



Ε.Μ.Π.

ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

*ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΓΙΑ
ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΣΤΟΧΩΝ ΣΤΟ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ

ΘΩΜΑΪΔΗ ΛΑΖΑΡΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΚΟΚΟΣΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ

ΜΑΡΤΙΟΣ 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μελέτη αποτελεί τη διπλωματική μου εργασία στα πλαίσια των σπουδών μου στο τμήμα Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Αντώνιου Κοκόση, τον οποίο, θα ήθελα να ευχαριστήσω για τη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της. Επίσης οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες στον μεταδιδακτορικό ερευνητή, Θανάση Νικολακόπουλο, για την αμέριστη βοήθειά του κατά την διεκπεραίωσή της εργασίας. Τέλος ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη οφείλω στην οικογένειά μου, για την υποστήριξη που μου παρείχαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Αθήνα, Μάρτιος 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση νερού στις βιομηχανίες είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη, καθώς χρησιμοποιείται είτε ως φέρον μέσο διαφόρων συστατικών είτε ως αντιδραστήριο. Ως εκ τούτου, η ελαχιστοποίηση της παροχής του επιβάλλεται όχι μόνο για περιβαλλοντικούς αλλά και για οικονομικούς λόγους. Για το λόγο αυτό έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες προκειμένου να υπάρξει ικανοποιητική προσέγγιση και ερμηνεία της διαδικασίας χρησιμοποίησης και ανακύκλωσης του νερού.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια καινούργια μεθοδολογία για την ελαχιστοποίηση της παροχής ρευμάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί συνέχεια της δουλειάς που παρουσιάστηκε το 1999 από τους A. Alva-Argaez , A. Vallianatos και A.Kokossis, η οποία αφορά την εφαρμογή του αλγορίθμου μεταφόρτωσης (transshipment model) σε προβλήματα κατασκευής δικτύων εναλλαγής μάζας και ελαχιστοποίησης υγρών αποβλήτων.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας αναφέρουμε κάποιες γενικές πληροφορίες για επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων, παρουσιάζουμε τις γραφικές μεθόδους επίλυσης για προβλήματα ελαχιστοποίησης υγρών αποβλήτων για ένα συστατικό (SMITH, 2005) και τον αλγόριθμο μεταφόρτωσης για την επίλυση προβλημάτων δικτύων εναλλαγής μάζας (A. Alva-Argaez et al.,1999).

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας παρουσιάζουμε τον αλγόριθμο που προτείνουμε εμείς για την επίλυση προβλημάτων ελαχιστοποίησης παροχής ρευμάτων υγρών αποβλήτων. Στη συνέχεια παραθέτουμε κάποια παραδείγματα τα οποία επιλύθηκαν με την χρήση του αλγορίθμου και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που παρήχθησαν με τα αποτελέσματα που προκύπτουν αν επιλύσουμε τα ίδια προβλήματα με την γραφική μέθοδο και με ένα πακέτο λογισμικού, το WATER.

Τα αποτελέσματα που παρήχθησαν προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις άλλες μεθοδολογίες.

Τέλος, παρουσιάζουμε κάποια συμπεράσματα που προκύπτουν από την σύγκριση των αποτελεσμάτων που παράγουμε με τις υπόλοιπες μεθοδολογίες, καθώς και κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

ABSTRACT

Water use in industries is widespread, because of its use, either as a conveying mean of components or as a reagent. As a result, minimization of its consumption is imperative, not only for environmental reasons, but for economical as well. That is why, many studies have been held, so as a satisfactory approach and interpretation of the process of water use and recycle to exist.

This study introduced a new methodology for targeting minimum wastewater treatment flowrate. This methodology follows the work that was presented in 1999 by A. Alva-Argaez, A. Vallianatos and A. Kokossis, concerning the application of the transshipment model in problems of mass exchange networks and wastewater minimization.

The first part of this study includes some general information about wastewater treatment and reuse, the graphic solving methods of wastewater minimization problems for single contaminant (Smith, 2005), as well as the transshipment model for solving problems of mass exchange networks (Alva-Argaez et al., 1999).

The second part of this study includes the recommended algorithm for solving problems of wastewater treatment flowrate minimization. Additionally, there are some examples, solved with the use of this algorithm, as well as a comparison among these results and those obtained by the graphic method and by the WATER software.

The results obtained by the use of this algorithm are accurately close to those obtained by the other methodologies.

Finally, there is a presentation of several conclusions originated from the comparison of the results that are produced by the other methodologies, as well as some suggestions for future research.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	5
1.2 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΚΥΚΛΟ	6
1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	8
1.4 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	10
1.5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΝΕΡΟΥ	21
2. ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΕΝΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ	24
3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΠΡΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΓΙΑ ΕΝΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ	34
4. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΕΝΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ	43
5. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΠΡΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΓΙΑ ΕΝΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ	48
6. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΛΥΘΗΚΑΝ ΜΕ ΤΗΝ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	53
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	66
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	67
9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	69

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

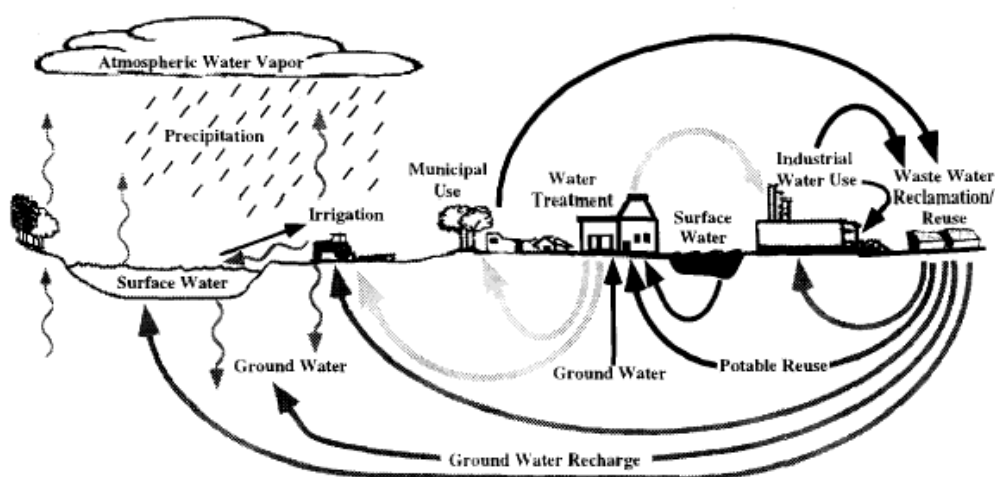
Είναι γνωστό ότι, το 70% της επιφάνειας της γης αποτελείται από νερό. Μολαταύτα, το γλυκό νερό, αποτελεί μόλις το 2,5% των συνολικών υδάτινων αποθεμάτων του πλανήτη μας. Η σπανιότητα του γλυκού νερού καθίσταται ακόμα πιο εμφανής αν αναλογιστούμε ότι ο άνθρωπος έχει άμεση πρόσβαση μόλις στο 0,3% αυτού του 2,5%. Συγκεκριμένα, από όλο το γλυκό νερό στη Γη το 98,8% βρίσκεται σε μορφή πάγου στο υπέδαφος, ενώ μόλις το 0,3% υπάρχει στα ποτάμια και στις λίμνες. Στην πραγματικότητα ολόκληρη η ανθρωπότητα συνεχίζει να αναπτύσσεται και να επιβιώνει χάρη σε ένα απειροελάχιστο κλάσμα γλυκού νερού. Σήμερα, η πρόσβαση των ανθρώπων σε καθαρό νερό όχι μόνο δεν είναι δεδομένη αλλά πλέον διαγράφεται ξεκάθαρα ο κίνδυνος για εξάπλωση της λειψυδρίας ακόμα και σε περιοχές που πριν 30 χρόνια έμοιαζαν με υδροβιότοπους.

Οι προβλέψεις είναι ακόμα πιο απαισιόδοξες για το μέλλον. Η χρήση νερού προβλέπεται να αυξηθεί κατά 50% την περίοδο μέχρι το 2025 στις αναπτυσσόμενες χώρες και 18% στις ανεπτυγμένες. Ταυτόχρονα, η συνεχής αύξηση του πληθυσμού, η ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων νερών, η άνιση κατανομή των υδάτινων πόρων, καθώς και η υπερθέρμανση του πλανήτη, που έχει οδηγήσει σε περιόδους εκτεταμένης ξηρασίας, έχουν ως αποτέλεσμα την εξάντληση των αποθεμάτων νερού.

Με αφορμή όλα τα παραπάνω, οι οργανισμοί ύδρευσης έχουν οδηγηθεί σε αναζήτηση νέων πηγών υδάτινων αποθεμάτων. Η χρήση των επαρκώς επεξεργασμένων εκρών υγρών αποβλήτων, οι οποίες εκβάλλουν στο περιβάλλον από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων, συγκεντρώνει όλο και περισσότερο ενδιαφέρον ως μία βιώσιμη λύση υδάτινου πόρου. Σε πολλές περιοχές η επαναχρησιμοποίηση του νερού αποτελεί ήδη ένα σημαντικό στοιχείο στο σχεδιασμό και τη διαχείριση των υδάτινων πόρων. Ενώ η επαναχρησιμοποίηση του νερού είναι μια βιώσιμη επιλογή, η διατήρηση των υδάτινων αποθεμάτων, η ορθολογική χρήση του νερού από τους υπάρχοντες οργανισμούς ύδρευσης και η ανάπτυξη και η διαχείριση νέων υδάτινων πόρων, είναι επίσης σημαντικοί παράγοντες οι οποίοι θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

1.2 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΚΥΚΛΟ

Ο συνυπολογισμός της προγραμματισμένης ανάκτησης, ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης του νερού στο σύστημα υδάτινων πόρων αντανακλά στην αυξανόμενη ανάγκη υδατικών πόρων για την εξυπηρέτηση κοινωνικών αναγκών, στην τεχνολογική πρόοδο, στην αυξανόμενη κοινωνική αποδοχή και στην βελτίωση της κατανόησης των κινδύνων της δημόσιας υγείας. Η σχέση μεταξύ υγρών αποβλήτων, ανακτημένου νερού και επαναχρησιμοποίησης του νερού απεικονίζεται πιο ξεκάθαρα όταν χρησιμοποιούνται όσο το δυνατόν μικροί κύκλοι ανακύκλωσης. Παραδοσιακά, ο υδρολογικός κύκλος έχει χρησιμοποιηθεί για να παρουσιάσει τη συνεχόμενη μεταφορά του νερού στο περιβάλλον. Ο κύκλος του νερού αποτελείται από γλυκά και αλμυρά επιφανειακά νερά, υπό-επιφανειακά και υπόγεια νερά, νερά που σχετίζονται με διάφορες επίγειες δραστηριότητες και νερά σε μορφή υδρατμών που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Επίσης, υπάρχουν πολλοί δευτερεύοντες κύκλοι στον υδρολογικό κύκλο, οι οποίοι σχετίζονται με την μηχανική μεταφορά του νερού. Η ανάκτηση, ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση του νερού αποτελούν σημαντικά στοιχεία του υδρολογικού κύκλου στις αστικές, στις βιομηχανικές και στις αγροτικές περιοχές. Στο σχήμα 1 απεικονίζονται οι βασικές αρχές του κύκλου του νερού από τους επιφανειακούς και τους υπόγειους υδάτινους πόρους στις διεργασίες επεξεργασίας του νερού, για άρδευση, για αστικές και βιομηχανικές εφαρμογές και στις διεργασίες ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης.



Σχήμα 1

Οι κυριότεροι τρόποι επαναχρησιμοποίησης του νερού περιλαμβάνουν άρδευση, βιομηχανική χρήση, συμπλήρωση των επιφανειακών νερών και εμπλουτισμό των υπόγειων νερών. η συμπλήρωση των επιφανειακών νερών και ο εμπλουτισμός των υπόγειων νερών, γίνεται επίσης μέσω φυσικών λεκανών απορροής και μέσω

διείσδυσης των νερών άρδευσης και των βρόχινων νερών. Επίσης, στο Σχήμα 1 απεικονίζεται και η ενδεχόμενη χρήση του ανακτημένου νερού ως πηγή πόσιμου νερού. Η ποσότητα του μεταφερόμενου νερού μέσω κάθε διαδρομής εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, από κλιματολογικούς και υδρογεωλογικούς παράγοντες, από το βαθμό χρησιμοποίησης νερού στις διάφορες εφαρμογές και το βαθμό άμεσης ή έμμεσης επαναχρησιμοποίησης του νερού.

Το νερό που χρησιμοποιείται ή επαναχρησιμοποιείται για άρδευση γεωργικών εκτάσεων και κήπων περιλαμβάνει γεωργικές, οικιακές, εμπορικές και αστικές εφαρμογές. Η βιομηχανική επαναχρησιμοποίηση είναι μια γενική κατηγορία η οποία περιλαμβάνει τη χρήση νερού από διάφορες βιομηχανίες όπως παραγωγή ενέργειας, χαρτοβιομηχανίες και άλλες βιομηχανίες που απαιτούν μεγάλες ποσότητες νερού.

Σε μερικές περιπτώσεις έχουν αναπτυχθεί κλειστά κυκλώματα ανακύκλωσης τα οποία επεξεργάζονται το νερό που χρησιμοποιείται σε μια συγκεκριμένη διεργασία και το επιστρέφουν πίσω στη διεργασία, με την προσθήκη ορισμένης ποσότητας γλυκού νερού. Σε άλλες περιπτώσεις, ανακτημένο αστικό νερό χρησιμοποιείται για βιομηχανικές εφαρμογές, όπως σε πύργους ψύξης. Η Εθνική Υπηρεσία Αεροναυτικής και Διαστήματος (NASA) έχει μελετήσει κλειστά συστήματα για διαστημικούς σταθμούς και αποστολές μεγάλης χρονικής διάρκειας.

Πόσο μικρά θα είναι αυτά τα κλειστά κυκλώματα ανάκτησης νερού θα εξαρτάται από τη δημόσια υγεία, την τεχνολογία, την οικονομία, την αισθητική και κυρίως από την αποδοχή του κοινού. Τις τελευταίες δεκαετίες η σχεδιασμένη ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση του νερού έχει συγκεντρώσει το ενδιαφέρον του κοινού σε παγκόσμια κλίμακα, ως μία εναλλακτική και νέα πηγή νερού στα πλαίσια μιας ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδάτινων πόρων.

1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Στο σχεδιασμό και στην υλοποίηση της ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης του νερού, συνήθως η εφαρμογή του ανακτημένου νερού θα καθορίσει την απαίτηση επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων για την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος και το βαθμό αξιοπιστίας που απαιτείται για τη μέθοδο και τη λειτουργία της επεξεργασίας. Επτά είναι οι κυριότερες κατηγορίες επαναχρησιμοποίησης των αστικών υγρών αποβλήτων, ξεκινώντας από την κατηγορία με την πιο διαδεδομένη εφαρμογή και καταλήγοντας στην πιο περιορισμένη.

1. Η πρώτη κατηγορία, η άρδευση αγροτικών εκτάσεων, είναι προς το παρόν η μεγαλύτερη κατηγορία όπου χρησιμοποιείται το ανακτημένο νερό. Επίσης, αυτή η κατηγορία προσφέρει σημαντικές προοπτικές και για μελλοντικές εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης του νερού.
2. Η δεύτερη κατηγορία, περιλαμβάνει την άρδευση πάρκων, γηπέδων, κοινόχρηστων χώρων και ακάλυπτων χώρων γύρω από τα εμπορικά καταστήματα, γραφεία και βιομηχανίες. Σε πολλές από τις εφαρμογές της συγκεκριμένης κατηγορίας άρδευσης χρησιμοποιείται το διπλό σύστημα διανομής, ένα για το πόσιμο και ένα για το ανακτημένο νερό.
3. Η τρίτη κατηγορία χρήσης του ανακτημένου νερού περιλαμβάνει τις βιομηχανικές δραστηριότητες, κυρίως για ψύξη και ανάγκες διάφορων διεργασιών. Το νερό ψύξης είναι η επικρατέστερη εφαρμογή της βιομηχανικής επαναχρησιμοποίησης, το οποίο είτε σε πύργους ψύξης είτε σε δεξαμενές ψύξης, αποτελεί τη μεγαλύτερη απαίτηση πολλών βιομηχανιών σε νερό. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία βιομηχανικών χρήσεων, όπου εκτός από τη δευτεροβάθμια επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, απαιτείται καλύτερη επεξεργασία για την εξασφάλιση κατάλληλης ποιότητας ανακτημένου νερού.
4. Η τέταρτη εφαρμογή επαναχρησιμοποίησης του ανακτημένου νερού είναι ο εμπλουτισμός των υπόγειων νερών, είτε μέσω λεκανών διασποράς, είτε με απευθείας έκχυση στον υπόγειο υδροφόρο. Ο εμπλουτισμός των υπόγειων νερών σχετίζεται με την ενσωμάτωση του ανακτημένου νερού στο υπόγειο νερό, την αποθήκευση στον υπόγειο υδροφόρο ή τη δημιουργία υδραυλικού φράγματος για την παρεμπόδιση της διείσδυσης και ανάμιξης του θαλασσινού νερού με το γλυκό νερό παράκτιων υδροφορέων.
5. Η πέμπτη χρήση ανακτημένου νερού, χρήσεις αναψυχής/περιβαλλοντικές, περιλαμβάνουν έναν αριθμό μη πόσιμων χρήσεων που σχετίζονται με δραστηριότητες που έχουν ως βάση το νερό, όπως υγρότοποι αναψυχής, εμπλουτισμός υγροβιότοπων και ενίσχυση χειμάρρων. Η συλλογή του

ανακτημένου νερού μπορεί να ενσωματωθεί στο χωροταξικό σχεδιασμό αστικών περιοχών. Τεχνητές λίμνες, λεκάνες αποθήκευσης και επιφανειακοί ταμιευτήρες σε γήπεδα και πάρκα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πηγές τροφοδοσίας νερού. Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται παράδειγμα χρήσης του ανακτημένου νερού για περιβαλλοντικές εφαρμογές. Η χρήση του ανακτημένου νερού σε υγροτόπους έχει εξυπηρετήσει διάφορους σκοπούς, όπως τη δημιουργία υγροτόπου, την αποκατάσταση ενός υγροτόπου και τον εμπλουτισμό του οικοσυστήματος. Προϋπόθεση για τις συγκεκριμένες εφαρμογές είναι η ικανοποιητική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων πριν την εκροή τους στο υδάτινο σύστημα και η συνεισφορά του βρόχινου νερού.



Σχήμα 2

6. Η έκτη κατηγορία επαναχρησιμοποίησης, μη πόσιμο νερό για αστικές χρήσεις, περιλαμβάνει χρήσεις όπως πυρόσβεση, κλιματισμός, καθαρισμός τουαλετών και νερό για οικοδομική χρήση. Τυπικά, για οικονομικούς λόγους, αυτές οι χρήσεις είναι δευτερεύουσες και εξαρτώνται από την απόσταση που βρίσκεται η μονάδα επεξεργασίας και ανάκτησης του νερού από το σημείο εφαρμογής και κατά πόσο μπορεί να συνδυασθεί η επαναχρησιμοποίηση του νερού με άλλη πιο διαδεδομένη εφαρμογή, όπως για άρδευση.
7. Η έβδομη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης περιλαμβάνει τη χρήση για πόσιμο νερό, η οποία εφαρμόζεται μέσω ανάμιξης του ανακτημένου νερού με το ακατέργαστο πόσιμο νερό ενός ταμιευτήρα πόσιμου νερού ή σπανιότερα, μέσω άμεσης διοχέτευσης του ανακτημένου νερού στο δίκτυο πόσιμου.

Ενώ είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν μεγάλες ποσότητες ανακτημένων αστικών υγρών αποβλήτων στις πρώτες πέντε κατηγορίες επαναχρησιμοποίησης, στην έκτη και στην έβδομη κατηγορία επαναχρησιμοποίησης οι ποσότητες είναι μικρές, κυρίως της επαναχρησιμοποίησης για πόσιμο νερό.

1.4 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

1.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα βασικά ρυπαντικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων που πρέπει να απομακρυνθούν με κατάλληλες τεχνικές είναι:

1. Οργανικό ρυπαντικό φορτίο μετρούμενο σαν BOD και COD
2. Αιωρούμενα στερεά απαρτιζόμενα από τέσσερις κατηγορίες:
 - αδρομερή
 - ανόργανα
 - οργανικά
 - κολλοειδή
3. Διαλυτά ανόργανα στερεά
4. Λίπη και έλαια
5. Θρεπτικά συστατικά:
 - οργανικό άζωτο (Total Kjeldahl Nitrogen)
 - ολικός φώσφορος
6. Τοξικές ουσίες που οι κύριες κατηγορίες τους είναι:
 - φαινολικές ενώσεις
 - οργανοχλωριωμένες ενώσεις
 - βαρέα μέταλλα
7. Χρώμα και οσμή
8. pH
9. Παθογόνοι μικροοργανισμοί

Τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά ενός υγρού αποβλήτου αποτελούν τα δεδομένα εισόδου στην εφαρμογή μιας τεχνολογίας επεξεργασίας του, ενώ τα δεδομένα εξόδου καθορίζονται από τις απαιτήσεις αποτοξικοποίησης και σταθεροποίησης του από την εκάστοτε νομοθεσία διάθεσης του αποβλήτου στο περιβάλλον ή από τις προδιαγραφές απαιτήσεων για την ανακύκλωση του ή την επαναχρησιμοποίηση του.

1.4.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΡΥΠΑΝΤΩΝ ΑΠΟ ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

Το οργανικό ρυπαντικό φορτίο αποτελεί συνήθως το κύριο ρυπαντικό φορτίο ενός αποβλήτου και βασική μέθοδος απομάκρυνσής του αποτελεί η χημική ή/και η βιολογική οξείδωσή του. Αν ο λόγος COD/BOD είναι μεγάλος (>2.5) τότε η χημική οξείδωση θεωρείται κατά πάσα πιθανότητα απαραίτητη. Επειδή όμως η χημική οξείδωση είναι σημαντικά ακριβότερη απ' ότι η βιολογική οξείδωση,

εφαρμόζεται όσο απαιτείται για την αποτοξικοποίηση των υγρών αποβλήτων και κατόπιν ακολουθεί μια βιολογική οξείδωση.

Τα αιωρούμενα στερεά, ιδιαίτερα τα αδρομερή και ανόργανα αιωρούμενα στερεά, αποτελούν παράγοντα μηχανικής διάβρωσης του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού της μονάδας επεξεργασίας, κατά την διακίνηση και μεταφορά του υγρού αποβλήτου, γι' αυτό και πρέπει να απομακρυνθούν από την αρχή οποιασδήποτε τεχνολογικής εφαρμογής επεξεργασίας. Ιδιαίτερο πρόβλημα αποτελούν τα κολλοειδή στερεά τα οποία φέρουν ηλεκτροστατικά φορτία στην επιφάνειά τους και έτσι επιπλέον δημιουργούν σοβαρά προβλήματα παρεμπόδισης ανάπτυξης των μικροοργανισμών κατά τη φάση της βιολογικής οξείδωσης. Η τεχνική απομάκρυνσης των κολλοειδών διασπορών αποτελεί ίσως τη δυσκολότερη φάση επεξεργασίας ενός υγρού αποβλήτου. Συνήθως τα οργανικά αιωρούμενα στερεά βρίσκονται σε κολλοειδής διασπορές.

Τα διαλυμένα ανόργανα συστατικά είναι κυρίως ιοντικής μορφής ανόργανες ενώσεις οι οποίες χαρακτηρίζουν την ιοντική ισχύ του αποβλήτου (ηλεκτροαγωγιμότητα). Η υψηλή ιοντική ισχύς παρεμποδίζει την ανάπτυξη μικροοργανισμών κατά τις διεργασίες της βιολογικής οξείδωσης. Επίσης η υψηλή αγωγιμότητα ενός επεξεργασμένου αποβλήτου περιορίζει σημαντικά την δυνατότητα του να απορριφθεί επιφανειακά στο έδαφος ή σε γλυκά επιφανειακά νερά ή να ανακυκλωθεί. Μέθοδοι απομάκρυνσης των ιόντων ενός αποβλήτου είναι η διήθηση μέσω μεμβρανών καθώς και η ιοντοεναλλαγή. Οι τεχνικές αυτές εφαρμόζονται συνήθως στην τελική φάση επεξεργασίας του αποβλήτου λίγο πριν την τελική διάθεσή του.

Τα λίπη και τα έλαια επίσης πρέπει να απομακρυνθούν από την αρχή οποιασδήποτε τεχνολογικής εφαρμογής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων καθότι δύσκολα αποδομούνται, ιδιαίτερα τα πετρελαιοειδή, είτε με χημική οξείδωση είτε με βιολογική οξείδωση.

Το οργανικό άζωτο και ο φώσφορος αποτελούν τους βασικούς παράγοντες δημιουργίας ευτροφισμού ενός επιφανειακού υδάτινου αποδέκτη γι' αυτό και οι προδιαγραφές της νομοθεσίας για την διάθεση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων που περιέχουν τα θρεπτικά αυτά συστατικά, για τους μικροοργανισμούς του περιβάλλοντος, είναι πού αυστηρές. Σαν οργανικό άζωτο θεωρούνται όλες οι ενώσεις του αζώτου πλην των νιτρικών και των νιτρωδών. Η κύρια μέθοδος απομάκρυνσης του αζώτου βασίζεται στη βιολογική νιτροποίηση και απονιτροποίηση του υγρού αποβλήτου. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται κατάλληλη περιεκτικότητα BOD του αποβλήτου σε ποιότητα και ποσότητα. Η απομάκρυνση του φωσφόρου βασίζεται τόσο στη βιολογική ενσωμάτωσή του στη βιομάζα που αναπτύσσεται κατά την βιολογική οξείδωσή

του BOD όσο και στη χημική κατακρύμνησή του με ασβέστιο ή/και τρισθενή σίδηρο. Ένα μέρος και του οργανικού αζώτου ενσωματώνεται στη παραγόμενη βιομάζα της βιολογικής οξείδωσης. Επίσης απομάκρυνση του αζώτου και του φωσφόρου, χωρίς ιδιαίτερες προδιαγραφές του αποβλήτου σε BOD, μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση κατάλληλων υδροπονικών καλλιεργειών εκμεταλλευόμενοι το γεγονός κατά το οποίο τα φυτά χρησιμοποιούν το άζωτο και τον φώσφορο για την ανάπτυξή τους, ενώ τον άνθρακα τον προσλαμβάνουν με φωτοσυνθετικές διεργασίες από την ατμόσφαιρα.

Σημαντική παρουσία τοξικών οργανικών ενώσεων (φαινολικών και οργανοχλωριωμένων) στα υγρά απόβλητα απαιτεί την απομάκρυνσή τους ή την διάσπασή τους (αποτοξικοποίηση) με χημικές μεθόδους οξείδωσης. Η βιολογική οξείδωση απαιτεί χαμηλές συγκεντρώσεις τέτοιων οργανικών τοξικών ουσιών. Τα βαρέα μέταλλα (Cu, Zn, Cr, Pb, Cd, Hg, Ni, Sn) πρέπει να απομακρυνθούν από τα υγρά απόβλητα διότι αποτελούν τόσο τοξικό παράγοντα ανάπτυξης των μικροοργανισμών του περιβάλλοντος όσο και επικίνδυνο παράγοντα για την υγεία του ανθρώπου. Τα βαρέα μέταλλα έχουν την ιδιότητα να συσσωρεύονται στους λιπώδεις ιστούς των οργανισμών ενός οικοσυστήματος, έτσι η συνεχής ρύπανση ενός οικοσυστήματος με βαρέα μέταλλα αυξάνει συνεχώς την μέση συγκέντρωσή τους στην βιομάζα του οικοσυστήματος. Η απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων μπορεί να επιτευχθεί τόσο μέσω της χημικής κατακρύμνησής τους με οξείδωση σε αλκαλικό περιβάλλον όσο και με ενσωμάτωσή τους στη παραγόμενη βιομάζα κατά την επεξεργασία του υγρού αποβλήτου.

Η ρύθμιση του pH, επιτυγχάνεται με τεχνικές εξουδετέρωσης του αποβλήτου και αυτό επιτελείται, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμοζόμενης τεχνολογίας επεξεργασίας, είτε προ της βιολογικής οξείδωσης (πιθανώς μαζί με την κροκίδωση των κολλοειδών διασπορών) είτε λίγο πριν την τελική διάθεση του επεξεργασμένου αποβλήτου.

Το χρώμα και η οσμή που πιθανώς περιέχει το επεξεργασμένο υγρό απόβλητο, προ της τελικής διάθεσής του, οφείλονται είτε σε υπολειμματικές αρχικές οργανικές και ανόργανες ενώσεις που περιείχε το απόβλητο είτε σε δευτερογενώς παραγόμενες ενώσεις κατά την διάρκεια της επεξεργασίας του αποβλήτου. Η απομάκρυνσή τους μπορεί να επιτευχθεί με μεθόδους οξείδωσης ή/και προσρόφησης τους σε ειδικά προσροφητικά μέσα, όπως είναι ο ενεργός άνθρακας.

Η απολύμανση του αποβλήτου προ της τελικής διάθεσής του αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση. Ο συνηθισμένος τρόπος απολύμανσης ενός επεξεργασμένου αποβλήτου, για λόγους τόσο αποτελεσματικότητας όσο και

βιωσιμότητας, είναι η κατάλληλη χλωρίωση του είτε με αέριο χλώριο είτε με υποχλωριώδες άλας του νατρίου ή ασβεστίου.

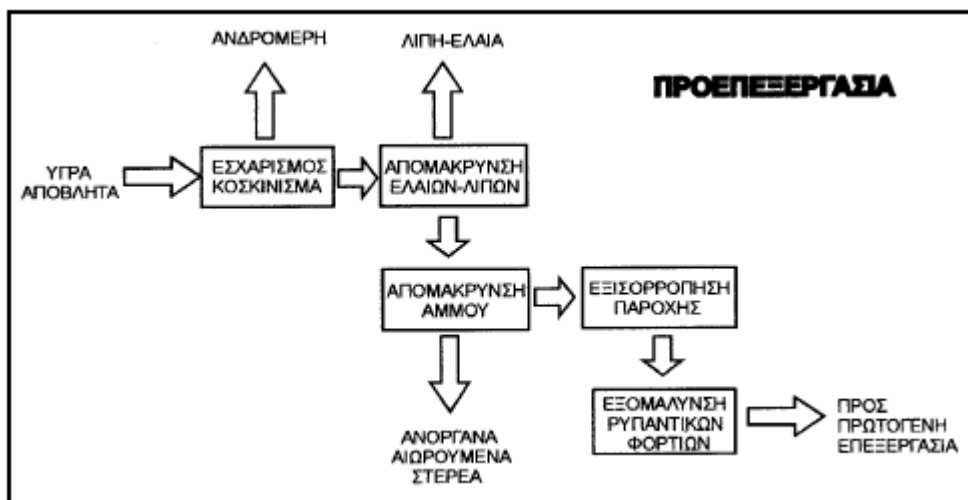
1.4.3 ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Η απορρύπανση ενός υγρού αποβλήτου μπορεί να ακολουθήσει μία ή περισσότερες από τις παρακάτω διεργασίες επεξεργασίας:

- Προεπεξεργασία
- Πρωτογενή επεξεργασία
- Δευτερογενής επεξεργασία
- Τριτογενής επεξεργασία

Προεπεξεργασία

Η προεπεξεργασία έχει σαν σκοπό να προετοιμάσει το απόβλητο κυρίως από υδραυλικής πλευράς για τις περαιτέρω επεξεργασίες με την απομάκρυνση των μικροσκοπικά ορατών πλην του νερού φάσεων καθώς και την εξομάλυνση των διακυμάνσεων των ρυπαντικών φορτίων.



Σχήμα 3. Διεργασίες προεπεξεργασίας

Οι διεργασίες που περιλαμβάνονται στην προεπεξεργασία είναι:

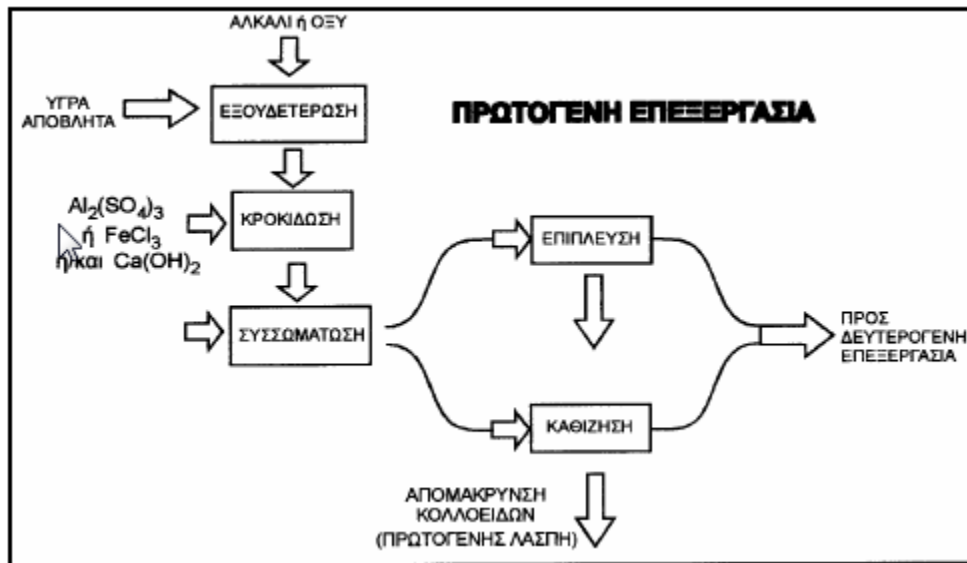
- Απομάκρυνση αδρομερών: ανάλογα με το μέγεθος των στερεών που θέλουμε να απομακρυνθούν περιλαμβάνονται τεχνικές εσχαρισμού ή τεχνικές κοσκινίσματος.

- Απομάκρυνση ελαίων και λιπών: ανάλογα με την αρχική συγκέντρωση των ελαιωδών ουσιών καθώς και τη μορφή την οποία βρίσκονται (γαλακτώματα, αιωρήματα, κλπ.) μπορούν να εφαρμοστούν οι παρακάτω τεχνικές:
 - i. DAF (Dissolved Air Flotation): επίπλευση με διαλυμένο αέρα
 - ii. IAF (Induced Air Flotation): επίπλευση με αέρα
 - iii. APIS (American Petroleum Institution Separators): απλοί διαχωριστές βαρύτητας
 - iv. Μεμβράνες
 - v. Διαχωριστές βαρύτητας με παράλληλες πλάκες
- Απομάκρυνση άμμου: απομάκρυνση ανόργανων αιωρούμενων στερεών μεγάλου ειδικού βάρους. Μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές διαχωρισμού με βαρύτητα (διακεκριμένη καθίζηση) που περιλαμβάνουν:
 - i. Δεξαμενές οριζόντιας ροής
 - ii. Δεξαμενές κάθετης ροής
- Εξισορρόπηση παροχής: χρησιμοποιούνται δεξαμενές μεταβλητού όγκου
- Εξομάλυνση ρυπαντικού φορτίου: χρησιμοποιούνται δεξαμενές σταθερού όγκου

Τα παραπροϊόντα της προεπεξεργασίας είναι αδρομερή στερεά τα οποία διατίθενται με μεθόδους διάθεσης στερεών απορριμμάτων, τα λίπη και έλαια τα οποία αν δεν μπορούν να ανακυκλωθούν καίγονται σε ειδικούς κλιβάνους και τα ανόργανα στερεά τα οποία μπορούν να διατεθούν στους χώρους υγειονομικής ταφής ή να καούν σε ειδικούς αποτεφρωτήρες.

Πρωτογενής επεξεργασία

Η πρωτογενής επεξεργασία έχει σαν σκοπό την απομάκρυνση των κολλοειδών διασπορών. Μαζί με τις κολλοειδείς διασπορές απομακρύνεται και μέρος του BOD καθώς και μέρος των θρεπτικών συστατικών αζώτου και φωσφόρου. Επίσης επιτυγχάνεται και η εξουδετέρωση των αποβλήτων. Στη πρωτογενή επεξεργασία περιλαμβάνονται οι παρακάτω διεργασίες και τεχνικές:



Σχήμα 4. Διεργασίες πρωτογενούς επεξεργασίας

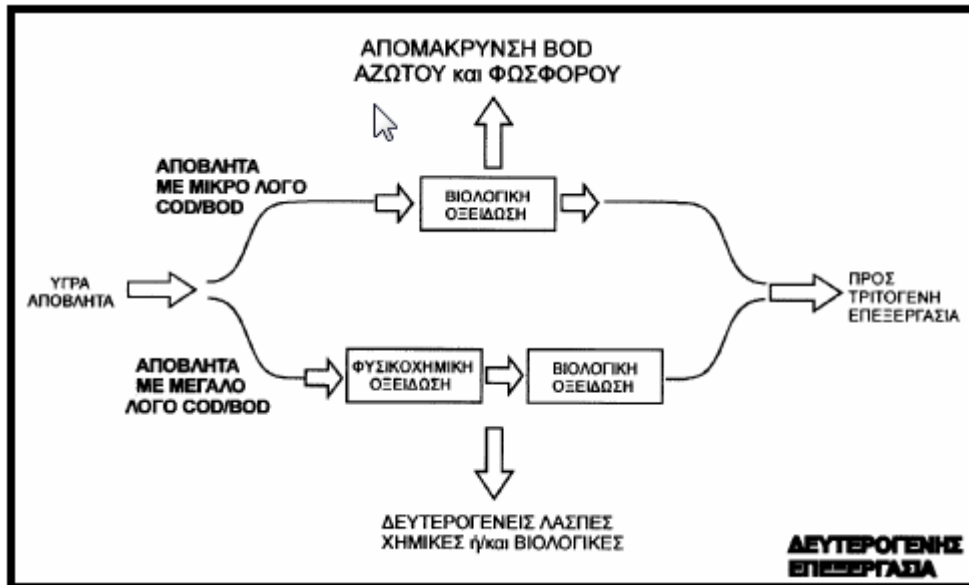
- Εξουδετέρωση αποβλήτων: περιλαμβάνει τεχνικές ταχείας ανάμιξης με οξύ ή βάση
- Κροκίδωση κολλοειδών: περιλαμβάνει τεχνικές ταχείας ανάμιξης με κροκιδωτικά όπως $FeCl_3$ και $Al_2(SO_4)_3$. Στη διεργασία αυτή εξουδετερώνονται τα ηλεκτροστατικά φορτία των κολλοειδών σωματιδίων
- Συσσωμάτωση κροκιδωμένων κολλοειδών: περιλαμβάνει τεχνικές ιξώδους ανάμιξης με πολυηλεκτρολύτες όπως:
 - i. διατάξεις μηχανικής ανάδευσης
 - ii. διατάξεις εξαναγκασμένης ροής
 - iii. διατάξεις αγωγών ροής
- Απομάκρυνση κροκιδωμάτων με τεχνικές:
 - i. επίπλευσης με DAF
 - ii. παρεμποδισμένη καθίζηση

Τα παραπροϊόντα της πρωτογενούς επεξεργασίας είναι μία πρωτογενή λάσπη η οποία πρέπει να παχυνθεί (αύξηση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σε 5%), να σταθεροποιηθεί ή/και να αξιοποιηθεί ενεργειακά με διεργασίες αναερόβιας ή αερόβιας χώνευσης (κομπόστες, βιοαέριο) και τελικά να διατεθεί να δεν περιέχει τοξικότητες σε χώρους υγειονομικής ταφής.

Δευτερογενής επεξεργασία

Αποτελεί την ουσιαστική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων καθότι περιλαμβάνει τεχνικές οξείδωσης και σταθεροποίησης τους με απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους του BOD καθώς και των θρεπτικών. Ανάλογα με το

περιεχόμενο του αποβλήτου σε τοξικές ουσίες μπορούμε να ακολουθήσουμε τις παρακάτω μεθόδους οξείδωσης:



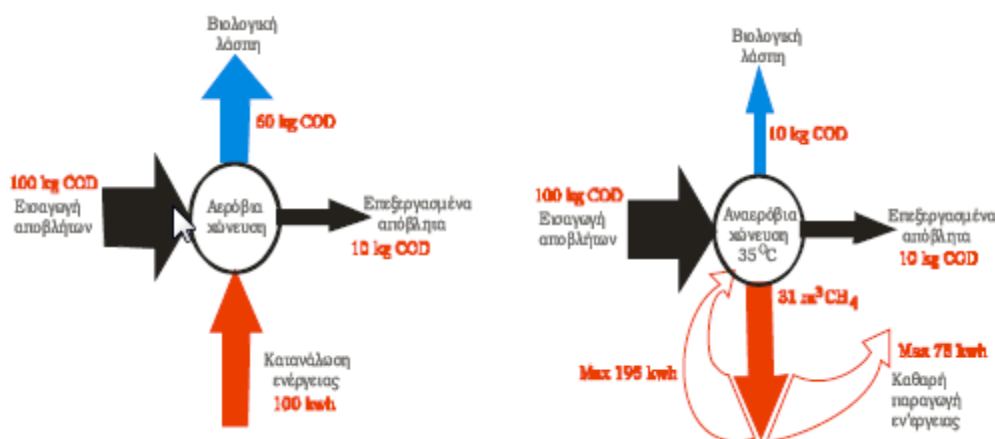
Σχήμα 5. Χημική και βιολογική οξείδωση υγρών αποβλήτων

- Χημική οξείδωση: βασίζεται στην παραγωγή ριζών υδροξυλίου ($\cdot OH$) και περιλαμβάνει τις παρακάτω τεχνικές:
 - i. φωτοκαταλυτική οξείδωση
 - ii. ηλεκτρολυτική οξείδωση
 - iii. οξείδωση με αντιδράσεις fenton
 - iv. οξείδωση με υπερήχους
 - v. οξείδωση με UV σε συνδυασμό με H_2O_2 ή O_3
- Βιολογική οξείδωση: βασίζεται στη χρήση του οργανικού φορτίου από βακτήρια σαν θρεπτικό υπόστρωμα για την ανάπτυξή τους. Ανάλογα με την παρουσία ή όχι οξυγόνου στην αποδόμηση του οργανικού φορτίου από τα βακτήρια, η βιολογική οξείδωση χαρακτηρίζεται σε αερόβια και αναερόβια.
 - i. Αερόβια βιολογική οξείδωση: η παρουσία οξυγόνου κατά τη διάρκεια της αποδόμησης του BOD παρέχει πλούσια ενέργεια στα αερόβια βακτήρια με αποτέλεσμα η δευτερογενής βιολογική λάσπη που παράγεται αποτελεί μεγάλο μέρος του αρχικού BOD (60% περίπου). Τεχνικές αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας είναι:
 - a. ενεργός ιλύς (ενός ή δύο σταδίων)
 - b. βιόφιλτρα (ενός ή δύο σταδίων)
 - c. βιοδίσκοι
 - ii. Αναερόβια βιολογική αποδόμηση: η έλλειψη οξυγόνου που απαιτείται κατά την αναερόβια αποδόμηση του BOD

αναγκάζει το αναερόβιο οικοσύστημα να καταναλώσει μεγάλο μέρος του υποστρώματος για τις ενεργειακές του ανάγκες και αποτελεί μικρό μέρος του αρχικού BOD (10% περίπου). Τεχνικές αναερόβιας βιολογικής επεξεργασίας είναι:

- συστήματα ενεργού ιλύος πλήρους αναμίξεως (ενός ή δύο σταδίων)
- αναερόβια βιόφιλτρα
- αντιδραστήρες UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

Παραπροϊόν της αναερόβιας χώνευσης είναι το βιοαέριο το οποίο περιέχει μέχρι και 75% μεθάνιο. Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μία μέθοδος ενεργειακής αξιοποίησης των οργανικών αποβλήτων. Τα ενεργειακά ισοζύγια καθώς και τα ισοζύγια μάζας της αερόβιας και της αναερόβιας αποδόμησης για την ίδια ποιότητα και ποσότητα υποστρώματος (COD) παρουσιάζονται στα διαγράμματα του παρακάτω Σχήματος.



Σχήμα 6. Ισοζύγια μάζας και ενέργειας αερόβιας και αναερόβιας αποδόμησης

Από το παραπάνω Σχήμα φαίνεται γενικά ότι η αναερόβια χώνευση από στρατηγική πλευρά είναι πολύ περισσότερο ελκυστική απ' ό,τι η αερόβια χώνευση. Όμως επειδή η αναερόβια χώνευση αναπτύσσεται, λόγω έλλειψης οξυγόνου, σε φτωχά ενεργειακά υποστρώματα ο ανταγωνισμός επιβίωσης που αναπτύσσεται μεταξύ των βακτηρίων είναι σκληρός και έτσι καθίσταται όλη η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης δύσκολα ελεγχόμενη. Γι' αυτό και η αερόβια βιολογική επεξεργασία, επειδή είναι πολύ σταθερότερη της αναερόβιας, εφαρμόζεται σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα στην δευτερογενή επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Η αναερόβια χώνευση εφαρμόζεται συνήθως σε υγρά απόβλητα με υψηλό ρυπαντικό φορτίο και χαμηλή τοξικότητα.

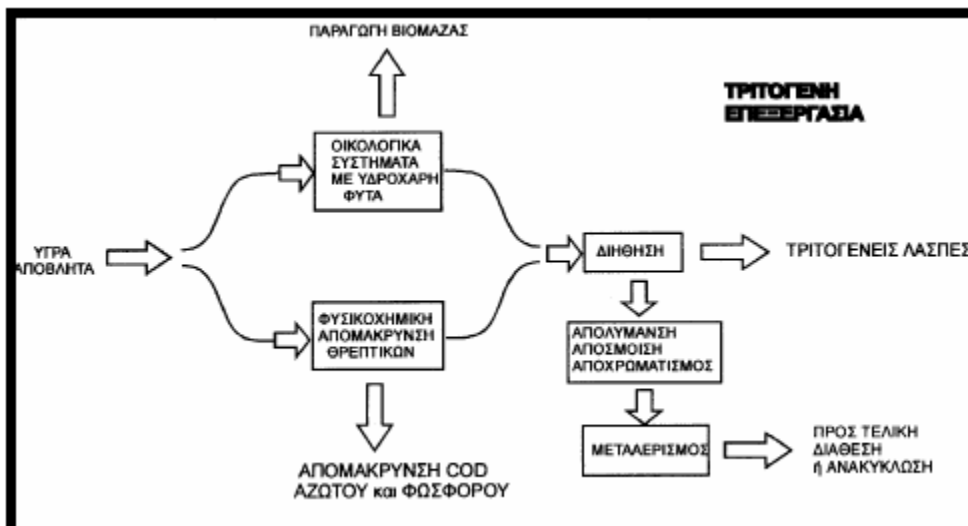
Επίσης η αναερόβια επεξεργασία δεν διαθέτει την ικανότητα απομείωσης του BOD περισσότερο από 80% εν αντιθέσει με την αερόβια η οποία μπορεί να φτάσει σε απόδοση μέχρι και 97% (μέθοδος παρατεταμένου αερισμού). Επομένως στη περίπτωση δυνατότητας εφαρμογής της αναερόβιας χώνευσης, αυτή αποτελεί το πρώτο στάδιο μίας βιολογικής επεξεργασίας ακολουθούμενο από μία αερόβια βιολογική επεξεργασία.

Ένα άλλο πλεονέκτημα της αερόβιας επεξεργασίας αποτελεί και η δυνατότητα απομάκρυνσης του οργανικού αζώτου με διεργασίες νιτροποίησης - απονιτροποίησης (μέθοδος A_2O) και βιολογικής απομάκρυνσης φωσφόρου με ενσωμάτωση του στη παραγόμενη βιομάζα δευτερογενή βιομάζα. Αυτή η δυνατότητα δεν υπάρχει με την εφαρμογή της αναερόβιας χώνευσης καθότι το μεν οργανικό άζωτο μετατρέπεται σε αμμωνία, η οποία αδυνατεί να νιτροποιηθεί χωρίς αερόβιες διεργασίες, ο δε φώσφορος δεν ενσωματώνεται στη βιομάζα χωρίς την επιλογή αερόβιων βακτηρίων με το φαινόμενο Luxuri.

Τελικά παραπροϊόντα της δευτερογενούς επεξεργασίας είναι μία βιομάζα υπό την μορφή μίας υδαρούς βιολογικής λάσπης (δευτερογενής λάσπη) η οποία αφού παχυνθεί (από 1% σε 5% αιωρούμενα στερεά) με τεχνικές βιοκροκίδωσης και πάχυνσης κατόπιν οδηγείται είτε σε μονάδες αερόβιας σταθεροποίησης είτε σε μονάδες αναερόβιας σταθεροποίησης και ενεργειακής αξιοποίησης και κατόπιν αφού αφυδατωθούν με τεχνικές διήθησης (κλίνες ξήρανσης, φιλτρόπρεσσες, ταινιοφιλτρόπρεσσες) ή φυγοκέντρισης οδηγούνται, εφ' όσον δεν διαθέτουν τοξικότητες, σε μονάδες κομποστοποίησης ή θάβονται με υγειονομικό τρόπο μαζί με τα αστικά απορρίμματα. Συνηθίζεται η πρωτογενής και η δευτερογενής λάσπη να επεξεργάζονται μαζί.

Τριτογενής επεξεργασία

Στη τριτογενή επεξεργασία το επεξεργασμένο απόβλητο "ραφινάρεται" ώστε να μπορεί να διατεθεί στο περιβάλλον σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Νόμου καθώς και της Τέχνης και της Επιστήμης. Οι μέθοδοι τριτογενούς επεξεργασίας παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 7. Τριτογενής επεξεργασία υγρών αποβλήτων

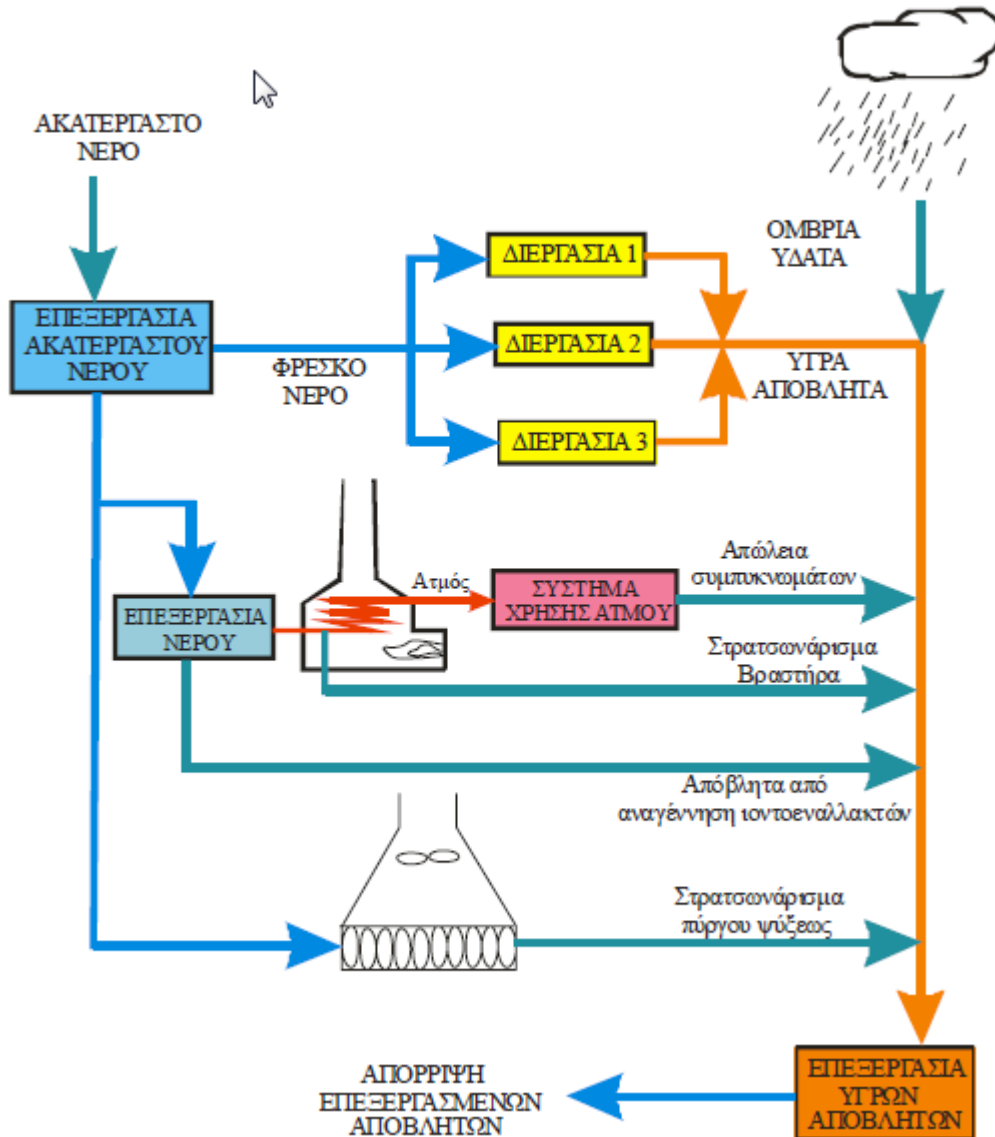
- Απομάκρυνση υπολειμματικών θρεπτικών: αυτό μπορεί να γίνει με τις ακόλουθες τεχνικές:
 - i. συστήματα υδρόβιων και υδροχαρών φυτών: στα συστήματα αυτά τα φυτά που αναπτύσσονται χρησιμοποιούν το άζωτο και το φώσφορο του αποβλήτου για τη δόμηση της κυτταρικής τους μάζας. Επίσης λόγω της αλληλοϋποστήριξης του ριζικού συστήματος των φυτών με το οικολογικό σύστημα οργανισμών και μικροοργανισμών του εδάφους όπου αναπτύσσονται τα υδροχαρή φυτά επέρχεται και η περαιτέρω μείωση του BOD και COD του αποβλήτου.
 - ii. συστήματα χημικής κατακρίμνησης του φωσφόρου και αέριας απογύμνωσης της αμμωνίας και του υδρόθειου.
- Διήθηση των αιρούμενων στερεών που παρέμειναν από τη δευτερογενή επεξεργασία. Περιλαμβάνει τεχνικές όπως:
 - i. διήθηση με φίλτρα άμμου (βαρυτικά ή πιεστικά)
 - ii. διήθηση με μεμβράνες
- Απολύμανση με τεχνικές:
 - i. χλωρίωση είτε με αέριο χλώριο (μεγάλες εγκαταστάσεις) είτε με υποχλωριώδες νάτριο (μικρές εγκαταστάσεις)
 - ii. οζόνωση
 - iii. υπεριώδης ακτινοβολία
- Απομάκρυνση ιόντων είτε μεταλλικών είτε ανιόντων με σκοπό την ελάττωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων που παρέμειναν από την δευτερογενή επεξεργασία. Περιλαμβάνει τεχνικές όπως:
 - i. ιοντοεναλλαγή
 - ii. υπερδιήθηση με μεμβράνες

- Απόσμιση και αποχρωματισμό με τεχνικές:
 - i. προσρόφηση (με ενεργό άνθρακα, κ.α.)
 - ii. οξείδωση με χλώριο ή όζον
- Μετααερισμός έτσι ώστε η συγκέντρωση του οξυγόνου να ανέλθει στο επίπεδο της συγκέντρωσης που έχει ο αποδέκτης τελικής διάθεσης του αποβλήτου. Ο μετααερισμός μπορεί να επιτευχθεί με τις ακόλουθες τεχνικές:
 - i. διάχυση αέρα στη μάζα του υγρού
 - ii. με ελεύθερη πτώση του επεξεργασμένου αποβλήτου

Προϊόντα της τριτογενούς επεξεργασίας είναι ανόργανες λάσπες από τις διεργασίες διήθησης καθώς και τυχόν παραγωγή βιομάζας από τις υδροπονικές καλλιέργειες των υδροχαρών φυτών. Οι λάσπες αυτές στο βαθμό που δεν περιέχουν βαρέα μέταλλα μπορούν να διατεθούν στους χώρους απόθεσης των αστικών απορριμμάτων ενώ η βιομάζα μπορεί να προωθηθεί για ενεργειακή αξιοποίηση.

1.5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΝΕΡΟΥ

Η χρήση του νερού και η παραγωγή υγρών αποβλήτων σε μία κλασική χημική βιομηχανία φαίνονται παραστατικά στο παρακάτω Σχήμα.



Σχήμα 8. Χρήση νερού και παραγωγή υγρών αποβλήτων σε μία χημική βιομηχανία.

Το νερό αποτελεί την σπουδαιότερη πρώτη ύλη για την συντριπτική πλειοψηφία των βιομηχανιών. Τέσσερις μπορεί να είναι οι χρήσεις του νερού στη χημική βιομηχανία:

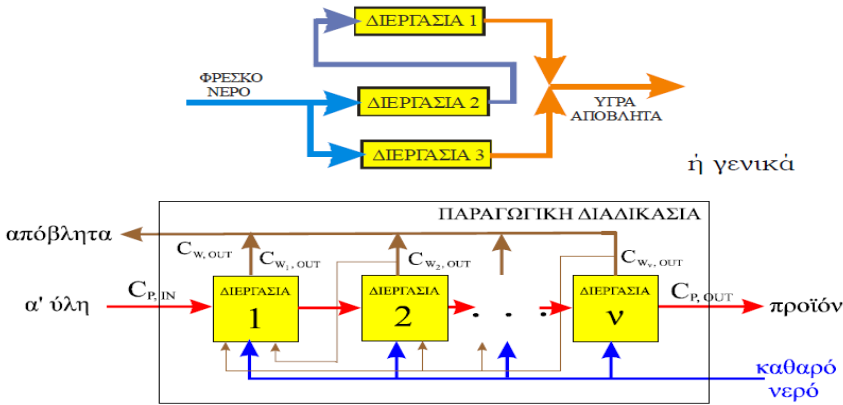
- Νερό που χρησιμοποιείται για θέρμανση ή για ατμοπαραγωγή. Το νερό αυτό, ανάλογα με τη θερμοκρασία του νερού ή την πίεση του παραγόμενου ατμού απαιτεί ειδική επεξεργασία. Το θερμό νερό αυτό ή τα συμπυκνώματα του ατμού μετά την χρήση τους συλλέγονται και ανακυκλώνονται. Όμως, ανάλογα με την αρχική επεξεργασία του νερού, ένα μέρος του

- ανακυκλούμενου νερού πρέπει να απορρίπτεται (στρατσώνα) και να ανανεώνεται με φρέσκο επεξεργασμένο νερό.
- ii. Νερό για τις ανάγκες ψύξης. Το ψυχρό αυτό νερό αφού χρησιμοποιηθεί επίσης συλλέγεται, απολυμαίνεται, ψύχεται σε πύργους ψύξης και ανακυκλώνεται με ανεξάρτητο κύκλωμα νερού. Επίσης ένα μέρος του ανακυκλούμενου νερού πρέπει να απορρίπτεται (στρατσώνα) και να ανανεώνεται με φρέσκο επεξεργασμένο νερό.
- iii. Νερό για την διάλυση και απομάκρυνση ανεπιθύμητων συστατικών από τις πρώτες ύλες. Μετά την χρήση του το νερό αυτό, που ονομάζεται νερό διεργασιών, απορρίπτεται στο περιβάλλον σαν υγρό απόβλητο αφού επεξεργαστεί καταλλήλως σε μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.
- iv. Νερό που ενσωματώνεται στο τελικό προϊόν (π.χ. αναψυκτικά).

Τα παραγόμενα υγρά απόβλητα, σε μια χημική βιομηχανία, προέρχονται αντίστοιχα από το στρατσωνάρισμα του κυκλώματος του θερμού και του ψυχρού νερού, του νερού διεργασιών (μετά την χρήση του) καθώς επίσης και από το στρατσωνάρισμα της μονάδας επεξεργασίας νερού, το νερό που προϋπήρχε στις πρώτες ύλες (π.χ. παραγωγή οινοπνεύματος από κρασί) και τέλος από τα νερά της βροχής.

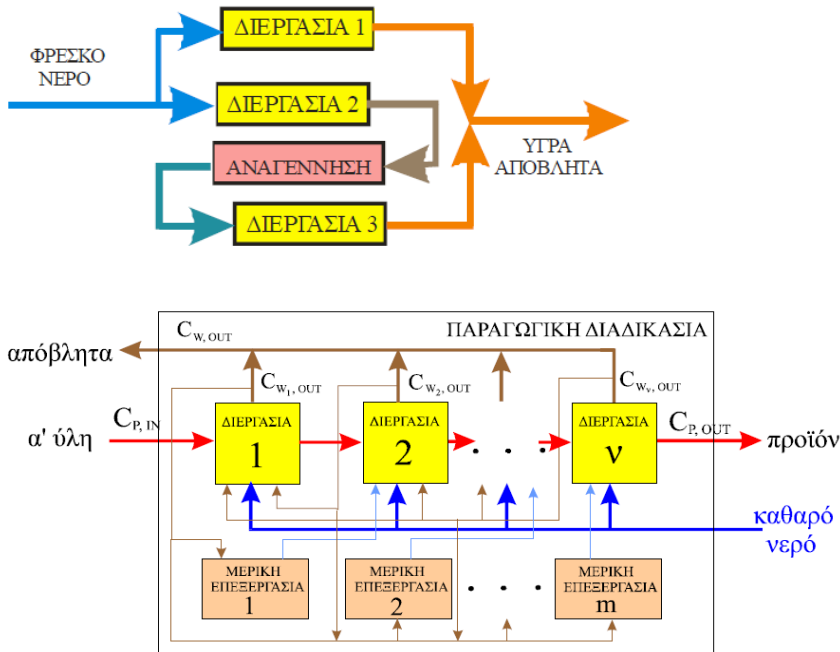
Προτού ο σχεδιασμός μιας χημικής επεξεργασίας επικεντρωθεί στα συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων πρέπει να επιβεβαιωθεί ότι τα παραγόμενα υγρά απόβλητα έχουν ελαχιστοποιηθεί. Ελάττωση των παραγόμενων αποβλήτων επιδρά τόσο στην επεξεργασία των αποβλήτων όσο και στις ποσότητες του χρησιμοποιούμενου καθαρού νερού. Τα υγρά απόβλητα που παράγονται από μία διεργασία (π.χ. αφαλάτωση, απογύμνωση, πλύσιμο) είτε από απομάκρυνση νερού από βοηθητικά συστήματα (π.χ. επεξεργασία νερού για την τροφοδοσία των λεβήτων, νερό λεβήτων, νερό πύργων ψύξεως). Αν εξαιρέσουμε την πιθανότητα δραματικής αλλαγής της όλης διεργασίας τότε υπάρχουν τρεις δυνατότητες που μπορούμε να ακολουθήσουμε για να ελαττώσουμε την ποσότητα των αποβλήτων:

- i. *Επαναχρησιμοποίηση.* Απόβλητα μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν κατ' ευθείαν σε άλλες διεργασίες λαμβάνοντας μέριμνα ώστε το επίπεδο ρύπανσης του επαναχρησιμοποιούμενου αποβλήτου να μην επηρεάζει την διεργασία (Σχήμα 9).



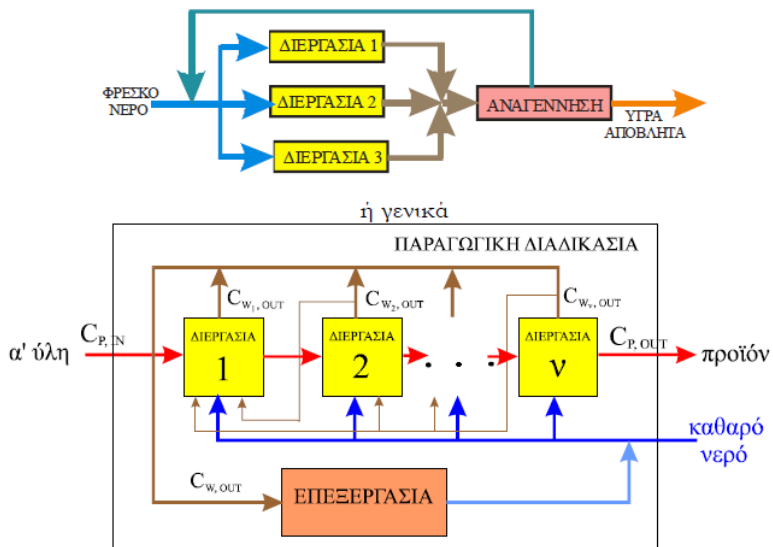
Σχήμα 9. Διαδικασία επαναχρησιμοποίησης αποβλήτων.

- ii. *Επεξεργασία-επαναχρησιμοποίηση.* Απόβλητα μπορούν να καθαριστούν με μερική επεξεργασία ώστε το επίπεδο ρύπανσης τους να επιτρέπει την επαναχρησιμοποίησή τους σε άλλες διεργασίες. Η επαναχρησιμοποίηση τους μπορεί να απαιτεί μίξη με άλλα απόβλητα ή και με καθαρό νερό (Σχήμα 10).



Σχήμα 10. Διαδικασία επεξεργασίας-επαναχρησιμοποίησης αποβλήτων.

- iii. *Επεξεργασία-ανακύκλωση.* Απόβλητα μπορούν να επεξεραστούν πλήρως ώστε να μπορούν να ανακυκλωθούν στην αρχή της διεργασίας μαζί με το καθαρό νερό (Σχήμα 11).



Σχήμα 11. Διαδικασία επεξεργασίας-ανακύκλωσης αποβλήτων.

2. ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΕΝΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ

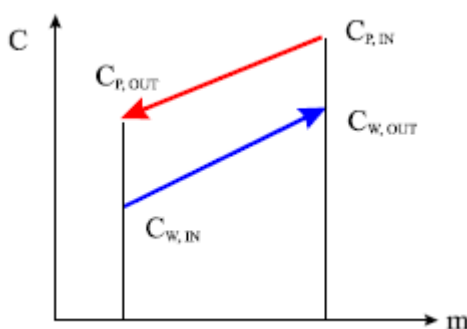
Θεωρούμε μία βιομηχανική διεργασία που χρησιμοποιεί νερό και πρώτες ύλες για την παραγωγή ενός προϊόντος (Σχήμα 12).



Σχήμα 12. Μια διεργασία που χρησιμοποιεί νερό.

Στην παραγωγική αυτή διαδικασία το νερό έρχεται σε επαφή με τις πρώτες ύλες σε επιμέρους διεργασίες με σκοπό να απομακρύνει ένα συστατικό που περιέχεται στις πρώτες ύλες και είναι ανεπιθύμητο στο τελικό προϊόν. Έτσι όμως το νερό εμπλουτίζεται με το συστατικό αυτό και καθίσταται ρυπασμένο. Μία τέτοια διεργασία π.χ. μπορεί να είναι ένας αφαλατωτής πετρελαίου όπου χρησιμοποιείται νερό για να «ξεπλύνει» το πετρέλαιο από το αλάτι που περιέχει. Το καθαρό νερό αναμιγνύεται σε κατάλληλη διάταξη με το πετρέλαιο και επειδή το αλάτι έχει μεγαλύτερη διαλυτότητα στο νερό απ' ότι στο πετρέλαιο μεταφέρεται ποσοτικά από το πετρέλαιο στο νερό. Κατόπιν μία διάταξη διαχωρισμού του γαλακτώματος νερού- πετρελαίου απομακρύνει το νερό το οποίο έχει εμπλουτιστεί (ρυπανθεί) με αλάτι.

Στο (Σχήμα 13) η διεργασία αυτή απεικονίζεται σε διάγραμμα με τεταγμένη την συγκέντρωση του αλατιού τόσο στο πετρέλαιο όσο και στο νερό και τετμημένη το ρυθμό μεταφοράς μάζας του αλατιού από τη μία φάση στην άλλη.

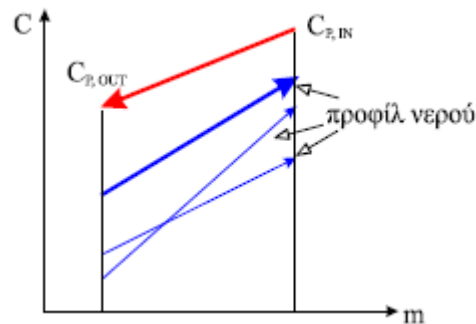


Σχήμα 13. Η διεργασία απεικονίζεται σε συντεταγμένες συγκέντρωσης έναντι ρυθμού μεταφοράς μάζας του ρυπαντή.

Η συγκέντρωση του ρυπαντή στα ρεύματα εισαγωγής και εξαγωγής της διεργασίας προσδιορίζονται από τις ανάγκες της διεργασίας. Το (Σχήμα 6) παριστάνει έναν πιθανό συνδυασμό συγκεντρώσεων εισαγωγής και εξαγωγής του νερού που ικανοποιεί τις ανάγκες μεταφοράς μάζας. Προσδιορίζοντας τις επιθυμητές συγκεντρώσεις εισαγωγής και εξαγωγής του ρυπαντή στο νερό καθώς και τη

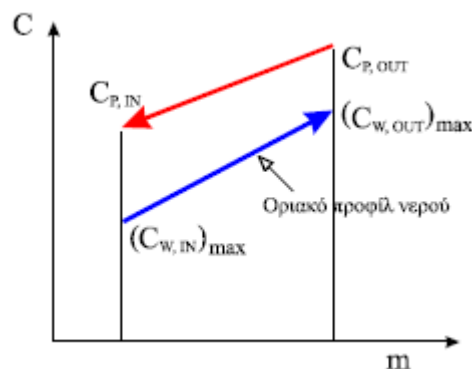
μεταφορά μάζας του ρυπαντή από την πρώτη ύλη στο νερό τότε καθορίζεται μονοσήμαντα και η παροχή του νερού.

Προφανώς το ίδιο πρόβλημα μπορεί να λυθεί με διαφορετικές παροχές νερού και συγκεντρώσεις εισαγωγής και εξαγωγής του ρυπαντή (διάγραμμα Σχήματος 14).



Σχήμα 14. Διαφορετικά επίπεδα συγκεντρώσεων του ρυπαντή στο νερό καθώς και παροχές νερού μπορούν να λύσουν το ίδιο πρόβλημα.

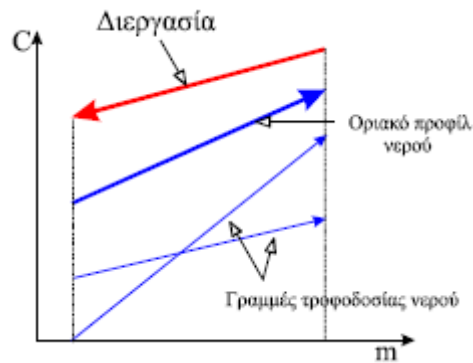
Εάν επιθυμούμε να μεγιστοποιήσουμε τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του νερού από άλλες διεργασίες, στη συγκεκριμένη διεργασία που μελετάμε, τότε πρέπει να προσδιορίσουμε τη μεγαλύτερη συγκέντρωση ρυπαντή που μπορεί να έχει η εισαγωγή του νερού στη διεργασία. Προσδιορίζοντας τη μέγιστη δυνατή συγκέντρωση του ρυπαντή στην εξαγωγή του νερού από την διεργασία τότε προσδιορίζουμε και την ελάχιστη παροχή νερού στη μέγιστη συγκέντρωση του ρυπαντή στο νερό εισαγωγής (Σχήμα 15).



Σχήμα 15. Μεγιστοποιώντας την εισαγωγή νερού στη διεργασία καθώς επίσης και τις συγκεντρώσεις του ρυπαντή στην έξοδο ορίζεται το οριακό προφίλ του νερού.

Αυτό το προφίλ που φαίνεται στο (Σχήμα 8) δεν είναι αναγκαίο να αποτελεί το τελικό προφίλ που θα χρησιμοποιηθεί. Απλώς αντιπροσωπεύει μια οριακή περίπτωση. Η οριακή αυτή κατάσταση ονομάζεται *οριακό προφίλ του νερού* (limiting water profile, LWP). Κάθε άλλη παροχή νερού που βρίσκεται κάτω από το LWP της διεργασίας για τον συγκεκριμένο ρυπαντή, ικανοποιεί τις ανάγκες της διεργασίας. Το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 16) δείχνει δύο παραδείγματα

διαφορετικής παροχής νερού που ικανοποιούν τις προδιαγραφές της διεργασίας.



Σχήμα 16. Κάθε γραμμή τροφοδοσίας του νερού που είναι κάτω από το οριακό προφίλ νερού ικανοποιεί τις ανάγκες της διεργασίας.

Για τον καθορισμό του οριακού προφίλ νερού μίας διεργασίας ως προς τις συγκεντρώσεις εισαγωγής και εξαγωγής ενός συγκεκριμένου ρυπαντή πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- i. Ελάχιστη διαφορά συγκεντρώσεων του ρυπαντή στην πρώτη ύλη και στο νερό (διαφορά δυναμικού μεταφοράς μάζας) η οποία μπορεί να διαφέρει από διεργασία σε διεργασία.
- ii. Μέγιστη διαλυτότητα.
- iii. Αποφυγή καθίζησης του ρυπαντή από το διάλυμα (αν είναι σε διαλυτή μορφή).
- iv. Αποφυγή φραξίματος των μηχανημάτων.
- v. Παροχή νερού τουλάχιστον ίση με την ελάχιστη δυνατή έτσι ώστε να αποφεύγονται οι επικαθίσεις.

Έχοντας το οριακό προφίλ χρήσης του νερού των επί μέρους διεργασιών μίας παραγωγικής διεργασίας μπορούμε πλέον να διαχειριζόμαστε τις διεργασίες μεταξύ τους, λειτουργικά ή συγκριτικά, σε κοινή πλέον βάση ως προς τη χρήση του νερού χωρίς να μας απασχολεί η φύση των διεργασιών, δηλαδή π.χ. αν είναι εκχύλιση ή απογύμνωση. Η χρήση κοινών διαγραμμάτων οριακών προφίλ νερού όλων των διεργασιών μιας παραγωγικής μονάδας δίνει το πλεονέκτημα της δυνατότητας εφαρμογής γενικών μεθόδων περιορισμού της χρήσης του νερού και επομένως ελάττωσης της ρύπανσης με έναν ομοιόμορφο τρόπο ανεξαρτητοποιώντας την αλληλεπίδραση των διεργασιών ως προς τη χρήση του νερού.

Η βασική προσέγγιση της μεθόδου υπολογισμού της ελάχιστης παροχής χρήσης νερού σε μία παραγωγική διεργασία θα περιγραφεί με παραδείγματα ώστε να γίνει κατανοητή, και μάλιστα η εξέλιξη των παραδειγμάτων θα έχει αυξανόμενο ρυθμός πολυπλοκότητας. Το πρώτο παράδειγμα αφορά μία παραγωγική διεργασία που αποτελείται από δύο επιμέρους διεργασίες των οποίων τα οριακά προφίλ νερού ως προς ένα ρυπαντή είναι γνωστά και επιθυμούμε να

ελαχιστοποιήσουμε την συνολική χρήση του νερού ως προς αυτόν τον ρυπαντή. Το δεύτερο παράδειγμα θα αφορά μία παραγωγική διεργασία που αποτελείται από τέσσερις επιμέρους διεργασίες. Το τρίτο παράδειγμα αφορά μια παραγωγική διεργασία, την CIMV, που υπάγεται στα πλαίσια του project της BIOCORE, και αποτελείται από έξι επιμέρους διεργασίες. Τα διαγράμματα που παρατίθενται παρακάτω κατασκευάστηκαν με τη βοήθεια της *Matlab*. Παρακάτω παρατίθεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε.

Παράδειγμα 1

Έχουμε μια παραγωγική διαδικασία που χρησιμοποιεί δύο επιμέρους διεργασίες. Τα δεδομένα ως προς τα οριακά προφίλ χρήσης του νερού για κάθε διεργασία παρουσιάζονται στον πίνακα 1, δηλαδή δίνονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις εισαγωγής και εξαγωγής του ρυπαντή *A* στο νερό σε σχέση με την ελάχιστη παροχή νερού. Υποθέτουμε ότι η μεταφορά μάζας του ρυπαντή ακολουθεί γραμμική σχέση με την συγκέντρωση του ρυπαντή (αυτό συνήθως ισχύει για αραιά συστήματα).

Πίνακας 1. Δεδομένα οριακής χρήσης του νερού του παραδείγματος 1.

Αριθμός διεργασίας	Ρυθμός μεταφοράς μάζας του ρυπαντή $m_c (g \cdot h^{-1})$	Συγκέντρωση ρυπαντή στο νερό εισαγωγής $C_{in} (ppm)$	Συγκέντρωση ρυπαντή στο νερό εξαγωγής $C_{out} (ppm)$	Οριακό προφίλ νερού $LWF (t \cdot h^{-1})$
1	15000	0	500	50
2	8000	400	800	20

Τα οριακά προφίλ νερού των δύο διεργασιών υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την παρακάτω μαθηματική σχέση

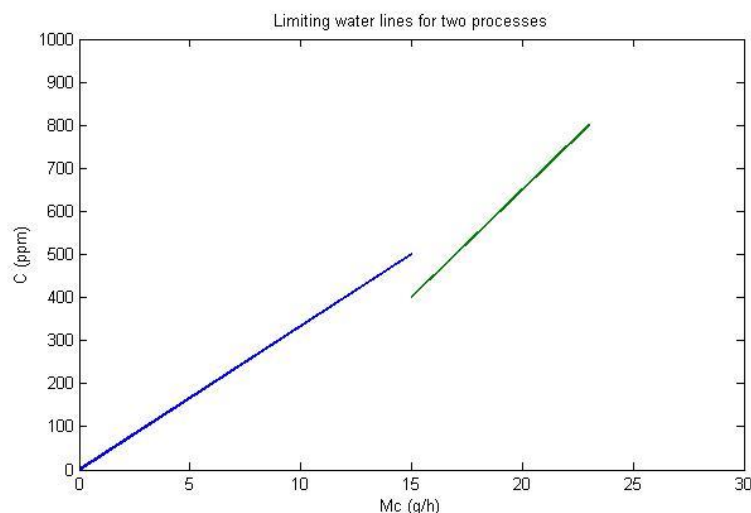
$$m_w = \frac{m_c}{\Delta c} (1)$$

όπου :

- m_w : Η παροχή νερού (στην περίπτωση μας το οριακό προφίλ νερού) σε $(t \cdot h^{-1})$
- m_c : Η μάζα του ρυπαντή σε $(g \cdot h^{-1})$
- Δc : Η διαφορά συγκέντρωσης σε (ppm)

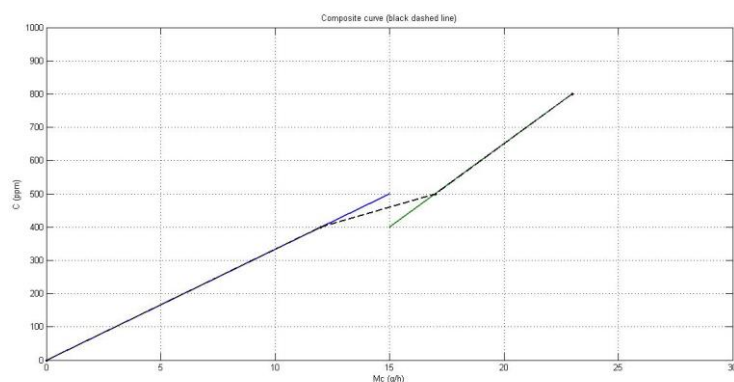
Εάν επιθυμούμε να ελαττώσουμε τη συνολική παροχή νερού πρέπει να αναλύσουμε τη συμπεριφορά της κάθε διεργασίας στο σύνολο της παραγωγικής διαδικασίας. Για να το επιτύχουμε αυτό κατασκευάζουμε τη *σύνθετη οριακή καμπύλη* (limiting composite curve) του προφίλ του νερού με τον τρόπο που παρατίθεται παρακάτω.

Καταρχήν, όπως φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 17), οριοθετούνται τα διαστήματα συγκεντρώσεων εισαγωγής και εξαγωγής των διεργασιών σε αθροιστική κατάσταση.



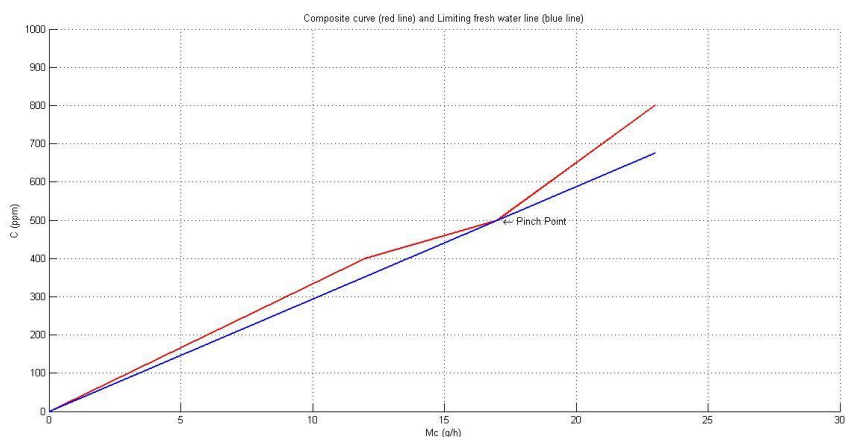
Σχήμα 17. Οριακά προφίλ νερού των διεργασιών σε αθροιστική κατάσταση.

Όπως όμως έχει καθοριστεί, η συμπεριφορά των συστημάτων είναι γραμμική σε οποιοδήποτε σημείο του διαγράμματος των συγκεντρώσεων συναρτήσει του ρυθμού μεταφοράς μάζας του ρυπαντή, οπότε συνδυάζοντας τις διεργασίες εντός των διαστημάτων συγκέντρωσης, παίρνουμε τη σύνθετη οριακή καμπύλη, όπως απεικονίζεται στο επόμενο Σχήμα (Σχήμα 18).



Σχήμα 18. Κατασκευή της οριακής σύνθετης καμπύλης νερού της ολικής παραγωγικής διαδικασίας.

Η σύνθετη οριακή καμπύλη νερού αντιστοιχεί στη καμπύλη συμπεριφοράς του συστήματος, σαν αυτό να λειτουργεί ως μία διεργασία. Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 19), απεικονίζεται η γραμμή λειτουργίας (limiting fresh water line) του νερού σε σχέση με την οριακή σύνθετη καμπύλη νερού.



Σχήμα 19. Κατασκευάζοντας την εφαπτόμενη γραμμή λειτουργίας του νερού προσδιορίζουμε την ελάχιστη δυνατή παροχή νερού.

Μεγιστοποιώντας τη συγκέντρωση εξόδου της γραμμής λειτουργίας του νερού, ελαχιστοποιούμε την εισαγωγή φρέσκου νερού, αλλά και την παροχή του αποβλήτου που πρέπει να επεξεργαστούμε. Όσο μεγαλύτερη κλίση έχει η γραμμή λειτουργίας του νερού τόσο μικρότερη είναι η παροχή του καθαρού νερού, που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε για να επιτύχουμε τον ζητούμενο στόχο (target).

Στο παράδειγμα 1 η γραμμή λειτουργίας του νερού εφάπτεται της σύνθετης οριακής καμπύλης σε δύο σημεία, στο (0,0) και σε ένα ενδιάμεσο σημείο, το . Κάθε σημείο όπου η γραμμή λειτουργίας εφάπτεται στην οριακή σύνθετη καμπύλη, δημιουργεί ένα *οριακό σημείο λειτουργίας* (pinch point). Στο οριακό αυτό σημείο η διαφορά δυναμικού μεταφοράς μάζας από την πρώτη ύλη στο νερό γίνεται η ελάχιστη δυνατή. Στο παράδειγμα η ελάχιστη παροχή νερού υπολογίζεται από την σχέση (1), και είναι ίση με $34 (t \cdot h^{-1})$.

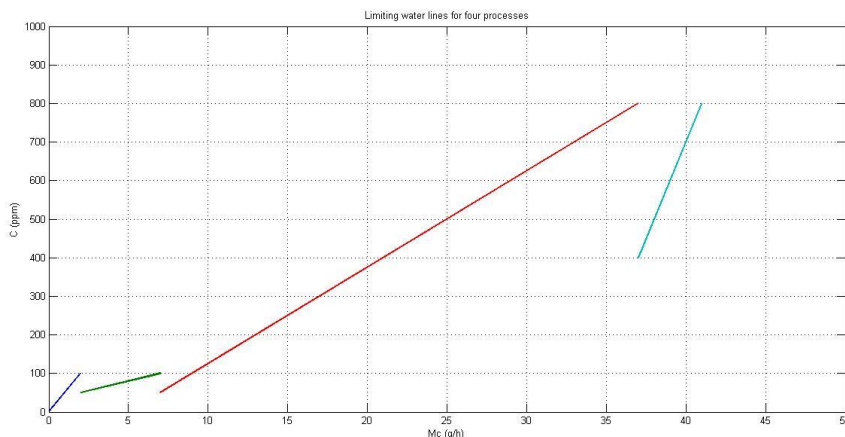
Παράδειγμα 2

Έχουμε μια παραγωγική διαδικασία που χρησιμοποιεί τέσσερις επιμέρους διεργασίες . Τα δεδομένα ως προς τα οριακά προφίλ χρήσης του νερού για κάθε διεργασία παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2. Δεδομένα οριακής χρήσης του νερού του παραδείγματος 2.

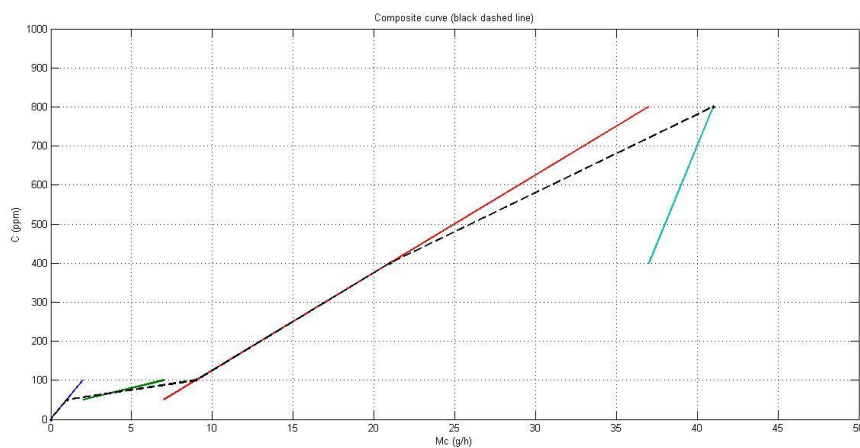
Αριθμός διεργασίας	Ρυθμός μεταφοράς μάζας του ρυπαντή $m_c (g \cdot h^{-1})$	Συγκέντρωση ρυπαντή στο νερό εισαγωγής $C_{in} (ppm)$	Συγκέντρωση ρυπαντή στο νερό εξαγωγής $C_{out} (ppm)$	Οριακό προφίλ νερού $LWP (t \cdot h^{-1})$
1	2000	0	100	20
2	5000	50	100	100
3	30000	50	800	40
4	4000	400	800	10

Αρχικά οριοθετούνται τα διαστήματα συγκεντρώσεων εισαγωγής και εξαγωγής των διεργασιών σε αθροιστική κατάσταση, όπως φαίνεται στο Σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 20).



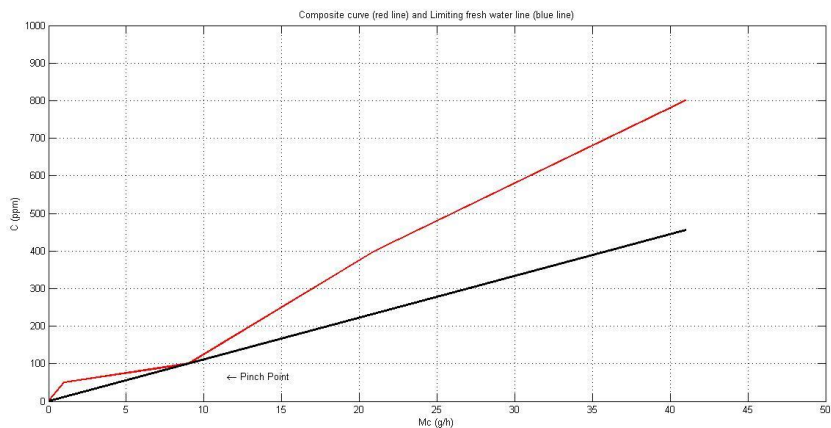
Σχήμα 20. Οριακά προφίλ νερού των διεργασιών σε αθροιστική κατάσταση.

Αν συνδυάσουμε τις διεργασίες εντός των διαστημάτων συγκέντρωσης, παίρνουμε τη σύνθετη οριακή καμπύλη, όπως απεικονίζεται στο επόμενο Σχήμα (Σχήμα 21).



Σχήμα 21. Κατασκευή της οριακής σύνθετης καμπύλης νερού της ολικής παραγωγικής διαδικασίας.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 22), απεικονίζεται η γραμμή λειτουργίας του νερού σε σχέση με την οριακή σύνθετη καμπύλη νερού.



Σχήμα 22. Κατασκευάζοντας την εφαπτόμενη γραμμή λειτουργίας του νερού προσδιορίζουμε την ελάχιστη δυνατή παροχή νερού.

Στο παράδειγμα 2 η γραμμή λειτουργίας του νερού εφάπτεται της σύνθετης οριακής καμπύλης σε δύο σημεία, στο (0,0) και σε ένα ενδιάμεσο σημείο, το (9,100). Στο παράδειγμα η ελάχιστη παροχή νερού υπολογίζεται από την σχέση (1), και είναι ίση με $90 \text{ (} t \cdot h^{-1} \text{)}$.

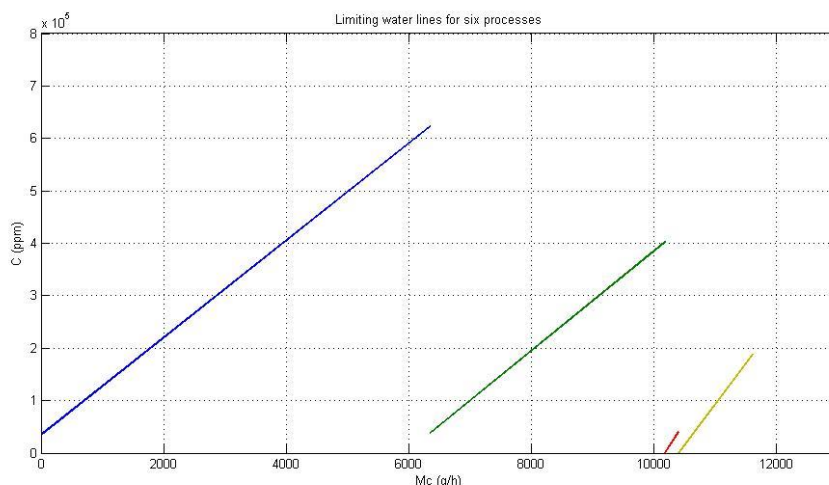
Παράδειγμα 3

Έχουμε μια παραγωγική διαδικασία που χρησιμοποιεί έξι επιμέρους διεργασίες. Τα δεδομένα ως προς τα οριακά προφίλ χρήσης του νερού για κάθε διεργασία παρουσιάζονται στον πίνακα 3.

Πίνακας 2. Δεδομένα οριακής χρήσης του νερού του παραδείγματος 2.

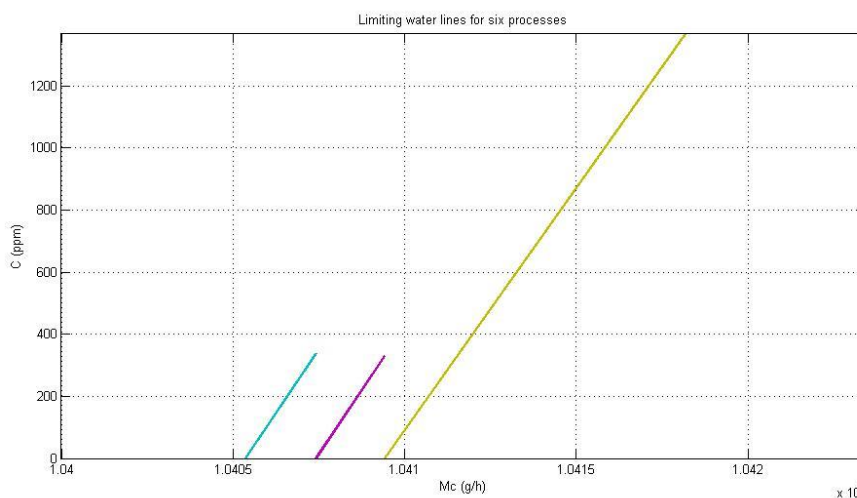
Αριθμός διεργασίας	Ρυθμός μεταφοράς μάζας του ρυπαντή $m_c \text{ (} g \cdot h^{-1} \text{)}$	Συγκέντρωση ρυπαντή στο νερό εισαγωγής $C_{in} \text{ (ppm)}$	Συγκέντρωση ρυπαντή στο νερό εξαγωγής $C_{out} \text{ (ppm)}$	Οριακό προφίλ νερού $LWP \text{ (} t \cdot h^{-1} \text{)}$
1	6.353.000	34.082,11	622.525,54	10,80
2	3.835.737	38.654,08	402.934,86	10,53
3	216.616	328,87	39.861,23	5,48
4	2.060	0	337,04	6,11
5	2.012	0	329,18	6,11
6	1.204.864	0	188.038,37	6,41

Αρχικά οριοθετούνται τα διαστήματα συγκεντρώσεων εισαγωγής και εξαγωγής των διεργασιών σε αθροιστική κατάταξη, όπως φαίνεται στο Σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 23).



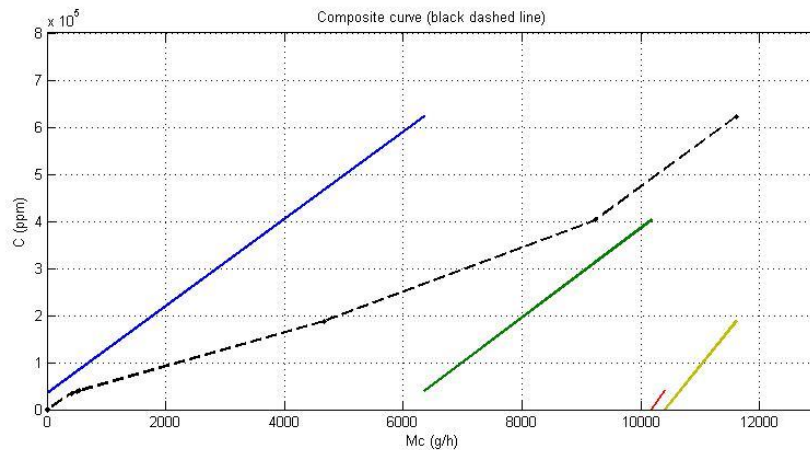
Σχήμα 23.α. Οριακά προφίλ νερού των διεργασιών σε αθροιστική κατάσταση.

Επειδή η τέταρτη και η πέμπτη διεργασία έχουν μικρές συγκεντρώσεις εξόδου σε σχέση με τις άλλες διεργασίες, παραθέτουμε το ίδιο διάγραμμα εστιάζοντας στις δύο αυτές διεργασίες (Σχήμα 23.β).



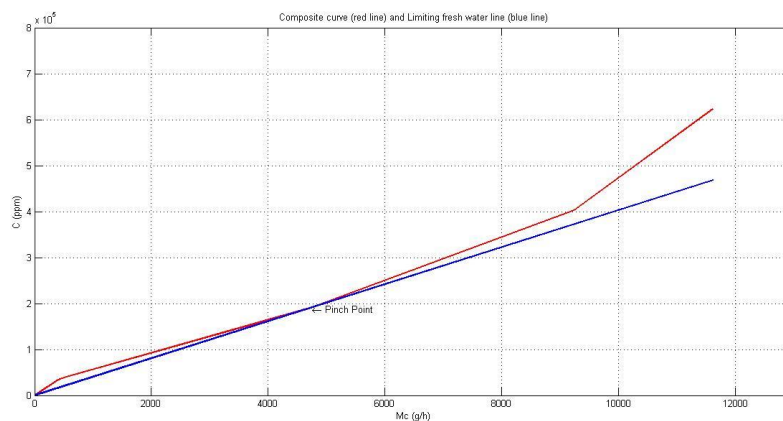
Σχήμα 23.β. Από τα αριστερά προς τα δεξιά φαίνονται η τέταρτη και η Πέμπτη διεργασία.

Αν συνδυάσουμε τις διεργασίες εντός των διαστημάτων συγκέντρωσης, παίρνουμε τη σύνθετη οριακή καμπύλη, όπως απεικονίζεται στο επόμενο Σχήμα (Σχήμα 24).



Σχήμα 24. Κατασκευή της οριακής σύνθετης καμπύλης νερού της ολικής παραγωγικής διαδικασίας.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 25), απεικονίζεται η γραμμή λειτουργίας του νερού σε σχέση με την οριακή σύνθετη καμπύλη νερού.



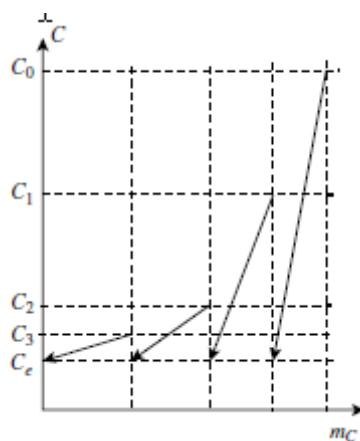
Σχήμα 25. Κατασκευάζοντας την εφαπτόμενη γραμμή λειτουργίας του νερού προσδιορίζουμε την ελάχιστη δυνατή παροχή νερού.

Στο παράδειγμα 3 η γραμμή λειτουργίας του νερού εφάπτεται της σύνθετης οριακής καμπύλης σε δύο σημεία, στο (0,0) και σε ένα ενδιάμεσο σημείο, το (9,100). Στο παράδειγμα η ελάχιστη παροχή νερού υπολογίζεται από την σχέση (1), και είναι ίση με $24,79 (t \cdot h^{-1})$.

3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΠΡΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΓΙΑ ΕΝΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ

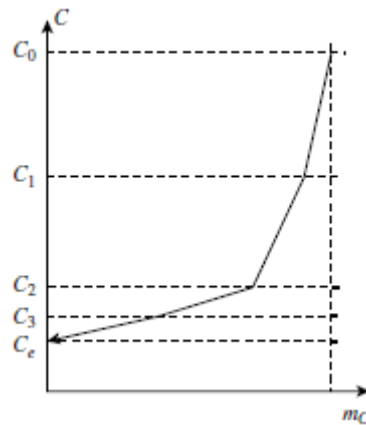
Στις βιομηχανίες, η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων συνήθως πραγματοποιείται σε μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας. Τα ρεύματα των αποβλήτων συγκεντρώνονται όλα μαζί και οδηγούνται για επεξεργασία. Το πρόβλημα είναι πως δύσκολα μπορεί να καθορίσει κανείς πότε συμφέρει να συνδυαστούν τα ρεύματα αυτά και πότε δεν συμφέρει, διότι ο συνδυασμός τους κάποιες φορές μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερο κόστος επεξεργασίας. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται μία φιλοσοφία σχεδιασμού που θα επιτρέπει στον εκάστοτε μηχανικό να καθορίζει πότε είναι συμφέρον να συνδυάζει τα ρεύματα αποβλήτων και πότε δεν είναι.

Έστω λοιπόν το παρακάτω σύστημα τεσσάρων ρευμάτων, που απεικονίζεται στο Σχήμα 26. Το καθένα έχει διαφορετική συγκέντρωση εισόδου και πρέπει όλα να οδηγηθούν για επεξεργασία προκειμένου η συγκέντρωση τους να πέσει σε ένα όριο C_e , που είναι το επιθυμητό όριο για αποδέσμευση του ρεύματος στο περιβάλλον.



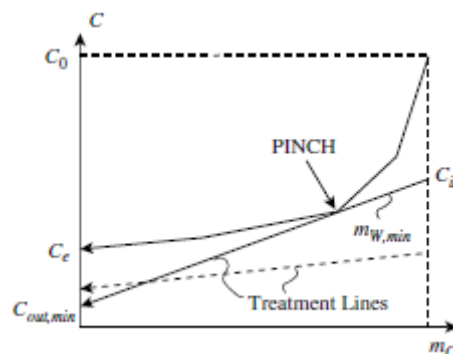
Σχήμα 26. Ρεύματα αποβλήτων.

Όπως και στην περίπτωση μέγιστης επαναχρησιμοποίησης νερού, έτσι και εδώ, τα τέσσερα ρεύματα συνδυάζονται για να κατασκευαστεί η σύνθετη περιοριστική καμπύλη αποβλήτων, όπως αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 27.



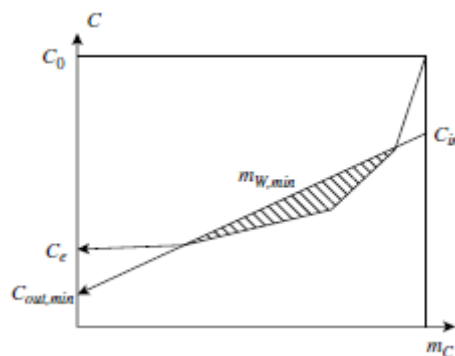
Σχήμα 27. Σύνθετη περιοριστική καμπύλη αποβλήτων.

Σκοπός του σχεδιασμού είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους του δικτύου επεξεργασίας αποβλήτων. Για να μειωθεί το κόστος πρέπει να ελαττωθεί η ποσότητα νερού που παρέχεται στις διεργασίες. Στο Σχήμα 21 παρατίθεται μία σύνθετη περιοριστική καμπύλη αποβλήτων, στην οποία έχουν υπερτεθεί γραμμές επεξεργασίας που παριστάνουν την πραγματική απόδοση της διεργασίας επεξεργασίας αποβλήτων. Η επεξεργασία είναι απαραίτητη για τη μείωση της συγκέντρωσης του ρεύματος αποβλήτων σε μια τιμή που θα επιτρέψει την αποβολή του στο περιβάλλον. Όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση της γραμμής επεξεργασίας, τόσο μικρότερη είναι η παροχή του νερού που χρειάζεται για την επεξεργασία των αποβλήτων. Η μέγιστη κλίση που μπορεί να πάρει η γραμμή επεξεργασίας καθορίζεται από την ελάχιστη συγκέντρωση που πρέπει να έχει το ρεύμα ώστε να μπορεί να αποβληθεί στο περιβάλλον και από τον κόμβο ανάσχεσης (Σχήμα 28).



Σχήμα 28. Ελάχιστη παροχή για την γραμμή επεξεργασίας.

Για να είναι εφικτή η διεργασία που πρόκειται να σχεδιαστεί, η γραμμή επεξεργασίας πρέπει να βρίσκεται μεταξύ του κόμβου ανάσχεσης και της ελάχιστης συγκέντρωσης που πρέπει να πάρει το ρεύμα προκειμένου να αποβληθεί (Σχήμα 29).

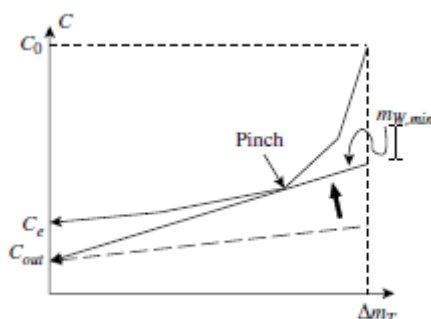


Σχήμα 29. Ανεφικτη διεργασία.

Για τον σχεδιασμό του συστήματος επεξεργασίας υπάρχουν δύο μεθοδολογίες.

Στην πρώτη περίπτωση, που είναι η πιο απλή από τις δύο που θα αναφέρουμε, είναι γνωστή η συγκέντρωση εξόδου (C_{out}) της γραμμής λειτουργίας.

Αρχικά κατασκευάζεται η σύνθετη περιοριστική καμπύλη των αποβλήτων και στη συνέχεια χαράσσεται η γραμμή λειτουργίας, η οποία διέρχεται από την τιμή στην οποία έχει οριστεί η συγκέντρωση εξόδου και από τον κόμβο ανάσχεσης (Σχήμα 30).



Σχήμα 30. Σχεδιασμός για σταθερή συγκέντρωση εξόδου.

Στην δεύτερη περίπτωση, είναι γνωστή η απόδοση της διεργασίας, η οποία καθορίζεται από έναν λόγο απομάκρυνσης R , ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$R \text{ [2]} = \frac{\text{Μάζα αποβλήτου που απομακρύνεται}}{\text{Μάζα αποβλήτου που τροφοδοτείται}}$$

$$R = \frac{m_{W,in} C_{in} - m_{W,out} C_{out}}{m_{W,in} C_{in}} \quad (2.1)$$

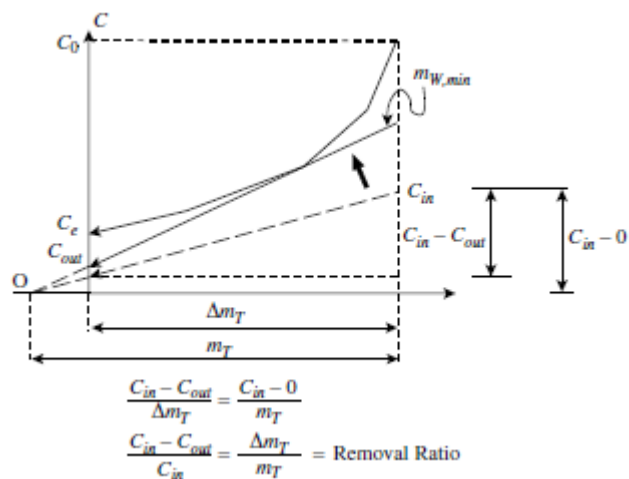
Όπου:

- i. R : ο λόγος απομάκρυνσης
- ii. $m_{W,in}$, $m_{W,out}$: οι παροχές εισόδου και εξόδου
- iii. C_{in} , C_{out} : οι συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου.

Σε αρκετές περιπτώσεις, η αλλαγή των παροχών θεωρείται αμελητέα, οπότε ο παραπάνω τύπος απλοποιείται ως εξής:

$$R = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \quad (2.2)$$

Στο Σχήμα 31 απεικονίζεται η διαδικασία που πραγματοποιείται στην περίπτωση αυτή για τον υπολογισμό της ελάχιστης παροχής του ρεύματος αποβλήτων.



Σχήμα 31. Σχεδιασμός με καθορισμένο λόγο απομάκρυνσης.

Ας θεωρηθεί αρχικά η διάτρητη γραμμή λειτουργίας, της οποίας το σημείο προέλευσης αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο λόγο απομάκρυνσης. Εφαρμόζοντας την ομοιότητα τριγώνων, προκύπτει πως ο λόγος

απομάκρυνσης $R = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}}$ ισούται με τον λόγο $\frac{\Delta m_T}{m_T}$. Συνεπώς, ένας

δοσμένος λόγος απομάκρυνσης θα ισούται με τον λόγο $\frac{\Delta m_T}{m_T}$, και ως εκ

τούτου με ένα συγκεκριμένο σημείο προέλευσης της γραμμής λειτουργίας. Στη συνέχεια, κρατώντας σταθερό το σημείο προέλευσης μετακινείται η γραμμή λειτουργίας έως ότου συναντήσει τον κόμβο ανάσχεσης. Η κλίση της γραμμής λειτουργίας αντιστοιχεί στην ελάχιστη παροχή για το ρεύμα αποβλήτων.

Για πληρέστερη κατανόηση της μεθόδου υπολογισμού της ελάχιστης παροχής του ρεύματος υγρών αποβλήτων προς επεξεργασία σε μία παραγωγική διεργασία, παρατίθενται εν συνεχεία τρία παραδείγματα. Η εξέλιξη των παραδειγμάτων θα έχει αυξανόμενο ρυθμός πολυπλοκότητας.

Παράδειγμα 4

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα αναλύουμε τη μέθοδο εύρεσης της ελάχιστης παροχής του ρεύματος επεξεργασίας όταν είναι γνωστή η συγκέντρωση εξόδου.

Έχουμε μια παραγωγική διαδικασία που χρησιμοποιεί τρεις επιμέρους διεργασίες. Τα δεδομένα ως προς τα οριακά προφίλ χρήσης του νερού για κάθε διεργασία παρουσιάζονται στον πίνακα 4, δηλαδή δίνονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις εισαγωγής του ρυπαντή A στο νερό σε σχέση με την ελάχιστη παροχή νερού. Το όριο αποβολής είναι $C_e = 20 ppm$ και για τρία ρεύματα, και το ρεύμα νερού προς επεξεργασία έχει συγκέντρωση εξόδου $C_{out} = 10 ppm$.

Υποθέτουμε ότι η μεταφορά μάζας του ρυπαντή ακολουθεί γραμμική σχέση με την συγκέντρωση του ρυπαντή (αυτό συνήθως ισχύει για αραιά συστήματα).

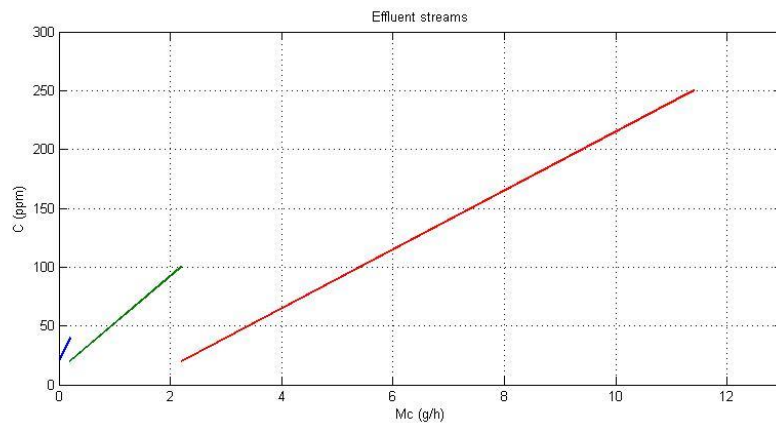
Πίνακας 4. Δεδομένα οριακής χρήσης του νερού του παραδείγματος 4.

Ρεύμα νερού	Συγκέντρωση εισόδου $C_{in} (ppm)$	Παροχή ρεύματος $m_w (t \cdot h^{-1})$
1	250	40
2	100	25
3	40	10

Αρχικά θα κατασκευάσουμε την σύνθετη οριακή καμπύλη, η οποία δείχνει τη συμπεριφορά της κάθε διεργασίας στο σύνολο της παραγωγικής διαδικασίας.

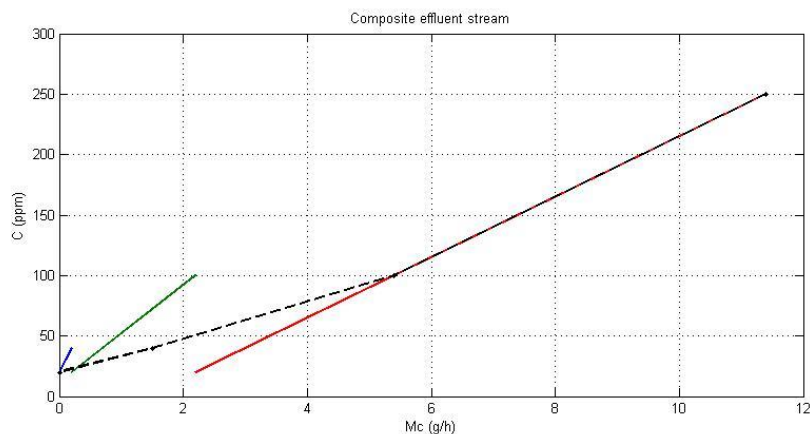
Για την κατασκευή της σύνθετης οριακής καμπύλης ακολουθούμε την ίδια διαδικασία που αναπτύξαμε στα προηγούμενα παραδείγματα.

Στο Σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 32) απεικονίζονται ξεχωριστά οι τρεις διεργασίες σε κοινό διάγραμμα.



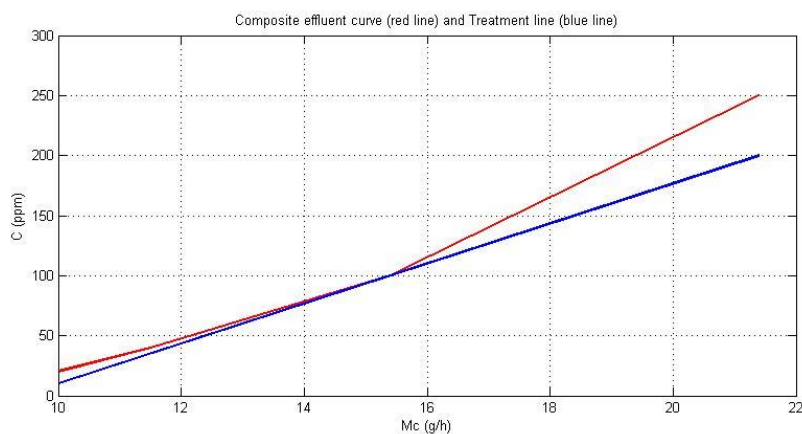
Σχήμα 32. Οριακά προφίλ νερού των διεργασιών σε αθροιστική κατάταξη.

Αν συνδυάσουμε τις διεργασίες εντός των διαστημάτων συγκέντρωσης, παίρνουμε τη σύνθετη οριακή καμπύλη, όπως απεικονίζεται στο επόμενο Σχήμα (Σχήμα 33).



Σχήμα 33. Κατασκευή της οριακής σύνθετης καμπύλης νερού της ολικής παραγωγικής διαδικασίας.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 34), απεικονίζεται η γραμμή λειτουργίας του νερού σε σχέση με την οριακή σύνθετη καμπύλη νερού.



Σχήμα 34. Κατασκευάζοντας την επαπτόμενη γραμμή λειτουργίας του νερού προσδιορίζουμε την ελάχιστη δυνατή παροχή νερού.

Για να υπολογίσουμε την ελάχιστη παροχή παίρνουμε το πηλίκο της μάζας του συστατικού προς απομάκρυνση δια την συγκέντρωσή του στο ρεύμα, στο σημείο του κόμβου ανάσχεσης.

Στο παράδειγμα 4 η γραμμή λειτουργίας του νερού εφάπτεται της σύνθετης οριακής καμπύλης σε δύο σημεία, στο (0,0) και σε ένα ενδιάμεσο σημείο, το (5,4;100). Η ελάχιστη παροχή νερού υπολογίζεται από την σχέση (1),

$$m_w = \frac{m_C}{\Delta c} = \frac{5400 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}}{(100 - 10) \text{ ppm}} = 60 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

και είναι ίση με $60 \text{ (t} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$.

Παράδειγμα 5

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα αναλύουμε τη μέθοδο εύρεσης της ελάχιστης παροχής του ρεύματος επεξεργασίας όταν είναι γνωστός ο λόγος απομάκρυνσης R .

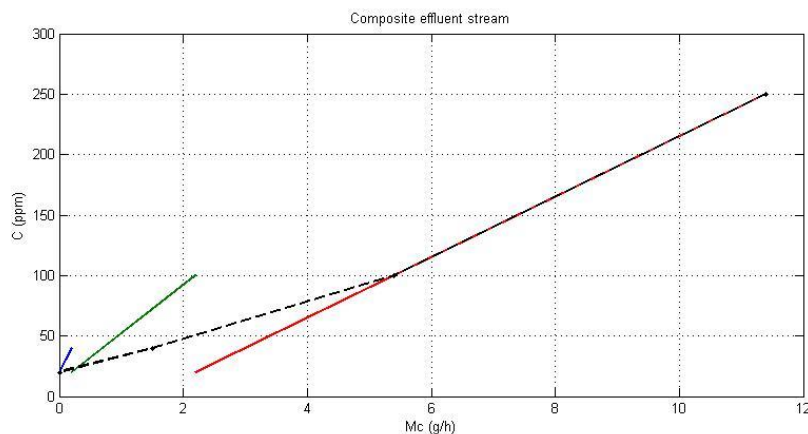
Έχουμε μια παραγωγική διαδικασία που χρησιμοποιεί τρεις επιμέρους διεργασίες, τις ίδιες διεργασίες που παρουσιάζονται στον πίνακα 4, του παραδείγματος 4.

Πίνακας 5. Δεδομένα οριακής χρήσης του νερού του παραδείγματος 5.

Ρεύμα νερού	Συγκέντρωση εισόδου C_{in} (ppm)	Παροχή ρεύματος m_w ($t \cdot h^{-1}$)
1	250	40
2	100	25
3	40	10

Η διαφορά με το προηγούμενο παράδειγμα (παράδειγμα 4) είναι ότι δεν είναι γνωστή η συγκέντρωση εξόδου του ρεύματος προς επεξεργασία, αλλά ο λόγος απομάκρυνσης $R = 95\%$.

Αρχικά κατασκευάζουμε την σύνθετη οριακή καμπύλη, προκειμένου να βρούμε το σημείο του κόμβου ανάσχεσης (pinch point). Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία που αναπτύξαμε και στα προηγούμενα παραδείγματα.



Σχήμα 35. Κατασκευή της οριακής σύνθετης καμπύλης νερού της ολικής παραγωγικής διαδικασίας.

Το σημείο που βρίσκεται ο κόμβος ανάσχεσης της διεργασίας είναι το (5,4;100).

Στην συνέχεια από τον τύπο υπολογισμού του λόγου απομάκρυνσης

$$R = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \quad (2.2)$$

υπολογίζουμε την σχέση που συνδέει τις συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου.

$$R = 0.95 \Rightarrow \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} = 0.95 \Rightarrow C_{in} = 20C_{out}$$

Η συνολική μάζα του συστατικού δίνεται από την σχέση (1)

$$\Delta_{m_T} = m_{W,\min} \cdot \Delta C \Rightarrow 11.4 \cdot 10^3 = m_{W,\min} \cdot (C_{in} - C_{out})$$

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η παροχή, η γραμμή επεξεργασίας θα διέρχεται από τον κόμβο ανάσχεσης (5,4;100). Από το ισοζύγιο μάζας κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης προκύπτει

$$\Delta_{m_T} = m_{W,\min} \cdot \Delta C \Rightarrow 5.4 \cdot 10^3 = m_{W,\min} \cdot (C_{in} - C_{out}) \Rightarrow 5.4 \cdot 10^3 = m_{W,\min} \cdot (100 - C_{out})$$

Αν διαιρέσουμε κατά μέλη τις δύο εξισώσεις που προέκυψαν προηγουμένως, έχουμε

$$\frac{11.4 \cdot 10^3}{5.4 \cdot 10^3} = \frac{m_{W,\min} \cdot (C_{in} - C_{out})}{m_{W,\min} \cdot (100 - C_{out})}$$

Αν στην σχέση αυτή αντικαταστήσουμε την συγκέντρωση εισόδου με $C_{in} = 20C_{out}$, τότε μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε τις συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου, και στη συνέχεια την ελάχιστη παροχή της γραμμής λειτουργίας, που είναι και το ζητούμενο του προβλήματος.

Από την αντικατάσταση προκύπτουν οι παρακάτω τιμές:

$$C_{in} = 200 \text{ ppm}$$

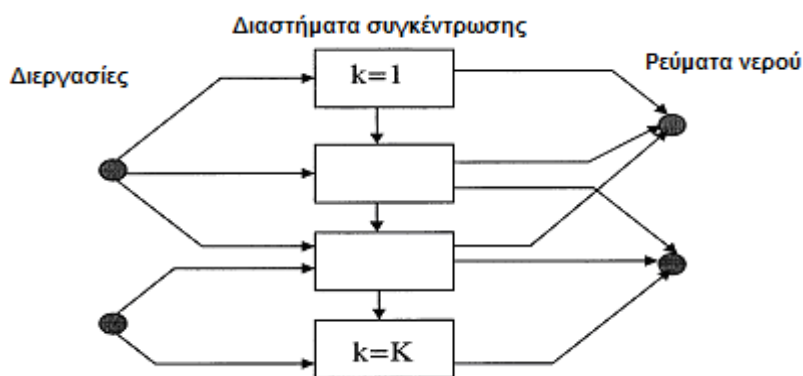
$$C_{out} = 10 \text{ ppm}$$

$$m_{W,\min} = 60 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

Πρέπει να επισημάνουμε πως τυχαία προέκυψε ο λόγος απομάκρυνσης $R=95\%$ να αντιστοιχεί σε συγκέντρωση εξόδου ίση με $C_{out} = 10 \text{ ppm}$. Αν αλλάξουμε τον λόγο απομάκρυνσης θα αλλάξει και η συγκέντρωση εξόδου.

4. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΕΝΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ

Το μαθηματικό μοντέλο για την ελαχιστοποίηση του φρέσκου νερού στηρίζεται στην κατασκευή γραφήματος διαστημάτων συγκέντρωσης (CID- Concentration Interval Diagram) (El-Halwagi and Manousiouthakis, 1989). Σε αυτή, τα όρια των διαστημάτων συγκέντρωσης αντιστοιχούν στις μέγιστες συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου των επιμέρους διεργασιών και στις συγκεντρώσεις εισόδου των πηγών παροχής καθαρού νερού. Η βασική ιδέα ανάπτυξης της μεθόδου έχει τις βάσεις της στο δίκτυο μεταφοράς θερμότητας (HEN- Heat Exchange Network). Στο μοντέλο μεταφόρτωσης που θεωρείται, η μάζα του ρυπαντή μεταφέρεται από τις διεργασίες στα ρεύματα νερού μέσω των διαστημάτων συγκέντρωσης, κατά τον τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα 36.



Σχήμα 36. Μοντέλο μεταφοράς μάζας από τις διεργασίες στα ρεύματα

Το υψηλότερης τιμής διάστημα συγκέντρωσης λαμβάνει την τιμή $k=1$ και το χαμηλότερης τιμής (π.χ. το K -οστό) την τιμή K . Στο πρώτο διάστημα συγκέντρωσης δεν εισέρχονται υπολείμματα ρυπαντών από άλλα διαστήματα (συστατικό εισέρχεται μόνο από τη διεργασία). Στο τελευταίο διάστημα δεν υπάρχει απόρριψη ρυπαντή και η απώλεια μάζας είναι μόνο προς το ρεύμα του νερού. Γενικότερα, κατά την κατασκευή του τηρούνται οι εξής τέσσερις κανόνες:

- i. Η μάζα του ρυπαντή μεταφέρεται σε ένα συγκεκριμένο διάστημα από εκείνες τις διεργασίες των οποίων τα όρια συγκέντρωσης περιλαμβάνουν τα όρια του διαστήματος συγκέντρωσης.
- ii. Η μάζα του ρυπαντή μεταφέρεται από ένα συγκεκριμένο διάστημα συγκέντρωσης από εκείνα τα ρεύματα νερού των οποίων τα όρια συγκέντρωσης περιλαμβάνουν τα όρια του διαστήματος συγκέντρωσης.
- iii. Η μάζα μεταφέρεται από ένα συγκεκριμένο διάστημα συγκέντρωσης στο επόμενο χαμηλότερο διάστημα. Αυτή η μάζα είναι το υπόλειμμα που δεν μπορεί να μεταφερθεί στο προαναφερθέν διάστημα.
- iv. Η μάζα μεταφέρεται σε ένα συγκεκριμένο διάστημα συγκέντρωσης από το προηγούμενο που βρίσκεται σε μεγαλύτερη συγκέντρωση.

Η βασική ιδέα της ελαχιστοποίησης του καθαρού νερού μέσω του μοντέλου, είναι η εισαγωγή μεταβλητών για το σύνολο των πιθανών ροών μάζας, η γραφή όλων των ισοζυγίων μάζας γύρω από το κάθε διάστημα και η εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου που ελαχιστοποιεί την παροχή φρέσκου νερού, λαμβάνοντας παράλληλα υπ' όψιν τους περιορισμούς για τα ισοζύγια μάζας.

Μαθηματικό Μοντέλο

Ξεκινώντας την περιγραφή του προβλήματος ορίζουμε τα παρακάτω μεγέθη:

$$I = \langle i | i = 1, 2, \dots, N_0 \rangle$$

είναι το σύνολο των διεργασιών που χρησιμοποιούν νερό, όπου N_0 είναι ο συνολικός αριθμός χρηστών του συστήματος. Ο κάθε χρήστης απαιτεί διαφορετική ποιότητα νερού,

$$C = \langle c | c = 1, 2, \dots, N_c \rangle$$

είναι οι συγκεντρώσεις των ρυπαντών, βάση των οποίων καθορίζεται η ποιότητα του νερού που απαιτεί κάθε χρήστης. N_c είναι το σύνολο των ρυπαντών,

$$J = \langle j | j = 1, 2, \dots, N_s \rangle$$

είναι το σύνολο των διαθέσιμων καθαρών πηγών νερού,

$$CW_{inc,j}$$

είναι η συγκέντρωση παροχής για κάθε διαθέσιμη πηγή καθαρού νερού,

$$C_{in,max_{c,j}}, C_{out,max_{c,j}}$$

είναι οι συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου, για κάθε διεργασία, σε ppm,

$$M_{L_{c,i}}$$

είναι η μάζα του ρυπαντή που μεταφέρεται σε κάθε διεργασία που χρησιμοποιεί νερό, σε $g \cdot h^{-1}$,

$$F_{li} = \max_{c \in C} \frac{M_{L_{c,i}}}{(C_{out,max_{c,j}} - C_{in,max_{c,j}})}$$

είναι το οριακό προφίλ του νερού για κάθε διεργασία i , σε $t \cdot h^{-1}$,

$$CI = \langle k | k = 1, 2, \dots, K \rangle$$

είναι τα διαστήματα συγκεντρώσεων, όπου C_k η συγκέντρωση εισόδου του διαστήματος k ,

$$W_{i,k}^P = F_{li} \cdot \Delta C_k = F_{li} \cdot (C_k - C_{k+1})$$

είναι η σχέση που υπολογίζει την μάζα του ρυπαντή που μεταφέρεται από την διεργασία i , δια του διαστήματος συγκέντρωσης k .

$$W_{j,k}^W = L_j \cdot \Delta C_k = L_j \cdot (C_k - C_{k+1})$$

είναι η σχέση που υπολογίζει τη μάζα του ρυπαντή που μεταφέρεται στο ρεύμα νερού j , δια μέσω του διαστήματος συγκέντρωσης k . Η μεταβλητή L_j , που

είναι παροχή του ρεύματος καθαρού νερού j , είναι αυτή που θα καθοριστεί από την λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Το πρόβλημα για την εύρεση του κόστους της ελάχιστης παροχής καθαρού νερού διατυπώνεται ως εξής:

$$\min S = \sum_{j \in I} c_j L_j \quad (4.1)$$

και υπόκειται στους παρακάτω περιορισμούς:

$$r_{i,k} - r_{i,k-1} + \sum_j W_{i,j,k} = W_{i,k}^P, \quad k=1,2,\dots,K, \quad \forall i \in I \quad (4.2)$$

$$\sum_j W_{i,j,k} = W_{j,k}^W \quad (4.3)$$

$$W_{j,k}^W = L_j \cdot (C_k - C_{k+1}) \quad (4.4)$$

$$0 \leq L_j \leq L_j^U \quad (4.5)$$

$$r_{i,0} = r_{i,K} = 0, \quad r_{i,k} \geq 0, \quad k=1,2,\dots,K-1 \quad (4.6)$$

όπου:

$$c_j$$

είναι το μοναδιαίο κόστος της πηγής καθαρού νερού j , σε $\$/t^{-1}$,

$$r_{i,k}$$

η εναπομένουσα μάζα ρυπαντή από τη διεργασία i στο διάστημα συγκέντρωσης k , σε $g \cdot h^{-1}$,

$$W_{i,j,k}$$

είναι η μάζα του ρυπαντή που μεταφέρεται από την διεργασία i , στο ρεύμα καθαρού νερού j , στο διάστημα συγκέντρωσης k , σε $g \cdot h^{-1}$,

$$L_j^U$$

είναι η μέγιστη ποσότητα καθαρού νερού του ρεύματος j , που έχουμε διαθέσιμη, σε $t \cdot h^{-1}$.

Η εξίσωση (4.2) αντιπροσωπεύει διαδοχικά ισοζύγια μάζας για κάθε διεργασία που χρησιμοποιεί νερό σε κάθε διάστημα.

Η καινούργια μεταβλητή $W_{i,j,k}$ ταυτίζεται με τη μάζα του ρυπαντή που ανταλλάσσεται μεταξύ της διεργασίας i και του ρεύματος καθαρού νερού j , σε κάθε διάστημα συγκέντρωσης k .

Το παραπάνω πρόβλημα, είναι ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο μπορεί να επιλυθεί εύκολα και να παράγει τις βέλτιστες τιμές των παροχών καθαρού νερού, καθώς και την υπολειπόμενη μάζα του ρυπαντή.

Ο κόμβος ανάσχεσης εντοπίζεται στο σημείο που το άθροισμα της υπολειπόμενης μάζας του ρυπαντή μηδενίζεται, δηλαδή όπου

$$\sum_i r_{i,k} = 0$$

5. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΠΡΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΓΙΑ ΕΝΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ

Το συγκεκριμένο μαθηματικό μοντέλο, αποτελεί επέκταση του μαθηματικού μοντέλου που παρουσιάστηκε για μέγιστη επαναχρησιμοποίηση νερού για ένα συστατικό (Argaez et al. ,1998), σε προβλήματα ελαχιστοποίησης παροχής ρεύματος υγρών αποβλήτων προς επεξεργασία για ένα συστατικό. Υιοθετεί επίσης, την ιδέα των διαστημάτων συγκέντρωσης που προτάθηκε για τον σχεδιασμό δικτύων εναλλαγής μάζας (Mass Exchange Networks, MEN, El-Halwagi and Manousiouthakis,1989), και του μοντέλου μεταφόρτωσης (transshipment logistics model) που προτάθηκε για τον σχεδιασμό δικτύων εναλλαγής θερμότητας (Heat Exchange Networks, HEN, Paroulias and Grossman, 1983).

Μαθηματικό Μοντέλο

Ξεκινώντας την περιγραφή του προβλήματος ορίζουμε τα παρακάτω μεγέθη:

$$K = \{k \mid k = 1, 2, \dots, S_K\}$$

είναι το σύνολο των διεργασιών που μεταφέρουν υγρά απόβλητα, όπου S_K είναι ο συνολικός αριθμός διεργασιών του συστήματος,

$$N = \{n \mid n = 1, 2, \dots, S_N\}$$

είναι ο αριθμός των ρυπαντών, όπου S_N είναι το σύνολο των ρυπαντών,

$$J = \{j \mid j = 1, 2, \dots, S_J\}$$

είναι το σύνολο των διαθέσιμων διεργασιών επεξεργασίας,

$$C_{in,o,k}, C_{out,o,k}$$

είναι οι αυθεντικές συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου για καθένα από τα ρεύματα υγρών αποβλήτων, σε ppm ,

$$ML_k$$

είναι η μάζα του ρυπαντή που μεταφέρεται από κάθε ρεύμα υγρών αποβλήτων k , σε $g \cdot h^{-1}$,

$$MWF_k = \frac{ML_k}{Cin_{o,k} - Cout_{o,k}}, \forall k$$

είναι το οριακό προφίλ του νερού για κάθε διεργασία k , σε $t \cdot h^{-1}$,

$$CI = \{i | i = 1, 2, \dots, S_I\}$$

είναι τα διαστήματα συγκεντρώσεων, όπου C_i η συγκέντρωση εξόδου του διαστήματος i ,

$$M_{i,k}^P = MWF_k \Delta C_i = MWF_k (C_{i+1} - C_i)$$

είναι η σχέση που υπολογίζει την μάζα του ρυπαντή που μεταφέρεται από την διεργασία k , δια του διαστήματος συγκέντρωσης i .

$$M_{i,k}^W = Ft_j \Delta C_i = Ft_j (C_{i+1} - C_i)$$

είναι η σχέση που υπολογίζει τη μάζα του ρυπαντή που μεταφέρεται στο ρεύμα επεξεργασίας j , δια μέσω του διαστήματος συγκέντρωσης i . Η μεταβλητή Ft_j που είναι παροχή του ρεύματος επεξεργασίας j , είναι αυτή που θα καθοριστεί από την λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Το πρόβλημα για την εύρεση του κόστους της ελάχιστης παροχής καθαρού νερού διατυπώνεται ως εξής:

$$\min Cost = \sum_{j \in J} c_j Ft_j \quad (5.1)$$

και υπόκειται στους παρακάτω περιορισμούς:

$$u_{i-1,k} - u_{i,k} + \sum_j M_{i,j,k} = M_{i,k}^P, \forall i, k \quad (5.2)$$

$$\sum_k M_{k,j,i} = M_{j,i}^W, \quad \forall j, i \quad (5.3)$$

$$M_{i,k}^W = Ft_j (C_{i+1} - C_i), \quad \forall k \quad (5.4)$$

$$0 \leq Ft_j \leq Ft_j^U, \quad \forall j \quad (5.5)$$

$$u_{I+1,k} = u_{1,k} = 0, \quad u_{i,k} \geq 0, i = 1, 2, \dots, I \quad (5.6)$$

όπου:

$$c_j$$

είναι το μοναδιαίο κόστος του ρεύματος επεξεργασίας, j , σε $\$ \cdot t^{-1}$,

$$u_{i,k}$$

η εναπομένουσα μάζα ρυπαντή από τη διεργασία k στο διάστημα συγκέντρωσης i , σε $g \cdot h^{-1}$,

$$M_{k,j,i}$$

είναι η μάζα του ρυπαντή που μεταφέρεται από την διεργασία k , στο ρεύμα επεξεργασίας j , στο διάστημα συγκέντρωσης i , σε $g \cdot h^{-1}$,

$$Ft_j^U$$

είναι η μέγιστη παροχή του ρεύματος επεξεργασίας j , που έχουμε διαθέσιμη, σε $t \cdot h^{-1}$.

Ο εξίσωση (5.2) αντιπροσωπεύει διαδοχικά ισοζύγια μάζας του ρυπαντή σε κάθε διάστημα i .

Η καινούργια μεταβλητή $M_{k,j,i}$ ταυτίζεται με τη μάζα του ρυπαντή που ανταλλάσσεται μεταξύ της διεργασίας k και του ρεύματος επεξεργασίας j , σε κάθε διάστημα συγκέντρωσης i .

Το παραπάνω πρόβλημα, είναι ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο μπορεί να επιλυθεί εύκολα και να παράγει τις βέλτιστες τιμές των παροχών καθαρού νερού, καθώς και την υπολειπόμενη μάζα του ρυπαντή.

Σχεδιασμός για ρεύματα επεξεργασίας με σταθερή συγκέντρωση εξόδου

Για ρεύματα επεξεργασίας με σταθερή συγκέντρωση εξόδου, πριν κατασκευάσουμε τα διαστήματα συγκεντρώσεων, από τις συγκεντρώσεις των ρευμάτων υγρών αποβλήτων πρέπει να αφαιρέσουμε την μικρότερη από τις συγκεντρώσεις των ρευμάτων επεξεργασίας, δηλαδή

$$Cout_{\min} = \min_j \{Cout_j\}$$

Με αυτόν τον τρόπο η αρχική συγκέντρωση του ρεύματος επεξεργασίας θα έχει εικονική τιμή μηδέν. Στη συνέχεια ορίζουμε το πρώτο διάστημα συγκέντρωσης

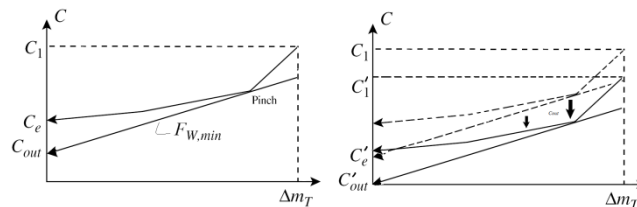
$$Cin_k = Cin_{o,k} - Cout_{\min}, \forall k$$

$$Cout_k = Cout_{o,k} - Cout_{\min}, \forall k$$

Η ίδια αλλαγή πρέπει να γίνει και στις συγκεντρώσεις εξόδου των υπόλοιπων ρευμάτων

$$C_{out,s_j} = C_{out_j} - C_{out_{min}}, \forall j$$

Στο επόμενο Σχήμα (Σχήμα 37), παρουσιάζουμε γραφικά την διαδικασία αλλαγής των συγκεντρώσεων για ένα απόβλητο και για ένα ρεύμα επεξεργασίας.

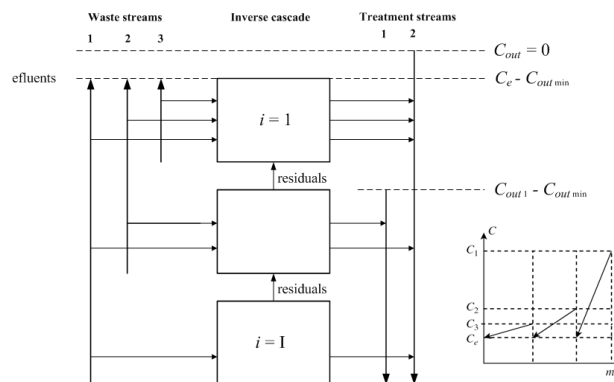


Σχήμα 37. Αλλαγή των συγκεντρώσεων εξόδου για ένα απόβλητο και για ένα ρεύμα επεξεργασίας.

Το διάγραμμα που απεικονίζεται στα αριστερά περιγράφει την γραφική λύση του προβλήματος. Το διάγραμμα στα δεξιά δείχνει ότι, το πρόβλημα μετά την αλλαγή συγκεντρώσεων, μετατρέπεται γεωμετρικά στο πρόβλημα ελαχιστοποίησης υγρών αποβλήτων ως προς ένα συστατικό, το οποίο αναλύθηκε προηγουμένως.

C'_1 , C'_e και $C'_{out} (=0)$ είναι αντίστοιχα η αλλαγμένη συγκέντρωση εισόδου της διεργασία 1, το αλλαγμένο όριο αποβολής στο περιβάλλον και η αλλαγμένη συγκέντρωση εξόδου του ρεύματος επεξεργασίας. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο προβλημάτων είναι ότι ο καταρράκτης της εναπομένουσας μάζας αποβλήτων είναι πλέον ανεστραμμένος.

Στο Σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 38) απεικονίζεται η ιδέα του ανεστραμμένου καταρράκτη με τρία ρεύματα υγρών αποβλήτων ($S_K = 3$), δύο ρεύματα επεξεργασίας ($S_J = 2$) και τρία διαστήματα συγκεντρώσεων (S_I). Το όριο αποβολής C_e , είναι το αρχικό όριο αποβολής, πριν την αλλαγή.



Σχήμα 38. Ανεστραμμένος καταρράκτης για τρία ρεύματα αποβλήτων και δύο ρεύματα επεξεργασίας.

Τα διαστήματα συγκέντρωσης ορίζονται από τις ακραίες συγκεντρώσεις των ρευμάτων υγρών αποβλήτων και από τις συγκεντρώσεις των ρευμάτων επεξεργασίας. Από τις μέγιστες συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου αφαιρούμε την ελάχιστη συγκέντρωση εξόδου $Cout_{min}$.

Σχεδιασμός για ρεύματα επεξεργασίας, για τα οποία είναι γνωστός ο λόγος απομάκρυνσης R

Όταν για τα ρεύματα επεξεργασίας είναι γνωστός ο λόγος απομάκρυνσης αντί της συγκέντρωσης εξόδου, τότε το πρόβλημα του καθορισμού της ελάχιστης παροχής γίνεται πιο πολύπλοκο.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η συγκέντρωση εξόδου $Cout_{min}$, αποτελεί μεταβλητή του προβλήματος. Το νέο πρόβλημα μπορεί πλέον να διατυπωθεί χρησιμοποιώντας τις μέχρι τώρα αναφερθείσες εξισώσεις (5.1) έως (5.6), καθώς και τις εξισώσεις που ακολουθούν.

Η πρώτη εξίσωση μας δίνει τη σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων εξόδου των ρευμάτων και του λόγου απομάκρυνσης.

$$Cout_j = Cin_j(1 - R_j), \quad \forall j \quad (5.7)$$

Τώρα όλες οι συγκεντρώσεις πρέπει να αλλάζουν δυναμικά κατά την διάρκεια της επίλυσης του προβλήματος,

$$Cin_k = Cin_{o,k} - Cout_{j^*}, \quad \forall k \quad (5.8)$$

όπου

$$j^* = \arg \min_j \{Cout_j\} \text{ for some } Cin_j \leq Cin_{o,k}, \quad \forall k, \text{ thus } j^* = \arg \max_j \{R_j\}$$

$$Cout_k = Cout_{o,k} - Cout_{j^*}, \quad \forall k \quad (5.9)$$

$$Cout_{,s_j} = Cout_j - Cout_{j^*}, \quad \forall j \quad (5.10)$$

Η μεταβλητή Δm_T , είναι η συνολική μάζα ρυπαντή που απομακρύνεται απ' όλα τα ρεύματα επεξεργασίας.

$$\Delta m_T = \sum_j Ft_j \Delta C_j = \sum_j Ft_j (Cin_j - Cout_{,s_j}) \quad (5.11)$$

6. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΛΥΘΗΚΑΝ ΜΕ ΤΗΝ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στην ενότητα αυτή θα παραθέσουμε τρία παραδείγματα, τα οποία επιλύθηκαν με τη βοήθεια του μαθηματικού μοντέλου. Το μαθηματικό μοντέλο αναπτύχθηκε στο GAMS , ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιείται ευρέως για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Οι κώδικες που αναπτύχθηκαν σε GAMS, και που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση των προβλημάτων παρατίθενται σε ξεχωριστό παράρτημα, στο τέλος του κειμένου.

Τα πρώτα δύο παραδείγματα που θα παραθέσουμε αφορούν προβλήματα στα οποία έχουμε ένα ρυπαντή (single contaminant) και ένα ρεύμα επεξεργασίας (single treatment process).

Τα προβλήματα στα οποία έχουμε ένα ρυπαντή και ένα ρεύμα επεξεργασίας θα τα λύσουμε με τρεις διαφορετικές μεθόδους και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν στις τρεις περιπτώσεις. Αρχικά θα τα λύσουμε με την βοήθεια του μαθηματικού μοντέλου, στη συνέχεια με την γραφική μέθοδο και τέλος με χρήση του λογισμικού WATER.

Το WATER, είναι ένα επώνυμο λογισμικό που εξειδικεύεται στην επίλυση προβλημάτων ελαχιστοποίησης παροχής ρευμάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ,καθώς και σε προβλήματα μέγιστης επαναχρησιμοποίησης νερού, κ.α. Επίσης με την χρήση του WATER θα παράγουμε και το αντίστοιχο δίκτυο ρευμάτων που προκύπτει από την επίλυση κάθε προβλήματος.

Το τρίτο παράδειγμα, είναι ένα πρόβλημα στο οποίο έχουμε έναν ρυπαντή αλλά δύο ρεύματα επεξεργασίας, και το οποίο θα επιλύσουμε μόνο για δοσμένη συγκέντρωση εξόδου. Στην περίπτωση αυτή, επειδή ο υπολογισμός της ελάχιστης παροχής με την γραφική μέθοδο καθίσταται πολύπλοκος, η επίλυση του προβλήματος θα πραγματοποιηθεί με την χρήση του μαθηματικού μοντέλου και τα παραγόμενα αποτελέσματα θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα που θα εξάγουμε με την βοήθεια του WATER.

Άλλωστε αυτός είναι και ο σκοπός αυτής της εργασίας, δηλαδή να προτείνει μία γρήγορη και αξιόπιστη μέθοδο για τον υπολογισμό της ελάχιστης παροχής ρευμάτων επεξεργασίας, χωρίς να χρειάζεται να ανατρέχει κανείς στην χρήση πολύπλοκων γραφικών μεθόδων και λογισμικών.

Παράδειγμα 6.1

Το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι παρμένο από το βιβλίο *Wastewater Minimization* (Wang & Smith,1994). Στο πρόβλημα δίνονται τρία ρεύματα υγρών αποβλήτων, που μεταφέρουν το ίδιο συστατικό, και ένα ρεύμα

επεξεργασίας. Τα δεδομένα για κάθε ρεύμα παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί.

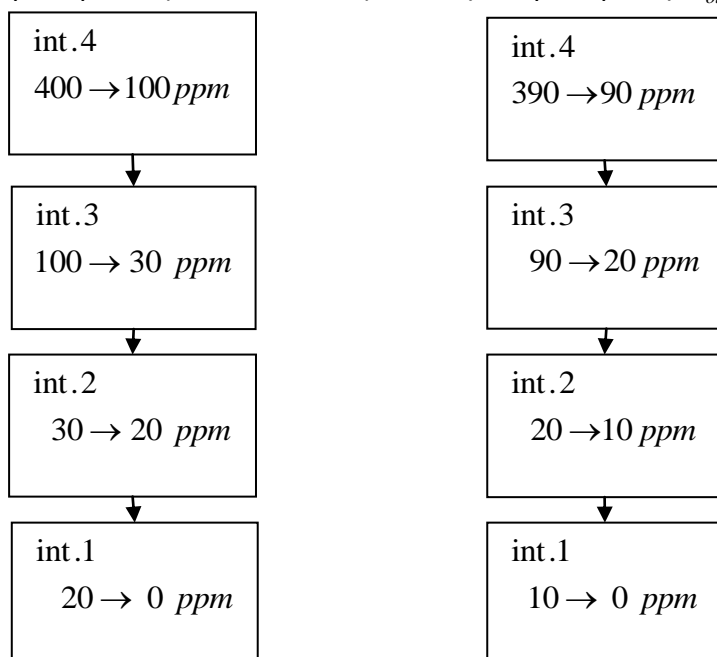
Πίνακας 6. Παράδειγμα για μοναδικό συστατικό και για μοναδικό ρεύμα επεξεργασίας.

Contaminant	Streams			Treatment Processes		Ce(ppm)	Target(t/h)	
	Cin(ppm)	S1	S2	S3	TP		RR	Cout
A				RR	Cout(ppm)	20		
	400	100	30				59.8	64.44
				0.99	10			
Flowrate(t/h)	40	30	20					

Για το συγκεκριμένο παράδειγμα υπολογίζουμε την ελάχιστη παροχή του ρεύματος επεξεργασίας στην περίπτωση που είναι γνωστή η συγκέντρωση εξόδου του ρεύματος επεξεργασίας ($C_{out} = 10 ppm$), και στη περίπτωση που δίνεται ο λόγος απομάκρυνσης του ρεύματος επεξεργασίας ($R = 0.99$).

Όπως προαναφέρθηκε ο κώδικας του GAMS, που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος παρατίθεται αναλυτικά στο παράρτημα στο τέλος του κειμένου.

Στην περίπτωση που δίνεται η συγκέντρωση εξόδου του ρεύματος επεξεργασίας ($C_{out} = 10 ppm$) πρέπει να παράγουμε τα εικονικά διαστήματα συγκεντρώσεων, τα οποία προκύπτουν αν αφαιρέσουμε από τις αρχικές συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου την συγκέντρωση $C_{out} = 10 ppm$.



Σχήμα 39. Απεικόνιση δεξιά των πραγματικών και αριστερά των εικονικών διαστημάτων συγκέντρωσης. Η αρίθμηση των διαστημάτων γίνεται από κάτω προς τα πάνω.

Από το πρώτο ρεύμα αποβλήτων (S1), που έχει εύρος συγκέντρωσης $\Delta c = (400 - 20) \text{ ppm} = 380 \text{ ppm}$, έχουμε μεταφορά μάζας στο δεύτερο, στο τρίτο και στο τέταρτο διάστημα συγκέντρωσης.

Από το δεύτερο ρεύμα (S2), που έχει εύρος συγκέντρωσης $\Delta c = (100 - 20) \text{ ppm} = 80 \text{ ppm}$ έχουμε μεταφορά μάζας στο δεύτερο και στο τρίτο διάστημα συγκέντρωσης.

Από το τρίτο ρεύμα (S3), που έχει εύρος συγκέντρωσης $\Delta c = (30 - 20) \text{ ppm} = 10 \text{ ppm}$, έχουμε μεταφορά μάζας μόνο στο τρίτο διάστημα συγκέντρωσης.

Από κανένα ρεύμα δεν έχουμε μεταφορά μάζας στο πρώτο διάστημα συγκέντρωσης.

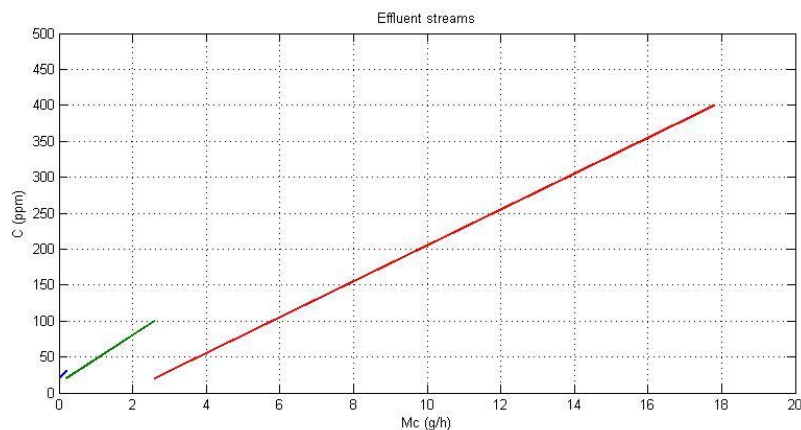
Επίσης πρέπει να υπολογίσουμε τη συνολική μάζα του ρυπαντή που μεταφέρει κάθε ρεύμα αποβλήτου. Ο υπολογισμός γίνεται με βάση την σχέση (1). Για το πρώτο ρεύμα (S1) η μάζα είναι ίση με $m_{c_{s1}} = 15200 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$, για το δεύτερο ρεύμα είναι ίση με $m_{c_{s2}} = 2400 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ και για το τρίτο ρεύμα είναι ίση με $m_{c_{s3}} = 200 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$.

Τα παραπάνω δεδομένα τα εισάγουμε στο GAMS, και παράγουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Αν τρέξουμε το αρχείο GAMS, προκύπτει ότι η ελάχιστη παροχή του ρεύματος επεξεργασίας είναι $Ft_j = 64.44 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$.

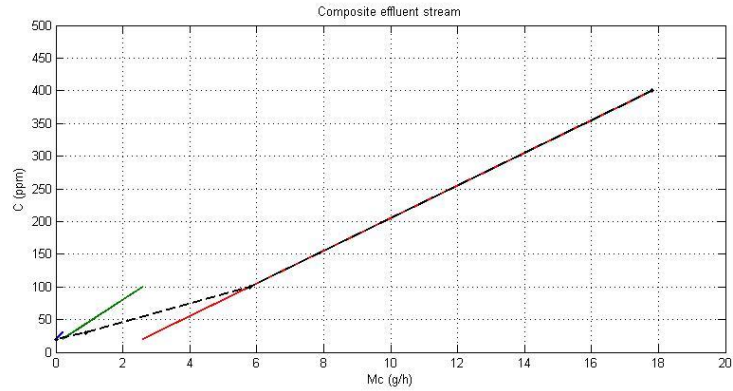
Αν θέλουμε τώρα να επιλύσουμε το ίδιο πρόβλημα με την γραφική μέθοδο, θα ακολουθήσουμε την διαδικασία που περιγράψαμε προηγουμένως.

Αρχικά κατασκευάζουμε το διάγραμμα που απεικονίζει τα οριακά προφίλ των ρευμάτων υγρών αποβλήτων σε αθροιστική κατάταξη (Σχήμα 40).



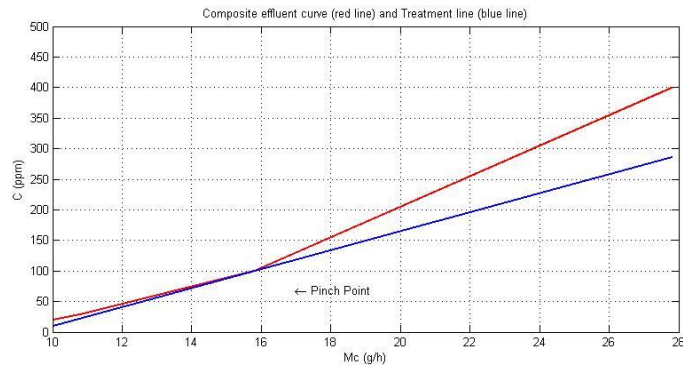
Σχήμα 40. Οριακά προφίλ νερού των διεργασιών σε αθροιστική κατάταξη.

Στη συνέχεια κατασκευάζουμε την σύνθετη οριακή καμπύλη (Σχήμα 41), η οποία δείχνει τη συμπεριφορά της κάθε διεργασίας στο σύνολο της παραγωγικής διαδικασίας.



Σχήμα 41. Κατασκευή της οριακής σύνθετης καμπύλης νερού της ολικής παραγωγικής διαδικασίας.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 42), απεικονίζεται το ρεύμα επεξεργασίας σε σχέση με την οριακή σύνθετη καμπύλη των διεργασιών.



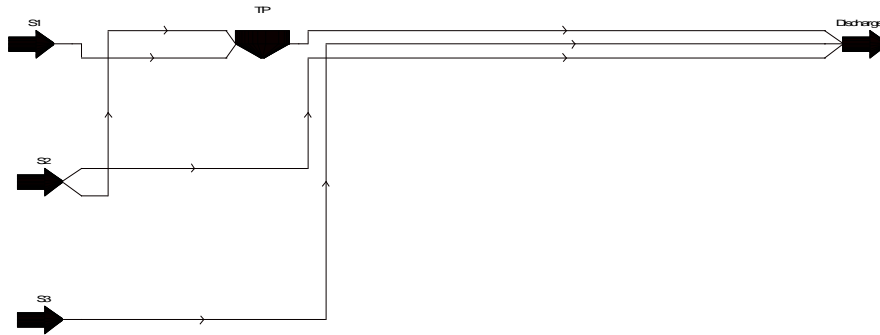
Σχήμα 42. Κατασκευάζοντας την εφαπτόμενη γραμμή λειτουργίας, προσδιορίζουμε την ελάχιστη δυνατή παροχή του ρεύματος επεξεργασίας.

Για να υπολογίσουμε την ελάχιστη παροχή παίρνουμε το πηλίκο της μάζας του συστατικού προς απομάκρυνση δια την συγκέντρωσή του στο ρεύμα, στο σημείο του κόμβου ανάσχεσης.

Στο παράδειγμα 4 η γραμμή λειτουργίας του νερού εφάπτεται της σύνθετης οριακής καμπύλης σε δύο σημεία, στο (0,0) και σε ένα ενδιάμεσο σημείο, το (5,8;100). Η ελάχιστη παροχή νερού υπολογίζεται από την σχέση (1), η οποία είναι ίση με $Ft_j = 64.44t \cdot h^{-1}$.

Επίσης αν προσπαθήσουμε να λύσουμε το ίδιο πρόβλημα χρησιμοποιώντας το WATER, προκύπτει ότι η τιμή της ελάχιστης παροχής του ρεύματος είναι $Ft_j = 64.44t \cdot h^{-1}$.

Στην συνέχεια παραθέτουμε το δίκτυο των ρευμάτων, που προκύπτει με χρήση του WATER (Σχήμα 43).



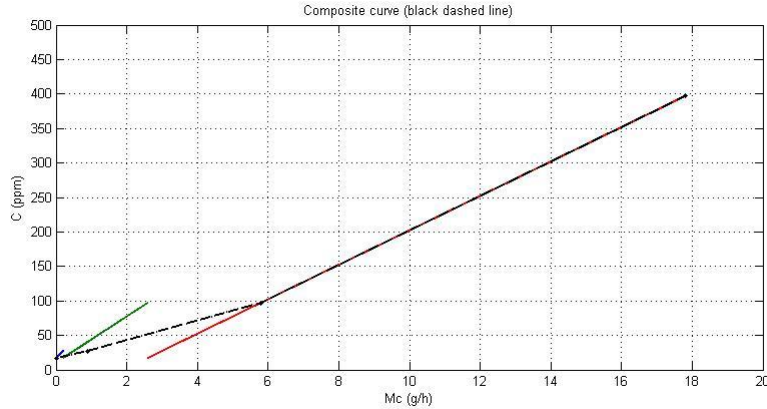
Σχήμα.43. Δίκτυο που προκύπτει με χρήση του WATER.

Παρατηρούμε ότι και με τους τρεις τρόπους επίλυσης του προβλήματος το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι το ίδιο.

Στην περίπτωση τώρα του λόγου απομάκρυνσης ($R=0.99$) πρέπει, στο εσωτερικό του κώδικα να ορίσουμε εκ νέου τα διαστήματα συγκέντρωσης, καθώς και τον λόγο απομάκρυνσης. Η διαφορά σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση είναι ότι τα διαστήματα συγκέντρωσης που ορίζουμε είναι τα πραγματικά

Αν πραγματοποιήσουμε τις αλλαγές αυτές στον κώδικα και τον τρέξουμε το αποτέλεσμα που θα προκύψει θα είναι $Ft_j = 59.79t \cdot h^{-1}$.

Αν λύσουμε τώρα το ίδιο πρόβλημα με την γραφική μέθοδο, θα δούμε ότι το αποτέλεσμα που θα προκύψει είναι το ίδιο.



Σχήμα 44. Κατασκευή της οριακής σύνθετης καμπύλης νερού της ολικής παραγωγικής διαδικασίας.

Το σημείο που βρίσκεται ο κόμβος ανάσχεσης της διεργασίας είναι το (5,8;100).

$$R = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}}$$

Στην συνέχεια από τον τύπο υπολογισμού του λόγου απομάκρυνσης

$$R = 0.99 \Rightarrow \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} = 0.99 \Rightarrow C_{in} = 100C_{out}$$

υπολογίζουμε την σχέση που συνδέει τις συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου.

$$\Delta_{m_T} = m_{W,\min} \cdot \Delta C \Rightarrow 17.8 \cdot 10^3 = m_{W,\min} \cdot (C_{in} - C_{out})$$

Η συνολική μάζα του συστατικού δίνεται από την σχέση (1)

$$\Delta_{m_T} = m_{W,\min} \cdot \Delta C \Rightarrow 5.8 \cdot 10^3 = m_{W,\min} \cdot (C_{in} - C_{out}) \Rightarrow 5.8 \cdot 10^3 = m_{W,\min} \cdot (100 - C_{out})$$

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η παροχή, η γραμμή επεξεργασίας θα διέρχεται από τον κόμβο ανάσχεσης (5,8;100). Από το ισοζύγιο μάζας κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης προκύπτει

Αν διαιρέσουμε κατά μέλη τις δύο εξισώσεις που προέκυψαν προηγουμένως, έχουμε

$$\frac{17.8 \cdot 10^3}{5.8 \cdot 10^3} = \frac{m_{W,\min} \cdot (C_{in} - C_{out})}{m_{W,\min} \cdot (100 - C_{out})}$$

Αν στην σχέση αυτή αντικαταστήσουμε την συγκέντρωση εισόδου με $C_{in} = 100C_{out}$, τότε μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε τις συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου, και στη συνέχεια την ελάχιστη παροχή της γραμμής λειτουργίας, που είναι και το ζητούμενο του προβλήματος.

$$C_{in} = 300 \text{ ppm}$$

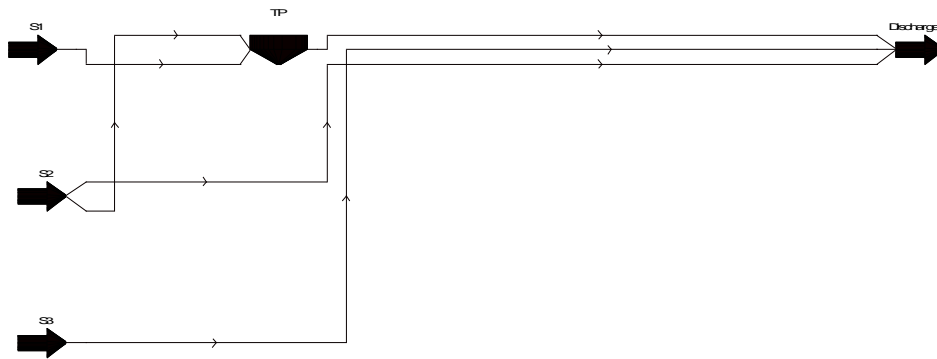
$$C_{out} = 3 \text{ ppm}$$

$$m_{W,\min} = 59.79 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

Παρατηρούμε όντως, ότι το αποτέλεσμα που προκύπτει από την γραφική μέθοδο είναι ίδιο με το αποτέλεσμα που προκύπτει από τους υπολογισμούς του GAMS.

Τέλος μπορούμε να επαληθεύσουμε τα αποτελέσματά μας και με το WATER. Αν εισάγουμε τα δεδομένα του προβλήματος στο WATER, τότε το αποτέλεσμα που θα προκύψει θα είναι ουσιαστικά το ίδιο με τις προηγούμενες δύο μεθόδους, δηλαδή $Ft_j = 59.78 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$.

Παρακάτω παραθέτουμε το δίκτυο των ρευμάτων που προκύπτει (Σχήμα 45).



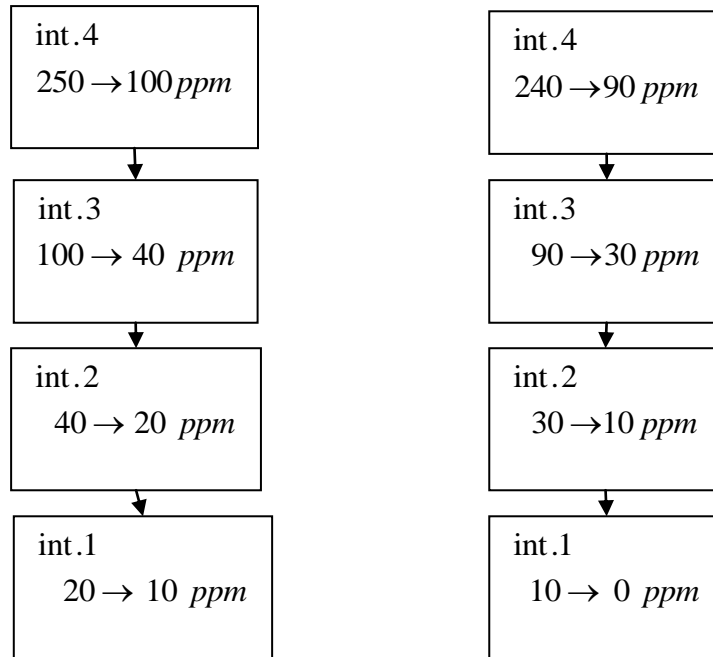
Σχήμα 45. Δίκτυο που προκύπτει με χρήση του WATER.

Παράδειγμα 6.2

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα θα κάνουμε χρήση των δεδομένων του πίνακα 4, και θα δείξουμε ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την γραφική επίλυση για συγκέντρωση εξόδου $C_{out} = 10 ppm$ και για λόγο απομάκρυνσης $R = 95\%$, συμβαδίζουν απόλυτα με τα αποτελέσματα που παράγει το μαθηματικό μοντέλο, και στις δύο περιπτώσεις. Απλά να θυμίσουμε ότι το αποτέλεσμα που είχε προκύψει ήταν $Ft_j = 60 t \cdot h^{-1}$.

Ρεύμα αποβλήτου	Συγκέντρωση εισόδου $C_{in} (ppm)$	Παροχή ρεύματος $m_w (t \cdot h^{-1})$
1	250	40
2	100	25
3	40	10

Ας αναλύσουμε αρχικά την περίπτωση που δίνεται η συγκέντρωση εξόδου του ρεύματος επεξεργασίας ($C_{out} = 10 ppm$). Πρέπει να παράγουμε τα εικονικά διαστήματα συγκεντρώσεων, τα οποία προκύπτουν αν αφαιρέσουμε από τις αρχικές συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου την συγκέντρωση $C_{out} = 10 ppm$.



Σχήμα 46. Απεικόνιση δεξιά των πραγματικών και αριστερά των εικονικών διαστημάτων συγκέντρωσης. Η αρίθμηση των διαστημάτων γίνεται από κάτω προς τα πάνω.

Από το πρώτο ρεύμα αποβλήτων (S1), που έχει εύρος συγκέντρωσης $\Delta c = (250 - 20) \text{ ppm} = 230 \text{ ppm}$, έχουμε μεταφορά μάζας στο δεύτερο, στο τρίτο και στο τέταρτο διάστημα συγκέντρωσης.

Από το δεύτερο ρεύμα (S2), που έχει εύρος συγκέντρωσης $\Delta c = (100 - 20) \text{ ppm} = 80 \text{ ppm}$ έχουμε μεταφορά μάζας στο δεύτερο και στο τρίτο διάστημα συγκέντρωσης.

Από το τρίτο ρεύμα (S3), που έχει εύρος συγκέντρωσης $\Delta c = (40 - 20) \text{ ppm} = 20 \text{ ppm}$, έχουμε μεταφορά μάζας μόνο στο τρίτο διάστημα συγκέντρωσης.

Από κανένα ρεύμα δεν έχουμε μεταφορά μάζας στο πρώτο διάστημα συγκέντρωσης.

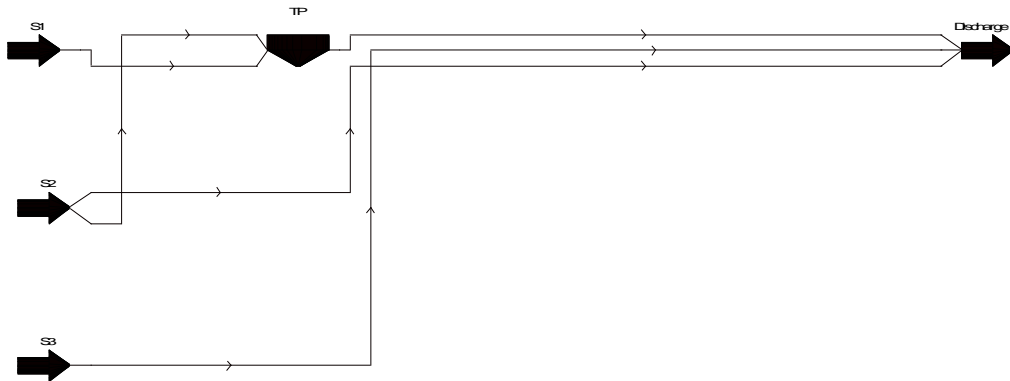
Επίσης πρέπει να υπολογίσουμε τη συνολική μάζα του ρυπαντή που μεταφέρει κάθε ρεύμα αποβλήτου. Ο υπολογισμός γίνεται με βάση την σχέση (1). Για το πρώτο ρεύμα (S1) η μάζα είναι ίση με $m_{c_{s1}} = 9200 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$, για το δεύτερο ρεύμα είναι ίση με $m_{c_{s2}} = 2000 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ και για το τρίτο ρεύμα είναι ίση με $m_{c_{s3}} = 200 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$.

Τα παραπάνω δεδομένα τα εισάγουμε στο GAMS, και παράγουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Αν τρέξουμε το αρχείο GAMS, προκύπτει ότι η ελάχιστη παροχή του ρεύματος επεξεργασίας είναι $Ft_j = 60t \cdot \text{h}^{-1}$.

Επίσης αν προσπαθήσουμε να λύσουμε το ίδιο πρόβλημα χρησιμοποιώντας το WATER, προκύπτει ότι η τιμή της ελάχιστης παροχής του ρεύματος είναι $Ft_j = 60t \cdot h^{-1}$.

Στην συνέχεια παραθέτουμε το δίκτυο των ρευμάτων, που προκύπτει με χρήση του WATER (Σχήμα 47).

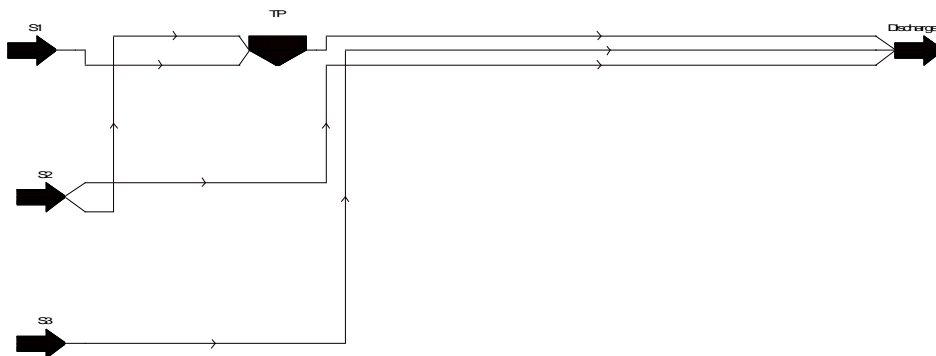


Σχήμα 47. Δίκτυο που προκύπτει με χρήση του WATER.

Ας αναλύσουμε τώρα την περίπτωση που δίνεται ο λόγος απομάκρυνσης $R=95\%$. Στην περίπτωση αυτή πρέπει, στο εσωτερικό του κώδικα να ορίσουμε εκ νέου τα διαστήματα συγκέντρωσης, καθώς και τον λόγο απομάκρυνσης. Η διαφορά σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση είναι ότι τα διαστήματα συγκέντρωσης που ορίζουμε είναι τα πραγματικά. Αν πραγματοποιήσουμε τις αλλαγές αυτές στον κώδικα και τον τρέξουμε το αποτέλεσμα που θα προκύψει θα είναι $Ft_j = 60t \cdot h^{-1}$.

Τέλος μπορούμε να επαληθεύσουμε τα αποτελέσματά μας και με το WATER. Αν εισάγουμε τα δεδομένα του προβλήματος στο WATER, τότε το αποτέλεσμα που θα προκύψει θα είναι ίδιο με τις προηγούμενες δύο μεθόδους, δηλαδή $Ft_j = 60t \cdot h^{-1}$.

Παρακάτω παραθέτουμε το δίκτυο των ρευμάτων που προκύπτει (Σχήμα 48).



Σχήμα 48. Δίκτυο που προκύπτει με χρήση του WATER.

Τελικό συμπέρασμα που προκύπτει από τα δύο προηγούμενα παραδείγματα είναι πως το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στο GAMS, προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δύο μέχρι τώρα υπάρχουσες μεθόδους για τον υπολογισμό της ελάχιστης παροχής ενός ρεύματος επεξεργασίας.

Παράδειγμα 6.3

Στο παράδειγμα που ακολουθεί, έχουμε ένα πρόβλημα στο οποίο δίνονται δύο ρεύματα υγρών αποβλήτων, που μεταφέρουν τον ίδιο ρυπαντή, και δύο ρεύματα επεξεργασίας. Τα δεδομένα για κάθε ρεύμα δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 6.2).

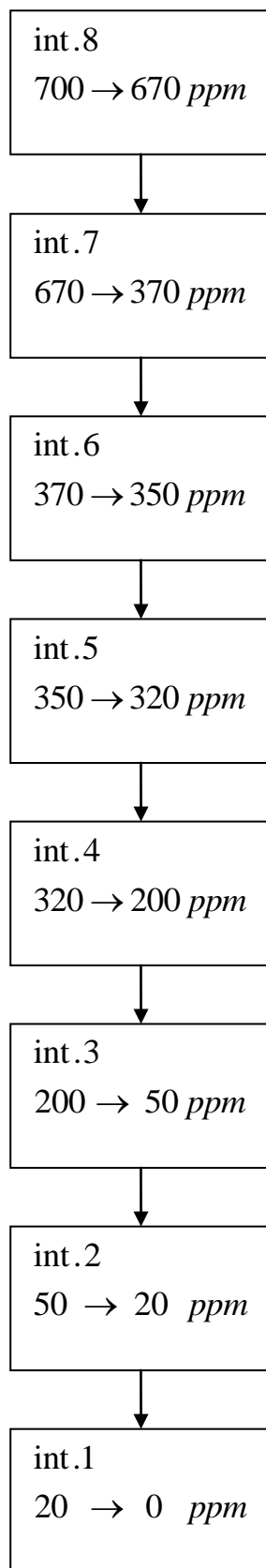
Πίνακας 7. Παράδειγμα για μοναδικό συστατικό και για δύο ρεύματα επεξεργασίας.

Contaminant	Streams C_{in}		Treatment Processes				C_e	Target(t/h)
	S1	S2	TP-I		TP-II			
A	350	700	C_{out}	$C_{in_{max}}$	C_{out}	$C_{in_{max}}$	50	C_{out}
			200	1000	30	400		126.5
Flowrate(t/h)	80	40						

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα συνδυάζουμε τα δύο ρεύματα επεξεργασίας και προσπαθούμε να υπολογίσουμε την ελάχιστη παροχή αυτών, έτσι ώστε να επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα, το οποίο είναι να μειώσουμε την συγκέντρωση των δύο ρευμάτων αποβλήτων (S1) και (S2) σε όριο κατάλληλο για την αποδέσμευση τους στο περιβάλλον $C_e = 50 \text{ ppm}$.

Όπως και στην απλή περίπτωση μοναδικού ρεύματος επεξεργασίας που αντιμετωπίσαμε προηγουμένως, έτσι και εδώ πρέπει να παράγουμε τα εικονικά διαστήματα συγκεντρώσεων, τα οποία προκύπτουν αν αφαιρέσουμε από τις συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου των ρευμάτων την συγκέντρωση εξόδου του δεύτερου ρεύματος επεξεργασίας $C_{out} = 30 \text{ ppm}$.

Αν εφαρμόσουμε αυτήν την διαδικασία θα προκύψουν οχτώ εικονικά διαστήματα συγκεντρώσεων, τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 49).



Σχήμα 49. “Καταρράκτης” εικονικών διαστημάτων συγκέντρωσης.

Από το πρώτο ρεύμα αποβλήτων (S1), έχουμε μεταφορά μάζας στο δεύτερο, στο τρίτο, στο τέταρτο και στο πέμπτο διάστημα συγκέντρωσης.

Από το δεύτερο ρεύμα (S2), έχουμε μεταφορά μάζας από το δεύτερο έως και το όγδοο διάστημα συγκέντρωσης.

Από κανένα ρεύμα δεν έχουμε μεταφορά μάζας στο πρώτο διάστημα συγκέντρωσης.

Επίσης, επειδή έχουμε δύο ρεύματα επεξεργασίας, τα οποία έχουν διαφορετικά όρια συγκέντρωσης, πρέπει να ορίσουμε από ποια διαστήματα συγκέντρωσης έχουμε μεταφορά μάζας στο πρώτο και στο δεύτερο ρεύμα επεξεργασίας αντίστοιχα. Πιο αναλυτικά έχουμε ότι από το δεύτερο και από το τρίτο διάστημα συγκέντρωσης δεν έχουμε μεταφοράς μάζας στο πρώτο ρεύμα επεξεργασίας, διότι το κατώτερο όριο συγκέντρωσης αυτού είναι τα 200 ppm. Επίσης, από τα διαστήματα επτά και οχτώ δεν έχουμε μεταφορά μάζας στο δεύτερο ρεύμα επεξεργασίας, διότι το ανώτερο όριο συγκέντρωσης αυτού είναι τα 400 ppm (370 ppm, εικονική συγκέντρωση). Στο εύρος συγκεντρώσεων 370 ppm → 200 ppm, έχουμε αλληλοεπικάλυψη των δύο ρευμάτων επεξεργασίας, οπότε έχουμε μεταφορά μάζας από το τέταρτο, το πέμπτο και το έκτο διάστημα συγκέντρωσης και στα δύο ρεύματα επεξεργασίας. Τέλος, δεν έχουμε καθόλου μεταφορά μάζας από το πρώτο διάστημα συγκέντρωσης στα δύο ρεύματα επεξεργασίας. Όλοι αυτοί οι συσχετισμοί ρευμάτων-διαστημάτων συγκέντρωσης, εισάγονται στο GAMS με την μορφή περιορισμών.

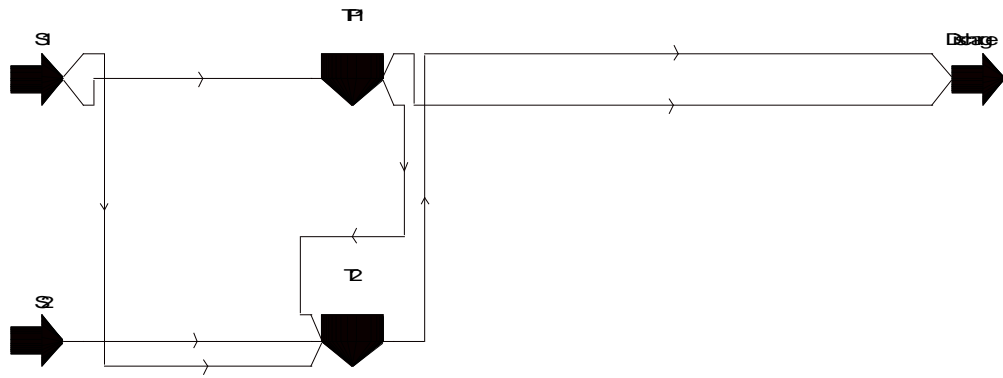
Επίσης, να υπενθυμίσουμε ότι πρέπει να υπολογίσουμε τη συνολική μάζα ρυπαντή που μεταφέρει κάθε ρεύμα αποβλήτου.

Ο υπολογισμός γίνεται με βάση την σχέση (1). Για το πρώτο ρεύμα (S1) η μάζα είναι ίση με $m_{c_{s1}} = 24000 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ και για το δεύτερο ρεύμα είναι ίση με $m_{c_{s2}} = 26000 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$.

Τα παραπάνω δεδομένα τα εισάγουμε στο GAMS, και παράγουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αν τρέξουμε το αρχείο GAMS, προκύπτει ότι η συνδυασμένη ελάχιστη παροχή των δύο ρευμάτων επεξεργασίας είναι $Ft_j = 126.5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$. Η παροχή του πρώτου ρεύματος επεξεργασίας θα είναι $Ft_{TP-I} = 20.8 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$, και του δεύτερου ρεύματος επεξεργασίας $Ft_{TP-II} = 105.7 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$.

Ας προσπαθήσουμε τώρα να λύσουμε το ίδιο πρόβλημα χρησιμοποιώντας το WATER. Η συνδυασμένη ελάχιστη παροχή των δύο ρευμάτων θα είναι ίση με $Ft_j = 127.5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$. Η παροχή του πρώτου ρεύματος επεξεργασίας θα είναι $Ft_{TP-I} = 21.7 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$, και του δεύτερου ρεύματος επεξεργασίας $Ft_{TP-II} = 105.8 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$.

Στην συνέχεια παραθέτουμε το δίκτυο των ρευμάτων, που προκύπτει με χρήση του WATER (Σχήμα 50).



Σχήμα 50. Δίκτυο ρευμάτων που προκύπτει με χρήση του WATER.

Παρατηρούμε, λοιπόν ότι, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το GAMS, προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια τα αποτελέσματα που παράγονται με τη χρήση του WATER.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζεται μια καινούργια μεθοδολογία για τον υπολογισμό της παροχής ρευμάτων επεξεργασίας. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για προβλήματα που αναφέρονται σε επεξεργασία ρευμάτων αποβλήτων που φέρουν τον ίδιο ρυπαντή, κάνοντας χρήση ενός ή δύο ρευμάτων επεξεργασίας.

Τα αποτελέσματα που παρήχθησαν με το μαθηματικό μοντέλο που προτάθηκε, προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια τα αποτελέσματα που προκύπτουν αν επιλύσουμε τα ίδια προβλήματα με τις είδη υπάρχουσες μεθοδολογίες.

Το κυριότερο πλεονέκτημα αυτής της μεθοδολογίας είναι ότι δεν την επηρεάζει από ποια διεργασία επεξεργασίας προέρχεται το εκάστοτε ρεύμα υγρών αποβλήτων, ουσιαστικά λειτουργεί σαν “black box”, δηλαδή αν είναι γνωστά δεδομένα για την παροχή και τις συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου του κάθε ρεύματος, αυτό αρκεί για να πραγματοποιηθεί προσέγγιση της επιθυμητής λύσης.

Η συγκεκριμένη μελέτη αποτελεί απλά την αρχή, για την επίλυση ενός τόσο σημαντικού προβλήματος, όπως είναι αυτό της εξοικονόμησης νερού στον βιομηχανικό τομέα, και όχι μόνο.

Προτάσεις για συνέχιση της μελέτης θα ήταν η επεξεργασία του είδη προτεινόμενου αλγορίθμου, έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε προβλήματα με ρεύματα υγρών αποβλήτων που μεταφέρουν τουλάχιστον δύο υγρά απόβλητα, και επεξεργασία αυτών με ένα ή και περισσότερα ρεύματα επεξεργασίας.

1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Smith R. (2005) *Chemical Process Design and Integration*. England: John Wiley & Sons Ltd, 2nd Edition, Chapter 26, pp. 581-623.
- 2) Metcalf & Eddy, Inc. Tchobanoglous G., Burton F.L. & Stensel H.D. (ed.) (2003) *Μηχανική Υγρών Αποβλήτων: Επεξεργασία & Επαναχρησιμοποίηση*. Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 4^η Έκδοση, Τόμος Β', Κεφάλαιο 13.
- 3) A. Alva-Argáez, A.C. Kokossis, R. Smith, 1998, Wastewater minimisation of industrial systems using an integrated approach, *Computers and Chemical Engineering*, 22, S741-S744
- 4) M. Bagajewicz, 2000, A review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants, *Computers and Chemical Engineering*, 24, 9-10, 2093-2113
- 5) P. Castro, H. Matos, A. Novais, 2007, Heuristic procedure for the optimal design of wastewater treatment systems, *Resources, Conservation and Recycling*, 50, 158–185
- 6) M. El-Halwagi and V. Manousiouthakis, 1989, Synthesis of Mass Exchanger Networks, *American Institute of Chemical Engineering Journal*, 35, 8, 1233–1244
- 7) D.C.Y. Foo, 2009, State of the art review of pinch analysis techniques for Water network synthesis, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48, 11, 5125-5159
- 8) W.C.J. Kuo and R. Smith, 1997, Effluent treatment system design *Chemical Engineering Science*, 52, 23, 4273-4290
- 9) A. Nikolakopoulos, P. Karagiannakis, A. Galanis, A. Kokossis, 2012, A water saving methodology for the efficient development of biorefineries, *Computer Aided Chemical Engineering*, 30, 7-10
- 10) A. Nikolakopoulos, A. Galanis, P. Karagiannakis, A. Kokossis, 2013, An Integrated Targeting and Design Method for Saving Water in 2nd Generation Biorefineries, *AIChE 2013 - 2013 AIChE Annual Meeting, Conference Proceedings*
- 11) S. A. Papoulias and I. E. Grossman, 1983, A structural optimization approach in process synthesis II: Heat recovery networks, *Computer Chemical Engineering*, 7, 6, 707–721
- 12) Y.P. Wang and R. Smith, 1994, Design of distributed effluent treatment systems, *Chemical Engineering Science*, 49, 18, 3127-3145
- 13) Zhang C. (2006) *An assessment of centralized and decentralized wastewater reclamation systems in Beijing*. SWITCH: Managing Water for the City of the Future.
- 14) *Wikipedia, the Free Encyclopedia*, http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page, (accessed 15/11/2013).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Παρακάτω παρατίθεται ο κώδικας σε GAMS που υλοποιεί το μαθηματικό μοντέλο για την ελαχιστοποίηση της παροχής του ρεύματος υγρών αποβλήτων προς επεξεργασία για ένα συστατικό (ο κώδικας αναφέρεται στην περίπτωση του παραδείγματος του πίνακα 4).

sets

- *i* operations /1*3/
- *k* intervals /1*4/
- *opk* (*i,k*) intervals - *k* - receiving contaminant from operation - *i* -. /1.3, 2.(2,3), 3.(1,2,3) /
- *op* (*i,k*) intervals - *k* - NOT!! receiving contaminant from operation - *i* -. /1.(1,2,4), 2.(1,4), 3.4 /

Στο *sets* ορίζονται ο αριθμός των ρευμάτων νερού, πόσα είναι τα διαστήματα συγκέντρωσης, καθώς και σε ποιά διαστήματα συγκέντρωσης μεταφέρεται μάζα από τα ρεύματα και σε ποιά όχι.

parameter

- *mc*(*i*) contaminant mass in process *i* /1 200, 2 2000, 3 9200/
- *Cin_max*(*i*) maximum allowed inlet concentration in process *i* /1 10, 2 10, 3 10/
- *Cout_max*(*i*) maximum allowed outlet concentration in process *i* /1 30, 2 90, 3 240/
- *Clo*(*k*) lower limit concentrations of concentration intervals /1 90, 2 30, 3 10, 4 0/
- *Cup*(*k*) upper limit concentrations of concentration intervals /1 240, 2 90, 3 30, 4 10/

Στο *parameter* υπολογίζετε η μάζα συστατικού που μεταφέρει κάθε ρεύμα, αναγράφονται οι συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου των ρευμάτων, όπως ορίστηκαν στον πίνακα 4, καθώς και τα διαστήματα συγκεντρώσεων που προκύπτουν.

variables

- **WP(i,k)** Mass load of a contaminant transferred from water-using operation - i - through the concentration interval - k -.
- **Fl(i)** The limiting water flowrate Fl*i* for the water-using operation - i -
- **z**

Στο *variables* ορίζονται ως μεταβλητές, η μάζα συστατικού που μεταφέρεται από κάθε ρεύμα νερού στο εκάστοτε επιτρεπτό διάστημα συγκέντρωσης, η περιοριστική υδατική ευθεία για κάθε ρεύμα (ή οριακή γραμμή παροχής, limiting water flowrate), και η ανεξάρτητη μεταβλητή z η οποία χρησιμοποιείται για την επίλυση του γραμμικού συστήματος.

Equations

- **FlEquation(i)** The limiting water flowrate Fl*i* for the water-using operation - i -
- **WPikEquation1(i,k)** Mass load of a contaminant transferred from water-using operation - i - through the concentration interval - k -.
- **WPikEquation2(i,k)** Mass load of a contaminant transferred from water-using operation - i - through the concentration interval - k -.
- **obj** Dummy objective;

**

- **obj..** $z = e = 5;$
- **FlEquation(i)..** $Fl(i) = e = mc(i) / (C_{out_max}(i) - C_{in_max}(i));$
- **WPikEquation1(i,k)\$(opk(i,k))..** $WP(i,k) = e = Fl(i) * (C_{up}(k) - C_{lo}(k));$
- **WPikEquation2(i,k)\$(op(i,k))..** $WP(i,k) = e = 0;$

Στο *equations* ,το οποίο χωρίζεται σε δύο τμήματα, στο πρώτο τμήμα δηλώνονται τα ονόματα των εξισώσεων και στο δεύτερο παρατίθενται οι μαθηματικές εκφράσεις τους.

- Η obj είναι η συνάρτηση που υπολογίζει την ανεξάρτητη μεταβλητή.
- Η FlEquation(i) είναι η συνάρτηση που υπολογίζει την οριακή γραμμή παροχής. Ο τύπος της δίνεται στο μαθηματικό μοντέλο.
- Η WPikEquation1(i,k)\$(opk(i,k)) είναι η συνάρτηση που υπολογίζει τη μάζα του συστατικού που μεταφέρεται από την διεργασία (i) στο διάστημα συγκέντρωσης (k).
- Η WPikEquation2(i,k)\$(op(i,k))

Τέλος ορίζουμε το όνομα του μοντέλου και τον διαδικασία επίλυσης του προβλήματος, που στην περίπτωση αυτή πρόκειται για γραμμικό πρόβλημα.

- `Model limiting_water_flowrate /all/;`
- `Solve limiting_water_flowrate using Ip minimizing z;`

Στο πρώτο μέρος του κώδικα, που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της οριακής γραμμής παροχής (limiting water flowrate) κάθε ρεύματος, η μόνη διαφορά σε σχέση με τον κώδικα του παραρτήματος (I) είναι η αλλαγή στις τιμές των συγκεντρώσεων εισόδου και εξόδου, και στα διαστήματα συγκεντρώσεων. Οι τιμές που θα προκύψουν, για την οριακή γραμμή παροχής κάθε ρεύματος, θα χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα στο δεύτερο μέρος του κώδικα για τον υπολογισμό της ελάχιστης παροχής του ρεύματος υγρών αποβλήτων.

Παρακάτω παρατίθεται το δεύτερο μέρος του κώδικα, που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ελάχιστης παροχής του ρεύματος υγρών αποβλήτων.

sets

- `kk(k)` subset of intervals for the constraint SMB `/1*4/`
- `j` streams `/1/`

Στο *sets* ορίζονται ο αριθμός των διαστημάτων συγκέντρωσης που εξαρτώνται από το ισοζύγιο μάζας και ο αριθμός των καθαρών πηγών νερού, που στην περίπτωση αυτή είναι τέσσερα τα διαστήματα και μία η πηγή.

parameter

- `LU(j)` Upper bound for the flowrate of freshwater stream - j -. `/1 150000/`
- `cost(j)` unit cost of freshwater source j `/1 1/`

Στο *parameter* ορίζονται η μέγιστη τιμή ροής που μπορεί να πάρει η καθαρή πηγή νερού και η μονάδα κόστους της καθαρής πηγής νερού. Η μέγιστη τιμή ροής ορίστηκε στις $150000 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ και το κόστος μοναδιαίο.

variables

- `Total_cost` the total cost for the use of freshwater
- `L(j)` Inlet freshwater flows for the system
- `r(i,k)` Residual mass of the contaminant from rich stream - i - in interval - k - ($\text{g} \cdot \text{h}^1$).
- `W(i,k,j)` Mass load of contaminant exchanged between water-using operation - i - and freshwater source - j - in each interval - k -.
- `WW(j,k)` Mass load transferred to the water stream - j - in concentration interval - k -.

- `aux_var1(i)`

Στο *variables* ορίζονται οι μεταβλητές του προβλήματος.

- Η `Total_cost` είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή
- Η `L(j)` είναι παροχή εισόδου του φρέσκου νερού
- Η `r(i,k)` είναι η μάζα συστατικού που περισεύει από το πλούσιο ρεύμα (i) στο διάστημα (k)
- Η `W(i,k,j)` είναι η μάζα συστατικού που ανταλλάσσεται μεταξύ του ρεύματος της διεργασίας (i) και του ρεύματος καθαρού νερού (j) στο διάστημα (k)
- Η `WW(j,k)` είναι η μάζα συστατικού που μεταφέρεται στο ρεύμα καθαρού νερού (j) στο διάστημα συγκέντρωσης (k).
- Η `aux_var1(i)` είναι μία μεταβλητή που ελέγχει αν τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τον υπολογισμό της περισσευούμενης μάζας σε κάθε διάστημα συγκέντρωσης είναι σωστά ή όχι.

Equations

- `ObjFun` Objective function (minimum freshwater cost)
- `SMB(i,kk)` Successive material balances for each water-using operation - i - in each interval - k - (constraint set (1)from paper).
- `SMBint_0(i)` Successive material balances for each water-using operation - i - in interval - 0 - (constraint missing from paper).
- `ConstSet2(j,k)` Constraint for mass load transferred to the water stream - j - in concentration interval - k - (constraint set (2)from paper).
- `ConstSet3(j,k)` Constraint for mass load transferred to the water stream - j - in concentration interval - k - (constraint set (3)from paper).;
- `auxEq1(i)` Auxiliary equation to check the residuals;

- `ObjFun.. Total_cost =e= sum(j, L(j)*cost(j));`
- `SMB(i,kk).. r(i,kk) - r(i,kk-1) + sum(i, W(i,kk,j)) =e= WP(i,kk);`
- `SMBint_0(i).. + r(i,'1') + sum(j, W(i,'1',j)) =e= WP(i,'1');`
- `ConstSet2(j,k).. sum(i, W(i,k,j)) =l= WW(j,k);`
- `ConstSet3(j,k).. WW(j,k) =e= L(j)*(Cup(k) - Clo(k));`
- `auxEq1(i).. aux_var1(i) =e= sum(j, W(i,'1',j))`

* Bounds

- $r.lo(i,k) = 0;$
- $L.up(j) = LU(j);$
- $L.lo(j) = 0;$

*fixed values

- $WP.fx(op) = 0;$
- $r.fx(i,'1') = 0;$
- $r.fx(i,'4') = 0;$

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το τμήμα *Equations* του κώδικα χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος δηλώνονται τα ονόματα των εξισώσεων και στο δεύτερο δίνονται οι μαθηματικές τους εκφράσεις.

- Η ObjFun είναι η συνάρτηση που μας προσδιορίζει την τιμή που θα πάρει η ανεξάρτητη μεταβλητή, σύμφωνα με τον τύπο (LP1) που αναφέρθηκε προηγουμένως στο μαθηματικό μοντέλο.
- Η SMB(i,kk) είναι η συνάρτηση που αναφέρεται στα διαδοχικά ισοζύγια μάζας στα διάφορα διαστήματα συγκέντρωσης. Ο τύπος της δίνεται από την εξίσωση (1), που αναφέρθηκε προηγουμένως στο μαθηματικό μοντέλο.
- Η SMBint_0(i) είναι το ισοζύγιο μάζας για το πρώτο διάστημα συγκέντρωσης. Ο τύπος της δίνεται από την εξίσωση (1) στο μαθηματικό μοντέλο.
- Ο ConstSet2(j,k) είναι ο περιορισμός (2) που αναφέρεται στο μαθηματικό μοντέλο.
- Ο ConstSet3(j,k) είναι ο περιορισμός (3) που αναφέρεται στο μαθηματικό μοντέλο.
- Ο auxEq1(i) είναι νέος περιορισμός που εισήχθη στον κώδικα για να ελέγξει αν η περισσευούμενη μάζα συστατικού στο πρώτο διάστημα συγκέντρωση έχει υπολογιστή σωστά.

Τα *Bounds* και *fixed values* είναι κάποιοι επιπλέον περιορισμοί προκειμένου να δουλέψει σωστά ο κώδικας.

- Ο $r.lo(i,k) = 0$ σημαίνει πως η ελάχιστη μάζα συστατικού που μπορεί να περισσεύει από κάθε διάστημα συγκέντρωσης είναι μηδέν, και δεν μπορεί να πάρει αρνητική τιμή.
- Ο $L.up(j) = LU(j)$ δείχνει ότι το $L.up(j)$ ισούται με την μέγιστη ροή του φρέσκου νερού, που ορίστηκε στο *parameter*.

- $O L.lo(j) = 0$ σημαίνει ότι η τιμή της παροχής του φρέσκου νερού δεν μπορεί να πάρει αρνητική τιμή.
- $O WP.fx(op) = 0$
- $O r.fx(i,'1') = 0$ είναι περιορισμός που δείχνει ότι η περισσευούμενη μάζα συστατικού στο πρώτο διάστημα συγκέντρωσης είναι μηδενική.
- $O r.fx(i,'4') = 0$ είναι περιορισμός που δείχνει ότι η περισσευούμενη μάζα συστατικού στο τέταρτο διάστημα συγκέντρωσης είναι μηδενική. Στο παράδειγμα του πίνακα 1 το τέταρτο διάστημα είναι το τελευταίο διάστημα συγκέντρωσης.

Τέλος ορίζουμε το όνομα του μοντέλου και τον διαδικασία επίλυσης του προβλήματος, που στην περίπτωση αυτή πρόκειται για γραμμικό πρόβλημα.

- `Model Simple_model_fig26_24_optimal /all/;`
- `Solve Simple_model_fig26_24_optimal using lp minimizing Total_cost;`

Για την περίπτωση του παραδείγματος 6.3 αλλάζω τα παρακάτω μέρη του κώδικα:

```
sets
    i operations    /1*2/
    k intervals    /1*8/
*   opk (i,k) intervals - k - receiving contaminant from operation - i -.
/1.(1,2,3) , 2.(1,2) , 3.1/
    opk (i,k) intervals - k - receiving contaminant from operation - i -. /
1.(4,5,6,7), 2.(1,2,3,4,5,6,7)/
*   op (i,k) intervals - k - NOT!! receiving contaminant from operation - i -.
/2.3 , 3.(2,3)/
    op (i,k) intervals - k - NOT!! receiving contaminant from operation - i -.
/1.(1,2,3,8), 2.8/
*****
*****
*****
```

parameter

```
mc(i)    contaminant mass in process i    /1 24000, 2 26000/
```

* $C_{in_max}(i)$ maximum allowed inlet concentration in process i /1 50 , 2 50/

$C_{in_max}(i)$ maximum allowed inlet concentration in process i /1 0 , 2 0/

* $C_{out_max}(i)$ maximum allowed outlet concentration in process i /1 300, 2 600/

$C_{out_max}(i)$ maximum allowed outlet concentration in process i /1 350, 2 700/

$C_{lo}(k)$ lower limit concentrations of concentration intervals /1 670 , 2 370 , 3 350, 4 320, 5 200, 6 50, 7 20, 8 0/

$C_{up}(k)$ upper limit concentrations of concentration intervals /1 700 , 2 670 , 3 370, 4 350, 5 320, 6 200, 7 50, 8 20/

sets

$kk(k)$ subset of intervals for the constraint SMB /2*8/

j streams /1*2/

parameter

$LU(j)$ Upper bound for the flowrate of freshwater stream - j -. /1 150000, 2 150000/

$cost(j)$ unit cost of freshwater source j /1 1, 2 1/

variables

Total_cost the total cost for the use of freshwater

$L(j)$ Inlet freshwater flows for the system

$r(i,k)$ Residual mass of the contaminant from rich stream - i - in interval - k - ($g \cdot h^1$).

$WW(j,k)$ Mass load transferred to the water stream - j - in concentration interval - k -.

aux_var1(i)

positive variable

W(i,k,j) Mass load of contaminant exchanged between water-using operation - i - and freshwater source - j - in each interval - k -.

*fixed values

WP.fx(op) = 0;

*r.fx(i,'1') = 0;

*r.fx(i,'8') = 0;

r.fx(i,'7') = 0;

W.fx('2','1','2')=0;

W.fx('2','2','2')=0;

W.fx('2','6','1')=0;

W.fx('2','7','1')=0;

W.fx('1','6','1')=0;

W.fx('1','7','1')=0;

W.fx(i,'8',j)=0;

*W.fx('2','8','2')=0;

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Παρακάτω παρατίθεται ο κώδικας σε GAMS που υλοποιεί το μαθηματικό μοντέλο για την ελαχιστοποίηση της παροχής του ρεύματος υγρών αποβλήτων προς επεξεργασία για ένα συστατικό (ο κώδικας αναφέρεται στην περίπτωση του παραδείγματος του πίνακα 5).

sets

i operations /1*3/

k intervals /1*4/

opk (i,k) intervals - k - receiving contaminant from operation - i -. /
1.3, 2.(2,3), 3.(1,2,3) /

op (i,k) intervals - k - NOT!! receiving contaminant from operation - i -. /
1.(1,2,4), 2.(1,4), 3.4 /

kk(k) subset of intervals for the constraint SMB /2*4/

j streams /1/

```
*****  
*****  
*****
```

parameter

mc(i) contaminant mass in process i /1 200, 2 2000, 3
9200/

Cin_max_original(i) maximum allowed inlet concentration in process i
/1 20 , 2 20 , 3 20/

Cout_max_original(i) maximum allowed outlet concentration in process i
/1 40 , 2 100 , 3 250/

Clo_original(k) Original lower limit concentrations of concentration intervals
/1 100 , 2 40 , 3 20 , 4 0/

Cup_original(k) Original upper limit concentrations of concentration intervals
/1 250 , 2 100 , 3 40 , 4 20/

RR removal ratio /0.95/

LU(j) Upper bound for the flowrate of freshwater stream - j -. /1
150000/

cost(j) unit cost of freshwater source j /1 1/

variables

WP(i,k) Mass load of a contaminant transferred from water-using operation - i - through the concentration interval - k -.

Fl(i) The limiting water flowrate Fl_i for the water-using operation - i -

Cin_max(i) the min concentr after subtracting the Cout (the crosspoint of the water line with the C axes)

Cout_max(i) the max concentr after subtracting the Cout (the crosspoint of the water line with the C axes)

$C_{lo}(k)$ lower limit concentrations of concentration intervals

$C_{up}(k)$ upper limit concentrations of concentration intervals

C_{in} the inlet concentration of the water stream with min flow

C_{out} the crosspoint of the water line with the C axes

D_{mt} the total mass of contaminant from all the streams

$Total_cost$ the total cost for the use of freshwater

$L(j)$ Inlet freshwater flows for the system

$r(i,k)$ Residual mass of the contaminant from rich stream - i - in interval - k - ($g \cdot h^1$).

$W(i,k,j)$ Mass load of contaminant exchanged between water-using operation - i - and freshwater source - j - in each interval - k -.

$WW(j,k)$ Mass load transferred to the water stream - j - in concentration interval - k -.

Equations

D_{mt_calcul}

$C_{in_max_calcul}(i)$

$C_{out_max_calcul}(i)$

Clo_calcul(k)

Cup_calcul(k)

FliEquation(i) The limiting water flowrate Fli for the water-using operation - i -

WPikEquation1(i,k) Mass load of a contaminant transferred from water-using operation - i - through the concentration interval - k -.

WPikEquation2(i,k) Mass load of a contaminant transferred from water-using operation - i - through the concentration interval - k -.

ObjFun Objective function (minimum freshwater cost)

SMB(i,kk) Successive material balances for each water-using operation - i - in each interval - k - (constraint set (1)from paper).

SMBint_0(i) Successive material balances for each water-using operation - i - in interval - 0 - (constraint missing from paper).

ConstSet2(j,k) Constraint for mass load transferred to the water stream - j - in concentration interval - k - (constraint set (2)from paper).

ConstSet3(j,k) Constraint for mass load transferred to the water stream - j - in concentration interval - k - (constraint set (3)from paper).

RRconstaint_1(j)

RRconstaint_2

RRconstaint_3

RRconstaint_4;

```

*****
*****
*****

```

Dmt_calcul.. Dmt =e= sum(i, mc(i));

Cin_max_calcul(i).. Cin_max(i) =e= Cin_max_original(i) - Cout;

Cout_max_calcul(i).. Cout_max(i) =e= Cout_max_original(i) - Cout;

* Clo_calcul(k).. Clo(k) =e= Clo_original(k) - Cout;

Clo_calcul(k)\$ (ord(k) ne 4).. Clo(k) =e= Clo_original(k) - Cout;

Cup_calcul(k).. Cup(k) =e= Cup_original(k) - Cout;

FliEquation(i).. Fl(i)*(Cout_max_original(i) -
Cin_max_original(i))=e= mc(i);

WPikEquation1(i,k)\$ (opk(i,k)).. WP(i,k) =e= Fl(i)*(Cup(k) - Clo(k));

WPikEquation2(i,k)\$ (op(i,k)).. WP(i,k) =e= 0;

ObjFun.. Total_cost =e= sum(j, L(j)*cost(j));

SMB(i,kk).. r(i,kk) - r(i,kk-1) + sum(j, W(i,kk,j)) =e= WP(i,kk);

SMBint_0(i).. r(i,'1') + sum(j, W(i,'1',j)) =e= WP(i,'1');

ConstSet2(j,k).. sum(i, W(i,k,j)) =l= WW(j,k);

ConstSet3(j,k).. WW(j,k) =e= L(j)*(Cup(k) - Clo(k));

RRconstaint_1(j).. L(j)*(Cin-Cout) =e= Dmt;

RRconstaint_2.. Cout =e= Cin*(1-RR);

RRconstaint_3.. Cin =l= Cout_max_original('3');

RRconstaint_4.. Cout =l= Cin_max_original('3');

* Bounds

r.lo(i,k) = 0;

L.up(j) = LU(j);

L.lo(j) = 0;

Clo.lo(k) = 0;

*fixed values

WP.fx(op) = 0;

```
*r.fx(i,'1') = 0;
```

```
r.fx(i,'4') = 0;
```

```
*****
```

```
Model Simple_model_fig26_24_optimal /all/;
```

```
* Model Simple_model_fig26_24_optimal /ObjFun, SMB, SMBint_0,  
ConstSet2, ConstSet3/;
```

```
Solve Simple_model_fig26_24_optimal using nlp minimizing Total_cost;
```