηριστικά τους και ενεργειακή απαίτηση της μονάδας ξήρανσης με ψεκασμό

Μονάδα ξήρανσης με ψεκασμό		
Εισροές		
Συμπυκνωμένος όξινος ορός γάλακτος	714,29	kg/day
Αέρας	10000	kg/day
Θερμοκρασία αέρα	200	°C
Υγρασία αέρα	0,01	kg νερού/kg ξηρού αέρα
Εκροές		
Σκόνη πρωτεϊνών όξινου ορού γάλακτος	28,571	kg/day
Αέρας	10000	kg/day
Θερμοκρασία αέρα	35,799	°C
Υγρασία αέρα	0,078571	kg νερού/kg ξηρού αέρα
Νερό	685,719	kg/day
Ενεργειακή κατανάλωση		
Ηλεκτρική ενέργεια	7,7286	kWh/day
Θερμική ενέργεια	78,113	kWh/day

Τέλος, ο όξινος ορός γάλακτος, που είναι πλέον απαλλαγμένος από πρωτεΐνες, τροφοδοτείται σε αναερόβιο χωνευτή, όπου παράγεται βιοαέριο. Η διάμετρος και το ύψος του αναερόβιου χωνευτή υπολογίστηκαν ίσοι με 0,5939m και 0,7423m, αντίστοιχα. Το μεθάνιο, που περιέχεται στο βιοαέριο οδηγείται στη συνέχεια σε σύστημα συμπαραγωγής, όπου παράγεται ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, οι οποίες αξιοποιούνται στον αναερόβιο χωνευτή. Οι υπολογισμοί των τιμών που αναγράφονται στον Πίνακα 21 υπολογίστηκαν με τη βοήθεια κώδικα, ο οποίος είναι γραμμένος στη γλώσσα του Matlab, όπως φαίνεται στο Παράρτημα 9.2. Αφού υπολογισθούν οι ροές του βιοαερίου και του περιεχόμενου μεθανίου, το σύστημα συμπαραγωγής υπολογίστηκε στο υπολογιστικό εργαλείο Aspen Hysys, όπως φαίνεται στην Εικόνα 39. Στο σύστημα συμπαραγωγής επιλέχθηκε να ρέει νερό με μαζική παροχή ίση με 1 kg/h, ενώ η υψηλή, η μεσαία και η χαμηλή πίεση επιλέχθηκε να είναι ίσες με 4000kPa, 1200kPa και 10kPa, αντίστοιχα.



Εικόνα 39: Καύση του μεθανίου (πάνω διάγραμμα ροής) και σύστημα συμπαραγωγής (κάτω διάγραμμα ροής) στο υπολογιστικό εργαλείο Aspen Hysys

Πίνακας 21: Εισροές, εκροές και ενεργειακή απαίτηση της μονάδας αναερόβιας χώνευσης

Μονάδα αναερόβιας χώνευσης		
Εισροές		
Όξινος ορός γάλακτος απαλλαγμένος από πρωτεΐνες	2,7739	m ³ /day
Εκροές		
Βιοαέριο	11,482	m ³ /day
Μεθάνιο	7,2715	m ³ /day
Χωνεμένο υπόλειμμα	2843,8957	kg/day
Ενεργειακή κατανάλωση		
Ηλεκτρική ενέργεια	0,0015319	kWh/day
Θερμική ενέργεια	8,4896	kWh/day

Πίνακας 22: Εισροές και παραγωγή ενέργειας της μονάδας συμπαραγωγής

Μονάδα συμπαραγωγής		
Εισροές		
Μεθάνιο	7,2715	m ³ /day
Παραγωγή ενέργειας		
Ηλεκτρική ενέργεια	11,72769	kWh/day
Θερμική ενέργεια	34,97494	kWh/day

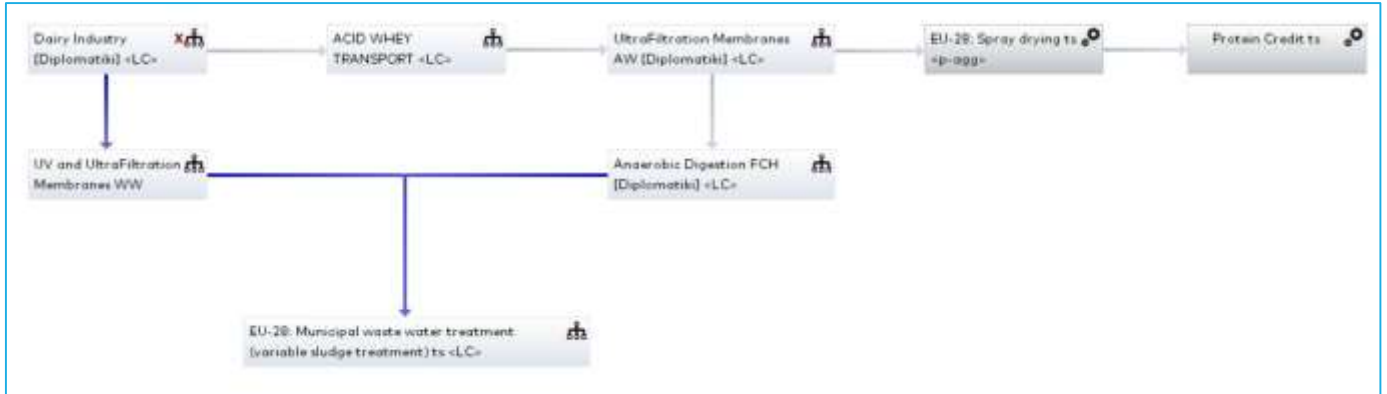
6.2. Ανάλυση κύκλου ζωής (LCA)

Η ανάλυση κύκλου ζωής έχει ως σκοπό να αποδώσει τα αποτελέσματα που αναγράφονται στους πίνακες της ενότητας 6.1 στο ανάλογο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Αυτό γίνεται με τους δείκτες επιπέδου μεσαίου σημείου, που αναγράφονται στον Πίνακα 13, αλλά και τους δείκτες επιπέδου τελικού σημείου, οι οποίοι αναγράφονται στον Πίνακα 12. Αυτό επιτυγχάνεται με το εγκεκριμένο υπολογιστικό εργαλείο Gabi LCA Software, ενώ η μέθοδος που ακολουθείται ονομάζεται ReCiPe 2016 v1.1.

Αρχικά, θα πρέπει να δομηθεί ένα διάγραμμα ροής στο Gabi, όπως φαίνεται στην Εικόνα 40. Η εικόνα αυτή αντιπροσωπεύει τη μελλοντική κατάσταση, στην οποία θα έχουν εγκατασταθεί οι παρεμβάσεις, που έχουν αναφερθεί παραπάνω. Όσον αφορά στην παρούσα κατάσταση, θα αποτελείται μόνο από τη γαλακτοβιομηχανία (Dairy Industry) και την εξωτερική μονάδα υγρών αποβλήτων, όπου καταλήγουν τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα της υπό μελέτη γαλακτοβιομηχανίας (Municipal waste water treatment). Οι διεργασίες που περιλαμβάνονται στην Εικόνα 40 είναι οι εξής:

- Γαλακτοβιομηχανία (Dairy Industry): στη διεργασία αυτή περιέχονται η παραγωγική διαδικασία και η μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Αυτή η διεργασία είναι η μία από τις δύο, που περιλαμβάνεται και στην υφιστάμενη, αλλά και στη μελλοντική κατάσταση. Ωστόσο οι τιμές των παραμέτρων που την αφορούν δεν παραμένουν σταθερές, λόγω των παρεμβάσεων.
- Μονάδα μεμβρανών υπερδιήθησης σε συνδυασμό με απολύμανση με UV (UV and UltraFiltration): στο εσωτερικό της διεργασίας αυτής επεξεργάζεται μέρος των υγρών αποβλήτων και γίνεται ανάκτηση του καθαρού νερού (water credit), προκειμένου να μειωθεί το συνολικό νερό που απαιτείται.
- Μεταφορά όξινου ορού γάλακτος (ACID WHEY TRANSPORT).
- Μονάδα μεμβρανών υπερδιήθησης (UltraFiltration Membranes AW): στη μονάδα αυτή επεξεργάζεται ο όξινος ορός γάλακτος.
- Μονάδα ξήρανσης με ψεκασμό (Spray drying): στη μονάδα αυτή καταλήγει το συμπύκνωμα των μεμβρανών υπερδιήθησης.
- Ανάκτηση πρωτεϊνών (Protein Credit): στη διεργασία αυτή γίνεται η ανάκτηση των πρωτεϊνών του όξινου ορού γάλακτος.

- Μονάδα αναερόβιας χώνευσης (Anaerobic Digestion): στη διεργασία αυτή καταλήγει το διήθημα των μεμβρανών υπερδιήθησης.
- Εξωτερική μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (Municipal waste water treatment): στη μονάδα αυτή καταλήγει το ποσοστό των καθαρών υγρών αποβλήτων που δεν διαπέρασε τις μεμβράνες υπερδιήθησης, καθώς και η χωνεμένη λάσπη από την αναερόβια χώνευση.



Εικόνα 40: Διάγραμμα ροής μελλοντικής κατάστασης στο υπολογιστικό εργαλείο Gabi LCA Software

Τα αποτελέσματα για την παρούσα και τη μελλοντική κατάσταση, όσον αφορά στους δείκτες επιπέδου μεσαίου σημείου αναγράφονται στον Πίνακα 23 και στον Πίνακα 24, αντίστοιχα.

Πίνακας 23: Δείκτες επιπέδου μεσαίου σημείου για την υφιστάμενη κατάσταση και τις επιμέρους διεργασίες της

Δείκτης επιπέδου μεσαίου σημείου	Συνολική υφιστάμενη κατάσταση	Γαλακτοβιομηχανία	Εξωτερική μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων
Climate change, default, excl biogenic carbon [kg CO ₂ eq.]	4,11E+04	4,09E+04	1,59E+02
Climate change, incl biogenic carbon [kg CO ₂ eq.]	4,15E+04	4,10E+04	5,24E+02
Fine Particulate Matter Formation [kg PM _{2.5} eq.]	2,58E+01	2,61E+01	-2,52E-01
Fossil depletion [kg oil eq.]	1,69E+04	1,70E+04	-6,02E+01
Freshwater Consumption [m ³]	3,84E+02	7,50E+02	-3,66E+02
Freshwater ecotoxicity [kg 1,4-DB eq.]	7,12E+00	3,44E+00	3,68E+00
Freshwater Eutrophication [kg P eq.]	6,09E-01	1,32E-01	4,77E-01
Human toxicity, cancer [kg 1,4-DB eq.]	2,65E+01	7,80E+00	1,87E+01
Human toxicity, non-cancer [kg 1,4-DB eq.]	3,15E+02	1,55E+02	1,60E+02
Ionizing Radiation [Bq C-60 eq. to air]	2,86E+03	2,86E+03	3,38E+00
Land use [Annual crop eq.·y]	2,38E+03	2,38E+03	3,17E+00
Marine ecotoxicity [kg 1,4-DB eq.]	1,63E+01	1,12E+01	5,08E+00
Marine Eutrophication [kg N eq.]	1,52E+00	9,56E-01	5,63E-01
Metal depletion [kg Cu eq.]	-8,03E+01	5,97E+01	-1,40E+02
Photochemical Ozone Formation, Ecosystems [kg NO _x eq.]	1,21E+05	1,21E+05	3,17E+02
Photochemical Ozone Formation, Human Health [kg NO _x eq.]	7,51E+04	7,49E+04	1,96E+02
Stratospheric Ozone Depletion [kg CFC-11 eq.]	8,00E-03	1,29E-02	-4,90E-03
Terrestrial Acidification [kg SO ₂ eq.]	8,32E+01	8,35E+01	-3,16E-01
Terrestrial ecotoxicity [kg 1,4-DB eq.]	1,23E+04	1,22E+04	5,86E+01



Πίνακας 24: Δείκτες επιπέδου μεσαίου σημείου για την μελλοντική κατάσταση και τις επιμέρους διεργασίες της

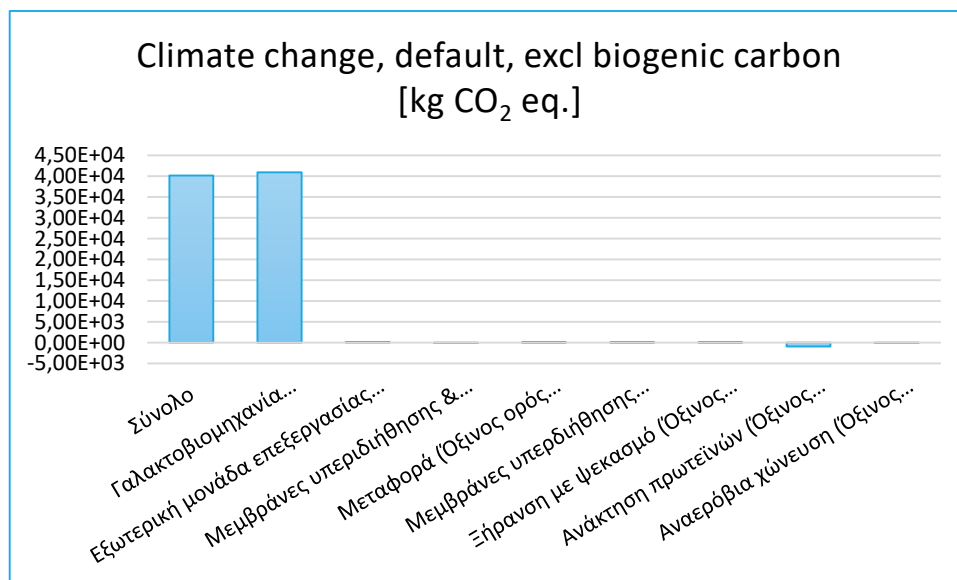
Δείκτης επιπέδου μεσαίου σημείου	Συνολική μελλοντική κατάσταση	Γαλακτοβιομηχανία	Εξωτερική μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων	Μεμβράνες υπερδιήθησης σε συνδυασμό με απολύμανση με UV	Μεταφορά όξινου ορού γάλακτος	Μεμβράνες υπερδιήθησης	Ξήρανση με ψεκασμό	Ανάκτηση πρωτεϊνών	Αναερόβια χώνευση
Climate change, default, excl biogenic carbon [kg CO ₂ eq.]	4,01E+04	4,09E+04	1,44E+02	-5,78E+01	8,15E-01	1,56E+00	2,24E+01	-8,89E+02	-1,13E+01
Climate change, incl biogenic carbon [kg CO ₂ eq.]	4,06E+04	4,10E+04	4,76E+02	-7,48E+01	8,11E-01	1,56E+00	2,24E+01	-8,59E+02	-1,13E+01
Fine Particulate Matter Formation [kg PM _{2.5} eq.]	2,06E+01	2,61E+01	-2,29E-01	-3,58E-02	6,95E-04	1,00E-03	4,87E-03	-5,24E+00	-4,37E-03
Fossil depletion [kg oil eq.]	1,68E+04	1,70E+04	-5,47E+01	-2,00E+01	2,58E-01	6,39E-01	8,91E+00	-9,93E+01	-4,58E+00
Freshwater Consumption [m ³]	3,35E+02	7,50E+02	-3,32E+02	-6,29E+01	1,06E-03	1,43E-02	3,08E-02	-2,03E+01	-2,37E-02
Freshwater ecotoxicity [kg 1,4 DB eq.]	6,06E+00	3,44E+00	3,34E+00	-5,00E-02	1,60E-04	1,20E-04	5,72E-04	-6,73E-01	-4,75E-04
Freshwater Eutrophication [kg P eq.]	4,26E-01	1,32E-01	4,33E-01	-6,02E-03	3,78E-06	4,25E-06	9,43E-06	-1,33E-01	-1,53E-05
Human toxicity, cancer [kg 1,4-DB eq.]	2,42E+01	7,80E+00	1,69E+01	-2,41E-01	2,21E-04	2,71E-04	4,10E-03	-2,99E-01	-2,09E-03
Human toxicity, non-cancer [kg 1,4-DB eq.]	4,46E+02	1,55E+02	1,45E+02	-2,53E+00	7,86E-02	2,08E-03	3,73E-02	1,48E+02	-6,94E-03
Ionizing Radiation [Bq C-60 eq. to air]	2,86E+03	2,86E+03	3,07E+00	-1,17E+00	5,19E-04	1,11E-01	2,35E-01	-2,65E+00	-2,38E-01
Land use [Annual crop eq.·y]	1,56E+03	2,38E+03	2,87E+00	-2,78E+00	5,90E-02	9,18E-02	2,00E-01	-8,22E+02	-3,44E-01
Marine ecotoxicity [kg 1,4-DB eq.]	1,48E+01	1,12E+01	4,61E+00	-7,84E-02	4,46E-04	3,97E-04	1,68E-03	-8,91E-01	-1,56E-03
Marine Eutrophication [kg N eq.]	2,68E-01	9,56E-01	5,11E-01	-8,94E-03	2,03E-05	3,52E-05	7,98E-05	-1,19E+00	-1,19E-04
Metal depletion [kg Cu eq.]	-6,97E+01	5,97E+01	-1,27E+02	6,78E-01	4,59E-04	1,97E-03	8,29E-03	-3,13E+00	-7,81E-03
Photochemical Ozone Formation, Ecosystems [kg NO _x eq.]	1,21E+05	1,21E+05	2,88E+02	-1,11E+02	6,42E-02	4,64E+00	1,65E+01	-3,67E+02	-1,39E+01
Photochemical Ozone Formation, Human Health [kg NO _x eq.]	7,48E+04	7,49E+04	1,78E+02	-6,90E+01	4,18E-02	2,88E+00	1,02E+01	-2,28E+02	-8,64E+00
Stratospheric Ozone Depletion [kg CFC-11 eq.]	2,39E-03	1,29E-02	-4,45E-03	-5,28E-05	2,71E-07	4,94E-07	3,27E-06	-6,01E-03	-2,38E-06
Terrestrial Acidification [kg SO ₂ eq.]	7,28E+01	8,35E+01	-2,86E-01	-1,09E-01	2,22E-03	3,20E-03	1,48E-02	-1,03E+01	-1,37E-02
Terrestrial ecotoxicity [kg 1,4-DB eq.]	1,22E+04	1,22E+04	5,32E+01	-1,68E+01	3,39E-02	4,67E-01	1,08E+00	-5,22E+01	-1,43E+00



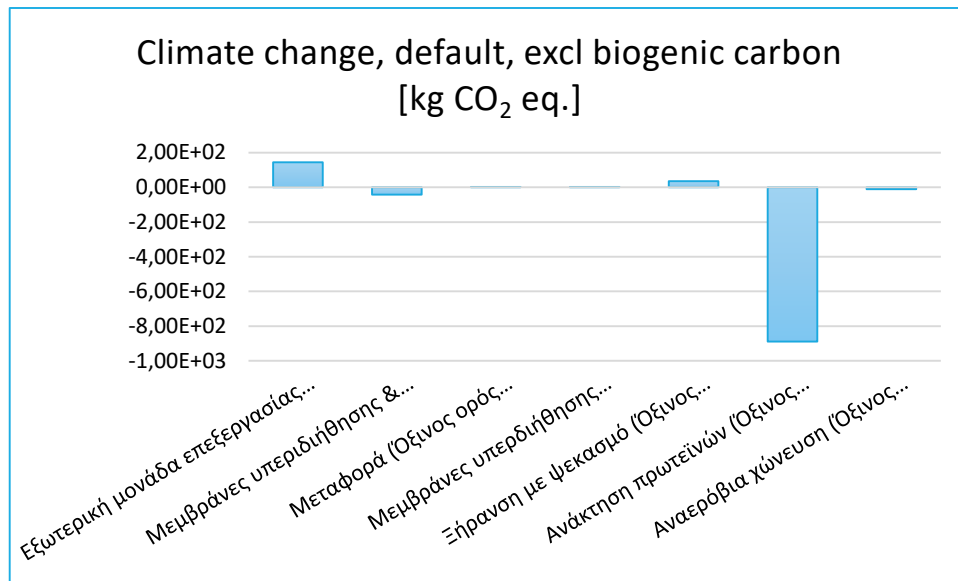
Όπως ήταν αναμενόμενο, οι τιμές των δεικτών επιπέδου μεσαίου σημείου των επί μέρους μονάδων της υπάρχουσας κατάστασης είναι περίπου ίσες με αυτές των αντίστοιχων μονάδων της μελλοντικής κατάστασης. Αυτό συμβαίνει, διότι η ροή του συμπυκνώματος που επιστρέφει στη μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων είναι πολύ μικρή για να επηρεάσει ριζικά τις τιμές των μονάδων αυτών. Όσον αφορά στην υφιστάμενη κατάσταση η γαλακτοβιομηχανία έχει μεγαλύτερη επιρροή ως προς την κλιματική αλλαγή, τον σχηματισμό λεπτών σωματιδίων και την εξάντληση των ορυκτών καυσίμων, σε σχέση με την εξωτερική μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Ωστόσο, η εξωτερική μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων συμβάλλει σε μεγαλύτερο βαθμό στον ευτροφισμό του νερού και στην τοξικότητα, που προκαλεί καρκίνο στον ανθρώπινο οργανισμό.

Μετά την εφαρμογή των παρεμβάσεων παρατηρείται ότι οι κύριες μονάδες, που επηρεάζουν τους δείκτες επιπέδου μεσαίου σημείου, είναι η γαλακτοβιομηχανία, η εξωτερική μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και η ανάκτηση των πρωτεϊνών όξινου ορού γάλακτος. Το αποτύπωμα των υπόλοιπων μονάδων είναι πολύ μικρό σε σχέση με αυτές. Αυτά που αξίζει να σχολιαστούν είναι η κλιματική αλλαγή και η κατανάλωση και ο ευτροφισμός του γλυκού νερού.

Όσον αφορά στην κλιματική αλλαγή, παρατηρώντας το Διάγραμμα 7, φαίνεται πως η γαλακτοβιομηχανία έχει το μεγαλύτερο αρνητικό αποτύπωμα, ενώ η ανάκτηση των πρωτεϊνών και ελάχιστα η μονάδα μεμβρανών υπερδιήθησης σε συνδυασμό με απολύμανση με UV και η αναερόβια χώνευση βοηθούν στην αποφυγή της κλιματικής αλλαγής. Έχοντας υπόψιν ότι η επιδείνωση της κλιματικής αλλαγής βασίζεται στην εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα, μπορεί να αποδοθεί η εξήγηση για τον καταμερισμό αυτό. Η γαλακτοβιομηχανία σπαταλά πολλή ενέργεια και κατ' επέκταση καίει αρκετά καύσιμα για τη λειτουργία της, με αποτέλεσμα να παράγει μεγάλα ποσά διοξειδίου του άνθρακα. Η χρήση ενέργειας των υπόλοιπων μονάδων είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με αυτή της γαλακτοβιομηχανίας. Μάλιστα, η αναερόβια χώνευση παράγει ένα μικρό ποσό θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα να μειώνεται η απαίτηση σε ενέργεια και κατ' επέκταση η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα. Επιπρόσθετα, η ανάκτηση των πρωτεϊνών μειώνει αρκετά τον κίνδυνο της κλιματικής αλλαγής, αφού η παραγωγή τους είναι αρκετά ενεργοβόρα.

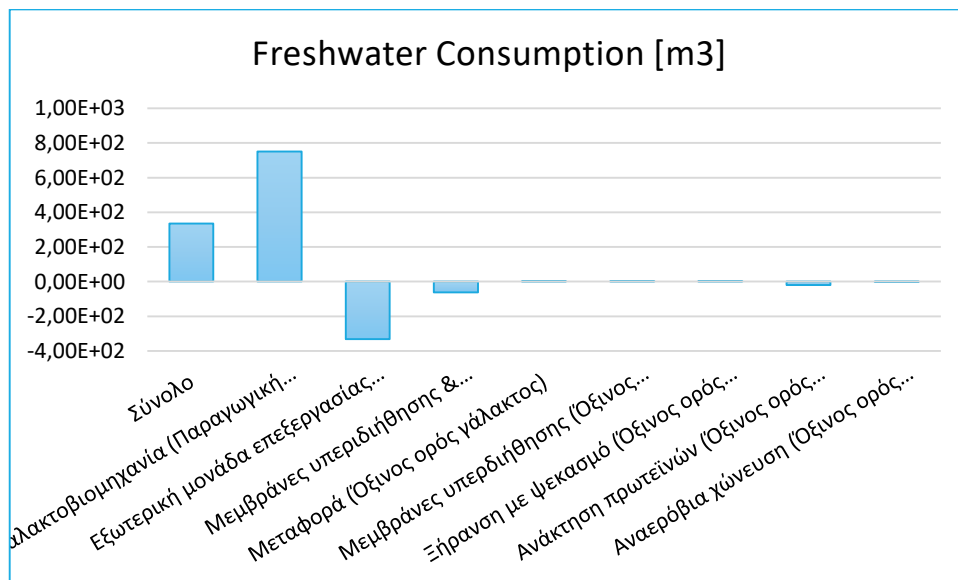


Διάγραμμα 7: Κλιματική αλλαγή (δείκτης επιπέδου μεσαίου σημείου) στις επιμέρους μονάδες της μελλοντικής κατάστασης



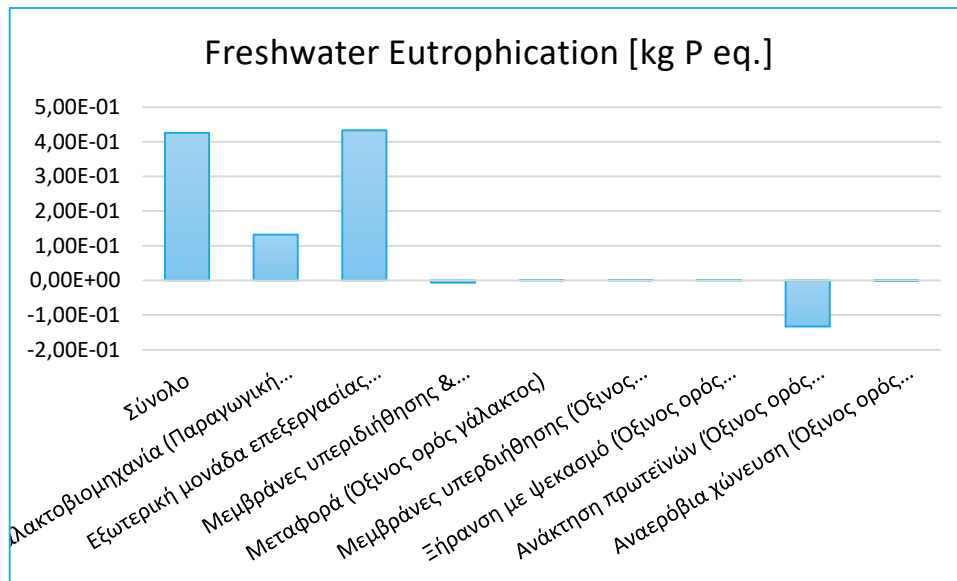
Διάγραμμα 8: Κλιματική αλλαγή (δείκτης επιπέδου μεσαίου σημείου) στις επιμέρους μονάδες της μελλοντικής κατάστασης (εξαιρώντας τη γαλακτοβιομηχανία)

Στη συνέχεια, εξετάζεται το Διάγραμμα 9, στο οποίο απεικονίζεται ο καταμερισμός της κατανάλωσης γλυκού νερού. Όπως έχει αναφερθεί η κατανάλωση της γαλακτοβιομηχανίας σε νερό είναι τεράστια, γεγονός που αποδίδεται και στο διάγραμμα αυτό. Αντιθέτως, στην εξωτερική μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και στην μονάδα μεμβρανών υπερδιήθησης σε συνδυασμό με απολύμανση με UV, όπου ανακτάται νερό, παρουσιάζεται θετικό αντίκτυπο στην κατανάλωση γλυκού νερού. Την ίδια συμπεριφορά φαίνεται να έχουν η ανάκτηση των πρωτεϊνών όξινου ορού γάλακτος και η μονάδα αναερόβια χώνευσης, γεγονός που αποδίδεται στη μείωση του νερού που θα απαιτούταν αν οι διεργασίες αυτές ήταν αυτόνομες.



Διάγραμμα 9: Κατανάλωση νερού (δείκτης επιπέδου μεσαίου σημείου) στις επιμέρους μονάδες της μελλοντικής κατάστασης

Ο ευτροφισμός του νερού φαίνεται να βελτιώνεται με την εισαγωγή των παρεμβάσεων, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 10. Η γαλακτοβιομηχανία και η εξωτερική μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων συμβάλλουν στην αύξηση του ευτροφισμού, αφού οι μονάδες αυτές επεξεργάζονται και παράγουν ουσίες, που έχουν υψηλό οργανικό φορτίο. Αντιθέτως, η ανάκτηση των πρωτεϊνών, που έμμεσα συνεπάγεται την αποφυγή απόθεσης στο περιβάλλον, μειώνει τον ευτροφισμό του γλυκού νερού.

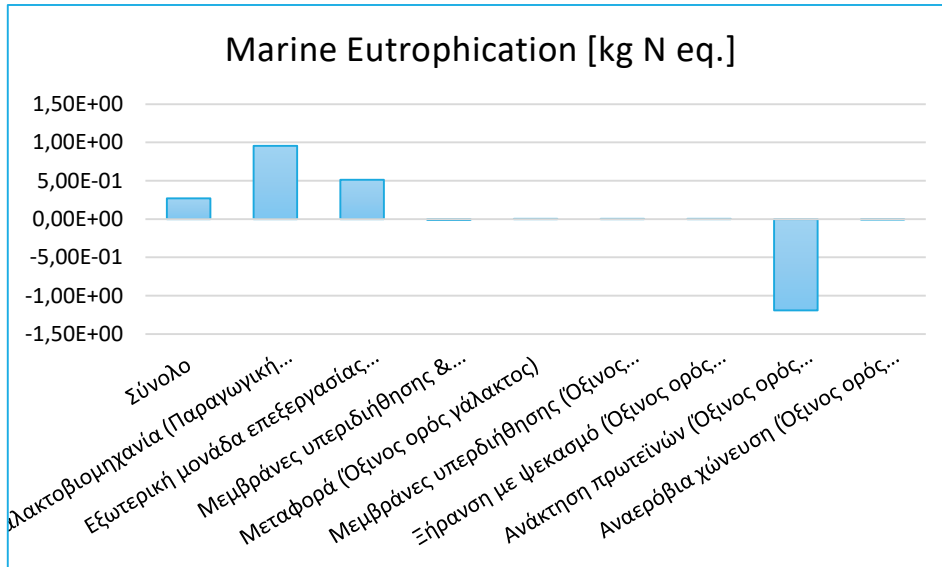


Διάγραμμα 10: Ευτροφισμός νερού (δείκτης επιπέδου μεσαίου σημείου) στις επιμέρους μονάδες της μελλοντικής κατάστασης

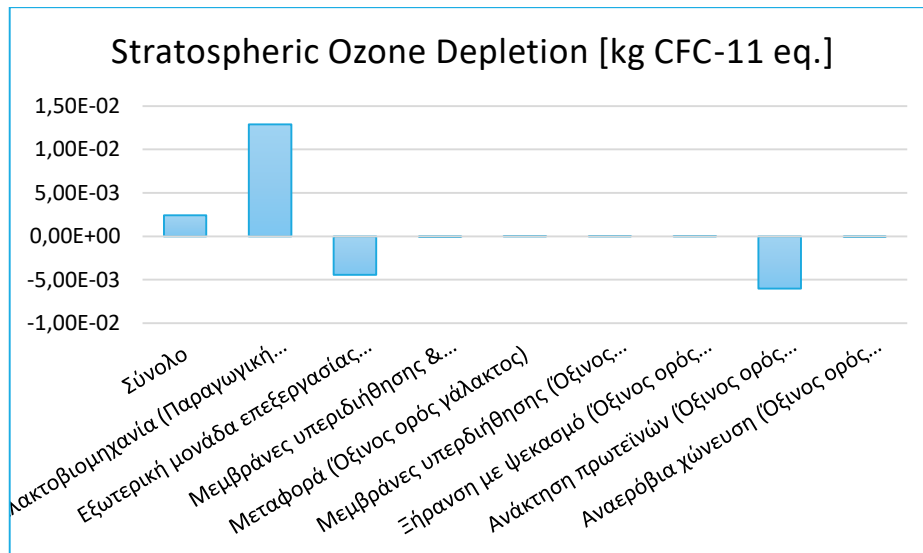
Πίνακας 25: Σύγκριση δεικτών επιπέδου μεσαίου σημείου υφιστάμενης και μελλοντικής κατάστασης

Δείκτης επιπέδου μεσαίου σημείου	Συνολική υφιστάμενη κατάσταση	Συνολική μελλοντική κατάσταση	Επί τοις εκατό μεταβολή
Climate change, default, excl biogenic carbon [kg CO ₂ eq.]	4,11E+04	4,01E+04	-2,31%
Climate change, incl biogenic carbon [kg CO ₂ eq.]	4,15E+04	4,06E+04	-2,33%
Fine Particulate Matter Formation [kg PM _{2.5} eq.]	2,58E+01	2,06E+01	-20,31%
Fossil depletion [kg oil eq.]	1,69E+04	1,68E+04	-0,64%
Freshwater Consumption [m ³]	3,84E+02	3,35E+02	-12,81%
Freshwater ecotoxicity [kg 1,4-DB eq.]	7,12E+00	6,06E+00	-14,92%
Freshwater Eutrophication [kg P eq.]	6,09E-01	4,26E-01	-30,05%
Human toxicity, cancer [kg 1,4-DB eq.]	2,65E+01	2,42E+01	-8,82%
Human toxicity, non-cancer [kg 1,4-DB eq.]	3,15E+02	4,46E+02	41,45%
Ionizing Radiation [Bq C-60 eq. to air]	2,86E+03	2,86E+03	-0,14%
Land use [Annual crop eq.·y]	2,38E+03	1,56E+03	-34,62%
Marine ecotoxicity [kg 1,4-DB eq.]	1,63E+01	1,48E+01	-8,84%
Marine Eutrophication [kg N eq.]	1,52E+00	2,68E-01	-82,35%
Metal depletion [kg Cu eq.]	-8,03E+01	-6,97E+01	-13,14%
Photochemical Ozone Formation, Ecosystems [kg NO _x eq.]	1,21E+05	1,21E+05	-0,41%
Photochemical Ozone Formation, Human Health [kg NO _x eq.]	7,51E+04	7,48E+04	-0,41%
Stratospheric Ozone Depletion [kg CFC-11 eq.]	8,00E-03	2,39E-03	-70,14%
Terrestrial Acidification [kg SO ₂ eq.]	8,32E+01	7,28E+01	-12,47%
Terrestrial ecotoxicity [kg 1,4-DB eq.]	1,23E+04	1,22E+04	-0,61%

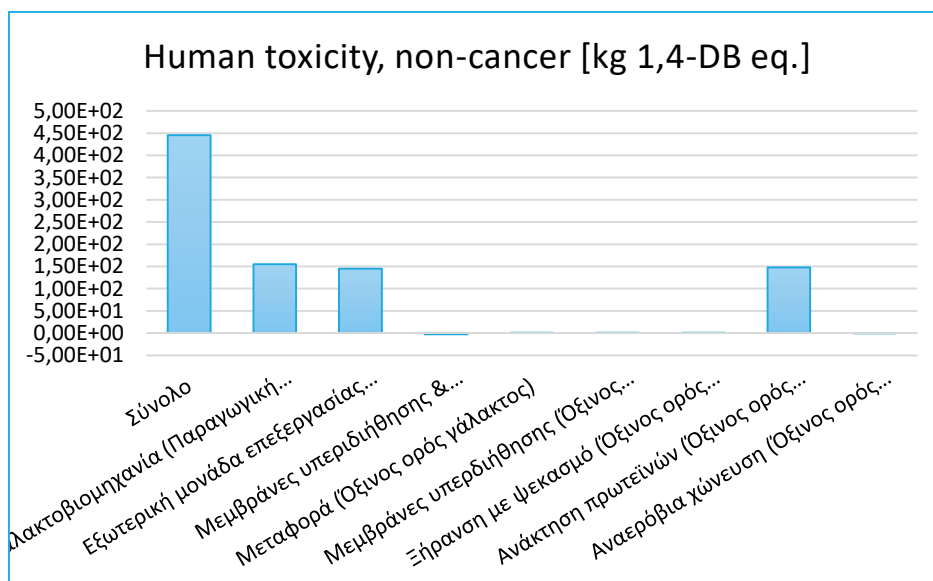
Στον Πίνακα 25 και στο Διάγραμμα 14, παρατηρείται μεγάλη μείωση στον ευτροφισμό των θαλασσών και στο στρατοσφαιρικό όζον, ενώ αρκετά μεγάλη αύξηση παρατηρείται στην τοξικότητα προς τον άνθρωπο, εκτός του καρκίνου. Αυτό εξηγείται αντίστοιχα στο Διάγραμμα 11, στο Διάγραμμα 12 και στο Διάγραμμα 13, στα οποία οι μεταβολές φαίνεται να αποδίδονται στην ανάκτηση των πρωτεϊνών.



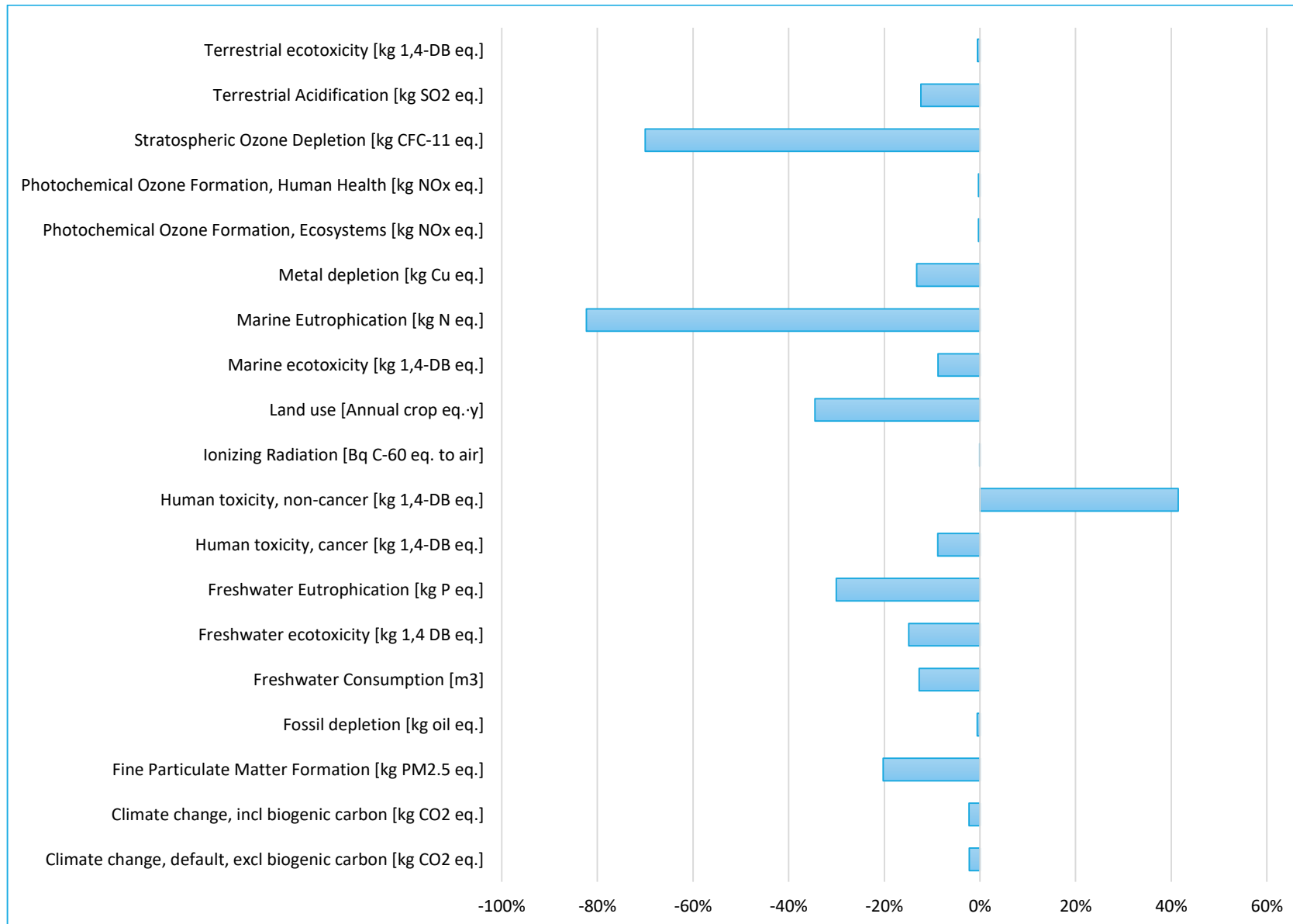
Διάγραμμα 11: Ευτροφισμός θάλασσας (δείκτης επιπέδου μεσαίου σημείου) στις επιμέρους μονάδες της μελλοντικής κατάστασης



Διάγραμμα 12: Μείωση στρατοσφαιρικού όζοντος (δείκτης επιπέδου μεσαίου σημείου) στις επιμέρους μονάδες της μελλοντικής κατάστασης



Διάγραμμα 13: Τοξικότητα προς τον άνθρωπο, εκτός του καρκίνου (δείκτης επιπέδου μεσαίου σημείου) στις επιμέρους μονάδες της μελλοντικής κατάστασης



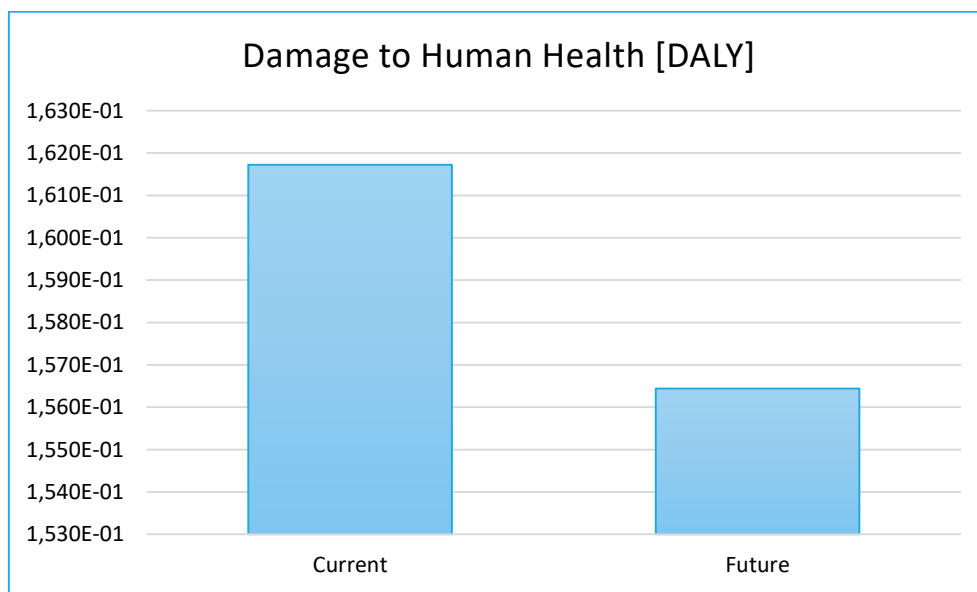
Διάγραμμα 14: Μεταβολή δεικτών επιπέδου μεσαίου σημείου από την υφιστάμενη προς την μελλοντική κατάσταση



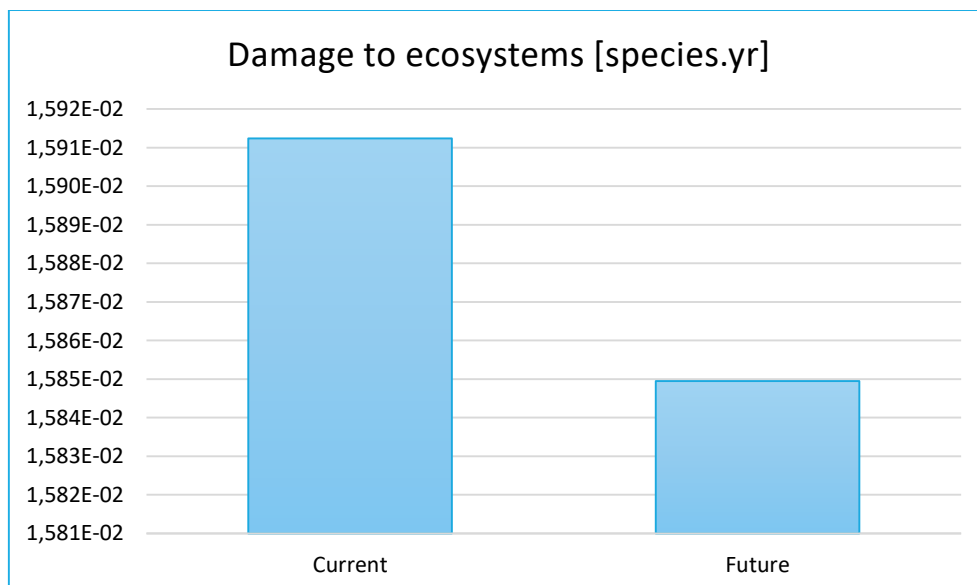
Με τους δείκτες επιπέδου τελικού σημείου επιβεβαιώνεται πως οι παρεμβάσεις συμβάλλουν στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της υπό μελέτη γαλακτοβιομηχανίας. Συγκεκριμένα, στον Πίνακα 26 φαίνεται η επί τοις εκατό μείωση της καταστροφής στην ανθρώπινη υγεία, στα οικοσυστήματα και στη διαθεσιμότητα των πόρων, ενώ φαίνεται η σύγκριση της υφιστάμενης και της μελλοντικής κατάστασης στο Διάγραμμα 15, στο Διάγραμμα 16 και στο Διάγραμμα 17, αντίστοιχα.

Πίνακας 26: Σύγκριση δεικτών επιπέδου τελικού σημείου υφιστάμενης και μελλοντικής κατάστασης

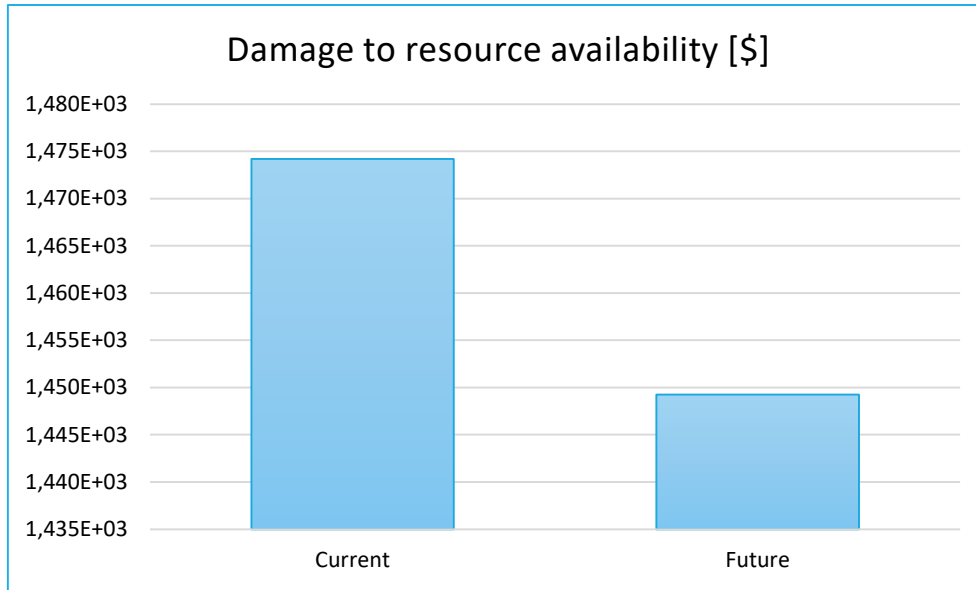
Δείκτης επιπέδου τελικού σημείου	Συνολική υφιστάμενη κατάσταση	Συνολική μελλοντική κατάσταση	Επί τοις εκατό μεταβολή
Damage to Human Health [DALY]	1,62E-01	1,56E-01	-3,36%
Damage to ecosystems [species.yr]	1,59E-02	1,58E-02	-0,50%
Damage to resource availability [€]	1,47E+03	1,45E+03	-1,65%



Διάγραμμα 15: Καταστροφή στην ανθρώπινη υγεία (δείκτης επιπέδου τελικού σημείου) στην υφιστάμενη και στη μελλοντική κατάσταση



Διάγραμμα 16: Καταστροφή στα οικοσυστήματα (δείκτης επιπέδου τελικού σημείου) στην υφιστάμενη και στη μελλοντική κατάσταση



Διάγραμμα 17: Καταστροφή στη διαθεσιμότητα των πόρων πόρους (δείκτης επιπέδου τελικού σημείου) στην υφιστάμενη και στη μελλοντική κατάσταση

6.3. Ανάλυση πλέγματος (NEXUS) Ενέργειας – Νερού – Υλικών

Προκειμένου να γίνει η ανάλυση πλέγματος θα πρέπει να δομηθεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας, όπως ο Πίνακας 27, όπου θα αναγράφονται οι υφιστάμενες και οι μελλοντικές τιμές των επιθυμητών παραμέτρων. Για τον υπολογισμό του δείκτη Nexus Strength απαιτούνται μόνο η ενέργεια, το νερό και τα απόβλητα. Θα πρέπει να σημειωθεί πως ως απόβλητο στην υφιστάμενη κατάσταση θεωρείται μόνο ο όξινο ορός γάλακτος, ενώ στην μελλοντική κατάσταση θεωρείται το χωνεμένο υπόλειμμα. Οι υπόλοιπες τιμές εξάγονται αθροιστικά από τους παραπάνω πίνακες, όπου αναγράφονται οι τιμές των υφιστάμενων και μελλοντικών μονάδων.

Πίνακας 27: Σύγκριση παραμέτρων υφιστάμενης και μελλοντικής κατάστασης

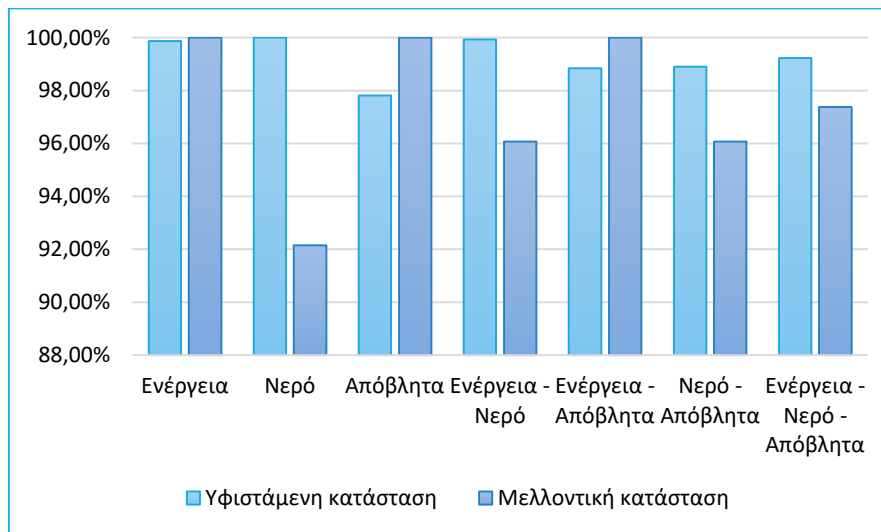
	Υφιστάμενη κατάσταση	Μελλοντική κατάσταση
Κατανάλωση ενέργειας [kWh/day]	95229,60	95351,67
Κατανάλωση νερού [m ³ /day]	379,32	349,55
Παραγωγή αποβλήτων [kg/day]	3571,40	2843,90
Ανάκτηση πρωτεϊνών [kg/day]	0,00	28,57
Καταστροφή στην ανθρώπινη υγεία [DALY]	1,62E-01	1,56E-01
Καταστροφή στα οικοσυστήματα [species. yr]	1,59E-02	1,58E-02
Καταστροφή στην διαθεσιμότητα πόρων [\$]	1,47E+03	1,45E+03
Κλιματική αλλαγή [kg CO ₂ eq.]	4,11E+04	4,01E+04

Οι δείκτες Nexus Strength φαίνεται να μειώνονται με την εισαγωγή των παρεμβάσεων. Ωστόσο, ο δείκτης που αφορά στην κατανάλωση ενέργειας, φαίνεται να αυξάνεται, γεγονός που οφείλεται στην αύξησή της με την εγκατάσταση των νέων μονάδων. Βέβαια η αύξηση αυτή είναι πολύ μικρή, αφού είναι αρκετά μικρές οι ροές που επεξεργάζονται.



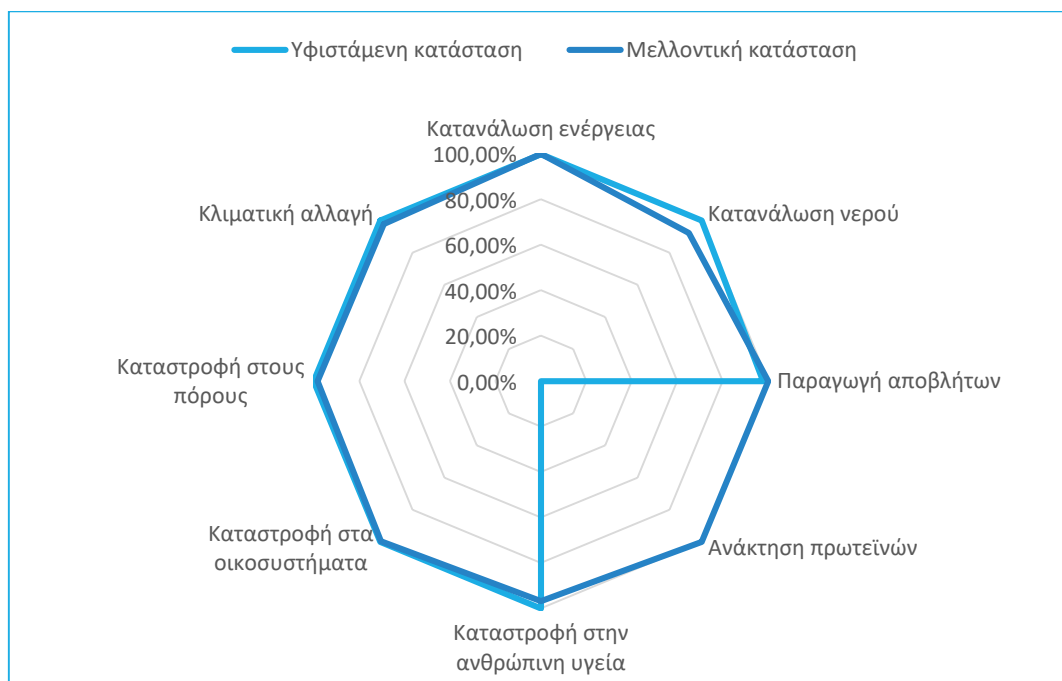
Πίνακας 28: Δείκτης Nexus Strength στην υφιστάμενη και στην μελλοντική κατάσταση

Nexus Strength	Συνολική υφιστάμενη κατάσταση	Συνολική μελλοντική κατάσταση	Επί τοις εκατό μεταβολή
Ενέργεια	99,87%	100,00%	0,13%
Νερό	100,00%	92,15%	-7,85%
Απόβλητα	97,82%	100,00%	2,18%
Ενέργεια - Νερό	99,94%	96,08%	-3,86%
Ενέργεια - Απόβλητα	98,84%	100,00%	1,16%
Νερό - Απόβλητα	98,91%	96,08%	-2,83%
Ενέργεια - Νερό - Απόβλητα	99,23%	97,38%	-1,85%



Διάγραμμα 18: Γραφική απεικόνιση σύγκρισης δεικτών Nexus Strength στην υφιστάμενη και τη μελλοντική κατάσταση

Τέλος, κατασκευάστηκε ένα διάγραμμα αράχνης όπου περιέχονται οι τιμές των παραμέτρων, που αναγράφονται στον Πίνακα 27. Από το Διάγραμμα 19 είναι εμφανής η μείωση της απαίτησης σε νερό, της κλιματικής αλλαγής και της καταστροφής στην ανθρώπινη υγεία, στα οικοσυστήματα και στην αξιοποίηση των πόρων, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η ανάκτηση πρωτεϊνών και η κατανάλωση ενέργειας.



Διάγραμμα 19: Μεταβολή παραμέτρων υφιστάμενης και μελλοντικής κατάστασης



7. Συμπεράσματα – Μελλοντικές προτάσεις

7.1. Συμπεράσματα

Οι παρεμβάσεις που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική απαιτούν αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης, ενώ ταυτόχρονα γίνεται εξοικονόμηση του νερού και μειώνεται η παραγωγή αποβλήτων. Ταυτόχρονα γίνεται παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας μέσω του συστήματος συμπαραγωγής, γεγονός που βοηθά ελάχιστα στην μείωση της συνολικής ενέργειας που απαιτείται στην μελλοντική κατάσταση. Η αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης και της παραγωγής αποβλήτων είναι πολύ μικρή βέβαια, με αποτέλεσμα να μπορούν να θεωρηθούν βιώσιμες οι αλλαγές, που πρόκειται να γίνουν. Το συμπέρασμα αυτό βέβαια εξάγεται και από την ανάλυση κύκλου ζωής, καθώς και από την ανάλυση πλέγματος.

Όσον αφορά στα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής, κρίνεται περιβαλλοντικά αποδεκτό να εγκατασταθούν οι νέες μονάδες, αφού όλοι οι δείκτες, εκτός από έναν, βελτιώθηκαν. Το μεγαλύτερο ποσοστό του περιβαλλοντικού αποτυπώματος αποδίδεται στη γαλακτοβιομηχανία. Αυτό είναι ένα λογικό αποτέλεσμα, καθώς η γαλακτοβιομηχανία διαχειρίζεται μεγάλες ποσότητες ροών και αποτελείται από πολλές επιμέρους διεργασίες. Βέβαια, η ανάκτηση των πρωτεϊνών φαίνεται να έχει την μεγαλύτερη συμβολή στη βελτίωση των δεικτών.

Όσον αφορά στα αποτελέσματα της ανάλυσης πλέγματος, κρίνονται επίσης περιβαλλοντικά αποδεκτές οι παρεμβάσεις, που πρόκειται να γίνουν. Ωστόσο ο δείκτης, που αντιστοιχεί στην ενέργεια, φαίνεται να αυξάνεται λόγω της αύξησης της κατανάλωσής της.

7.2. Μελλοντικές προτάσεις

Ήδη έχουν σημειωθεί σημαντικές βελτιώσεις στον κλάδο των γαλακτοβιομηχανιών, όπως 11% βελτίωση στην ειδική κατανάλωση νερού, 1% βελτίωση στην ενεργειακή απόδοση και 5% αύξηση στα ποσοστά ανακύκλωσης. Επίσης, το ποσοστό των ανακυκλωμένων υλικών, που χρησιμοποιούνται στις συσκευασίες έχει αυξηθεί κατά 17%. Ωστόσο η γαλακτοβιομηχανία βρίσκεται σε καλή θέση για να συνεχίσει να βελτιώνει τις επιδόσεις της όσον αφορά στην αποδοτικότητα του νερού και της ενέργειας στο εγγύς μέλλον. Συγκεκριμένα, μπορεί να επιτευχθεί μέχρι 50% μείωση νερού με χρήση κλειστών συστημάτων ψύξης, επαναχρησιμοποίηση του νερού έκπλυσης, εφαρμογή αυτόματων βαλβίδων στους σωλήνες νερού. Επιπλέον, εξοικονομείται νερό με χρήση συστημάτων ανακυκλοφορίας για την ανακύκλωση νερού κατά την παστερίωση. Την αποστείρωση, την επεξεργασία UHT, την ψύξη και την κατάψυξη. [4]

Με τις παρεμβάσεις που πρόκειται να προστεθούν παρατηρήθηκε βελτίωση στο περιβαλλοντικό αντίκτυπο, που έχει η γαλακτοβιομηχανία. Ωστόσο υπάρχει περιθώριο για περαιτέρω βελτίωση. Στην υφιστάμενη κατάσταση τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα οδηγούνται σε εξωτερική μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, όπου πραγματοποιούνται οι κατάλληλες ενέργειες, προκειμένου να διατεθεί το νερό στον υδροφόρο ορίζοντα, χωρίς να τον βλάψουν. Η υπό μελέτη γαλακτοβιομηχανία επιβαρύνεται οικονομικά, για να απαλλαχθεί από τα επεξεργασμένα αυτά υγρά απόβλητα. Αυτό που θα μπορούσε να γίνει λοιπόν είναι να προστεθούν περισσότερες μεμβράνες υπερδιήθησης, έτσι ώστε να έχουν δυναμικότητα ίση με αυτή των υγρών αποβλήτων. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να γίνει βελτιστοποίηση του ποσοστού του νερού που επεξεργάζεται από τις μεμβράνες υπερδιήθησης σε συνδυασμό με απολύμανση με UV, έτσι ώστε να επεξεργάζεται όσο το δυνατόν περισσότερο νερό, χωρίς όμως να αυξάνεται σημαντικά το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται.

Θα μπορούσε επίσης να γίνει βελτιστοποίηση των μεμβρανών υπερδιήθησης και του ξηραντήρα με ψεκασμό, που επεξεργάζονται τον όξινο ορό γάλακτος. Συγκεκριμένα, θα μπορούσε να βρεθεί η βέλτιστη επιθυμητή συγκέντρωση των πρωτεϊνών, που εξέρχονται από τη μονάδα μεμβρανών έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το άθροισμα της απαιτούμενης ενέργειας που πρέπει να καταναλωθεί στις δύο αυτές μονάδες.

Στην παρούσα διπλωματική οι παρεμβάσεις έχουν αξιολογηθεί με μόνο κριτήριο το περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Ωστόσο θα πρέπει να εξεταστεί η προσθήκη των μονάδων με μία οικονομική ανάλυση, ώστε να κριθεί αν τελικά είναι



ή όχι συμφέρουσες οι παρεμβάσεις. Η οικονομική δυνατότητα μίας βιομηχανίας αποτελεί βασική παράμετρο για την εφαρμογή οποιασδήποτε ενέργειας, αφού υπάρχει ένα πάγιο ποσό που σπαταλάται στους μισθούς των εργαζομένων, στην πληρωμή των λογαριασμών ρεύματος και νερού και σε άλλα πολλά.



8. Βιβλιογραφία

- [1] R. E. Dunlap και R. Scarce, «Poll Trends: Environmental Problems and Protection,» *The Public Opinion Quarterly*, τόμ. 55, αρ. 4, pp. 651-672, 1991.
- [2] J. Xing, L. Du, X. Quan, X. Luo, S. A. Snyder και H. Liang, «Combining chlor(am)ine-UV oxidation to ultrafiltration for potable water reuse: Promoted efficiency, membrane fouling control and mechanism,» *Journal of Membrane Science*, τόμ. 635, 2021.
- [3] Y. Zi, Z. Yi, F. Zhiyuan και R. Xiaobo, «A Review on Reverse Osmosis and Nanofiltration Membranes for Water Purification,» *Polymers*, τόμ. 11, αρ. 8, p. 1252, 2019.
- [4] S. J. Rad και M. J. Lewis, «Water utilisation, energy utilisation and waste water management in the dairy industry: A review,» *International Journal of Dairy Technology*, τόμ. 67, αρ. 1, pp. 1-20, 2 2014.
- [5] L. M. Hinds, C. P. O'Donnell, M. Akhter και B. K. Tiwari, «Principles and mechanisms of ultraviolet light emitting diode technology for food industry applications,» *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, τόμ. 56, 8 2019.
- [6] Eurostat, «Milk and milk product statistics,» 2023.
- [7] T. K. Thorning, A. Raben, T. Tholstrup, S. S. Soedamah-Muthu, I. Givens και A. Astrup, «Milk and dairy products: good or bad for human health? An assessment of the totality of scientific evidence,» *Food & Nutrition Research*, τόμ. 60, αρ. 1, 22 1 2016.
- [8] C. B. Peterson και F. M. Mitloehner, «Sustainability of the Dairy Industry: Emissions and Mitigation Opportunities,» *Frontiers in Animal Science*, τόμ. 2, 18 10 2021.
- [9] C. M. Timon, A. O'Connor, N. Bhargava, E. R. Gibney και E. L. Feeney, «Dairy Consumption and Metabolic Health,» *Nutrients*, τόμ. 12, αρ. 10, 3 10 2020.
- [10] B. Farizoglu και S. Uzuner, «The investigation of dairy industry wastewater treatment in a biological high performance membrane system,» *Biochemical Engineering Journal*, τόμ. 57, αρ. 1, pp. 46-54, 15 11 2011.
- [11] N. Burke, K. A. Zacharski, M. Southern, P. Hogan, M. P. Ryan και C. C. Adley, «The Dairy Industry: Process, Monitoring, Standards, and Quality,» σε *Descriptive Food Science*, IntechOpen, 2018.
- [12] Γ. Ευθύμερος, «Μελέτη για την τροποποίηση έγκρισης περιβαλλοντικών όρων υφιστάμενης δραστηριότητας,» Πάτρα, 2011.
- [13] C. Boukouvalas, F. Gkoumas, E. Koumaki, M. Krokida, S. Malamis, V. Oikonomopoulou και P. Argiro, «System Requirements and Specifications,» 2021.
- [14] K. Needham, «Water cooling towers : for cooling milk on the dairy farm,» *Journal of the Department of Agriculture*, τόμ. 3, αρ. 11, pp. 890-894, 1962.
- [15] S. Tyagi, A. Pandey, P. Pant και V. Tyagi, «Formation, potential and abatement of plume from wet cooling towers: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, τόμ. 16, αρ. 5, pp. 3409-3429, 6 2012.
- [16] J. Chandrapala, M. C. Duke, S. R. Gray, B. Zisu, M. Weeks, M. Palmer και T. Vasiljevic, «Properties of acid whey as a function of pH and temperature,» *Journal of Dairy Science*, τόμ. 98, αρ. 7, pp. 4352-4363, 7 2015.



- [17] J. Antonelli, C. A. Lindino, J. C. R. de Azevedo, S. N. M. de Souza, P. A. Cremonez και E. Rossi, «Biogas production by the anaerobic digestion of whey,» *Revista de Ciências Agrárias*, τόμ. 39, αρ. 3, pp. 463-468, 9 2016.
- [18] E. Tsakali, K. Petrotos, A. G. Alessandro και P. Goulas, «A review on whey composition and the methods used for its utilization for food and pharmaceutical products,» σε *6th International Conference on Simulation and Modelling in the Food and Bio-Industry FOODSIM 2010*, CIMO Research Centre, Braganca, Portugal, 2010.
- [19] «Αναφορά ποιότητας No 201,» Πάτρα, 2020.
- [20] «Αναφορά ποιότητας No 202,» Πάτρα, 2021.
- [21] Α. Βλυσίδης, Ε. Γρηγοροπούλου και Γ. Λυμπεράτος, *Περιβαλλοντική Μηχανική Σημειώσεις Παραδόσεων*, Αθήνα, 2020.
- [22] B. Bellocq, T. Ruiz, G. Delaplace, A. Duri και B. Cuq, «Screening efficiency and rolling effects of a rotating screen drum used to process wet soft agglomerates,» *Journal of Food Engineering*, τόμ. 195, pp. 235-246, 2 2017.
- [23] Γ. Λυμπεράτος και Δ. Βαγένας, *Διαχείριση υγρών αποβλήτων*, 2019.
- [24] K. Venkatesan, M. K. Saseetharan και V. Arutchelvan, «Determination of biokinetic coefficients for dairy waste water,» *Industrial Pollution Control*, τόμ. 20, αρ. 1, pp. 7-16, 2004.
- [25] A. Siatou, A. Manali και P. Gikas, «Energy Consumption and Internal Distribution in Activated Sludge Wastewater Treatment Plants of Greece,» *Water*, τόμ. 12, αρ. 4, 23 4 2020.
- [26] «Sludge thickening and dewatering,» σε *Design Guidelines for Sewage Works*, 2008.
- [27] A. Englande, P. Krenkel και J. Shamas, «Wastewater Treatment & Water Reclamation,» σε *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier, 2015.
- [28] «Belt filter presses for sludge dewatering,» 2020.
- [29] L. Bennamoun, «Solar drying of wastewater sludge: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, τόμ. 16, αρ. 1, pp. 1061-1073, 1 2012.
- [30] D. Bauman και J. Capper, «SUSTAINABILITY AND DAIRY PRODUCTION: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES,» σε *Cornell Nutrition Conference for Feed Manufacturers*, Ithaca, New York, 2011.
- [31] M. von Keyserlingk, N. Martin, E. Kebreab, K. Knowlton, R. Grant, M. Stephenson, C. Sniffen, J. Harner, A. Wright και S. Smith, «Invited review: Sustainability of the US dairy industry,» *Journal of Dairy Science*, τόμ. 96, αρ. 9, pp. 5405-5425, 9 2013.
- [32] T. Sar, S. Harirchi, M. Ramezani, G. Bulkan, M. Y. Akbas, A. Pandey και M. J. Taherzadeh, «Potential utilization of dairy industries by-products and wastes through microbial processes: A critical review,» *Science of The Total Environment*, τόμ. 810, 3 2022.
- [33] B. A.H και S. M.E., «Flux behavior and energy consumption of Ultrafiltration (UF) Process of milk,» *Australian Journal of Agricultural Engineering*, τόμ. 1, αρ. 2, pp. 54-65, 2010.
- [34] L. Robeson, «Polymer Membranes,» σε *Polymer Science: A Comprehensive Reference*, Elsevier, 2012, pp. 325-347.



- [35] F. Sun, S. Zeng, Y. Huang και M. He, «Parameter Identification of an Ultrafiltration Model for Organics Removal in a Full-Scale Wastewater Reclamation Plant with Sparse and Incomplete Monitoring Data,» *PLOS ONE*, τόμ. 11, αρ. 8, 6 8 2016.
- [36] R. H. Perry και D. W. Green, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 7th επιμ.
- [37] L. Ren, S. Yu, J. Li και L. Li, «Pilot study on the effects of operating parameters on membrane fouling during ultrafiltration of alkali/surfactant/polymer flooding wastewater: optimization and modeling,» *RSC Advances*, τόμ. 9, αρ. 20, pp. 11111-11122, 2019.
- [38] I. Masselin, L. Durand-Bourlier, J.-M. Laine, P.-Y. Sizaret, X. Chasseray και D. Lemordant, «Membrane characterization using microscopic image analysis,» *Journal of Membrane Science*, τόμ. 186, αρ. 1, pp. 85-96, 5 2001.
- [39] J. C. Crittenden, R. R. Trussell, D. W. Hand, K. J. Howe και G. Tchobanoglous, *MWH's Water Treatment*, 2012.
- [40] E. Torenbeek, «Appendix B: International Standard Atmosphere,» σε *Advanced Aircraft Design*, Oxford, UK, John Wiley & Sons, Ltd, 2013, pp. 397-398.
- [41] M. Gancheva, A. McNeill και M. Muro, «Water Reuse – Legislative Framework in EU Regions,» 2018.
- [42] H. E. d. El Nazer, S. Salman και A. Elnazer, «Irrigation water quality assessment and a new approach to its treatment using photocatalytic technique: Case study Yaakob village, SW Sohag, Egypt,» *Journal of materials and Environmental Sciences*, τόμ. 8, αρ. 1, pp. 310-317, 2017.
- [43] R. M. A. Roque-Malherbe, M. F. A. Goosen, S. S. Sablani και R. Roque-Malherbe, «Membrane Fouling: Recent Strategies and Methodologies for its Minimization,» σε *Handbook of Membrane Separations: Chemical, Pharmaceutical, and Biotechnological Applications*, A. K. Pabby, A. N. Sastre και S. S. H. Rizvi, Επιμ., CRC Press, Boca Raton, FL, 2009, pp. 325-344.
- [44] M. S. Rahman, Επιμ., *Handbook of Food Preservation*, CRC Press, 2007.
- [45] G. L. D. Pereira, L. Cardozo-Filho, V. Jegatheesan και R. Guirardello, «Generalization and Expansion of the Hermia Model for a Better Understanding of Membrane Fouling,» *Membranes*, τόμ. 13, αρ. 3, 2023.
- [46] J. Xu, G. Ruan, X. Chu, Y. Yao, B. Su και C. Gao, «A pilot study of UF pretreatment without any chemicals for SWRO desalination in China,» *Desalination*, τόμ. 207, αρ. 1-3, pp. 216-226, 3 2007.
- [47] J. Delaveau και P. Jelen, «Effect of pH on Viscosity of Sweet and Acid Wheys,» *Journal of Dairy Science*, τόμ. 62, αρ. 9, pp. 1455-1457, 9 1979.
- [48] G. Q. Chen, A. Artemi, J. Lee, S. L. Gras και S. E. Kentish, «A pilot scale study on the concentration of milk and whey by forward osmosis,» *Separation and Purification Technology*, τόμ. 215, pp. 652-659, 5 2019.
- [49] C. G. J. Baker και K. A. McKenzie, «Energy Consumption of Industrial Spray Dryers,» *Drying Technology*, τόμ. 23, αρ. 1-2, pp. 365-386, 23 2 2005.
- [50] T. Langrish, «Multi-scale mathematical modelling of spray dryers,» *Journal of Food Engineering*, τόμ. 93, αρ. 2, pp. 218-228, 7 2009.
- [51] T. Peng, X. Zhang, Y. Huang, Z. Zhao, Q. Liao, J. Xu, Z. Huang, J. Zhang, C.-y. Wu και X. Pan, «Nanoporous mannitol carrier prepared by non-organic solvent spray drying technique to enhance the aerosolization performance for dry powder inhalation,» *Scientific Reports*, τόμ. 7, αρ. 1, 2 5 2017.



- [52] L. Zhao, H. Wang, D. Kong, R. Gao και J. Yang, «Research on thermal characteristics of whey powder, milk replacer and lactose,» Kansas City, Missouri, 2013.
- [53] I. K. Sawhney, B. Sarkar, G. R. Patil και H. K. Sharma, «Moisture Sorption Isotherms and Thermodynamic Properties of Whey Protein Concentrate Powder from Buffalo Skim Milk,» *Journal of Food Processing and Preservation*, τόμ. 38, αρ. 4, pp. 1787-1798, 8 2014.
- [54] A. Wu, D. Lovett, M. McEwan, F. Cecelja και T. Chen, «A spreadsheet calculator for estimating biogas production and economic measures for UK-based farm-fed anaerobic digesters,» *Bioresource Technology*, τόμ. 220, pp. 479-489, 11 2016.
- [55] T. Teleszewski και M. Żukowski, «Analysis of Heat Loss of a Biogas Anaerobic Digester in Weather Conditions in Poland,» *Journal of Ecological Engineering*, τόμ. 19, αρ. 4, pp. 242-250, 1 7 2018.
- [56] Δ. Κέκος και Ε. Καλογεράς, Στοιχεία Βιοχημικής Μηχανικής, Αθήνα, 2010.
- [57] «Appendix,» σε *Fluid Flow for the Practicing Chemical Engineer*, Hoboken, NJ, USA, John Wiley & Sons, Inc., 2010, pp. 553-571.
- [58] E. Nieuwlaar, «Life Cycle Assessment and Energy Systems,» σε *Encyclopedia of Energy*, Elsevier, 2004, pp. 647-654.
- [59] S. Toniolo, L. Borsoi και D. Camana, «Life cycle assessment: methods, limitations, and illustrations,» σε *Methods in Sustainability Science*, Elsevier, 2021, pp. 105-118.
- [60] M. A. J. Huijbregts, Z. J. N. Steinmann, P. M. F. Elshout, G. Stam, F. Verones, M. Vieira, M. Zijp, A. Hollander και R. van Zelm, «ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level,» *The International Journal of Life Cycle Assessment*, τόμ. 22, αρ. 2, pp. 138-147, 12 2 2017.
- [61] D. Font Vivanco, R. Wang και E. Hertwich, «Nexus Strength: A Novel Metric for Assessing the Global Resource Nexus,» *Journal of Industrial Ecology*, τόμ. 22, αρ. 6, pp. 1473-1486, 11 12 2018.
- [62] A. Endo, M. Yamada, K. Baba, Y. Miyashita, R. Sugimoto, A. Ishii, J. Nishijima, M. Fujii, T. Kato και H. Hamamoto, «Methodology for Nexus Approach Toward Sustainable Use of Geothermal Hot Spring Resources,» *Frontiers in Water*, τόμ. 3, 12 10 2021.
- [63] M. H. Smith και A. Pears, «Doubling Energy Productivity by 2030-Technical Foundations Report,» 2014.
- [64] J. Stencl, «Moisture Sorption Isotherms of Whey Powder Spray in the 10–40°C Temperature Range,» *Adsorption Science & Technology*, τόμ. 22, αρ. 5, pp. 377-384, 7 6 2004.



9. Παραρτήματα

9.1. Παράρτημα Α (Κώδικας στο Matlab για την υφιστάμενη μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και την μελλοντική μονάδα μεμβρανών υπερδιήθησης σε συνδυασμό με απολύμανση με UV)

```
clear; clc

%Dairy Industry Output-----
disp('-----')
disp('Dairy Industry Output')
fprintf('\n')

Q_WW=375.7/(3600*24); %[m^3/sec]
fprintf('Waste Water Volumetric Flux of Dairy Industry [m^3/day]:
Q_WW=%g\n', (Q_WW*(24*3600)))

BOD_WW=1226/1000; %[kg/m^3]
fprintf('BOD5 of Dairy Industry [kg/m^3]: BOD_WW=%g\n',BOD_WW)

COD_WW=1993/1000; %[kg/m^3]
fprintf('COD of Dairy Industry [kg/m^3]: COD_WW=%g\n',COD_WW)

TSS_WW=1309/1000; %[kg/m^3]
fprintf('TSS of Dairy Industry [kg/m^3]: TSS_WW=%g\n',TSS_WW)
disp('-----')
fprintf('\n')

%Activated Sludge Data-----
disp('-----')
disp('Activated Sludge Data')
fprintf('\n')

X=3; %[kg MLVSS/m^3]
fprintf('Concentration of Microorganisms in Activated Sludge Process [kg MLVSS/m^3]:
X=%g\n',X)

F_M=0.09/(24*3600); %[kgBOD5/(kgMLVSS*sec)]
fprintf('Food to Microorganisms Ratio in Activated Sludge Process
[kgBOD5/(kgMLVSS*day)]: F/M=%g\n',F_M*(24*3600))

R_AS=150/100; %[-]
fprintf('Sludge Recirculation in Activated Sludge Process [-]: R_AS=%g\n',R_AS)

Y=0.933; %[kgBOD5/kgMLVSS]
fprintf('Yield Coefficient [kgBOD5/kgMLVSS]: Y=%g\n',Y)

Ks=867.76/1000; %[kg/m^3]
fprintf('Half Velocity Constant [mg/L]: Ks=%g\n',Ks*1000)

k=2.5/(24*3600); %[1/sec]
fprintf('Substrate Removal Rate Coefficient [1/day]: k=%g\n',k*(24*3600))

m_max=k*Y; %[1/sec]
fprintf('Maximum Specific Growth Rate [1/day]: m_max=%g\n',m_max*(24*3600))

kd=0.015/(24*3600); %[1/sec]
fprintf('Endogenous Decay Coefficient [1/day]: kd=%g\n',kd*(24*3600))
disp('-----')
fprintf('\n')
```




```
%UltraFiltration Membranes Data-----
disp('-----')
disp('UltraFiltration Membranes Data')
fprintf('\n')

d_p=0.02/10^6; %[m]
fprintf('Pore Size [μm]: d_p=%g\n',d_p*10^6)

DP=1*10^5; %[N/m^2]
fprintf('Transmembrane pressure [bar]: DP=%g\n',DP/10^5)

Dx=125.3/10^6; %[m]
fprintf('Thickness Of The Membrane or Pore Length [μm]: Dx=%g\n',Dx*10^6)

N=1.7*10^14; %[pores/m^2]
fprintf('Pore Density [x10^14 pores/m^2]: N=%g\n',N/10^14)

A_0_Membrane_Module=1; %[m^2]
fprintf('Initial Effective Area Of The Membrane Module [m^2]:
A_0_Membrane_Module=%g\n',A_0_Membrane_Module)

v=1.002*10^-3; %[Ns/m^2]
fprintf('Dynamic Viscosity [Ns/m^2]: v=%g\n',v)

P_1=1.01325*10^5; %[N/m^2]
fprintf('Pressure at module inlet (atmospheric) [bar]: P_1=%g\n',P_1/10^5)

P_2=P_1-DP; %[N/m^2]
fprintf('Pressure at module outlet (atmospheric) [bar]: P_2=%g\n',P_2/10^5)

R_UF=50/100; %[-]
fprintf('Permeate recirculation [percent]: Recirculation=%g\n',R_UF)
disp('-----')
fprintf('\n')

%Modelling of Activated Sludge Process & Ultrafiltration Membranes-----
loop=1;
while true

    if loop==1
        disp('-----')
        disp('Activated Sludge Process (Without Recirculation From UltraFiltration)')
        fprintf('\n')

        Q_F_AS=Q_WW; %[m^3/sec]
        fprintf('Input Volumetric Flux to Activated Sludge Process [m^3/day]:
Q_F_AS=%g\n',Q_F_AS*(24*3600))

        BOD_F_AS=BOD_WW; %[kg/m^3]
        fprintf('Input BOD5 Concentration to Activated Sludge Process [kg/m^3]:
BOD_F_AS=%g\n',BOD_F_AS)

        COD_F_AS=COD_WW; %[kg/m^3]
        fprintf('Input COD Concentration to Activated Sludge Process [kg/m^3]:
COD_F_AS=%g\n',COD_F_AS)

        TSS_F_AS=TSS_WW; %[kg/m^3]
        fprintf('Input TSS Concentration to Activated Sludge Process [kg/m^3]:
TSS_F_AS=%g\n',TSS_F_AS)
        fprintf('\n')

    else
        fprintf('\n')
        disp('-----')
```



```
disp('Activated Sludge Process (With Recirculation From UltraFiltration)')
fprintf('\n')

Q_C_UF_old=Q_C_UF; %[m^3/sec]

Q_F_AS=Q_WW+Q_C_UF_old; %[m^3/sec]
fprintf('Input Volumetric Flux to Activated Sludge Process [m^3/day]:
Q_F_AS=%g\n',Q_F_AS*(24*3600))

BOD_F_AS=(Q_WW*BOD_WW+Q_C_UF_old*BOD_C_UF)/Q_F_AS; %[kg/m^3]
BOD_F_AS=mean(BOD_F_AS);
fprintf('Input BOD5 Concentration to Activated Sludge Process [kg/m^3]:
BOD_F_AS=%g\n',BOD_F_AS)

COD_F_AS=(Q_WW*COD_WW+Q_C_UF_old*COD_C_UF)/Q_F_AS; %[kg/m^3]
COD_F_AS=mean(COD_F_AS);
fprintf('Input COD Concentration to Activated Sludge Process [kg/m^3]:
COD_F_AS=%g\n',COD_F_AS)

TSS_F_AS=(Q_WW*TSS_WW+Q_C_UF*TSS_C_UF)/Q_F_AS; %[kg/m^3]
TSS_F_AS=mean(TSS_F_AS);
fprintf('Input TSS Concentration to Activated Sludge Process [kg/m^3]:
TSS_F_AS=%g\n',TSS_F_AS)
fprintf('\n')

end

theta=(BOD_F_AS)/(F_M*X); %[sec]
fprintf('Residence Time in Aeration Tank [sec]: θ=%g\n',theta)

V=Q_F_AS*theta; %[m^3]
fprintf('Volume of Liquid in Aeration Tank [m^3]: V=%g\n',V)

Q_R_AS=R_AS*Q_F_AS; %[m^3/sec]
fprintf('Recirculated Volumetric Flux of Activated Sludge [m^3/day]:
Q_R_AS=%g\n',Q_R_AS*(24*3600))

BOD_OUT_AS(1)=0.1;

i=1;
while true
    theta_c(i)=(((1+R_AS)/((Y*(BOD_F_AS-BOD_OUT_AS(i)))/(X*theta))-kd))-
theta)/R_AS; %#ok<SAGROW>
    BOD_OUT_AS(i+1)=(((1+R_AS)/(theta+R_AS*theta_c(i)))+kd)*Ks)/(m_max-kd-
((1+R_AS)/(theta+R_AS*theta_c(i)))); %#ok<SAGROW>
    e_a=abs(BOD_OUT_AS(i+1)-BOD_OUT_AS(i));

    if(i>300||e_a<10^-10);BOD_OUT_AS=BOD_OUT_AS(i+1);theta_c=theta_c(i);break;end
    i=i+1;
end

Q_SLUDGE_WET_AS=V/theta_c; %[m^3/sec]
fprintf('Sludge Volumetric Flux from Activated Sludge Process [m^3/day]:
Q_OUT_AS=%g\n',Q_SLUDGE_WET_AS*(24*3600))

X_U=(((1+R_AS)*theta_c)/(theta+R_AS*theta_c))*X; %[kg/m^3]
Q_SLUDGE_DRY_AS=Q_SLUDGE_WET_AS*X_U; %[kg/sec]
fprintf('Real Sludge Volumetric Flux from Activated Sludge Process [kg/day]:
Q_sludge=%g\n',Q_SLUDGE_DRY_AS*(24*3600))

Loss_Of_Organics=(BOD_F_AS-BOD_OUT_AS)/BOD_F_AS; [%]
COD_OUT_AS=(1-Loss_Of_Organics)*COD_F_AS; %[kg/m^3]
TSS_OUT_AS=(1-Loss_Of_Organics)*TSS_F_AS; %[kg/m^3]
```



```
fprintf('\n')
E_WWTP=4459.2/(24*3600); %[kWh/sec]
E_AS=(-0.294*log(Q_F_AS)+3.1891)*Q_F_AS; %[kWh/sec]
fprintf('Energy Required for Activated Sludge Process [kWh/day]:
E_AS=%g\n',E_AS*(24*3600))
disp('-----')
fprintf('\n')

%UltraFiltration-----
disp('-----')
disp('UltraFiltration')
fprintf('\n')

Q_WATER_AS=Q_F_AS-Q_SLUDGE_WET_AS; %[m^3/sec]
fprintf('Input Volumetric Flux to UltraFiltration [m^3/day]:
Q_F_UF=%g\n',Q_WATER_AS*(24*3600))

per_UF=10/100;
Q_F_UF=per_UF*Q_WATER_AS; %[m^3/sec]

BOD_F_UF=BOD_OUT_AS; %[kg/m^3]
fprintf('Input BOD5 Concentration to UltraFiltration [kg/m^3]:
BOD_F_UF=%g\n',BOD_F_UF)

COD_F_UF=COD_OUT_AS; %[kg/m^3]
fprintf('Input COD Concentration to UltraFiltration [kg/m^3]:
COD_F_UF=%g\n',COD_F_UF)

TSS_F_UF=TSS_OUT_AS; %[kg/m^3]
fprintf('Input TSS Concentration to UltraFiltration [kg/m^3]:
TSS_F_UF=%g\n',TSS_F_UF)
fprintf('\n')

Q_P_module=((pi*d_p^4*DP*N)/(128*v*Dx))*A_0_Membrane_Module; %[m^3/sec for 1
module]

M=floor((Q_F_UF)/Q_P_module); %[# of modules]
Q_F_module=Q_F_UF/M; %[m^3/sec for 1 module]
Q_C_module=Q_F_module-Q_P_module; %[m^3/sec for 1 module]
Q_R_module=R_UF*Q_C_module; %[m^3/sec for 1 module]

Q_F=Q_F_module+Q_R_module; %[m^3/sec for 1 module]
Q_C=Q_F-Q_P_module; %[m^3/sec for 1 module]

Q_P_UF=Q_P_module*M; %[m^3/sec]
Q_C_UF=Q_C_module*M; %[m^3/sec]
Q_R_UF=Q_R_module*M; %[m^3/sec]

Q_F_Total=Q_F*M; %[m^3/sec]

fprintf('Number Of Modules for UltraFiltration [#]: M=%g\n',M)
fprintf('\n')

fprintf('Permeate Volumetric Flux Rate from Ultrafiltration [m^3/day]:
Q_P_UF=%g\n',Q_P_UF*(24*3600))
fprintf('Concentrate Volumetric Flux Rate from Ultrafiltration [m^3/day]:
Q_C_UF=%g\n',Q_C_UF*(24*3600))
fprintf('Recirculated Volumetric Flux of Ultrafiltration [m^3/day]:
Q_R_UF=%g\n',Q_R_UF*(24*3600))

%Initial Condition
t_0=1; %[sec]
t_f=3600; %[sec]
t(1)=t_0;
```



```
t_total(1)=t_0;

BOD_P_UF_0=8.1156;
BOD_P_UF_0=BOD_P_UF_0*10^-3; %[kg/m^3]
BOD_P_UF(1)=BOD_P_UF_0;

COD_P_UF_0=13.1995;
COD_P_UF_0=COD_P_UF_0*10^-3; %[kg/m^3]
COD_P_UF(1)=COD_P_UF_0;

TSS_P_UF_0=8.6628;
TSS_P_UF_0=TSS_P_UF_0*10^-3; %[kg/m^3]
TSS_P_UF(1)=TSS_P_UF_0;

%Model Parameters
a=0.5*10^-3;           %parameter a (0 - 1*10^-3) [-]
b=1.6*10^-6;         %parameter b (0 - 5*10^-6) [-]
c=0.2*10^-9;         %parameter c (0 - 1*10^-9) [-]
f=1 *10^-8;          %parameter f (0 - 7*10^-8) [-]

%Differential Equation of BOD5 of Permeate in respect of the time

C_F_new=@(C,C_F) (Q_F_module*C_F+Q_R_module*((Q_F_module*C_F-
Q_P_module*C)/Q_C_module))/Q_F;
odefun=@(t,C,C_F) ((A_0_Membrane_Module/(Dx*Q_F_Total))*f*(C_F_new(C,C_F)-C)*(1-
a*t+b*t^2+c*t^3)-C)/t;

dt=1;
j=1;
BackWash=0;
BackWash_Time=30; %[sec]
while true

    %Backward Euler or Implicit Euler
    t(j+1) = t(j) + dt; %#ok<SAGROW>
    t_total(j+1)=t_total(j) + dt; %#ok<SAGROW>

    be_BOD = @(x) BOD_P_UF(j) + odefun( t(j+1), x, BOD_F_UF)*dt - x;
    BOD_P_UF(j+1) = fzero(be_BOD,BOD_P_UF(j)); %#ok<SAGROW>

    be_COD = @(x) COD_P_UF(j) + odefun( t(j+1), x, COD_F_UF)*dt - x;
    COD_P_UF(j+1) = fzero(be_COD,COD_P_UF(j)); %#ok<SAGROW>

    be_TSS = @(x) TSS_P_UF(j) + odefun( t(j+1), x, TSS_F_UF)*dt - x;
    TSS_P_UF(j+1) = fzero(be_TSS,TSS_P_UF(j)); %#ok<SAGROW>

    j=j+1;
    if(BOD_P_UF(j)>0.01) || (COD_P_UF(j)>0.075) || (TSS_P_UF(j)>0.01)
        BackWash=BackWash+1;
        BOD_P_UF(j)=BOD_P_UF_0; %#ok<SAGROW>
        COD_P_UF(j)=COD_P_UF_0; %#ok<SAGROW>
        TSS_P_UF(j)=TSS_P_UF_0; %#ok<SAGROW>
        t(j)=t_0; %#ok<SAGROW>
        t_total(j)=t_total(j)+BackWash_Time; %#ok<SAGROW>
    end

    if(t_total(j)>=t_f);break;end

end

fprintf('\n')
E_UF=((Q_P_UF*P_2)+(Q_R_UF*(P_1-P_2)))/(1000); %[kWh/sec]
fprintf('Energy Required for Ultrafiltration Membranes [kWh/day]:
E_AS=%g\n',E_UF*(24*3600))
```



```
E_UV=1.04*Q_F_UF; %[kWh/sec]
fprintf('Energy Required for UV Disinfection [kWh/day]: E_AS=%g\n',E_UV*(24*3600))

disp('-----')

if loop==1

    BOD_C_UF=(Q_F_UF*BOD_F_UF-Q_P_UF.*BOD_P_UF)./Q_C_UF;
    COD_C_UF=(Q_F_UF*COD_F_UF-Q_P_UF.*COD_P_UF)./Q_C_UF;
    TSS_C_UF=(Q_F_UF*TSS_F_UF-Q_P_UF.*TSS_P_UF)./Q_C_UF;
    fprintf('\n')

    disp('Results for LCA (Past)')
    Results= [Q_F_AS*3600*24, Q_WATER_AS*3600*24 ,Q_SLUDGE_WET_AS*3600*24; ...
        BOD_F_AS, BOD_OUT_AS, BOD_OUT_AS; ...
        COD_F_AS, COD_OUT_AS, COD_OUT_AS; ...
        TSS_F_AS, TSS_OUT_AS, TSS_OUT_AS;...
        E_AS*3600*24, 0, 0];
    rowNames = {'Q (m3/day)', 'BOD (kg/m3)', 'COD (kg/m3)', 'TSS (kg/m3)', 'E
(kWh/day)'};
    colNames = {'Activated Sludge Process (In)', 'Activated Sludge Process (Water
Out)', 'Activated Sludge Process (Wet Sludge Out)'};
    sTable = array2table(Results, 'RowNames', rowNames, 'VariableNames', colNames);
    disp(sTable)

    Results= [Q_SLUDGE_DRY_AS*3600*24; (E_WWTP-E_AS)*3600*24];
    rowNames = {'M (kg/day)', 'E (kWh/day)'};
    colNames = {'Sludge Dewatering Process (Dried Sludge)'};
    sTable = array2table(Results, 'RowNames', rowNames, 'VariableNames', colNames);
    disp(sTable)

else

    Q_C_UF_new=Q_C_UF;
    e_mm=abs(Q_C_UF_new-Q_C_UF_old);

    if(loop>50||e_mm<10^-6)

        figure (1)
        plot(t_total,BOD_P_UF, '-g. ');
        title('UltraFiltration')
        xlabel('Time [sec]')
        ylabel('BOD5 in Permeate [kg/m^3]')
        hold off

        figure (2)
        plot(t_total,BOD_C_UF, '-r. ');
        title('UltraFiltration')
        xlabel('Time [sec]')
        ylabel('BOD5 in Concentrate [kg/m^3]')
        hold off

        figure (3)
        plot(t_total,COD_P_UF, '-g. ');
        title('UltraFiltration')
        xlabel('Time [sec]')
        ylabel('COD in Permeate [kg/m^3]')
        hold off

        figure (4)
        plot(t_total,COD_C_UF, '-r. ');
        title('UltraFiltration')
        xlabel('Time [sec]')
```



```
ylabel('COD in Concentrate [kg/m^3]')
hold off

figure (5)
plot(t_total,TSS_P_UF,'-g. ');
title('UltraFiltration')
xlabel('Time [sec]')
ylabel('TSS in Permeate [kg/m^3]')
hold off

figure (6)
plot(t_total,TSS_C_UF,'-r. ');
title('UltraFiltration')
xlabel('Time [sec]')
ylabel('TSS in Concentrate [kg/m^3]')
hold off

break;
end
end
loop=loop+1;
end

disp('LCA Results (Future)')
Results= [Q_F_AS*3600*24, Q_WATER_AS*3600*24 ,Q_SLUDGE_WET_AS*3600*24; ...
BOD_F_AS, BOD_OUT_AS, BOD_OUT_AS; ...
COD_F_AS, COD_OUT_AS, COD_OUT_AS; ...
TSS_F_AS, TSS_OUT_AS, TSS_OUT_AS;...
E_AS*3600*24, 0, 0];
rowNames = {'Q (m3/day)', 'BOD (kg/day)', 'COD (kg/day)', 'TSS (kg/day)', 'E (kWh/day)'};
colNames = {'Activated Sludge Process (In)', 'Activated Sludge Process (Water
Out)', 'Activated Sludge Process (Sludge Out)'};
sTable = array2table(Results, 'RowNames', rowNames, 'VariableNames', colNames);
disp(sTable)

Results= [Q_SLUDGE_DRY_AS*3600*24; (E_WWTP-E_AS)*3600*24];
rowNames = {'M (kg/day)', 'E (kWh/day)'};
colNames = {'Sludge Dewatering Process (Dried Sludge)'};
sTable = array2table(Results, 'RowNames', rowNames, 'VariableNames', colNames);
disp(sTable)

Results= [Q_F_UF*3600*24 ,Q_F_UF*3600*24; ...
BOD_OUT_AS, BOD_OUT_AS; COD_OUT_AS, COD_OUT_AS; TSS_OUT_AS, TSS_OUT_AS;...
E_UV*3600*24, 0];
rowNames = {'Q (m3/day)', 'BOD (kg/m3)', 'COD (kg/m3)', 'TSS (kg/m3)', 'E (kWh/day)'};
colNames = {'UltraViolet Disinfection (In)', 'UltraViolet Disinfection (Out)'};
sTable = array2table(Results, 'RowNames', rowNames, 'VariableNames', colNames);
disp(sTable)

Results= [Q_F_UF*3600*24 ,Q_P_UF*3600*24, Q_C_UF*3600*24; ...
BOD_F_UF, mean(BOD_P_UF), mean(BOD_C_UF); ...
COD_F_UF, mean(COD_P_UF), mean(COD_C_UF); ...
TSS_F_UF, mean(TSS_P_UF), mean(TSS_C_UF); ...
E_UF*3600*24, 0, 0];
rowNames = {'Q (m3/day)', 'BOD (kg/m3)', 'COD (kg/m3)', 'TSS (kg/m3)', 'E (kWh/day)'};
colNames = {'UltraFiltration (In)', 'UltraFiltration (Permeate Out)', 'UltraFiltration
(Concentrate Out)'};
sTable = array2table(Results, 'RowNames', rowNames, 'VariableNames', colNames);
disp(sTable)
```




9.2. Παράρτημα Β (Κώδικας στο Matlab για τις μελλοντικές μονάδες μεμβρανών υπερδιήθησης, ξήρανσης με ψεκασμό και αναερόβιας χώνευσης)

```
clear; clc

%Acid Whey Data-----
disp('-----')
disp('Acid Whey Data')
fprintf('\n')

d=1.03*1000; %[kg/m^3]
fprintf('Density [kg/m^3]: d=%g\n',d)

v=1.09/1000; %[Ns/m^2]
fprintf('Dynamic Viscosity [Ns/m^2]: v=%g\n',v*1000)

Q_AW_F=25*(1000/(7*d)); %[m^3/day]
fprintf('Volumetric Flux of Acid Whey [m^3/day]: Q_AW_F=%g\n',Q_AW_F)

%[water, lactose, lactic cid, citric acid, minerals, protein]
fprintf('\n')
disp('Feed Concentration of Acid Whey (%):')
c_UF_F=[94/100, 3.8/100, 0.8/100, 0.1/100, 0.5/100, 0.8/100];
colNames = {'Water', 'Lactose', 'Lactic Acid', 'Citric Acid', 'Minerals', 'Protein'};
sTable = array2table(c_UF_F, 'VariableNames', colNames);
disp(sTable)
disp('-----')
fprintf('\n')
%-----

%UltraFiltration Membranes-----
disp('-----')
disp('UltraFiltration Membranes')
fprintf('\n')

disp('Data')
fprintf('\n')

d_p=0.02/10^6; %[m]
fprintf('Pore Size [μm]: d_p=%g\n',d_p*10^6)

DP=1*10^5; %[N/m^2]
fprintf('Transmembrane pressure [bar]: DP=%g\n',DP/10^5)

Dx=125.3/10^6; %[m]
fprintf('Thickness Of The Membrane or Pore Length [μm]: Dx=%g\n',Dx*10^6)

N=1.7*10^14; %[#pores/m^2]
fprintf('Pore Density [x10^14 #pores/m^2]: N=%g\n',N/10^14)

A_0_Membrane_Module=10; %[m^2]
fprintf('Initial Effective Area Of The Membrane Module [m^2]:
A_0_Membrane_Module=%g\n',A_0_Membrane_Module)

P_1=1.013250*10^5; %[N/m^2]
fprintf('Pressure at module inlet (atmospheric) [bar]: P_1=%g\n',P_1/10^5)

P_2=P_1-DP; %[N/m^2]
fprintf('Pressure at module outlet (atmospheric) [bar]: P_2=%g\n',P_2/10^5)
fprintf('\n')

disp('Results for LCA')
```



```
per_UF=20/100; %[%]
Q_F_UF=Q_AW_F; %[m^3/day]
Q_C_UF=per_UF*Q_F_UF; %[m^3/day]
Q_P_UF=Q_F_UF-Q_C_UF; %[m^3/day]
Q_P_module=( (pi*d_p^4*DP*N) / (128*v*Dx) ) *A_0_Membrane_Module*(24*3600); %[m^3/day for 1
module]
M=floor(Q_P_UF/Q_P_module); %[# of modules]

c_except_protein=c_UF_F(1:end-1)/sum(c_UF_F(1:end-1));
c_except_protein=[c_except_protein 0]; %[%]

Q_c_UF_F=Q_AW_F*c_UF_F; %[m^3/day]

Q_c_UF_P=c_except_protein*Q_P_UF; %[m^3/day]
c_UF_P=Q_c_UF_P/sum(Q_c_UF_P); %[%]

Q_c_UF_C=Q_c_UF_F-Q_c_UF_P; %[m^3/day]
c_UF_C=Q_c_UF_C/sum(Q_c_UF_C); %[%]

E_UF=Q_P_UF*P_2/(3600*1000); %[kWh/day]
fprintf('\n')

Results_Q= [Q_F_UF, Q_P_UF, Q_C_UF];
Results_c= [c_UF_F; c_UF_P; c_UF_C]';
Results_E= [E_UF, 0, 0];
Results= [Results_Q; Results_c; Results_E];
rowNames = {'Q (m3/day)', 'Water (%)', 'Lactose (%)', 'Lactic Acid (%)', 'Citric Acid
(%)', 'Minerals (%)', 'Protein (%)', 'E (kWh/day)'};
colNames = {'UltraFiltration (In)', 'UltraFiltration (Permeate Out)', 'UltraFiltration
(Concentrate Out)'};
sTable = array2table(Results, 'RowNames', rowNames, 'VariableNames', colNames);
disp(sTable)
disp('-----')
fprintf('\n')
%-----

%Concentrate to Spray Dryer-----
disp('-----')
disp('Spray Dryer (Concentrate)')
fprintf('\n')

disp('Air Data')
fprintf('\n')

M_Air=10000; %[kg air/day]
fprintf('Hot Air Mass Flow Rate [kg air/day]: M_Air=%g\n',M_Air)

T_Air_In=200; %[oC]
fprintf('Hot Air Temperature [oC]: T_Air_In=%g\n',T_Air_In)

Y_Air_In=0.01; %[kg water/kg dry air]
fprintf('Air Humidity [(kg water)/(kg dry air)]: Y_Air_In=%g\n',Y_Air_In)

cP_Air=1; %[kJ/(kg K)]
fprintf('Specific Heat Capacity of Dry Air [kJ/(kg K)]: cP_a=%g\n',cP_Air)
fprintf('\n')

disp('Ambient Data')
fprintf('\n')

T_amb=25; %[oC]
fprintf('The Ambient Temperature [oC]: T_amb=%g\n',T_amb)

Y_amb=Y_Air_In; %[kg water/kg dry air]
```



```
fprintf('Ambient Humidity [(kg water)/(kg dry air)]: Y_amb=%g\n',Y_amb)
fprintf('\n')

disp('Liquid Data')
fprintf('\n')

M_Liquid=Q_C_UF*d; %[kg liquid/day]
fprintf('Liquid Mass Flow Rate [kg liquid/day]: M_Liquid=%g\n',M_Liquid)

T_Liquid_In=30; %[oC]
fprintf('Liquid Temperature [oC]: T_Liquid=%g\n',T_Liquid_In)

W_In=(1-c_UF_C(end)); %[ ]
fprintf('Water Percentage Input [-]: W_In=%g\n',W_In)
fprintf('\n')

disp('Water Data')
fprintf('\n')

cP_Water=4.2; %[kJ/(kg K)]
fprintf('Specific Heat Capacity of Liquid Water [kJ/(kg K)]: cP_Water=%g\n',cP_Water)

cP_V=1.8; %[kJ/(kg K)]
fprintf('Specific Heat Capacity of Pure Water Vapor [kJ/(kg K)]: cP_V=%g\n',cP_V)

lamda=2500; %[kJ/kg]
fprintf('Latent Heat of Vaporisation [kJ/kg]: lamda=%g\n',lamda)
fprintf('\n')

disp('Solids Data')
fprintf('\n')

cP_25=[2.3200 1.8733 1.5333 1.8667 2.3900 1.3233];
cP_25=mean(cP_25);
cP_30=[2.6900 2.0733 1.8133 2.1600 2.4667 1.5133];
cP_30=mean(cP_30);
cP_35=[3.0033 2.1867 2.2300 2.3967 2.4367 2.5567];
cP_35=mean(cP_35);
cP_40=[3.2933 2.4100 2.4900 2.6500 2.6667 2.7233];
cP_40=mean(cP_40);
cP_45=[3.3700 2.4800 2.5700 2.7467 2.7467 2.8000];
cP_45=mean(cP_45);
cP_50=[3.4567 2.5500 2.6533 2.8600 2.8200 2.8833];
cP_50=mean(cP_50);
cP_55=[3.5667 2.6567 2.7733 3.0000 2.9167 2.9800];
cP_55=mean(cP_55);
cP_60=[3.6567 2.7367 2.8733 3.1200 2.9933 3.0500];
cP_60=mean(cP_60);
cP_65=[3.7567 2.8500 2.9900 3.2867 3.0900 3.1300];
cP_65=mean(cP_65);
cP_70=[3.8333 2.9533 3.1033 3.4300 3.1467 3.1800];
cP_70=mean(cP_70);
cP_75=[3.9467 3.0900 3.2533 3.6033 3.2800 3.2567];
cP_75=mean(cP_75);
cP_80=[4.0433 3.2167 3.4167 3.7767 3.3633 3.3333];
cP_80=mean(cP_80);
cP_85=[4.1467 3.3600 3.6067 3.9867 3.4633 3.4233];
cP_85=mean(cP_85);
cP_90=[4.3100 3.5933 3.8900 4.2800 3.6067 3.5900];
cP_90=mean(cP_90);
cP_95=[4.4800 3.8967 4.2167 4.6433 3.7667 3.8767];
cP_95=mean(cP_95);
cP_100=[4.6167 4.2600 4.5500 5.0167 3.9067 4.2600];
cP_100=mean(cP_100);
```



```
T_cP=[25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100];
cP=[cP_25 cP_30 cP_35 cP_40 cP_45 cP_50 cP_55 cP_60 cP_65 cP_70 cP_75 cP_80 cP_85 cP_90
cP_95 cP_100];

cP_Solids = interp1(T_cP,cP,T_Liquid_In); %[kJ/kg K]
fprintf('Specific Heat Capacity of Solids [kJ/(kg K)]: cP_Solids=%g\n',cP_Solids)
fprintf('\n')

M_Dry_Air=M_Air*(1/(1+Y_Air_In)); %[kg dry air/day]
M_Water_In=W_In*M_Liquid; %[kg water/day]
M_Solids=(1-W_In)*M_Liquid; %[kg solids/day]
X_In=M_Water_In/M_Solids; %[kg water/kg solids]
T_ref=0; %[oC]
P_atm=101325; %[Pa]
R=8.314; %[J/(mol K)]

X_Out_old=0.6; %[kg water/kg solids]

j=1;
maxiter=50;
while true

    Y_Air_Out=Y_Air_In+(M_Solids/M_Air)*(X_In-X_Out_old); %[kg water/kg dry air]

    H_Air=@(T_Air,Y_Air) cP_Air*(T_Air-T_ref)+Y_Air*(lamda+cP_V*(T_Air-T_ref));
    H_Water=@(T_Liquid) cP_Water*(T_Liquid-T_ref);
    H_Solids=@(T_Solids) cP_Solids*(T_Solids-T_ref);

    H_Air_In=H_Air(T_Air_In,Y_Air_In); %[kJ/kg dry air]
    H_Water_In=H_Water(T_Liquid_In); %[kJ/kg water]
    H_Solids_In=H_Solids(T_Liquid_In); %[kJ/kg solids]

    H=@(T) M_Dry_Air*H_Air_In + M_Water_In*H_Water_In + M_Solids*H_Solids_In -...
        (M_Dry_Air*H_Air(T,Y_Air_Out) + M_Solids*H_Solids(T));

    T_Out = fzero(H,0); %[oC]

    P_V=((Y_Air_Out/0.622)*P_atm)/(1+Y_Air_Out/0.622); %[Pa]
    P_V_sat=133.3*exp(18.3036-3816.44/(T_Out+229.02)); %[Pa]

    PSI=P_V/P_V_sat; %[-]

    Wm=@(T) 0.3969*exp(6.462*10^3/(R*T));
    C=@(T) 42*exp(-13.17*10^3/(R*T));
    k=@(T) 1.1016*exp(-1.1016*10^3/(R*T));

    X_Out_new=Wm(T_Out)*((C(T_Out)*k(T_Out)*PSI)/...
        ((1-k(T_Out)*PSI)*(1-k(T_Out)*PSI+C(T_Out)*k(T_Out)*PSI))); %[kg water/kg
solids]

    if( abs(X_Out_new-X_Out_old)<10^-7 || j>maxiter);break;end

j=j+1;
X_Out_old=X_Out_new;
end

X_Out=X_Out_new; %[kg water/kg solids]
M_Water_Out=X_Out*M_Solids; %[kg water/day]
M_Out=M_Solids+M_Water_Out; %[kg Liquid/day]
W_Out=M_Water_Out/M_Out; %[%]
```



```
disp('Energy Data')
fprintf('\n')

eta=0.306; %[-]
fprintf('Thermal Loss Factor [-]: eta=%g\n',eta)
fprintf('\n')

disp('Results for LCA')

E_SD_Thermal=(H_Water_In*M_Water_In+H_Solids_In*M_Solids-
M_Solids*H_Solids(T_Out))/3600/eta;

E_SD_Fan=2.42*(M_Liquid/24000)/3600; %[kWh/s]
E_SD_Atomizers=8.40*(M_Liquid/24000)/3600; %[kWh/s]
E_SD_Electricity=E_SD_Fan+E_SD_Atomizers; %[kWh/s]

Results= [M_Air, M_Air; ...
          T_Air_In, T_Out; ...
          Y_Air_In, Y_Air_Out; ...
          M_Liquid, M_Out; ...
          T_Liquid_In, T_Out; ...
          W_In*100, W_Out*100; ...
          E_SD_Thermal, 0; ...
          E_SD_Electricity*3600*24, 0];
rowNames = {'Air (kg air/day)', 'Air Temperature (oC)', 'Air Humidity ((kg water)/(kg dry
air))', 'Liquid (kg liquid/day)', 'Liquid Temperature (oC)', 'Liquid water (%)', 'Thermal
(kWh/day)', 'Electricity (kWh/day)'};
colNames = {'Spray Dryer (In)', 'Spray Dryer (Out)'};
sTable = array2table(Results, 'RowNames', rowNames, 'VariableNames', colNames);
disp(sTable)
disp('-----')
fprintf('\n')
%-----

%Permeate to Anaerobic Digester-----
disp('-----')
disp('Anaerobic Digester (Permeate)')
fprintf('\n')

disp('Data')
fprintf('\n')

Q_AD_F=Q_P_UF; %[m^3/day]
fprintf('Volumetric Flux of Feed [m^3/day]: Q_Feed=%g\n',Q_AD_F)

T=T_Liquid_In;
fprintf('Temperature Inlet [oC]: T=%g\n',T)

V_Dig=60;
fprintf('Volume of Anaerobic Digester [m^3]: V_Dig=%g\n',V_Dig)

Full=0.8;
fprintf('Volume of Anaerobic Digester [m^3]: V_Dig=%g\n',Full)

D_t=(4*pi/V_Dig)^(1/3); %[m]
D_i=D_t/3; %[m]
H_L=D_t; %[m]
H_t=H_L/0.8; %[m]
H_i=D_i; %[m]
W_b=D_t*0.1; %[m]

A_Dig=(pi*D_t^2)/2+pi*D_t*H_t; %[m^2]

RT=V_Dig/Q_AD_F;
```



```
fprintf('Retention Time [days]: RT=%g\n',RT)

DT=4;
k1=0.2;
k2=13.7;
k3=18.9;
if T>=25 || T<=45
    disp('Mesophilic')
    k4=0.494;
    k5=0.0704;
    k6=0.00233;
    k7=0.323;
    k8=23.8;
elseif T>45 || T<=60
    disp('Thermophilic')
    k4=22.8;
    k5=0.107;
    k6=21.0;
    k7=0.113;
    k8=58.6;
end
k9=0.39;
k10=0.13;
k11=0.8;

B=k4*exp(k5*(T-k8))-k6*exp(k7*(T-k8)); %[-]

VSD_A1=@(time) ((B*k1*(time-DT))/(1+B*k1*(time-DT))); %[%]
VSD_A2=@(time) (k2*log(B*(time-DT))+k3)/100; %[%]

VSD_A1_ =k9*VSD_A1 (RT/2)+k10*VSD_A1 (2*RT)+(1-k9-k10)*VSD_A1 (RT); %[%]
VSD_A2_ =k9*VSD_A2 (RT/2)+k10*VSD_A2 (2*RT)+(1-k9-k10)*VSD_A2 (RT); %[%]

VSD=k11*VSD_A1_+(1-k11)*VSD_A2_; %[%]

Y_BG_P=270/1000; %[m^3 biogas/kg volatile solids]
Y_BG=Y_BG_P*VSD; %[m^3 biogas/kg volatile solids]

VS=24.50; %[kg/m^3]
fprintf('Volatile Solids of Acid Whey [kg/m^3]: VS=%g\n',VS)

x_CH4=63.33/100; %[%]
fprintf('Content of CH4 in Acid Whey [-]: x_CH4=%g\n',x_CH4)

M_VS=Q_AD_F*VS; %[kg/day]

fprintf('\n')
disp('Results for LCA')
fprintf('\n')

Q_BG=M_VS*Y_BG; %[m^3/day]
Q_CH4=Q_BG*x_CH4; %[m^3/day]

d_CH4=0.667; %[kg/m^3]
M_CH4=d_CH4*Q_CH4; %[kg/day]

cP_AD = interp1(T_cP,cP,T); %[kJ/kg K]
M_Feed=d*Q_AD_F; %[kg/day]
E_AD_thermal=M_Feed*cP_AD*(T-T_amb)/(3600*24*3600);
U=0.34;
E_Loss=U*A_Dig*(T-T_amb)/3600000; %[kWh/sec]

Ni=1; %[rps]
```




```
Re=Ni*D_i^2*d/v; %[-]
Np=2;
g=9.81; %[m/s^2]
E_Mix=(d*Ni^3*D_i^5*Np/g)/(1000*3600);

E_AD_Total=E_AD_thermal+E_Loss;

Results= [Q_AD_F, Q_BG, Q_CH4, E_AD_Total*3600*24, E_Mix*3600*24]';
rowNames = {'Feed In (m3/day)', 'BioGas Out (m3/day)', 'CH4 Out (m3/day)', 'Thermal Energy
(kWh/day)', 'Electricity'};
colNames = {'Anaerobic Digester'};
sTable = array2table(Results, 'RowNames', rowNames, 'VariableNames', colNames);
disp(sTable)
disp('-----')
%-----
```