



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ
ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

**Μέθοδος για την Συγχρονισμένη Επιλογή Διεργασιών Επεξεργασίας
Νερού και Υπολογισμό Στόχων για τις Ροές Καθαρού Νερού και
Ανακύκλωσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ

ΔΗΜΗΤΡΗ ΦΑΣΚΙΩΤΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΚΟΚΟΣΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2015



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ: ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

**Μέθοδος για την Συγχρονισμένη Επιλογή Διεργασιών Επεξεργασίας
Νερού και Υπολογισμό Στόχων για τις Ροές Καθαρού Νερού και
Ανακύκλωσης**

Διπλωματική Εργασία του Σπουδαστή: Φασκιώτη Δημήτρη

Επιβλέπων Καθηγητής: Κοκόσης Αντώνιος, Καθηγητής

Συνεπίβλεψη: Νικολακόπουλος Αθανάσιος

Τριμελής Επιτροπή:

Κοκόσης Αντώνιος

Σαρίμβεης Χαράλαμπος

Παπαγιαννάκος Νικόλαος

ΑΘΗΝΑ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2015

Καθώς η εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας φτάνει στο τέλος της, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Αντώνη Κοκόση και τον κ. Θανάση Νικολακόπουλο για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε καθ'όλη τη διάρκειά της.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα Σχημάτων.....	v
Περιεχόμενα Πινάκων.....	vi
Περίληψη.....	vii
ABSTRACT.....	ix
1. Εισαγωγή.....	1
2. Μέθοδοι Καθαρισμού Λυμάτων.....	5
2.1 Πρωτογενείς Μέθοδοι.....	5
2.2 Δευτερογενείς Μέθοδοι.....	6
2.3 Τριτογενείς Μέθοδοι.....	8
3. Χρήση Νερού.....	10
4. Εξαγωγή Δεδομένων.....	14
5. Στόχευση Μέγιστης Επαναχρησιμοποίησης Νερού.....	17
6. Μετατροπές Στις Διεργασίες Για Ελαχιστοποίηση Κατανάλωσης Νερού.....	22
7. Στόχευση Ελάχιστης Επεξεργασίας Λυμάτων.....	24
8. Μεθοδολογία.....	27
8.1 Μοντέλο Μεταφόρτωσης.....	30
8.1.1 Εξισώσεις Μοντέλου.....	32
8.2 Μοντέλο Επιλογής Διεργασίας Επεξεργασίας.....	33
8.2.1 Εξισώσεις Μοντέλου.....	35
8.3 Σύνδεση Των Δύο Μοντέλων.....	36
9. Εφαρμογή Μεθοδολογίας-Αποτελέσματα.....	39
9.1 Πρώτο Παράδειγμα.....	39
9.2 Δεύτερο Παράδειγμα.....	46
10. Συμπεράσματα.....	56
11. Βιβλιογραφία.....	57
12. Παράρτημα 1:Κώδικας Gams Πρώτου Παραδείγματος.....	58
13. Παράρτημα 2:Κώδικας Gams Δεύτερου Παραδείγματος.....	68

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1: Απλοποιημένο σύστημα νερού	1
Σχήμα 2: Επαναχρησιμοποίηση νερού	2
Σχήμα 3: Αναγέννηση Νερού	2
Σχήμα 4: Ανακύκλωση και αναγέννηση	3
Σχήμα 5: Απλοποιημένο σύστημα νερού με επί μέρους επεξεργασίες	3
Σχήμα 6: Τρόπος μεταφοράς μάζας ρυπαντή και αύξηση συγκέντρωσης νερού	10
Σχήμα 7: Μείωση ροής νερού και αύξηση συγκέντρωσης εξόδου	11
Σχήμα 8: Προφίλ χρήσης νερού σε μέγιστη συγκέντρωση εισόδου και εξόδου	12
Σχήμα 9: Οριακό προφίλ χρήσης νερού	12
Σχήμα 10: Ανάλυση ευαισθησίας για τον προσδιορισμό των οριακών συνθηκών.....	15
Σχήμα 11: Δεδομένα οριακών ροών διεργασιών	18
Σχήμα 12: Οριακή σύνθετη καμπύλη	19
Σχήμα 13: Ελαχιστοποίηση ροής νερού	19
Σχήμα 14: Αναπαράσταση τρόπου διαχωρισμού λυμάτων.....	20
Σχήμα 15: Παράσταση περισσότερων κόμβων ανάσχεσης.....	21
Σχήμα 16: Ρεύματα λυμάτων και οι συγκεντρώσεις τους	24
Σχήμα 17: Σύνθετη καμπύλη λυμάτων.....	25
Σχήμα 18: Ελάχιστη ροή για τις γραμμές επεξεργασίας.....	25
Σχήμα 19: Μη εφικτή περιοχή επεξεργασίας	26
Σχήμα 20: Διαστήματα συγκεντρώσεων	31
Σχήμα 21: Τρόπος μεταφοράς μάζας στο διάστημα συγκέντρωσης k	31
Σχήμα 22: Μετατόπιση συγκεντρώσεων	34
Σχήμα 23: Αντεστραμμένος καταρράκτης.....	35
Σχήμα 24: Σύστημα νερού πρώτου παραδείγματος	39
Σχήμα 25: Διαστήματα συγκεντρώσεων πρώτου παραδείγματος	40
Σχήμα 26:Κόμβοι ανάσχεσης πρώτου παραδείγματος	41
Σχήμα 27: Ρεύματα λυμάτων	42
Σχήμα 28: Διαστήματα συγκεντρώσεων με τη συγκέντρωση περιβάλλοντος	43
Σχήμα 29: Κόστος συναρτήσεως της ροής ανακύκλωσης.....	45
Σχήμα 30: Ροή φρέσκου νερού συναρτήσεως της ροής ανακύκλωσης.....	45
Σχήμα 31: Σύστημα νερού δεύτερου παραδείγματος	47
Σχήμα 32: Διαστήματα συγκεντρώσεων δεύτερου παραδείγματος	48
Σχήμα 33: Κόμβοι ανάσχεσης δεύτερου παραδείγματος.....	49
Σχήμα 34: Ρεύματα λυμάτων	50
Σχήμα 35: Διαστήματα συγκεντρώσεων μαζί με τη συγκέντρωση περιβάλλοντος	51
Σχήμα 36: Κόστος συναρτήσεως της ροής ανακύκλωσης.....	54
Σχήμα 37: Ροή φρέσκου νερού συναρτήσεως της ροής ανακύκλωσης.....	54

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Ενδείξεις για την ποιότητα των λυμάτων ανάλογα με τις διεργασίες	8
Πίνακας 2: Δεδομένα συστήματος τεσσάρων διεργασιών.....	17
Πίνακας 3: Ροές νερού ανά διεργασία.....	18
Πίνακας 4: Δεδομένα διεργασιών χρήσης νερού πρώτου παραδείγματος	39
Πίνακας 5: Αποτελέσματα πρώτου μοντέλου.....	41
Πίνακας 6: Δεδομένα επεξεργασίας λυμάτων πρώτου παραδείγματος.....	42
Πίνακας 8: Αποτελέσματα επεξεργασίας λυμάτων	44
Πίνακας 9: Αποτελέσματα ροής φρέσκου νερού και κόστους για διάφορες τιμές ροής ανακύκλωσης	44
Πίνακας 10: Βέλτιστα αποτελέσματα	46
Πίνακας 11: Δεδομένα διεργασιών χρήσης νερού δεύτερου παραδείγματος	46
Πίνακας 12: Αποτελέσματα πρώτου μοντέλου	49
Πίνακας 13: Δεδομένα επεξεργασίας λυμάτων δεύτερου παραδείγματος.....	50
Πίνακας 14: Αποτελέσματα επεξεργασίας λυμάτων	52
Πίνακας 15: Αποτελέσματα ροής φρέσκου νερού και κόστους για διάφορες τιμές ροής ανακύκλωσης	53
Πίνακας 16: Βέλτιστα αποτελέσματα	55

Περίληψη

Το νερό αποτελεί ένα φυσικό πόρο με πολύ μεγάλη περιβαλλοντική, κοινωνική και οικονομική σημασία. Στη σημερινή εποχή έχει γίνει αισθητή η ανάγκη για την ανάπτυξη μεθοδολογιών και τεχνολογιών για την ελαχιστοποίηση της χρήσης του αλλά και της επεξεργασίας του ώστε να μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί χωρίς να υπάρχει ανάγκη για χρήση νέας ποσότητας καθαρού νερού.

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μίας μεθοδολογίας για την εύρεση της βέλτιστης τιμής ροής ανακυκλοφορίας ελαττώνοντας το συνολικό κόστος στο ελάχιστο σε ένα σύστημα νερού στο οποίο γίνεται χρήση φρέσκου νερού αλλά και ταυτόχρονα καθαρισμός του με διεργασίες επεξεργασίας μετά τη χρησιμοποίησή του. Η διαχείριση του νερού με σκοπό την ελαχιστοποίηση του μπορεί να γίνει γενικά με τρεις τρόπους: με ανακυκλοφορία, με επαναχρησιμοποίηση και με αναγέννηση. Στη παρούσα εργασία εξετάστηκαν τρόποι υπολογισμού των στόχων ελάχιστης χρήσης καθαρού νερού, που προκύπτουν από επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση. Εξετάστηκε επίσης η ταυτόχρονη επιλογή των οικονομικότερων διεργασιών επεξεργασίας νερού και οι στόχοι για τις ροές ρευμάτων νερού που υπόκεινται σε επεξεργασία.

Αρχικά παρουσιάζονται κάποιες γενικές πληροφορίες οι οποίες αφορούν τις μεθόδους επεξεργασίας των λυμάτων, τους δείκτες που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγησή τους καθώς και τρόποι χρήσης του νερού για την επίτευξη μέγιστης επαναχρησιμοποίησης αλλά και ελάχιστης επεξεργασίας εξασφαλίζοντας τον επιθυμητό στόχο.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία μεθοδολογία που βασίζεται στη γραφική εύρεση των κόμβων ανάσχεσης και υπολογισμού της ελάχιστης οριακής ροής με τη χρήση των γραμμών παροχής νερού και της οριακής σύνθετης καμπύλης που δημιουργείται από τις διεργασίες χρήσης νερού.

Η μεθοδολογία συμπληρώνεται με τη βοήθεια δύο υπαρχόντων μοντέλων. Το μοντέλο μεταφόρτωσης και το μοντέλο επιλογής διεργασίας επεξεργασίας. Με τη χρήση του μοντέλου μεταφόρτωσης υπολογίζεται η ροή φρέσκου νερού που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών του συστήματος και το κόστος αυτής. Με το μοντέλο επιλογής διεργασιών επεξεργασίας, επιλέγονται οι διεργασίες οι οποίες καταφέρνουν με το ελάχιστο δυνατό κόστος να φτάσουν την συγκέντρωση των λυμάτων του μοντέλου μεταφόρτωσης στην υποχρεωτική συγκέντρωση απόθεσης του περιβάλλοντος.

Με τη χρήση αυτής της μεθοδολογίας υπολογίζεται η ροή ανακυκλοφορίας που τροφοδοτείται από το μοντέλο επιλογής διεργασιών επεξεργασίας με την οποία ελαχιστοποιείται το κόστος. Από τη στιγμή που επιτυγχάνεται το ελάχιστο κόστος, οποιαδήποτε επιπλέον ποσότητα δοθεί στο σύστημα από τη ροή ανακύκλωσης δεν συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς καθώς αποτελεί μία πλεονάζουσα ποσότητα. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζονται οι βέλτιστες ροές και τα βέλτιστα κόστη.

Λέξεις Κλειδιά

Ανάλυση Κόμβου Ανάσχεσης, Υδατική Ολοκλήρωση, Μαθηματική Μοντελοποίηση,
Μοντέλο Μεταφόρτωσης, Μοντέλο Επιλογής Διεργασίας Επεξεργασίας

Title

Method for the Synchronized Selection of Water Treatment Processes and Targeting of Clear Water and Recycle Flows

ABSTRACT

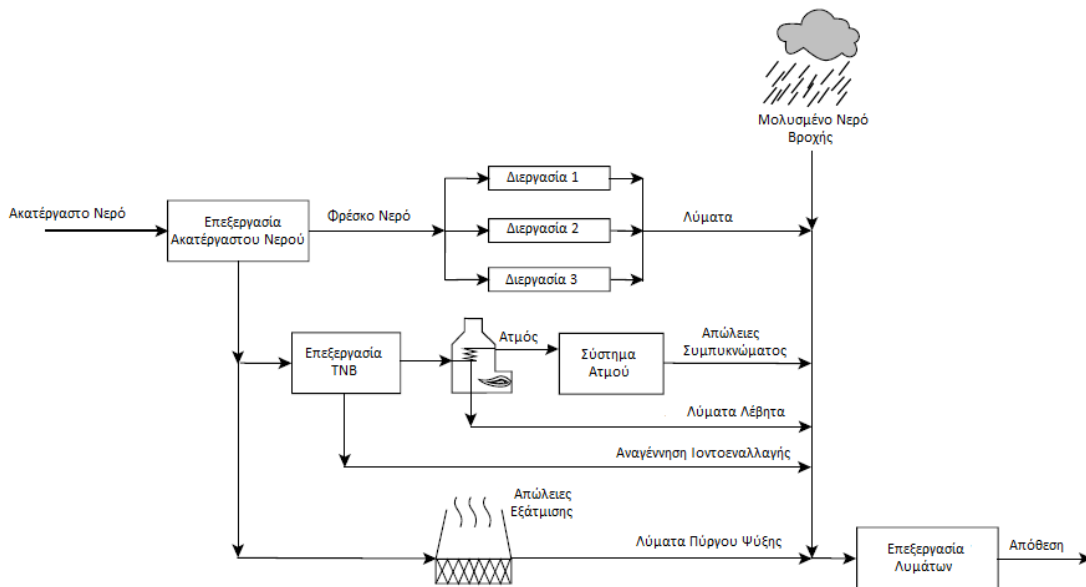
The chemical industry is facing an increasingly stringent legislative framework on discharge limits, while fresh water resources are rapidly depleting. On the other hand industries are struggling to operate in the most economic way. Overall costs depend on the fresh water requirements, the selection of the appropriate technologies for waste treatment, the flowrates of the treated effluents and the possibilities for water reuse and recycle. Prior to detailed designs it is useful to have an overall picture of the maximum potential of the system in terms of clear water consumption, treatment processes to integrate, the minimum wastewater flowrate and maximum reuse and recycle (Kuo and Smith, *Chemical Engineering Science*, 52, 23, 4273-4290 1997). The possibility of reuse and recycle increases significantly the potential for water savings. Graphical targeting methods (Wang and Smith, *Chemical Engineering Science*, 49, 18, 3127-3145 1994) do not offer a holistic approach to the water integration problem that could take into account the recycle option for the minimization of fresh water intake and synchronously deal with the selection of the most appropriate treatment technologies among alternative options and the production of targets for multiple treatment flowrates. Furthermore, shortcut models for synchronized water targeting and selection of treatment processes are absent from literature (Foo, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48, 11, 5125-5159 2009). The present work integrates the extension of the transshipment models of (Nikolakopoulos, et al, *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 34, pp. 381-386, 2014.), presented in (Nikolakopoulos and Kokossis, *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 37, pp. 1091-1096, 2015), into a closed loop iterative procedure that selects treatment processes, targets the minimum treatment flowrates and at the same time calculates the optimal recycle rates and fresh water requirements ahead of detailed design. The novelty and advantage of the proposed method is that it assesses types and capacities of treatment processes simultaneously to calculating optimal recycle flows, further ensuring that any process configuration within the approved set of design features will satisfy the system's constraints. The proposed approach addresses targeting problems for treatment systems with fixed outlet concentration. It adopts the concept of concentration interval diagrams proposed for mass exchange networks (El-Halwagi and Manousiouthakis, *AIChE Journal*, vol. 35(8), 1233-1244, 1989.), and the transshipment logistics model adjusted to heat exchange network design (Papoulias and Grossman, *Computer Chemical Engineering*, vol. 7(6), 707-721, 1983). The methodology has been tested successfully on problems of systems with various water using operations and treatment technologies producing valid selection of treatment processes and treatment flows together with optimal targets for fresh water and recycle flows.

Key Words

Pinch Analysis, Water Integration, Mathematical Modelling, Transshipment Model, Screening Treatment Model

1. Εισαγωγή

Στο παρελθόν το νερό θεωρούνταν ένας ανεξάντλητος πόρος με πολύ μικρό κόστος. Πλέον είναι αντιληπτός ο κίνδυνος που υπάρχει από την υπερβολική άντληση νερού για το περιβάλλον. Σε κάποιες περιοχές, η μελλοντική αύξηση χρήσης νερού έχει απαγορευτεί. Παράλληλα, η θέσπιση νέων κανονισμών για τα όρια μόλυνσης που μπορεί να έχει μία ποσότητα νερού όταν καταλήγει στο περιβάλλον, έχουν προκαλέσει την αύξηση του κόστους των διεργασιών καθαρισμού του με πολύ μικρό ή και καθόλου κέρδος στο τέλος. Στο Σχήμα 1 φαίνεται ένα απλοποιημένο σύστημα νερού για περιοχή.



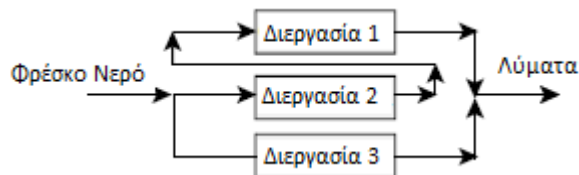
Σχήμα 1: Απλοποιημένο σύστημα νερού

Το νερό εισέρχεται στο περιβάλλον που θα χρησιμοποιηθεί. Αρχικά μπορεί να χρειαστεί να υποστεί μία μικρή διεργασία που μπορεί να είναι τόσο απλή όπως η συλλογή κόκκων άμμου που μπορεί να περιέχει. Το νερό χρησιμοποιείται σε διάφορες διεργασίες για καθαρισμό, σαν διαλύτης ή σαν μέσο για την πραγματοποίηση μίας αντίδρασης. Με αυτό το τρόπο το νερό μολύνεται και στη συνέχεια διώχνεται στο περιβάλλον. Το νερό χρησιμοποιείται επίσης στο σύστημα παραγωγής ατμού αλλά προτού χρησιμοποιηθεί υφίσταται κατεργασία προκειμένου να αφαιρεθούν πιθανές ποσότητες στερεών, διαλυτοποιημένων αλάτων ή και αερίων. Ο ατμός που παράγεται κατανέμεται στις διάφορες διεργασίες ενώ ένα μέρος του συμπυκνώματός του φεύγει σαν λύμα. Είναι επίσης πιθανή η χρήση νερού χωρίς ιόντα. Το μέρος που γίνεται ο απαιονισμός του νερού χρειάζεται στη συνέχεια να ξαπλωθεί προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ξανά με αποτέλεσμα νέα ποσότητα να παράγεται σαν λύμα. Τέλος νερό χρησιμοποιείται στα συστήματα ψύξης με ατμό. Όλα τα λύματα που παράγονται μαζί με το νερό της βροχής αναμιγνύονται και πηγαίνουν για καθαρισμό προτού χυθούν στο περιβάλλον. Εάν η ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται καταφέρει να μειωθεί τότε θα μειωθεί και το κόστος για το νερό που παρέχεται καθώς και το κόστος για την επεξεργασία του. Για αυτό το λόγο υπάρχει

ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη μείωση τόσο της κατανάλωσης ποσότητας φρέσκου νερού στις διεργασίες όσο και στην κατεργασία του μολυσμένου νερού.

Τρόποι Χρήσης Νερού

Το νερό που χρησιμοποιείται στις διεργασίες δεν είναι απαραίτητο να χυθεί στο περιβάλλον. Υπάρχουν τρόποι για χρησιμοποιηθεί ξανά. Ο πιο απλός τρόπος είναι η χρήση του ίδιου νερού όχι μόνο σε μία διεργασία αλλά και σε κάποια άλλη. Προϋπόθεση αποτελεί οποιαδήποτε μόλυνση έχει υποστεί το νερό από τη πρώτη διεργασία να είναι αποδεκτή στη δεύτερη. Αυτό δεν ισχύει όμως πάντα καθώς μπορεί κάποια ουσία που υπάρχει στο νερό να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ξανά χωρίς να καθαριστεί. Με αυτόν τον τρόπο όμως μειώνεται τόσο ο όγκος φρέσκου νερού που χρησιμοποιείται όσο κι ο όγκος του ακάθαρτου νερού. Στο Σχήμα 2 φαίνεται η επαναχρησιμοποίηση νερού μεταξύ δύο διεργασιών.



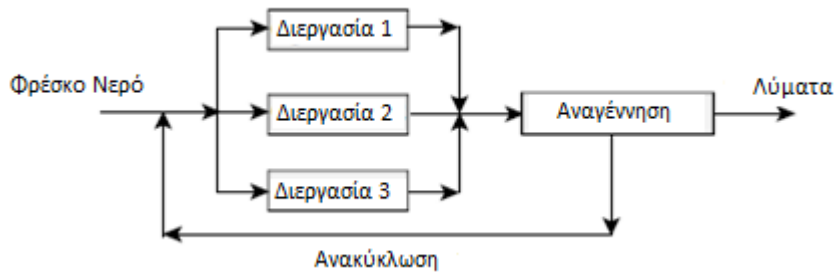
Σχήμα 2: Επαναχρησιμοποίηση νερού

Άλλο τρόπος είναι η αναγέννηση του νερού όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. Με τον όρο αναγέννηση περιγράφεται οποιαδήποτε διεργασία που χρησιμοποιείται για το καθαρισμό του νερού σε σημείο που είναι αποδεκτό για περαιτέρω χρήση. Η διαφορά με τη παραπάνω μέθοδο είναι ένα μέρος από τα λύματα δεν υπάρχει πλέον καθώς το νερό υφίσταται αναγέννηση μεταξύ των διεργασιών.



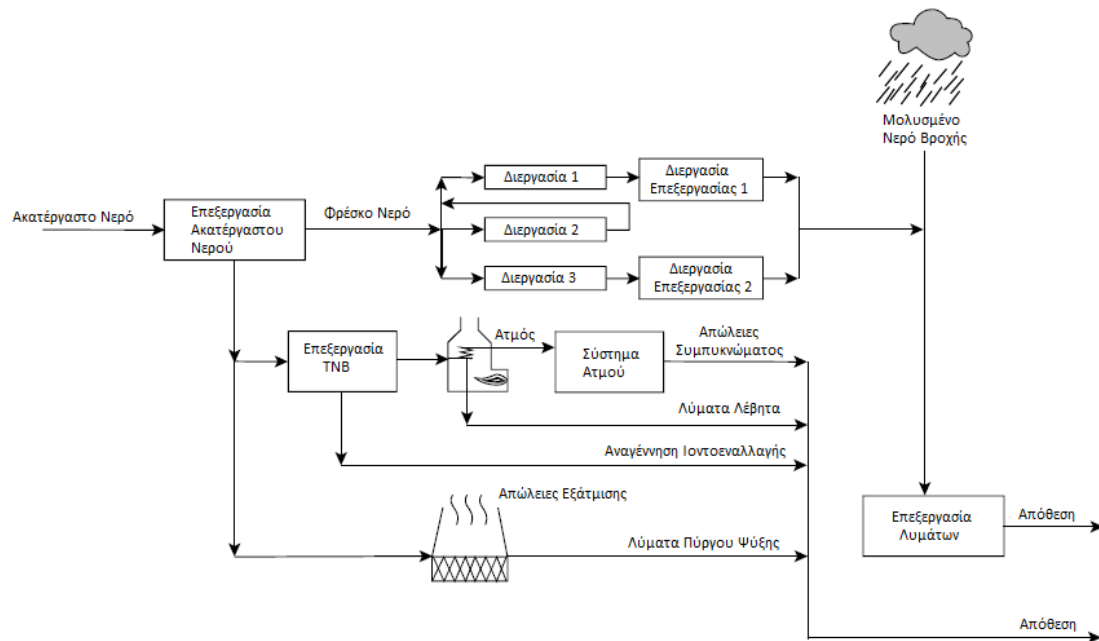
Σχήμα 3: Αναγέννηση Νερού

Μία τρίτη μέθοδος είναι η ανακύκλωση ενός μέρους του νερού αφού υποστεί αναγέννηση. Το νερό αυτό χρησιμοποιείται για όλες τις διεργασίες και όχι μόνο για μία όπως ήταν η παραπάνω μέθοδος. Το κόστος όμως αυτής της μεθόδου είναι αρκετά μεγάλο. Το πιο σπουδαίο πρόβλημα όμως με αυτή τη μέθοδο είναι ότι καθώς ανακυκλώνεται το νερό οι μικροοργανισμοί που υπάρχουν ή προϊόντα διάβρωσης συσσωρεύονται και αν δεν απομακρυνθούν θα δημιουργήσουν προβλήματα στη συνέχεια. Στο Σχήμα 4 φαίνεται αυτή η μέθοδος σε ένα σύμπλεγμα τριών διεργασιών.



Σχήμα 4: Ανακύκλωση και αναγέννηση

Μία τελευταία μέθοδος είναι η χρήση διαφορετικής μεθόδου καθαρισμού του νερού ανάλογα με το ρεύμα που θα καθαριστεί όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Είναι πολύ πιθανό να μην είναι όλα τα ρεύματα μολυσμένα με ρυπαντή στην ίδια ποσότητα με αποτέλεσμα να μην χρειάζονται την ίδια μέθοδο καθαρισμού. Έτσι το καθένα καθαρίζεται ξεχωριστά μέχρι το σημείο όπου θα είναι μολυσμένα στο ίδιο ποσοστό και στην συνέχεια αναμιγνύονται ώστε να καθαριστούν σαν ένα.



Σχήμα 5: Απλοποιημένο σύστημα νερού με επί μέρους επεξεργασίες

Το κόστος για τον καθαρισμό υδάτινων ακάθαρτων νερών είναι ανάλογο με τη συνολική ροή ακάθαρτου νερού καθώς και με τη συγκέντρωση σε ρυπαντή που είναι ο στόχος. Όσο μειώνεται η συγκέντρωση τόσο πιο μεγάλο είναι το κόστος. Για αυτό το λόγο σε περίπτωση ύπαρξης δύο ρευμάτων τα οποία θα υποβληθούν σε καθαρισμό αλλά διαφορετικού είδους δεν πρέπει να αναμιχθούν καθώς το κόστος θα αυξηθεί πολύ.

Μέθοδοι Υπολογισμού Οξυγόνου Για Τη Μείωση Μόλυνσης Σε Υδατικά Λύματα

Όταν το νερό χρησιμοποιείται σε διάφορες διεργασίες μολύνεται με ρυπαντές. Υπάρχουν δύο λόγοι για τους οποίους το ποσοστό μόλυνσης υδατικού λύματος είναι σημαντικός. Ο πρώτος λόγος είναι ότι τα λύματα τα οποία χύνονται στο περιβάλλον πρέπει να τηρούν κάποιες περιβαλλοντικές προδιαγραφές σύμφωνα με τους κανονισμούς. Ο δεύτερος λόγος αφορά τη χρήση του νερού για ανακύκλωση ή επαναχρησιμοποίηση. Πρέπει το επίπεδο της μόλυνσης να είναι αποδεκτό κατά την είσοδο του νερού στις διεργασίες. Για να μπορούν να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι είναι απαραίτητο να είναι γνωστό το ποσό οξυγόνου που χρειάζεται για την μείωση της μόλυνσης στα λύματα. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό είναι τέσσερις.

- Βιοχημική απαίτηση σε οξυγόνο(BOD): Αποτελεί μέθοδο που επινοήθηκε και μετράει τη ποσότητα οξυγόνου που καταναλώνεται από μικροοργανισμούς όταν έρχονται σε επαφή με μολυσμένο νερό για πέντε μέρες σε θερμοκρασία 20⁰C.
- Χημική απαίτηση σε οξυγόνο(COD): Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιείται όξινο διχρωμικό κάλιο για να πραγματοποιηθεί οξείδωση. Χρειάζεται καταλύτης για να πραγματοποιηθεί αυτή η οξείδωση για κάποιες οργανικές ενώσεις. Τα αποτελέσματα με αυτή τη μέθοδο συνήθως είναι μεγαλύτερα από ότι με το BOD αφού η μέθοδος COD οξειδώνει υλικά τα οποία βιοδιασπώνται αργά.
- Συνολική απαίτηση σε οξυγόνο(TOD): Με αυτή τη μέθοδο υπολογίζεται το οξυγόνο που καταναλώνεται όταν ένα δείγμα από μολυσμένο νερό οξειδώνεται σε ένα ρεύμα αέρα στους 900⁰C μέσα σε ένα φούρνο. Κάτω από αυτές τις συνθήκες όλος ο άνθρακας οξειδώνεται σε διοξείδιο του άνθρακα. Η απαίτηση σε οξυγόνο μετράται από τη διαφορά οξυγόνου που υπάρχει στο ρεύμα αέρα πριν και μετά την οξείδωση.

Η σχέση μεταξύ των τριών παραπάνω μεθόδων για το ίδιο οργανικό απόβλητο είναι η εξής:

$$BOD < COD < TOD$$

Υπάρχει και μία τέταρτη μέθοδος που ονομάζεται Συνολικός Οργανικός Άνθρακας(TOC). Είναι παρόμοια μέθοδος με τη TOD απλά σε αυτή μετράται η ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα αντί για τη ποσότητα οξυγόνου.

2. Μέθοδοι Καθαρισμού Λυμάτων

Οι μέθοδοι καθαρισμού του νερού μπορούν να ενταχθούν σε τρεις κατηγορίες:

- Πρωτογενείς
- Δευτερογενείς ή βιολογικές και
- Τριτογενείς

2.1 Πρωτογενείς Μέθοδοι

Η πρωτογενής επεξεργασία του μολυσμένου νερού μπορεί να περιλαμβάνει είτε φυσική είτε χημική επεξεργασία, εξαρτώμενη πάντα από τη φύση του ρυπαντή με σκοπό να εκπληρωθούν τρεις στόχοι:

- Επαναχρησιμοποίηση ή ανακύκλωση του νερού,
- Ανάκτηση πολύτιμων υλικών αν είναι δυνατό και
- Προετοιμασία του μολυσμένου νερού για τη δευτερογενή επεξεργασία απομακρύνοντας πριν από αυτή ρυπαντές οι οποίοι μπορεί να παρουσιάσουν προβλήματα στη συνέχεια.

Παρακάτω αναλύονται συνοπτικά οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται.

1. Διαχωρισμός στερεών: Μέθοδος για το διαχωρισμό στερεών με τη χρήση καθίζησης, φυγόκεντρου διαχωρισμού και με φιλτράρισμα.
2. Επίπλευση: Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει στερεά ή αναμίξιμα υγρά σωματίδια από το νερό. Αυτά τα σωματίδια πρέπει να έχουν μικρότερη πυκνότητα από το νερό και να είναι υδρόφοβα. Πραγματοποιείται με τη χρήση διαλυτοποιημένου αέρα. Οι φυσαλίδες προσκολλάνε πάνω στα σωματίδια και έρχονται στην επιφάνεια όπου συλλέγονται. Αυτή η μέθοδος είναι πολύ αποτελεσματική για το διαχωρισμό πολύ μικρών και ελαφριών σωματιδίων.
3. Κρυσταλλοποίηση: Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται όταν το μολυσμένο νερό έχει διαλυτότητα η οποία μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία τότε η ψύξη ίσως επιτρέψει τη κρυσταλλοποίηση ενός σημαντικού ποσοστού της μόλυνσης.
4. Εξάτμιση: Η χρήση αυτής της μεθόδου γίνεται όταν το μολυσμένο νερό έχει μικρό όγκο και οι ρυπαντές δεν είναι πτητικοί. Έτσι το ρεύμα με τους ρυπαντές συλλέγεται ξεχωριστά ενώ το εξατμιζόμενο νερό συλλέγεται με συμπύεση.
5. Απόσπαση υγρού από υγρό: Με τη μέθοδο αυτή το μολυσμένο νερό που περιέχει οργανικές ουσίες έρχεται σε επαφή με έναν διαλύτη στον οποίο τα οργανικά είναι πιο διαλυτά. Με απόσταξη ή εξάτμιση διαχωρίζονται τα οργανικά από τον διαλύτη ο οποίος στη συνέχεια ανακυκλώνεται.

6. Προσρόφηση: Η προσρόφηση χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση οργανικών ενώσεων και βαριών μετάλλων. Ως κύριο μέσο προσρόφησης χρησιμοποιείται ο ενεργός άνθρακα αλλά χρησιμοποιούνται ακόμα και συνθετικές ρητίνες.
7. Εναλλαγή ιόντων: Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την επιλεκτική απομάκρυνση κάποιων ιόντων και βρίσκει εφαρμογή στην ανάκτηση κάποιων συγκεκριμένων συστατικών όπως των βαριών μετάλλων.
8. Υγρή οξείδωση: Σε αυτή τη μέθοδο ένα μίγμα με βάση το νερό θερμαίνεται υπό πίεση με παρουσία αέρα ή καθαρού οξυγόνου, το οποίο οξειδώνει τις οργανικές ουσίες. Η αποδοτικότητα της οξείδωσης εξαρτάται από την ώρα της αντίδρασης και από τη πίεση. Θερμοκρασίες μεταξύ 150⁰C και 300⁰C μαζί με πιέσεις της τάξης των 3 έως 200 bar οι οποίες εξαρτώνται από τη διεργασία καθώς και αν υπάρχει καταλύτης ή όχι.
9. Χημική οξείδωση: Η χημική οξείδωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την οξείδωση οργανικών ρυπαντών οι οποίοι είναι δύσκολο να διαχειριστούν στη δευτερογενή επεξεργασία. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να σκοτώσει μικροοργανισμούς.
10. Αποστείρωση: Σε κάποιες διεργασίες, όπως σε διεργασίες παραγωγής φαγητών και φαρμάκων, το νερό που χρησιμοποιείται μπορεί να χρειαστεί να αποστειρωθεί πριν γίνει επαναχρησιμοποίηση του ή ανακύκλωσή του. Υπεριώδης ακτινοβολία, χημική οξείδωση ή και συνδυασμός αυτών των δύο μεθόδων επιτυγχάνουν το επιθυμητό αποτέλεσμα.
11. Ρύθμιση pH: Το pH πρέπει τις περισσότερες φορές να προσαρμόζεται πριν την επαναχρησιμοποίηση, απόρριψη ή δευτερογενή επεξεργασία. Για τη δευτερογενή επεξεργασία το pH πρέπει να είναι μεταξύ 8 και 9.
12. Χημική καταβύθιση: Αυτή η μέθοδος ακολουθούμενη από το διαχωρισμό στερεών είναι πολύ καλή για το διαχωρισμό βαριών μετάλλων. Απομακρύνονται με τη μορφή ανθρακικών, υδροξειδίων και σουλφιδίων.

2.2 Δευτερογενείς Μέθοδοι

Στις δευτερογενείς ή βιολογικές μεθόδους, μία μάζα μικροοργανισμών χρησιμοποιείται για να μετατρέψει τα οργανικά σε σταθερά απόβλητα. Η οργανική μάζα αυτή χρησιμεύει στους μικροοργανισμούς ως τροφή. Καθώς εκτυλίσσεται η μέθοδος οι μικροοργανισμοί παράγουν μία μεγάλη ποσότητα λάσπης από την οποία ένα μέρος δεν μπορεί να ανακυκλωθεί. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι βιολογικής επεξεργασίας οι οποίοι είναι:

1. Αερόβια επεξεργασία: Οι αερόβιες αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα μόνο όταν υπάρχει παρουσία ελεύθερου οξυγόνου και παράγουν σταθερά και σχετικά αδρανή προϊόντα όπως διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Οι αερόβιες αντιδράσεις είναι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες. Ταυτόχρονα λαμβάνουν χώρα και αντιδράσεις ενδογενούς αναπνοής οι οποίες μειώνουν την ποσότητα της λάσπης που παράγεται

καθώς και αντιδράσεις νιτροποίησης οι οποίες μετατρέπουν το άζωτο και την αμμωνία σε ανθρακικό άλας.

2. Αναερόβια επεξεργασία: Οι αναερόβιες αντιδράσεις δεν χρειάζονται οξυγόνο και παίρνουν την ενέργεια που χρειάζονται από τα οργανικά συστατικά στα απόβλητα. Αυτού του τύπου οι αντιδράσεις εκτυλίσσονται σχετικά αργά και οδηγούν σε προϊόντα τα οποία είναι ασταθή και περιέχουν αρκετή ποσότητα ενέργειας. Τέτοια προϊόντα είναι μεθάνιο και υδρόθειο.
3. Ανοξική επεξεργασία: Οι ανοξικές αντιδράσεις δε χρειάζονται οξυγόνο και αυτές. Όμως οι κύριες βιοχημικές αντιδράσεις δεν είναι οι ίδιες με τις αναερόβιες διεργασίες, αλλά μία παραλλαγή των αντιδράσεων της αερόβιας επεξεργασίας. Οι αντιδράσεις αυτές βρίσκουν εφαρμογές για την απονιτροποίηση για τη μετατροπή το νιτρικό άλας σε άζωτο. Για να έρθει σε επαφή το βρώμικο νερό με τους μικροοργανισμούς χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι. Όμως πολλοί από τους μικροοργανισμούς που χρησιμοποιούνται χρειάζεται αρκετό χρόνο για να αναπτυχθούν. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα εφαρμόζονται τρεις μέθοδοι:
 - Αερόβια χώνευση: Βιολογική επεξεργασία του αποβλήτου λαμβάνει χώρα σε μία δεξαμενή όπου το απόβλητο αναμιγνύεται με μία βιολογική κροκυδωμένη λάσπη. Για να διατηρηθούν οι αερόβιες συνθήκες πρέπει η δεξαμενή να αερίζεται συνεχώς. Ο διαχωρισμός τους στη συνέχεια πραγματοποιείται συνήθως με βαρυτική καθίζηση. Ένα μέρος της λάσπης ανακυκλώνεται ενώ η ποσότητα που περισσεύει απομακρύνεται
 - Αναερόβια χώνευση: Όταν τα απόβλητα περιέχουν μεγάλα ποσά οργανικών η απαίτηση σε οξυγόνο μπορεί να είναι τόσο μεγάλη όπου γίνεται εξαιρετικά δύσκολη και ακριβή η διατήρηση των αερόβιων συνθηκών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι αναερόβιες διεργασίες προσφέρουν αποτελεσματικούς τρόπους απομάκρυνσης μεγάλων ποσοτήτων οργανικών. Όμως δεν είναι ικανές να παράγουν προϊόν υψηλής ποιότητας και χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία. Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι η ρύθμιση της θερμοκρασίας μεταξύ των 35°C και 40°C για να υπάρξει όσο το δυνατόν καλύτερη απόδοση.
 - Κλίνες καλαμιών: Οι διεργασίες με τις κλίνες καλαμιών απαιτεί καλάμια να έχουν φυτευτεί στο χώμα στη περιοχή όπου βρίσκονται τα λύματα. Οξυγόνο από τον αέρα μεταφέρεται διαμέσου των φύλλων, των κλαδιών και των ριζών σε μικροοργανισμούς με μεγάλη συγκέντρωση στη περιοχή των ριζών. Αερόβιες συνθήκες λαμβάνουν χώρα στη περιοχή των ριζών καθώς αναερόβιες και ανοξικές στη γύρω περιοχή. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι δε παράγει λάσπη προς διάθεση. Το σημαντικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι χρειάζονται έξι μήνες με δύο χρόνια για την ανάπτυξη των βλαστών. Επιπλέον οι διαφορές που υπάρχουν στο κλίμα μεταξύ χειμώνα και καλοκαιριού πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Ποσότητα λάσπης παράγεται από όλους του τύπους διεργασιών με τις αναερόβιες να έχουν το πλεονέκτημα καθώς παράγουν μικρότερες ποσότητες από τις αερόβιες. Η απομάκρυνση της λάσπης αποτελεί μία δαπανηρή διαδικασία η οποία στις αερόβιες διεργασίες οφείλεται για το 25%-40% του λειτουργικού κόστους.

2.3 Τριτογενείς Μέθοδοι

Οι τριτογενείς μέθοδοι είναι το τελευταίο στάδιο πριν την απελευθέρωση του υδάτινου αποβλήτου στο περιβάλλον. Η τελική ποιότητα του λύματος εξαρτάται από την φύση και τη ροή του νερού που χρησιμοποιείται. Στον Πίνακα 1 φαίνονται κάποιες ενδείξεις για την ποιότητα του λύματος που απαιτείται προκειμένου να απελευθερωθεί στο περιβάλλον.

Πίνακας 1: Ενδείξεις για την ποιότητα των λυμάτων ανάλογα με τις διεργασίες

Αερόβια	Αναερόβια	Κλίνες Καλαμιών
$BOD_5 < 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (υψηλότερη εάν χρησιμοποιείται O_2)	$BOD_5 > 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$BOD_5 < 3,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Σταθερά τελικά προϊόντα (CO_2, H_2O, \dots)	Ασταθή τελικά προϊόντα (CH_4, H_2S, \dots)	Σταθερά και ασταθή τελικά προϊόντα
Απομάκρυνση BOD_5 μέχρι και 95%	Απομάκρυνση BOD_5 μεταξύ και 75-85%	Απομάκρυνση BOD_5 μεταξύ και 60-80%
Μεγάλος σχηματισμός λάσπης	Μικρός σχηματισμός λάσπης	Καθόλου σχηματισμός λάσπης

Η αναερόβια χώνευση είναι συνήθως ικάνη να απομακρύνει το 95% του BOD. Η αναερόβια χώνευση απομακρύνει μικρότερο ποσοστό το οποίο κυμαίνεται από 75% έως 85%. Τις περισσότερες φορές τα οικιακά απόβλητα επεξεργάζονται μαζί με τα βιομηχανικά απόβλητα οπότε υφίστανται μία διεργασία για την απομάκρυνση οργανισμών που είναι πιθανό να προκαλέσουν την εμφάνιση ασθενειών και στη συνέχεια απομακρύνονται στο περιβάλλον. Οι μέθοδοι στη τριτογενή επεξεργασία ποικίλουν αλλά αποτελούν το τελευταίο στάδιο επεξεργασίας ώστε τα λύματα να μπορούν να απελευθερωθούν στο περιβάλλον. Οι τριτογενείς μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- Φιλτράρισμα: Παραδείγματα τέτοιων διεργασιών είναι τα φίλτρα άμμου. Είναι σχεδιασμένα ώστε να απομακρύνουν ουσίες που δεν μπόρεσαν οι δευτερογενείς μέθοδοι να απομακρύνουν και μαζί με αυτές και το εναπομείναντα BOD βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα των λυμάτων που έρχονται από τη δευτερογενή επεξεργασία. Τα φίλτρα άμμου σε κάποιες περιπτώσεις μπορούν να απομακρύνουν αποτελεσματικά όλο το εναπομείναντα BOD.

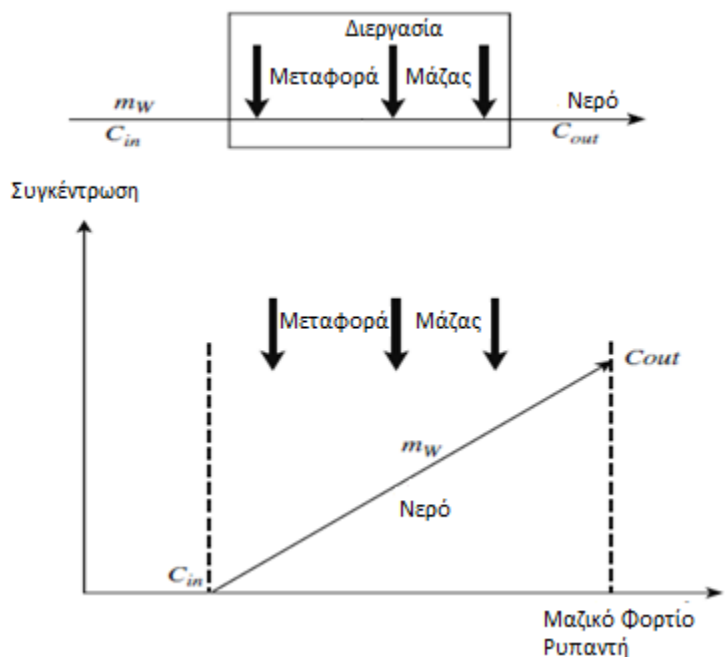
- Προσρόφηση: Κάποιες οργανικές ουσίες δεν απομακρύνονται από βιολογικά συστήματα που λειτουργούν σε φυσιολογικές συνθήκες. Η απομάκρυνση οργανικών ουσιών που περιέχεται στα υπολείμματα γίνεται με τη χρήση της τεχνικής της προσρόφησης. Χρησιμοποιείται τόσο ενεργός άνθρακας όσο και συνθετικές ρητίνες.
- Απομάκρυνση φωσφόρου και αζώτου: Τόσο το άζωτο όσο και ο φώσφορος είναι συστατικά ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη μικροοργανισμών με αποτέλεσμα τα λύματα που προέρχονται από τη βιολογική επεξεργασία να περιέχουν κάποια ποσότητα. Η ποσότητα που αποβάλλεται στο περιβάλλον μπορεί να έχει μεγάλες συνέπειες στην ανάπτυξη της άλγης. Εάν η απόθεση γίνει σε υδάτινη περιοχή υψηλής ποιότητας και ο ρυθμός διάλυσης είναι μικρός τότε η απομάκρυνση είναι απαραίτητη. Το άζωτο εμφανίζεται κυρίως ως αμμώνιο (NH_4^+), ως νιτρικό άλας (NO_3^-) και νιτρώδες (NO_2^-). Ο φώσφορος εμφανίζεται ως ορθοφωσφορικό (PO_4^{3-}). Υπάρχει μία μεγάλη ποικιλία βιολογικών και χημικών τεχνικών για την απομάκρυνση των παραπάνω. Αυτές οι διεργασίες παράγουν επιπλέον ποσότητα βιολογικής και ανόργανης λάσπης η οποία πρέπει να απομακρυνθεί.
- Απολύμανση: Το χλώριο, είτε σαν αέριο είτε σαν υποχλωριώδες ιόν, χρησιμοποιείται πάρα πολύ σαν μέσο απολύμανσης. Η χρήση του χλωρίου φέρνει τον κίνδυνο για τη δημιουργία τοξικών οργανικών χλωριδίων με αποτέλεσμα η απόθεση στο περιβάλλον των λυμάτων με αυξημένη την περιεκτικότητα σε τέτοιες τοξικές ουσίες να είναι επικίνδυνη. Ουσίες όπως το υπεροξείδιο του υδρογόνου και του αζώτου χρησιμοποιούνται ως μέσα απολύμανσης τα οποία παράγουν προϊόντα τα οποία είναι λιγότερο τοξικά. Σε όλη τη διεργασία χρησιμοποιείται υπεριώδης ακτινοβολία η οποία κάνει την απολύμανση πιο αποτελεσματική. Κάποιες φορές και μόνο η χρήση της υπεριώδης ακτινοβολίας είναι αρκετή για την απολύμανση των λυμάτων.

3. Χρήση Νερού

Το νερό είναι το μέσο που χρησιμοποιείται περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη ουσία και η χρήση του είναι απαραίτητη. Κάποιες από τις χρήσεις του είναι:

1. Μέσο για την πραγματοποίηση κάποιων αντιδράσεων
2. Καθαρισμό εξοπλισμού
3. Σε διεργασίες εξαγωγής
4. Παραγωγή ατμού

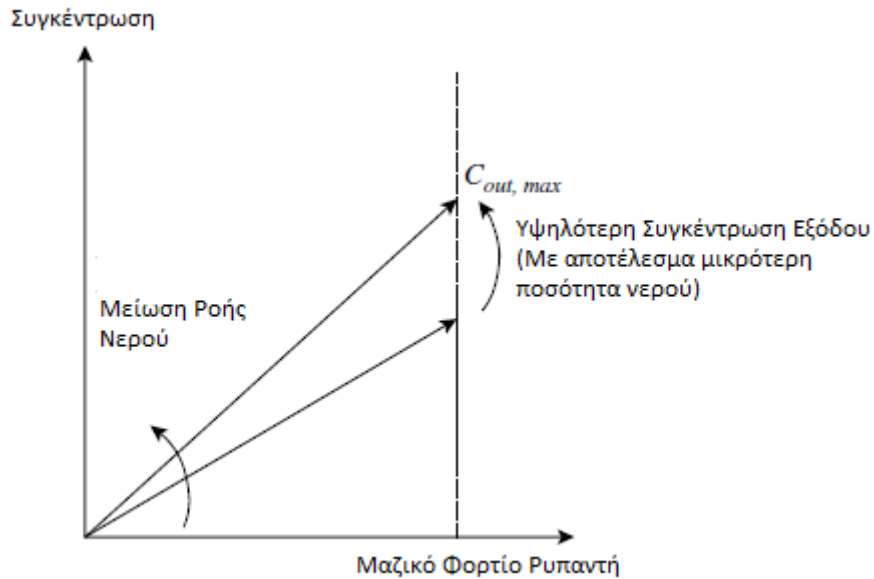
Το κοινό χαρακτηριστικό που έχουν οι παραπάνω χρήσεις είναι ότι το νερό έρχεται σε επαφή με διάφορα συστατικά και ουσίες που χρησιμοποιούνται στις διάφορες διεργασίες με αποτέλεσμα να μολύνεται. Στο Σχήμα 6 φαίνεται πως γίνεται η μεταφορά ρυπαντών και πως αυξάνεται το ποσοστό μόλυνσης του νερού.



Σχήμα 6: Τρόπος μεταφοράς μάζας ρυπαντή και αύξηση συγκέντρωσης νερού

Αρχικά το νερό χρησιμοποιείται καθαρό και το ποσοστό μόλυνσης αυξάνεται καθώς μεταφέρονται ρυπαντές μέσω μεταφοράς μάζας.

Εάν ο ρυθμός ροής του νερού σε μία διεργασία μειωθεί για κάποιο λόγο, τότε για την ίδια ποσότητα μάζας ρυπαντή που θα μεταφερθεί, η μείωση στο ρυθμό της ροής νερού θα οδηγήσει σε μία γραμμή η οποία θα έχει πιο απότομη κλίση και η συγκέντρωση εξόδου θα είναι μεγαλύτερη όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.

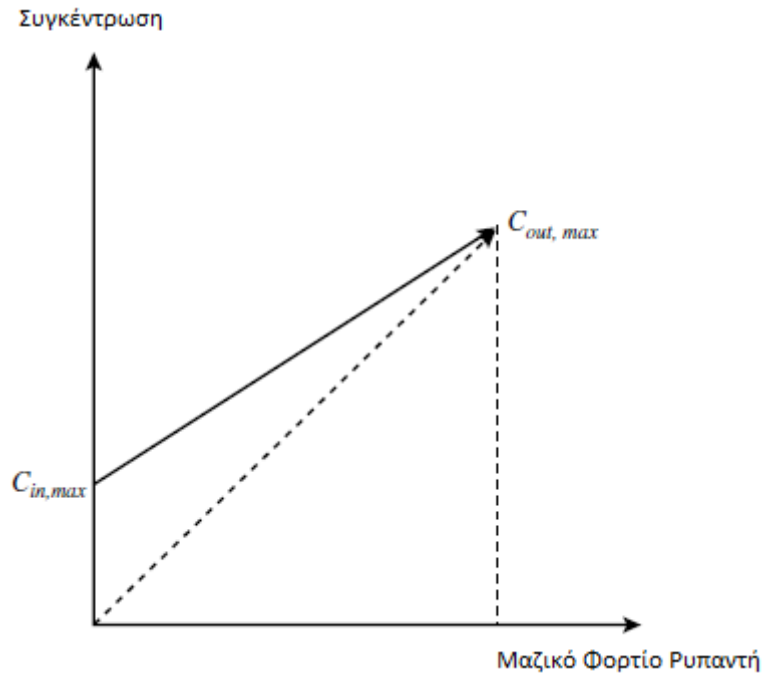


Σχήμα 7: Μείωση ροής νερού και αύξηση συγκέντρωσης εξόδου

Το ποσοστό μείωσης στο νερό που χρησιμοποιείται θα περιορίζεται είτε από την ελάχιστη ποσότητα νερού που χρειάζεται η διεργασία για να είναι εφικτή είτε από την μέγιστη ποσότητα συγκέντρωσης εξόδου. Η μέγιστη συγκέντρωση εξόδου μπορεί να καθοριστεί από διάφορους παράγοντες:

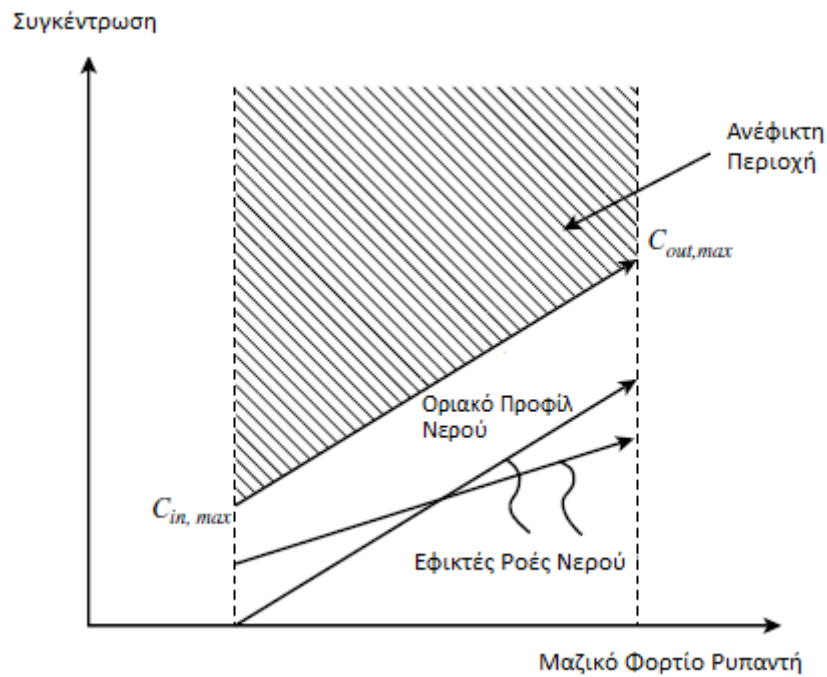
1. Τη μέγιστη διαλυτότητα
2. Περιορισμοί στη διάβρωση
3. Περιορισμοί ρύπανσης
4. Ελάχιστες απαιτήσεις σε ροή νερού
5. Μέγιστη συγκέντρωση εισόδου για περαιτέρω επεξεργασία

Εάν όλες οι διεργασίες χρησιμοποιούν καθαρό νερό, τότε μπορεί να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση νερού ελαχιστοποιώντας τη ροή νερού που χρησιμοποιείται. Με αυτή τη μέθοδο όμως η δυνατότητα για επαναχρησιμοποίηση μίας ποσότητας νερού εξαφανίζεται. Για να γίνει λοιπόν δυνατή η επαναχρησιμοποίηση νερού μεταξύ διεργασιών θα πρέπει να είναι ανεκτό ένα ποσοστό μόλυνσης του νερού κατά την είσοδό του σε κάποια διεργασία. Στο Σχήμα 8 φαίνεται το προφίλ χρήσης νερού στο οποίο τόσο η συγκέντρωση εισόδου όσο και η εξόδου έχουν τη μέγιστη τιμή τους.



Σχήμα 8: Προφίλ χρήσης νερού σε μέγιστη συγκέντρωση εισόδου και εξόδου

Στη συγκεκριμένη περίπτωση επειδή και οι δύο συγκεντρώσεις είναι στη μέγιστη τιμή τους το προφίλ χρήσης νερού περιγράφεται ως οριακό προφίλ χρήσης νερού όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9: Οριακό προφίλ χρήσης νερού

Η γραμμή που σχηματίζεται ενώνοντας τις δύο μέγιστες συγκεντρώσεις οριοθετεί τις περιοχές όπου είναι εφικτή και ανέφικτη η διεκπεραίωση μίας διεργασίας σε κάποιες τιμές συγκεντρώσεων. Πάνω από τη γραμμή είναι οι ανέφικτες τιμές ενώ κάτω είναι οι εφικτές. Η προσέγγιση με το οριακό προφίλ χρήσης νερού χρησιμοποιείται ώστε να εντοπίζονται ευκαιρίες επαναχρησιμοποίησης νερού οι οποίες. Τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι:

- Διεργασίες με διαφορετικά χαρακτηριστικά είναι δυνατό να συγκριθούν
- Δεν απαιτείται η ύπαρξη ενός μοντέλου που να περιγράφει τη διεργασία ώστε να παρασταθεί η μεταφορά μάζας
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε διεργασία η οποία χρησιμοποιεί νερό
- Δεν εξαρτάται από τον τύπο της ροής νερού.

4. Εξαγωγή Δεδομένων

Ισοζύγιο χρήσης νερού: Προτού ένα σύστημα μπορεί να μελετηθεί από τη σκοπιά της κατανάλωσης νερού και την επεξεργασίας λυμάτων, το πρώτο βήμα είναι η δημιουργία ενός ισοζυγίου χρήσης νερού. Για τη δημιουργία ενός νέου σχεδίου το μόνο πράγμα που χρειάζεται είναι πληροφορίες που σχετίζονται με τα ρεύματα νερού που μπορεί κάποιος να τις βρει στα διαγράμματα ροής, τα ισοζύγια ενέργειας για τις διεργασίες που θα λάβουν χώρα σε μία περιοχή καθώς και ότι χρειάζεται για τα συστήματα ασφαλείας. Ωστόσο είναι πολύ σπάνιο ο σχεδιαστής να έχει να αντιμετωπίσει μία τελείως νέα διεργασία. Οι πιο συχνές περιπτώσεις είναι η μετασκευή μίας ήδη υπάρχουσας διεργασίας, με όλο τον εξοπλισμό ή με κάποια πρόσθετα μηχανήματα ή με ορισμένα να είναι ανενεργά. Ο στόχος μπορεί να είναι να γίνουν αλλαγές με την πρόσθεση ή αφαίρεση εξοπλισμού, βελτίωση των ήδη υπάρχοντων περιβαλλοντικών και οικονομικών επιδόσεων ή την εφαρμογή νέων περιβαλλοντικών κανόνων. Σε περιπτώσεις μετασκευής είναι πολύ δύσκολη η επίτευξη ισοζυγίου νερού αλλά είναι απαραίτητη. Γενική έλλειψη πληροφοριών, κακός εξοπλισμός είναι κάποιοι από τους λόγους που η αξιοπιστία στο ισοζύγιο στη χρήση νερού δεν ξεπερνά το 90% το οποίο όμως είναι απαραίτητο.

Ρυπαντές: Η βασική ερώτηση που απαιτεί απάντηση είναι ποιοι ρυπαντές πρέπει να αναλύονται. Η απάντηση είναι όσο το δυνατόν λιγότεροι. Οι ρυπαντές πρέπει να τοποθετούνται στην ίδια κατηγορία όπου είναι δυνατό με παράδειγμα τα ολικά στερεά ή τις οργανικές ουσίες. Σε κάποιες περιπτώσεις θα είναι αναγκαίο να περιλαμβάνεται και ρυπαντής που θα είναι μόνος του σε μία κατηγορία εάν υπάρχουν συγκεκριμένοι περιορισμοί για αυτόν. Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή να μη συμπεριληφθεί κάποιος ρυπαντής στην ανάλυση επειδή απλά και μόνο δίνονται πληροφορίες για αυτόν από την έξοδο της διεργασίας. Οι ρυπαντές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μόνον όταν υπάρχει κάποιος περιορισμός στην είσοδο. Μία καλή στρατηγική για την δημιουργία μίας ανάλυσης είναι να θεωρηθεί ότι όλο το πρόβλημα μπορεί να αναλυθεί με έναν τύπο ρυπαντή. Επιπλέον ρυπαντές προστίθενται μόνο αν είναι απαραίτητο.

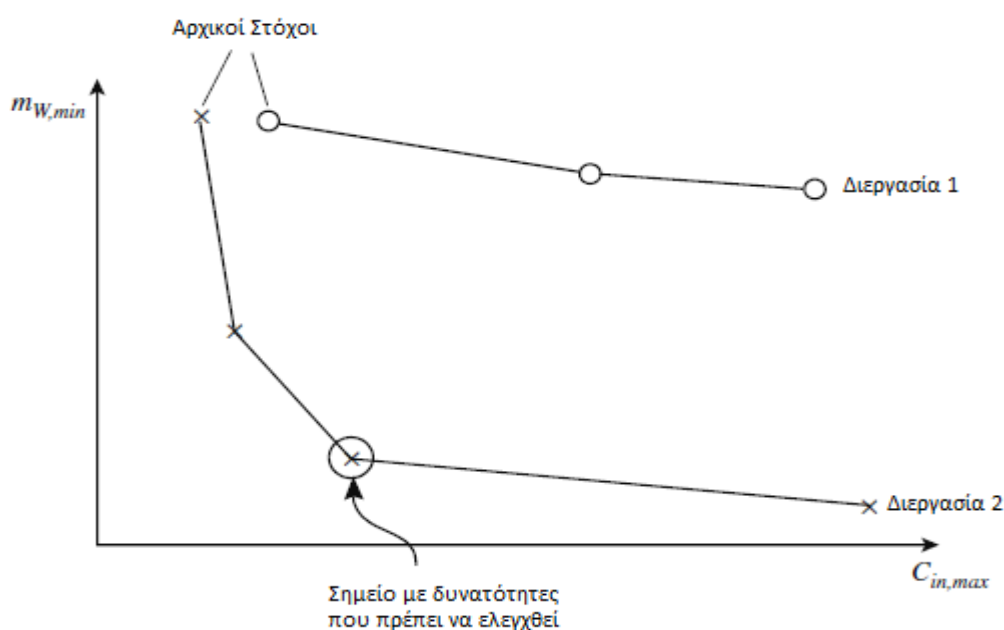
Περιορισμοί στις ροές: Κάποιες διεργασίες απαιτούν σταθερές ροές όπως στην αναπλήρωση των πύργων ψύξης. Για να μπορέσει ο σχεδιαστής να πάρει τα δεδομένα πρέπει να εντοπίσει τους περιορισμούς στις ροές. Εάν ο σκοπός της μελέτης είναι να πραγματοποιηθούν μεγάλες αλλαγές στην κατανάλωση νερού και στην αναγέννηση των λυμάτων τότε δεν πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στην ανάλυση μικρά ρεύματα. Επαναχρησιμοποίηση ή ανακύκλωση μικρών ρευμάτων είναι τις περισσότερες αντιοικονομικό. Μόνο τα μεγάλα ρεύματα πρέπει να μελετούνται.

Ακρίβεια δεδομένων: Τα συστήματα νερού είναι σύνθετα και τις περισσότερες φορές υπάρχει έλλειψη δεδομένων για μελέτη. Είναι σημαντικό να μη συλλέγονται πολλές ανούσιες πληροφορίες κατά την αρχή της μελέτης. Τα πιο ακριβή δεδομένα θα είναι στο σημείο του pinch και κάτω από αυτό. Έτσι μία καλή προσέγγιση είναι να συλλεχθεί μία ποσότητα δεδομένων και να γίνει μία αρχική ανάλυση. Μία αρχική μελέτη των δεδομένων που θα συλλεχθούν θα δείξουν που είναι πιο πιθανό να εμφανιστούν λάθη. Συλλογή ακόμα περισσότερων δεδομένων σε εκείνη τη περιοχή βοηθούν ώστε να επιτευχθεί ο στόχος. Με αυτή τη προσέγγιση θα αποφευχθεί η συλλογή ανούσιων πληροφοριών.

Περιοριστικές συνθήκες: Όταν καθοριστούν οι ευκαιρίες για επαναχρησιμοποίηση νερού ή αναγέννηση, το σημείο αρχής είναι τα περιοριστικά δεδομένα για το νερό που καθορίζουν τη μέγιστη μόλυνση που είναι αποδεκτή σε μία διεργασία. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που καθορίζουν αυτές τις περιοριστικές συνθήκες όπως:

- Κρίσης και εμπειρία
- Μέγιστη διαλυτότητα
- Μελέτες προσομοιώσεων
- Εργαστηριακές μελέτες
- Ανάλυση ευαισθησίας
- Περιορισμοί διάβρωσης

Η ανάλυση ευαισθησίας είναι ένα πολύ σημαντικό εργαλείο όταν πρέπει να προσδιοριστούν οι οριακές συγκεντρώσεις. Αρχίζοντας με κάποιες αρχικές οριακές συνθήκες, οι οποίες μπορεί να είναι οι ήδη υπάρχουσες συγκεντρώσεις, ένας αρχικός στόχος μπορεί να τεθεί όπως φαίνεται στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10: Ανάλυση ευαισθησίας για τον προσδιορισμό των οριακών συνθηκών

Τα δεδομένα μπορούν στη συνέχεια να αλλαχθούν ώστε να αυξηθούν οι συγκεντρώσεις εισόδου και να τεθεί ένας νέος στόχος. Μπορεί το αποτέλεσμα να είναι ευαίσθητο στις αλλαγές που πραγματοποιούνται στην είσοδο αλλά μπορεί και όχι. Η διεργασία 2 όπως φαίνεται στο σχήμα, είναι ευαίσθητη στις αλλαγές στην είσοδο καθώς μία μικρή αύξηση στη συγκέντρωση οδηγεί σε μία μεγάλη μείωση στην απαίτηση για νερό.

Περαιτέρω αυξήσεις στη συγκέντρωση εισόδου οδηγούν σε πολύ μικρές μειώσεις στις απαιτήσεις νερού. Στο σημείο όπου η ροή δεν μεταβάλλεται καθόλου από τις αλλαγές στις συγκεντρώσεις εισόδου είναι το σημείο στο οποίο πρέπει να δοθεί περισσότερη προσοχή και να γίνει περισσότερος έλεγχος. Αντιθέτως με την διεργασία 2, η διεργασία 1 δεν έχει την ίδια συμπεριφορά στις αυξήσεις των συγκεντρώσεων στην είσοδο. Παρατηρούνται μικρές μειώσεις και όχι μεγάλες. Με τη χρήση της ανάλυσης ευαισθησίας είναι πιο εύκολος ο προσδιορισμός των μεταβλητών που χρειάζονται μελέτη ώστε να δοθεί η ανάλογη έμφαση σε αυτές.

Δεδομένα επεξεργασίας: Όταν γίνεται μία μελέτη για ένα σύστημα επεξεργασίας λυμάτων, όπως η μελέτη για την επαναχρησιμοποίηση νερού, πρέπει συμπεριλαμβάνονται όσο το δυνατόν λιγότεροι ρυπαντές. Όταν γίνεται μελέτη για την επίδοση που έχει μία διεργασία βιολογικής επεξεργασίας, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή εάν ένα μίγμα λυμάτων από κάποια άλλη διεργασία επεξεργάζεται. Για παράδειγμα, έστω ότι σε μία περιοχή υπάρχει μία μονάδα βιολογικής επεξεργασίας με απόδοση 90% στην αφαίρεση του COD. Ας υποθεθεί ότι αυτή η απόδοση δεν είναι πλέον αποδεκτή και ότι απαιτείται μία αύξηση είτε στην αφαίρεση του COD είτε στην αφαίρεση μεμονωμένων ρυπαντών. Η δυναμικότητα της μονάδας βιολογικής επεξεργασίας θα πρέπει να αυξάνεται. Ίσως είναι υπερβολική η θεώρηση ότι η απόδοση της επεξεργασίας θα αυξηθεί με αύξηση της δυναμικότητας. Εάν γίνει μία πιο εις βάθος μελέτη θα παρατηρηθεί ότι η απόδοση της επεξεργασίας είναι διαφορετική για τα επιμέρους ρεύματα που επεξεργάζονται. Κάποια ρεύματα επεξεργάζονται πολύ περισσότερο από ότι χρειάζεται και κάποια άλλα λιγότερο με αποτέλεσμα το συνολικό άθροισμα της επεξεργασίας να φτάνει την τιμή του 90% αφαίρεσης COD. Τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να συμβούν σε περιοχές όπου γίνονται χημικές διεργασίες και πραγματοποιούνται μία μεγάλη ποικιλία από αυτές. Προκειμένου να μελετηθεί εις βάθος το σύστημα ώστε να βελτιωθεί πρέπει το ρεύμα λύματος να διαχωριστεί σε ξεχωριστές κατηγορίες COD. Κάθε διεργασία θα τοποθετείται σε μία συγκεκριμένη κατηγορία ανάλογα με την αποτελεσματικότητα που είχε η βιολογική επεξεργασία στην αφαίρεση του COD. Για να εντοπιστεί ο βαθμός υποβάθμισης του κάθε ρεύματος απαιτείται να διεξαχθούν τεστ βιολογικής χώνευσης για το κάθε ένα. Τα σχετικά αποτελέσματα που προκύπτουν μπορούν στη συνέχεια να αξιολογηθούν ώστε να δοθεί ένας συνολικός βαθμός απομάκρυνσης των ρυπαντών από τα ρεύματα. Οι επιλογές για την ελαχιστοποίηση των λυμάτων στη πηγή με προεπεξεργασία ή με επιπλέον βιολογική επεξεργασία μπορεί να αξιολογηθεί μετά με μεγαλύτερη βεβαιότητα.

Περιβαλλοντικοί περιορισμοί: Σε κάθε περιοχή όπου πραγματοποιούνται διεργασίες έχει όρια τα οποία πρέπει να φτάνονται προτού μπορούν τα λύματα να απελευθερώνονται στο περιβάλλον. Αυτοί οι περιορισμοί μπορεί να αφορούν τις συγκεντρώσεις, το συνολικό φορτίο ή ένα συνδυασμό αυτών. Είναι πολύ συχνό φαινόμενο οι κύριοι ρυπαντές να μεταφράζονται σε συγκεντρώσεις (κυρίως το BOD και το COD). Επειδή τα συστήματα νερού δεν είναι ποτέ σε κατάσταση ισορροπίας είναι λάθος να γίνεται σχεδιασμός ακριβώς στα όρια συγκεντρώσεων που θέτουν οι κανόνες. Είναι λοιπόν σωστό, δοθείσα τη δυναμική φύση των συστημάτων νερού να γίνεται σχεδιασμός για τιμές μικρότερες από αυτές που θέτουν οι νόμοι.

5. Στόχευση Μέγιστης Επαναχρησιμοποίησης Νερού

Όπως έχει ήδη ειπωθεί, εάν καθαρό νερό χρησιμοποιείται σε όλες τις διεργασίες, τότε ελαχιστοποιώντας τις ροές σε κάθε διεργασία θα ελαχιστοποιηθεί και η συνολική κατανάλωση νερού. Έτσι όμως δεν είναι εφικτή η επαναχρησιμοποίηση νερού. Εάν όμως ήταν επιτρεπτό κάποιο ποσοστό μόλυνσης στο ρεύμα εισόδου τότε το νερό θα μπορούσε να χρησιμοποιείται μεταξύ των διεργασιών.

Προκειμένου να αναλυθεί η επαναχρησιμοποίηση νερού παρατίθεται ο Πίνακας 2 με δεδομένα για τη μάζα του ρυπαντή, τις συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου και την οριακή ροή νερού για τέσσερις διαφορετικές διεργασίες.

Πίνακας 2: Δεδομένα συστήματος τεσσάρων διεργασιών

Αριθμός Διεργασίας	Μάζα Ρυπαντή($g \cdot h^{-1}$)	$C_{in}(ppm)$	$C_{out}(ppm)$	Οριακή Ροή Νερού($t \cdot h^{-1}$)
1	2000	0	100	20
2	5000	50	100	100
3	30000	50	800	40
4	4000	400	800	10

Υπάρχουν δύο σημεία τα οποία πρέπει να τονιστούν. Η συγκέντρωση C του ρυπαντή είναι με βάση τη συγκέντρωση του νερού και όχι του μίγματος δηλαδή,

$$C = \frac{m_c}{m_w} \text{ και όχι } C = \frac{m_c}{m_w + m_c}$$

Όπου,

m_c = η μαζική ροή του ρυπαντή

m_w = η μαζική ροή του νερού

Το άλλο σημαντικό σημείο αφορά τις μονάδες στις οποίες είναι εκφρασμένες τα δεδομένα του πίνακα. Η ροή του νερού εκφράζεται σε τόνους ανά ώρα και η συγκέντρωση σε ppm οπότε η μάζα του ρυπαντή πρέπει πάντα να εκφράζεται σε γραμμάρια ανά ώρα.

Η οριακή ροή νερού είναι η ροή νερού που απαιτείται ώστε μία συγκεκριμένη ποσότητα μάζας ρυπαντή να μπορέσει να συλλεχθεί από το νερό. Εάν μία διεργασία έχει στην είσοδο μέγιστη συγκέντρωση ρυπαντή μεγαλύτερη από το μηδέν και χρησιμοποιείται καθαρό νερό, τότε για μία συγκεκριμένη ποσότητα μάζας ρυπαντή, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ροή μικρότερη από την οριακή.

Αρχικά πρέπει να υπολογιστεί η ροή που θα χρειαζόταν κάθε διεργασία αν χρησιμοποιούσε καθαρό νερό. Η σχέση που συνδέει τη μάζα του ρυπαντή που παραλαμβάνεται, τη μαζική ροή του νερού και τη διαφορά συγκέντρωσης είναι:

$$\Delta m_c = m_w \cdot \Delta C$$

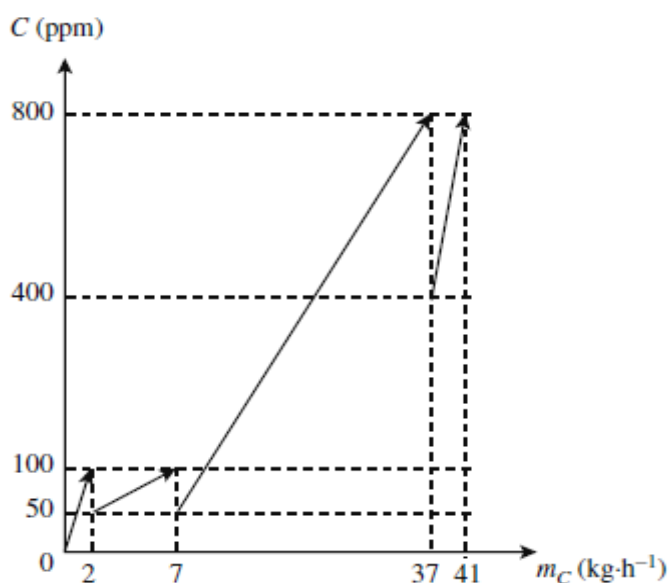
Λύνοντας ως προς m_w για κάθε διεργασία χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του Πίνακα 3 υπολογίζεται:

Πίνακας 3: Ροές νερού ανά διεργασία

Αριθμός Διεργασιών	Μαζική Ροή Νερού(t/h)
1	20
2	50
3	37,5
4	5

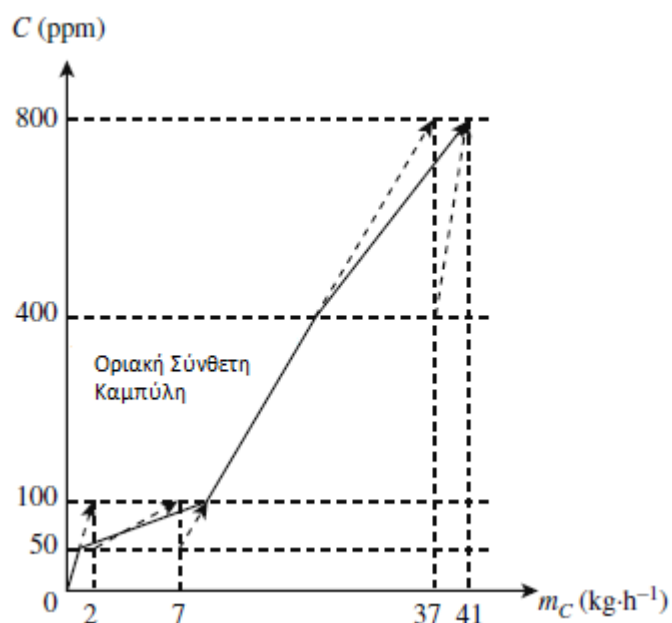
Η συνολική μαζική ροή δηλαδή είναι 112,5 t/h.

Τώρα θα γίνει χρήση επαναχρησιμοποίησης νερού. Προκειμένου να υπολογιστεί η μέγιστη δυνατή επαναχρησιμοποίηση δημιουργείται γράφημα των τεσσάρων διεργασιών όπου στον άξονα των Y είναι η συγκέντρωση C του ρυπαντή και στον άξονα των X η μάζα του ρυπαντή όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.



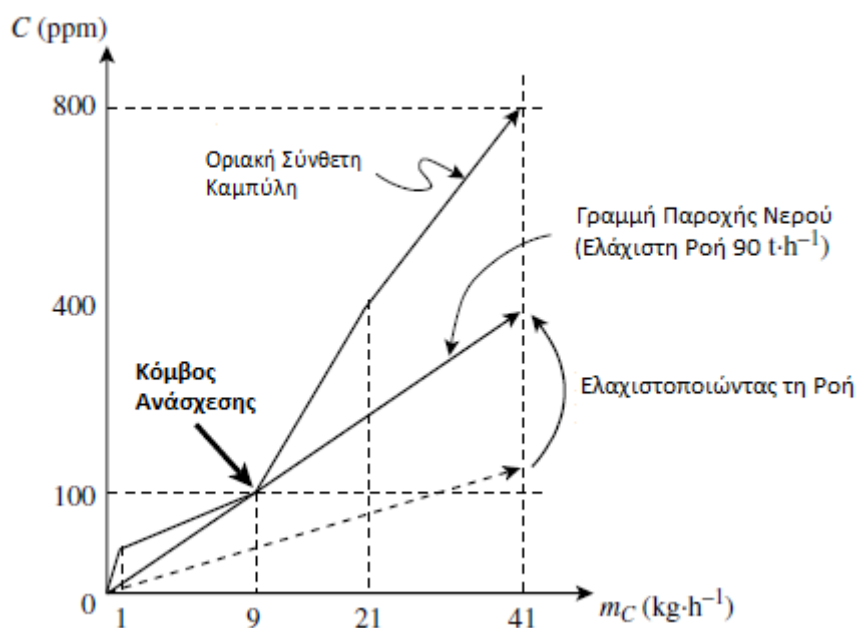
Σχήμα 11: Δεδομένα οριακών ροών διεργασιών

Στη συνέχεια κατασκευάζεται το σύνθετο διάγραμμα το οποίο είναι το παρακάτω.



Σχήμα 12: Οριακή σύνθετη καμπύλη

Χρησιμοποιώντας το παραπάνω υπολογίζεται η ελάχιστη ροή νερού. Ξεκινώντας από τη συγκέντρωση μηδέν, επειδή το νερό που χρησιμοποιείται είναι καθαρό στην είσοδο, σχεδιάζεται μία γραμμή η οποία πρέπει να έχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη κλίση για να υπολογιστεί η ελάχιστη ροή. Αυτή η γραμμή φαίνεται στο Σχήμα 13.

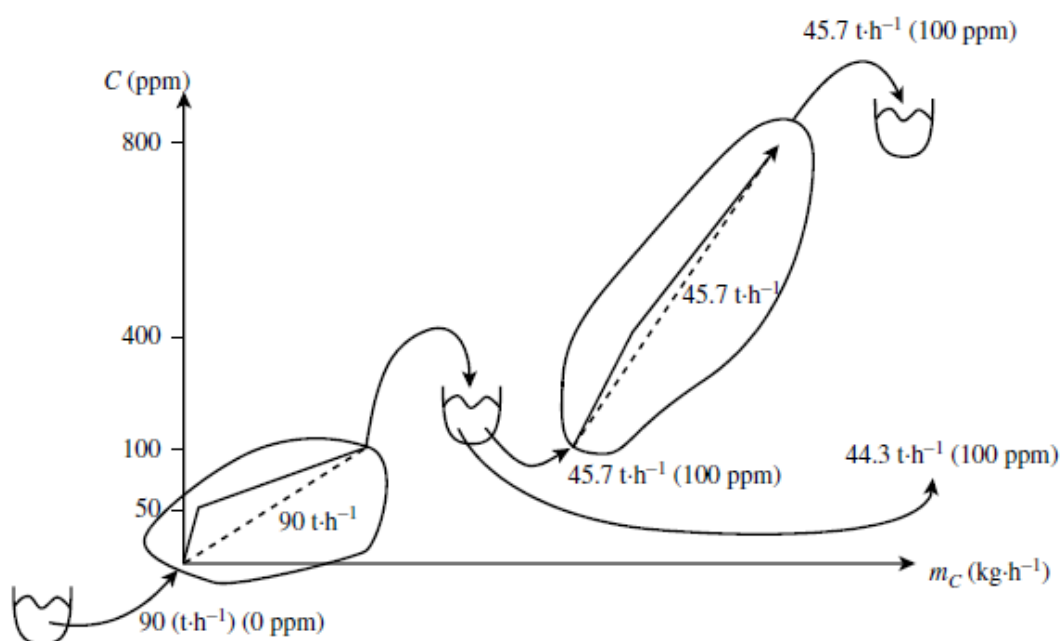


Σχήμα 13: Ελαχιστοποίηση ροής νερού

Η γραμμή με τη μεγαλύτερη κλίση είναι αυτή που ενώνει το σημείο μηδέν και το κόμβο ανάσχεσης. Η συγκέντρωση στο κόμβο ανάσχεσης είναι 100 ppm και η μάζα του ρυπαντή είναι 9000 g/h. Έτσι υπολογίζεται η μαζική ροή στους 90 t/h η οποία είναι, όπως ήταν αναμενόμενο, μικρότερη από αυτή που υπολογίστηκε όταν δεν γινόταν επαναχρησιμοποίηση νερού.

Πρέπει να τονιστεί ότι θα μπορούσαν να σχεδιαστούν και άλλες γραμμές που είναι με μεγαλύτερη κλίση όμως αυτές περνούν πάνω από τη οριακή σύνθετη καμπύλη με αποτέλεσμα να είναι μη εφικτές. Επιπλέον το γεγονός ότι η γραμμή υπολογισμού της ελάχιστης ροής εφάπτεται στη σύνθετη καμπύλη δεν σημαίνει ότι σε εκείνο το σημείο υπάρχει μεταφορά μάζας σε μηδενική διαφορά συγκέντρωσης. Το σημείο στο οποίο ακουμπάει η γραμμή τη καμπύλη είναι το σημείο στο οποίο η συγκέντρωση του νερού έχει τη μέγιστη τιμή του εκείνη τη στιγμή.

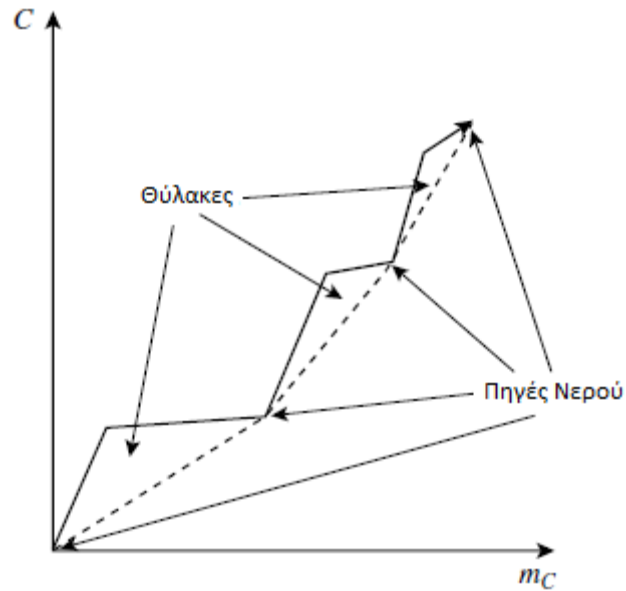
Με τη παραπάνω μέθοδο υπολογίστηκε η ποσότητα που απαιτείται κάτω από το κόμβο ανάσχεσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 14 διακρίνονται δύο περιοχές: πάνω από το κόμβο ανάσχεσης και κάτω από αυτόν. Κάτω από το κόμβο ανάσχεσης απαιτούνται και οι 90t/h αλλά πάνω από αυτόν είναι πιθανό να λειτουργεί το σύστημα και με λιγότερη ροή κάτι που συμβαίνει. Υπολογίζεται με ένα απλό ισοζύγιο μάζας ότι απαιτούνται 45,7t/h νερού.



Σχήμα 14: Αναπαράσταση τρόπου διαχωρισμού λυμάτων

Οι περιοχές οι οποίες σχεδιάζονται και χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα καθορίζονται χαράζοντας ευθείες γραμμές από την αρχική συγκέντρωση προς το κόμβο ανάσχεσης και από το κόμβο ανάσχεσης προς τη τελική συγκέντρωση. Έτσι σχηματίζονται δύο περιοχές οι οποίες ονομάζονται θύλακες. Σε πιο σύνθετα προβλήματα είναι πιθανό να υπάρχουν περισσότερες περιοχές όπως φαίνεται στο Σχήμα 15. Ο λόγος που σχεδιάζονται αυτές οι περιοχές και χρησιμοποιούνται στο μοντέλο είναι δύο:

1. Το ισοζύγιο μάζας είναι ορισμένο με συγκεκριμένους κανόνες
2. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ελαχιστοποίηση του κόστους κατά το καθαρισμό των λυμάτων.



Σχήμα 15: Παράσταση περισσότερων κόμβων ανάσχεσης

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι υπάρχουν περισσότεροι κόμβοι ανάσχεσης από έναν. Παρομοιάζεται ότι σε κάθε κόμβο ανάσχεσης υπάρχει μία ροή νερού η οποία μπορεί είτε να εισέρχεται στο σύστημα είτε να εξέρχεται ή και τα δύο μαζί. Αυτή η έννοια είναι χρήσιμη προκειμένου να γίνεται αντιληπτό ότι στις περιοχές αυτές υπάρχει μεταφορά νερού από και προς το σύστημα.

6. Μετατροπές Στις Διεργασίες Για Ελαχιστοποίηση Κατανάλωσης Νερού

Παραπάνω έγινε αναφορά για το πως η επαναχρησιμοποίηση νερού μπορεί να μειώσει τις απαιτήσεις σε νερό. Μεγιστοποιώντας την επαναχρησιμοποίηση νερού ελαχιστοποιείται τόσο η χρήση φρέσκου νερού όσο και η αναγέννηση λυμάτων. Ταυτόχρονα όμως με την επαναχρησιμοποίηση νερού υπάρχουν και αλλαγές που μπορούν να γίνουν μέσα στις ίδιες τις διεργασίες για να επιτευχθεί ο ίδιο στόχος. Κάποιες αλλαγές είναι:

- Αύξηση του αριθμού των σταδίων στα οποία γίνεται ο διαχωρισμός σε μία στήλη διαχωρισμού ή απορρόφησης για μείωση απαίτησης νερού
- Χρήση λέβητα για τη παραγωγή ατμού αντί την εισαγωγή του δημιουργώντας τον με άλλο τρόπο
- Επισκευή όλων των βαλβίδων ώστε να μην υπάρχουν απώλειες νερού
- Ο καθαρισμός του εξοπλισμού να γίνεται αρχικά με νερό που περιέχει ένα μέρος μόλυνσης ώστε να απομακρύνεται το μεγαλύτερο ποσοστό ακαθαρσιών και στη συνέχεια να χρησιμοποιείται καθαρό νερό για ξέπλυμα
- Η χρήση της ενέργειας με πιο αποτελεσματικό τρόπο ώστε να μειωθεί η ανάγκη σε ατμό που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των λυμάτων που παράγονται από το σύστημα παραγωγής ατμού
- Μειώνοντας τη θερμότητα που εκλύεται από τους πύργους ψύξης, μειώνεται η ποσότητα που χάνεται μέσω εξάτμισης με αποτέλεσμα να απαιτείται μικρότερη ποσότητα αναπλήρωσης νερού
- Αυξάνοντας την ποσότητα συμπυκνώματος που επιστρέφεται στα συστήματα παραγωγής ατμού, μειώνεται η ποσότητα νερού που απαιτείται για αναπλήρωση

Παραπάνω αναφέρθηκαν μερικές από τις ιδέες που μπορούν να εφαρμοστούν ώστε να εξοικονομηθεί νερό. Το ερώτημα όμως είναι ποιές από αυτές τις αλλαγές θα έχουν κάποιο αποτέλεσμα στο συνολικό σύστημα. Παρατηρώντας τη σύνθετη καμπύλη του σχήματος 12, είναι ξεκάθαρο ότι αλλαγές στο κόμβο ανάσχεσης και πάνω από αυτό θα φέρουν αλλαγές στο συνολικό σύστημα μειώνοντας την απαίτηση σε νερό. Έτσι οι τρόποι με τους οποίους το σύστημα θα επωφελοούνταν από αλλαγές στις διεργασίες είναι:

- Μετατόπιση του μαζικού φορτίου του ρυπαντή από κάτω από το κόμβο ανάσχεσης πάνω από αυτό για μία συγκεκριμένη ογκομετρική ροή για τις διεργασίες που γίνονται κάτω από το κόμβο ανάσχεσης αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις
- Μείωση της ογκομετρικής ροής για τις διεργασίες που γίνονται κάτω από το κόμβο ανάσχεσης για ένα συγκεκριμένο φορτίο μάζας ρυπαντή αυξάνοντας έτσι τις συγκεντρώσεις

- Συνδυάζοντας τα δύο παραπάνω

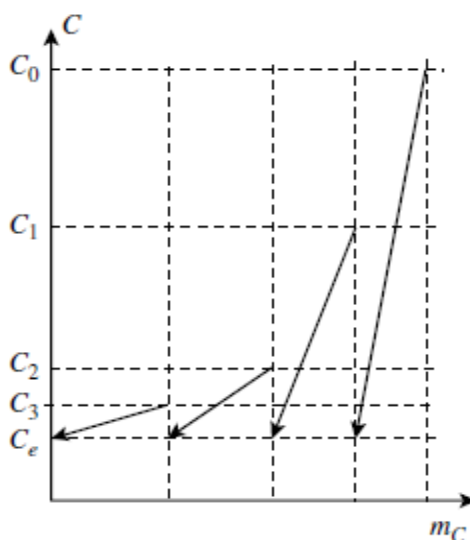
Τα διαστήματα συγκεντρώσεων στα οποία αντιστοιχεί μία διεργασία σχετικά με το κόμβο ανάσχεσης είναι ένα βασικό κριτήριο ώστε να αποφανθεί αν κάποια αλλαγή στη διεργασία θα είναι ωφέλιμη. Όσο πιο μεγάλη είναι η ροή μίας διεργασίας τόσο πιο μεγάλη θα είναι η επίπτωση στο σύστημα αν πραγματοποιηθεί κάποια αλλαγή.

7. Στόχευση Ελάχιστης Επεξεργασίας Λυμάτων

Η εξεργασία των λυμάτων είναι μία διεργασία που στις βιομηχανίες πραγματοποιείται σε μία κεντρική εγκατάσταση. Τα λύματα συγκεντρώνονται σε ένα κοινό ρεύμα με τη χρήση ενός συστήματος αποχέτευσης και οδηγούνται στη κεντρική εγκατάσταση επεξεργασίας ή μερικές φορές προεπεξεργάζονται και στη συνέχεια στέλνονται σε μία μονάδα επεξεργασίας του δήμου. Το πρόβλημα με τη χρήση μίας κεντρικής μονάδας επεξεργασίας είναι ότι συνδυάζοντας λύματα τα οποία θέλουν διαφορετική μέθοδο επεξεργασίας οδηγεί σε μεγαλύτερο κόστος από ότι θα οδηγούσε αν κάθε λύμα επεξεργαζόταν ξεχωριστά. Αυτό οφείλεται στο ότι το κόστος σχεδόν όλων των μεθόδων επεξεργασίας εξαρτάται από τη συνολική ροή των λυμάτων. Επιπλέον το κόστος της επεξεργασίας αυξάνεται με τη μείωση της συγκέντρωσης των λυμάτων που είναι λογικό καθώς όσο πιο χαμηλή είναι η συγκέντρωση τόσο πιο δύσκολο είναι να επιτευχθεί και άρα τα μέσα που απαιτούνται είναι πιο ακριβά και χρονοβόρα. Αν όμως δύο ρεύματα λυμάτων απαιτούν την ίδια μέθοδο επεξεργασίας τότε ο συνδυασμός τους είναι η καλύτερη λύση.

Είναι λοιπόν απαραίτητος ο σχεδιασμός μίας μεθόδου που θα επιτρέπει το συνδυασμό των ρευμάτων αλλά και το διαχωρισμό τους όταν πρέπει. Ας θεωρηθεί λοιπόν ένα σετ λυμάτων τα οποία πρέπει να επεξεργαστούν ώστε η συγκέντρωσή τους να είναι κάτω από το όριο του περιβάλλοντος.

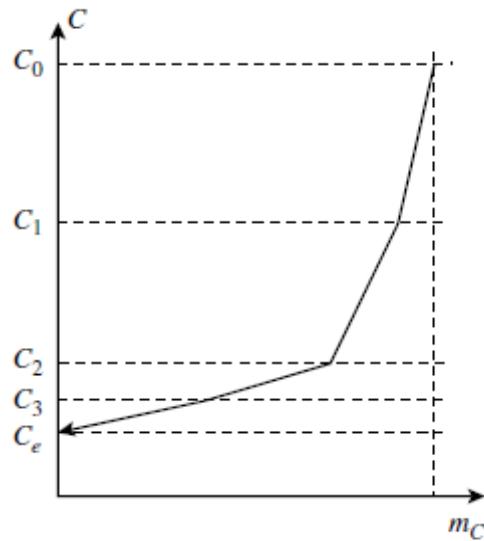
Στο Σχήμα 16 παρουσιάζεται ένα σύστημα που περιλαμβάνει τέσσερα ρεύματα λυμάτων με διαφορετικές συγκεντρώσεις εισόδου τα οποία όλα πρέπει να επεξεργαστούν ώστε να αφαιρεθεί ποσότητα μάζας ρυπαντή και η συγκέντρωση να πέσει στη τιμή που είναι αποδεκτή για το περιβάλλον, C_e .



Σχήμα 16: Ρεύματα λυμάτων και οι συγκεντρώσεις τους

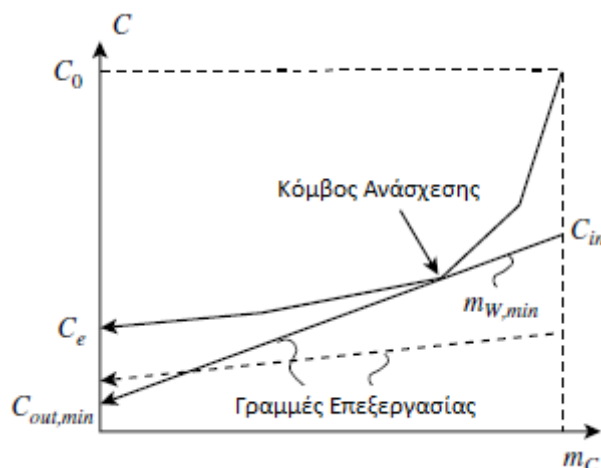
Προκειμένου το πρόβλημα να απλοποιηθεί και να είναι πιο εύκολη η λύση του κατασκευάζεται η σύνθετη καμπύλη των λυμάτων η οποία φαίνεται στο Σχήμα 17. Το

διάγραμμα χωρίζεται σε διαστήματα συγκεντρώσεων και η μάζα που αντιστοιχεί σε κάθε λύμα συνδυάζεται με τα υπόλοιπα για κάθε διάστημα.



Σχήμα 17: Σύνθετη καμπύλη λυμάτων

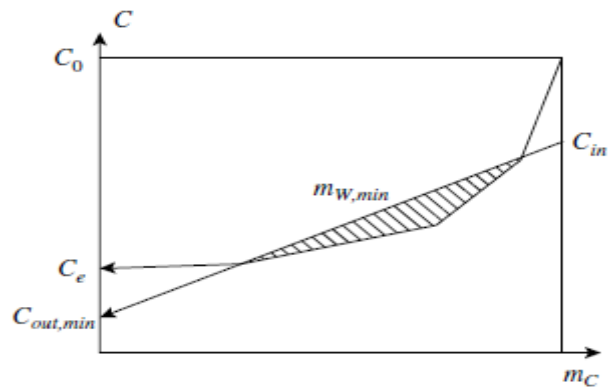
Το φορτίο μάζας μπορεί να απομακρυνθεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Ο στόχος όμως είναι η επεξεργασία του δικτύου των λυμάτων να γίνει με όσο το δυνατόν λιγότερο κόστος. Αυτό σημαίνει αρχικά ότι με μείωση της ροής μέσω της επεξεργασίας των λυμάτων μειώνεται το κόστος. Το Σχήμα 18 δείχνει τη σύνθετη καμπύλη των λυμάτων μαζί με δύο ευθείες γραμμές οι οποίες ονομάζονται γραμμές επεξεργασίας οι οποίες δείχνουν από ποια μέχρι ποια συγκέντρωση είναι ικανή η κάθε μέθοδος να οδηγήσει τα λύματα.



Σχήμα 18: Ελάχιστη ροή για τις γραμμές επεξεργασίας

Η διαδικασία επεξεργασίας των λυμάτων αφαιρώντας φορτίο μάζας είναι απαραίτητη ώστε η συγκέντρωση εξόδου του λύματος να είναι εντός των περιβαλλοντικών ορίων. Όσο μεγαλύτερη κλίση έχει η γραμμή επεξεργασίας τόσο μικρότερη θα είναι η ροή μέσα από την επεξεργασία. Η μέγιστη κλίση της γραμμής επεξεργασίας που φαίνεται στο Σχήμα 18 καθορίζεται στη μικρή συγκέντρωση από μία ελάχιστη συγκέντρωση εξόδου,

κάτω από την οποία η μέθοδος επεξεργασίας δε μπορεί να λειτουργήσει, και από το κόμβο ανάσχεσης μεταξύ τη σύνθετης καμπύλης και της γραμμής επεξεργασίας. Εάν η γραμμή επεξεργασίας σχεδιαστεί να έχει μεγαλύτερη κλίση, τότε θα διαπερνά τη σύνθετη καμπύλη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 19, και θα καταλήξει σε ένα σύστημα μη εφικτό. Θα είναι μη εφικτό καθώς θα απαιτείται να επεξεργάζεται μάζα ρυπαντή σε περιοχές συγκέντρωσης όπου δεν είναι διαθέσιμη. Οποιαδήποτε προσπάθεια για σχεδιασμό αυτής της ροής θα καταλήξει σε ένα μη εφικτό ισοζύγιο μάζας.



Σχήμα 19: Μη εφικτή περιοχή επεξεργασίας

8. Μεθοδολογία

Βασικός σκοπός είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας η οποία θα ελαχιστοποιεί τα λύματα που παράγονται από τις διεργασίες και την κατανάλωση καθαρού νερού και ταυτόχρονα θα επιλέγει τον πιο οικονομικό τρόπο επεξεργασίας από κάποιες δοθείσες επιλογές. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία πραγματοποιείται η ένωση δύο διαφορετικών μοντέλων, του μοντέλου μεταφόρτωσης (transshipment model-ενότητα 8.1,εξ.1-13) και του μοντέλου επιλογής διεργασίας επεξεργασίας (screening treatment process-ενότητα 8.2,εξ.14-22).

Το μοντέλο μεταφόρτωσης υπολογίζει τις ελάχιστες ροές των πηγών νερού που απαιτούνται για την κάλυψη των αναγκών των διεργασιών με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Το εύρος των συγκεντρώσεων χωρίζεται σε διαστήματα τα οποία καθορίζονται από τις οριακές συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου της κάθε μιας διεργασίας. Στη μοντελοποίηση του συστήματος η κατασκευή αυτών των διαστημάτων περιλαμβάνει και τη συγκέντρωση απόθεσης στο περιβάλλον.

Το μοντέλο επιλογής διεργασίας επεξεργασίας διαχειρίζεται τα δεδομένα που παράγονται από το προηγούμενο μοντέλο και παράγει λύσεις με την επιλογή διεργασιών και ελάχιστων ροών επεξεργασίας που επιτυγχάνουν τον απαιτούμενο καθαρισμό νερού.

Η μεθοδολογία που προτείνεται παρουσιάζεται στο παρακάτω πίνακα:

Ψευδοκώδικας: Μεθοδολογία εύρεσης ελαχίστου κόστους

Βήματα	
1	$L_2=0$
2	Solve model 1
3	$L_1, Cost_1$
4	Solve model 2
5	$L_{2L}, Cost_2$
6	Total cost= $Cost_1+Cost_2$
7	$L_2=L_2+e$
8	Solve model 1
9	$L'_1, Cost'_1$
10	Solve model 2
11	$L'_{2L}, Cost'_2$
12	Total cost'= $Cost'_1+Cost'_2$
13	while Total cost'<Total cost
14	$L_{2f}=L_2$
15	$L_1=L'_1$
16	Solve model 1
17	$L'_1, Cost'_1$
18	Solve model 2
19	$Cost'_2, L_{2L}$
20	Total cost'
21	end
22	L_2

Παραπάνω φαίνεται η μεθοδολογία και τα βήματα που προτείνονται. Πιο αναλυτικά:

Βήμα 1: Τίθεται η ροή ανακύκλωσης L_2 να είναι ίση με το μηδέν. Αυτό αφορά τη πρώτη επανάληψη που θα κάνει το μοντέλο καθώς η μόνη πηγή νερού είναι το φρέσκο νερό.

Βήμα 2: Επιλύεται το πρώτο μοντέλο, το μοντέλο μεταφόρτωσης, προκειμένου να δοθεί μία τιμή για τη ροή φρέσκου νερού L_1

Βήμα 3: Υπολογίζονται οι τιμές για το φρέσκο νερό L_1 καθώς και για το κόστος της χρήσης νερού, $Cost_1$.

Βήμα 4: Επιλύεται το δεύτερο μοντέλο για να υπολογιστεί η διαθέσιμη ροή ανακύκλωσης.

Βήμα 5: Υπολογίζεται η διαθέσιμη ποσότητα ροής ανακύκλωσης L_{2i} καθώς και το κόστος επεξεργασίας, $Cost_2$.

Βήμα 6: Υπολογίζεται το συνολικό κόστος του συστήματος, $Total\ cost = Cost_1 + Cost_2$

Βήμα 7: Η ροή ανακύκλωσης αυξάνεται κατά μία μικρή ποσότητα e

Βήμα 8: Επιλύεται το πρώτο μοντέλο.

Βήμα 9: Υπολογίζεται μία νέα τιμή ροής φρέσκου νερού, L_1' και ένα νέο κόστος, $Cost_1'$.

Βήμα 10: Επιλύεται το δεύτερο μοντέλο.

Βήμα 11: Υπολογίζεται μία νέα διαθέσιμη ροή ανακύκλωσης, L_{2i}' και ένα νέο κόστος επεξεργασίας $Cost_2'$.

Βήμα 12: Υπολογίζεται το νέο συνολικό κόστος του συστήματος, $Total\ cost' = Cost_1' + Cost_2'$

Βήμα 13: Με τη χρήση της εντολής *While* συγκρίνονται οι δύο τιμές κόστους. Σε περίπτωση η νέα τιμή συνολικού κόστους είναι μικρότερη από την προηγούμενη ακολουθούν τα επόμενα βήματα.

Βήμα 14: Η βέλτιστη ροή ανακύκλωσης, L_{2f} , τίθεται ίση με τη τιμή ανακύκλωσης L_2 που υπολογίστηκε προηγουμένως.

Βήμα 15: Η ροή φρέσκου νερού τίθεται ίδια με την ροή που υπολογίστηκε στο βήμα 9.

Βήμα 16: Επιλύεται το πρώτο μοντέλο.

Βήμα 17: Υπολογίζεται νέα τιμή φρέσκου νερού, L_1' και κόστους $Cost_1'$.

Βήμα 18: Επιλύεται το δεύτερο μοντέλο.

Βήμα 19: Υπολογίζονται νέα διαθέσιμη ροή ανακύκλωσης, L_{2i}' και κόστους επεξεργασίας $Cost_2'$

Βήμα 20: Υπολογίζεται το νέο συνολικό κόστος, *Total cost'* και μέσω της εντολής *While* συγκρίνεται με αυτή που υπολογίστηκε πριν. Εάν είναι μεγαλύτερη ή ίση με τη προηγούμενη τότε σταματάει η εντολή *While*.

Βήμα 21: Το μοντέλο παράγει τη τελική βέλτιστη τιμή ανακύκλωσης L_2

8.1 Μοντέλο Μεταφόρτωσης

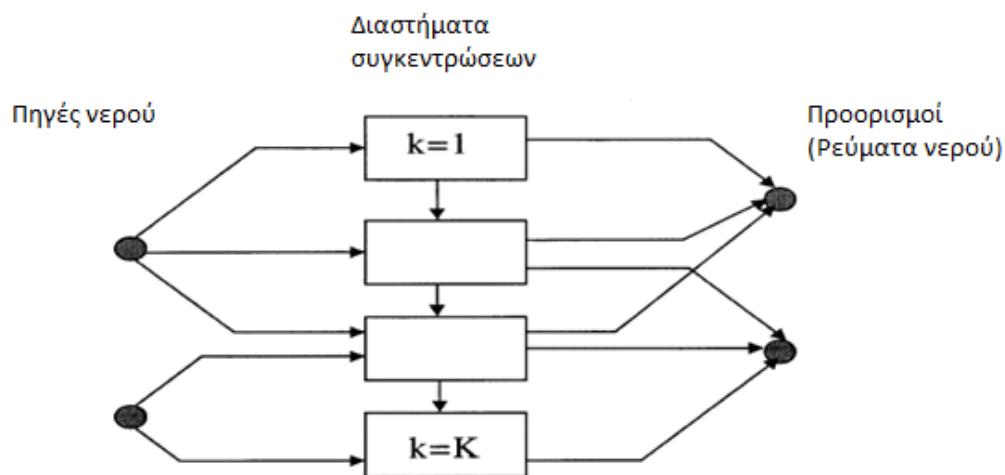
Το μοντέλο αυτό παρουσιάζει τον τρόπο επίλυσης του προβλήματος εύρεσης των ελάχιστων ρών των λυμάτων με τη χρήση πληροφοριών που δίνει το σημείο *pinch* και με τη χρήση προγραμματισμού. Το μοντέλο αυτό έχει πολλά κοινά σημεία με το μοντέλο που αφορά την ενεργειακή ολοκλήρωση.

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος νερού για την ελαχιστοποίηση των λυμάτων μπορεί να περιγραφεί κάνοντας αναφορά σε έναν αριθμό διεργασιών που χρησιμοποιούν νερό. Το πλήθος των διεργασιών συμβολίζεται με το γράμμα *i*. Το πλήθος των πηγών νερού που χρησιμοποιούνται συμβολίζεται με το γράμμα *j*. Κάθε διεργασία έχει μία μέγιστη συγκέντρωση εισόδου και εξόδου και συμβολίζεται ως $C_{in,max,i}$ και $C_{out,max,i}$. Το μαζικό φορτίο του ρυπαντή που μεταφέρεται σε κάθε διεργασία συμβολίζεται ως $M_{c,i}$. Έτσι η οριακή ροή νερού, $F_{l,i}$, δίνεται από την σχέση:

$$F_{l,i} = \frac{M_{c,i}}{(C_{out,max,i} - C_{in,max,i})} \quad (1)$$

Ο στόχος είναι να βρεθεί η σωστή κατανομή νερού από τις διαθέσιμες πηγές ώστε να ελαχιστοποιηθεί η χρήση του αλλά και να μεγιστοποιηθεί η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης. Με τη σωστή κατανομή ελαχιστοποιείται και η ποσότητα των λυμάτων στη συνέχεια.

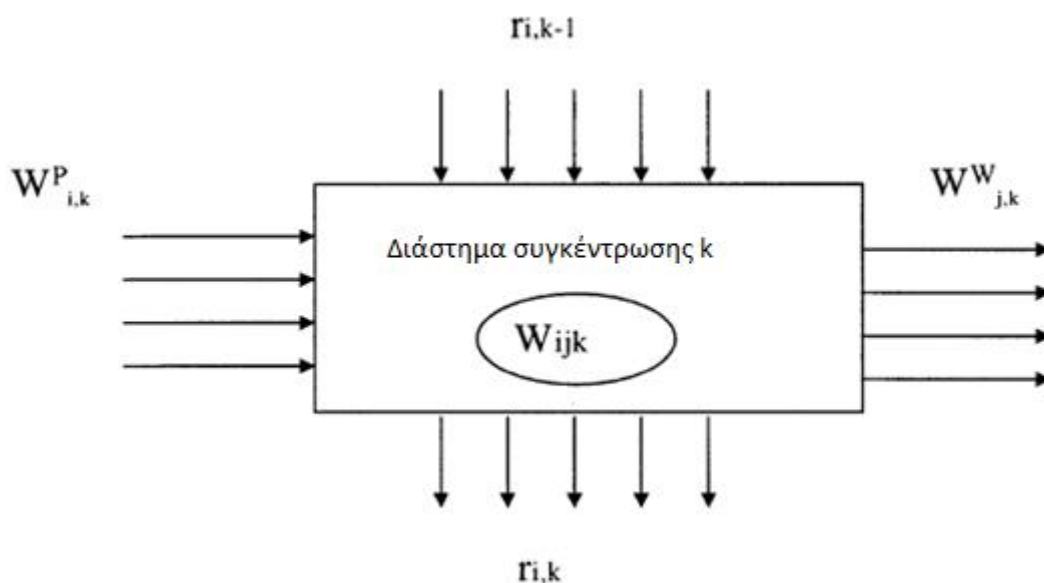
Στη συνέχεια κατασκευάζεται ένα διάγραμμα ροής στο οποίο φαίνονται τα διαστήματα των συγκεντρώσεων *k* όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 20. Σε αυτό το σχήμα φαίνεται η αναλογία μεταξύ του προβλήματος μεταβίβασης και της μεταφοράς μάζας. Το διάστημα συγκεντρώσεων με τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις συμβολίζεται με $k=K$ και το διάστημα συγκεντρώσεων με τις μικρότερες συγκεντρώσεις συμβολίζεται με $k=1$.



Σχήμα 20: Διαστήματα συγκεντρώσεων

Τα διαστήματα συγκεντρώσεων ορίζονται από τις μέγιστες συγκεντρώσεις στην είσοδο και στην έξοδο των διεργασιών και από τις συγκεντρώσεις εισόδου των πηγών νερού. Το διάγραμμα ροής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εντοπιστεί η πιο περιορισμένη περιοχή, δηλαδή η περιοχή όπου είναι κόμβος ανάσχεσης του προβλήματος.

Στο μοντέλο της μεταφόρτωσης (transshipment model) το μαζικό φορτίο του ρυπαντή θεωρείται ως ένα προϊόν το οποίο μεταφέρεται από τις διεργασίες στις πηγές νερού μέσω των διαστημάτων συγκέντρωσης. Στο Σχήμα 21 παρουσιάζεται ο τρόπος μεταφοράς μάζας για ένα διάστημα συγκεντρώσεων k .



Σχήμα 21: Τρόπος μεταφοράς μάζας στο διάστημα συγκέντρωσης k

Ως $W_{i,k}^P$ ορίζεται το φορτίο μάζας του ρυπαντή που μεταφέρεται από μία διεργασία i διαμέσου του διαστήματος k . Το $W_{j,k}^W$ είναι η ποσότητα ρυπαντή που μεταφέρεται στην πηγή νερού j διαμέσου του διαστήματος k . Το $W_{i,j,k}$ είναι το μαζικό φορτίο ρυπαντή που μεταφέρεται μεταξύ μίας διεργασίας i και της πηγής νερού j διαμέσου του διαστήματος k και τέλος το $r_{i,k}$ είναι το υπόλειμμα από τη διεργασία i που φεύγει από διάστημα k . Στο πρώτο διάστημα συγκεντρώσεων δεν εισέρχεται υπόλειμμα και ούτε εξέρχεται από το τελευταίο. Συνοψίζοντας:

1. Μάζα μεταφέρεται σε ένα συγκεκριμένο διάστημα συγκεντρώσεων από όλες τις διεργασίες των οποίων το εύρος των συγκεντρώσεων περιλαμβάνει το εύρος των συγκεντρώσεων των διαστημάτων.
2. Η μάζα μεταφέρεται από ένα συγκεκριμένο διάστημα συγκεντρώσεων στις πηγές νερού των οποίων το εύρος συγκεντρώσεων περιλαμβάνει το εύρος συγκέντρωσης του διαστήματος.
3. Μάζα μεταφέρεται από ένα διάστημα συγκεντρώσεων στο επόμενο το οποίο έχει υψηλότερη συγκέντρωση. Αυτή η ποσότητα μάζας είναι το υπόλειμμα το οποίο δεν μπορεί να μεταφερθεί από το προηγούμενο διάστημα.

Η βασική ιδέα για την ελαχιστοποίηση χρήσης νερού με σκοπό τη μείωση του κόστους γίνεται με αυτό το μοντέλο. Αυτό γίνεται ορίζοντας νέες μεταβλητές για όλες τις πιθανές ροές και η δημιουργία ισοζυγίων μάζας για κάθε διάστημα συγκεντρώσεων ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος το οποίο εξαρτάται άμεσα από τους περιορισμούς των ισοζυγίων.

8.1.1 Εξισώσεις Μοντέλου

Παραπάνω ορίστηκαν ως i οι διεργασίες που χρησιμοποιούν νερό, j οι πηγές φρέσκου νερού για να απομακρυνθούν οι ρυπαντές και k τα διαστήματα συγκεντρώσεων. Επιπλέον ως $F_{i,j}$ ορίστηκε η οριακή ροή νερού για κάθε διεργασία i . Ορίζεται ως C_k η συγκέντρωση εισόδου για το διάστημα συγκεντρώσεων k . Το πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός του φορτίου μάζας του ρυπαντή που μεταφέρεται από μία διεργασία i διαμέσου του διαστήματος k , δηλαδή του $W_{i,k}^P$. Αυτό υπολογίζεται από τον τύπο:

$$W_{i,k}^P = \frac{F_{i,i}}{C_k - C_{k-1}} \quad (2)$$

Ο βασικός σκοπός είναι να ελαχιστοποιηθεί το κόστος και η αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί είναι:

$$Cost = \sum_{j \in J} C_j \cdot L_j \quad (3)$$

Όπου,

C_j είναι το κόστος χρήσης της πηγής νερού j και

L_j είναι οι ροές των πηγών νερού

Το ισοζύγιο μάζας για κάθε διάστημα k είναι:

$$r_{i,k} - r_{i,k-1} + \sum_j W_{i,j,k} = W_{i,k}^P \quad (4)$$

Για το παραπάνω ισοζύγιο μάζας υπάρχουν βέβαια κάποιοι περιορισμοί οι οποίοι πρέπει να τηρούνται. Συγκεκριμένα όπως αναφέρθηκε παραπάνω στο διάστημα συγκεντρώσεων που έχει τις μικρότερες συγκεντρώσεις δεν εισέρχεται υπόλειμμα και στο διάστημα συγκεντρώσεων με τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις δεν εξέρχεται δηλαδή:

$$r_{i,0} = r_{i,k} = 0, r_{i,k} \geq 0, \forall i \quad (5)$$

Επιπλέον το άθροισμα των μαζικών φορτίων του ρυπαντή που μεταφέρεται μεταξύ των διεργασιών i και των πηγών νερού j διαμέσου των διαστημάτων k , δηλαδή το $W_{i,j,k}$ πρέπει να είναι ίσο με τη ποσότητα ρυπαντή που μεταφέρεται στην πηγή νερού j διαμέσου του διαστήματος k δηλαδή το $W_{j,k}^W$. Έτσι η εξίσωση είναι:

$$\sum_i W_{i,j,k} = W_{j,k}^W \quad (6)$$

Το μαζικό φορτίο που μεταφέρεται στο ρεύμα νερού j στο διάστημα συγκεντρώσεως k θα πρέπει να είναι ίσο με το γινόμενο της ροής j και της διαφοράς των συγκεντρώσεων εισόδου δύο διαδοχικών διαστημάτων συγκεντρώσεως δηλαδή:

$$W_{j,k}^W = L_j \cdot (C_k - C_{k+1}) \quad (7)$$

Τέλος οι ροές που θα προκύψουν από την επίλυση δεν πρέπει να ξεπερνάνε μία πολύ μεγάλη τιμή, την L_j^U . Ο σκοπός αυτού του περιορισμού είναι να θέσει ένα όριο στο μοντέλο ώστε κατά την επίλυση να μην είναι εφικτές πολύ μεγάλες τιμές ροών. Η εξίσωση είναι:

$$0 \leq L_j \leq L_j^U \quad (8)$$

Με τις παραπάνω εξισώσεις υπολογίζονται οι ροές του νερού θα χρησιμοποιηθεί. Βασικό όμως είναι να βρεθούν και οι ροές των λυμάτων καθώς και ο κόμβος ανάσχεσης. Για την εύρεση αυτών υπολογίζεται η συνολική ποσότητα του ρυπαντή, $M_{c,tot}$.

$$M_{c,tot} = \sum_i M_{c,i} \quad (9)$$

Για τον υπολογισμό του ο κόμβου ανάσχεσης είναι απαραίτητο το άθροισμα των υπολειμμάτων σε κάποιο διάστημα συγκεντρώσεων k να είναι μεγαλύτερο του μηδενός καθώς και να είναι μικρότερο ή ίσο από το γινόμενο ενός πολύ μεγάλου αριθμού M και μίας δυαδική μεταβλητής, y_k , η οποία παίρνει τιμές ένα εάν είναι ο κόμβος ανάσχεσης το k και μηδέν εάν δεν είναι. Δηλαδή:

$$\sum_i r_{i,k} \geq 0 \quad (10)$$

και

$$\sum_i r_{i,k} \leq y_k \cdot M \quad (11)$$

Συμβολίζεται με k^p το σύνολο των κόμβων ανάσχεσης που μπορεί να έχει ένα σύστημα διεργασιών συμπεριλαμβανομένου και του ψευδοκόμβου ανάσχεσης που είναι στη τελική συγκέντρωση. Έτσι η μάζα του ρυπαντή που απομακρύνεται μεταξύ των κόμβων ανάσχεσης k^p και k^p-1 είναι:

$$W_{k^p} = \sum_i \sum_{k=k^p-1}^{k=k^p} W_{i,k,j} \quad (12)$$

Η ροή του λύματος που απομακρύνεται από το κόμβος ανάσχεσης k^p είναι:

$$F_{k^p} = \frac{W_{k^p}}{C_{k^p} - C_{k^p+1}}, \forall k^p \quad (13)$$

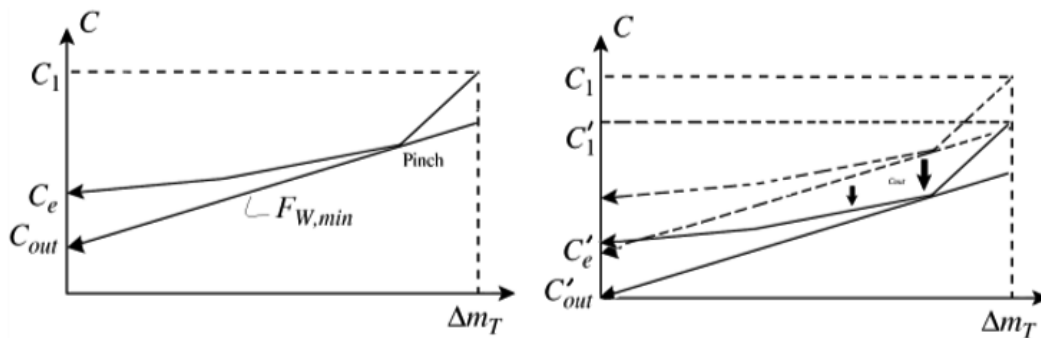
όπου C_{k^p} είναι η συγκέντρωση του λύματος στο σημείο k^p .

8.2 Μοντέλο Επιλογής Διεργασίας Επεξεργασίας

Αφού έχει επιλυθεί το πρόβλημα εύρεσης του κόμβου ανάσχεσης αλλά και των ροών των λυμάτων που προκύπτουν είναι αναγκαία η επεξεργασία τους με το ελάχιστο

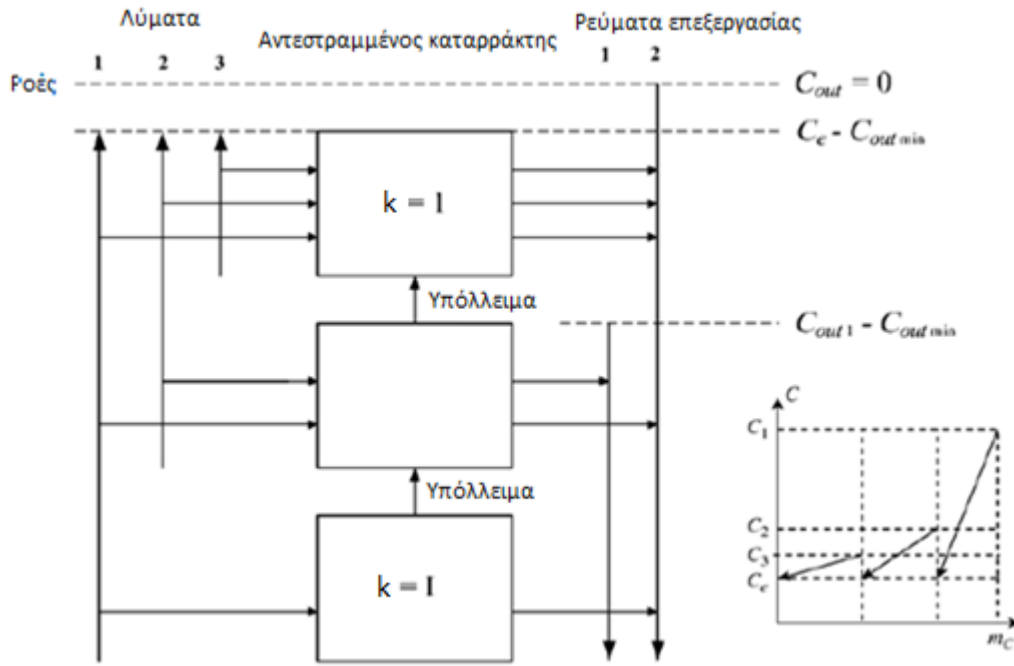
δυνατό κόστος. Το μοντέλο επεξεργασίας λυμάτων που παρουσιάζεται παρακάτω είναι συμπληρωματικό με αυτό που παρουσιάστηκε παραπάνω και στόχος του είναι να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή συγκέντρωσης εξόδου. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται περιέχει στοιχεία από τα διαγράμματα διαστημάτων συγκέντρωσης που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα εναλλαγής μάζας, στο μοντέλο μεταγωγής που χρησιμοποιείται στα συστήματα εναλλαγής θερμότητας καθώς και στοιχεία από τη διαδικασία μετατροπής των συγκεντρώσεων. Με τη χρήση προγραμματισμού η εύρεση της βέλτιστης λύσης γίνεται πιο εύκολη με τις κατάλληλες εξισώσεις.

Η μέθοδος επεξεργασίας σε αυτό το μοντέλο έχει συγκεκριμένη τιμή συγκέντρωσης στην έξοδο και είναι ο στόχος που πρέπει να επιτευχθεί από το μοντέλο αυτό. Για αυτό το λόγο προτού κατασκευαστούν τα διαστήματα συγκεντρώσεων πρέπει να αφαιρεθεί η ελάχιστη τιμή συγκέντρωσης εξόδου που υπάρχει στα ρεύματα επεξεργασίας τόσο από αυτά τα ίδια όσο και από τα ρεύματα των λυμάτων που οδηγούνται για επεξεργασία. Ο σκοπός που γίνεται αυτό είναι ώστε κατά την κατασκευή του αντίστροφου διαγράμματος μείωσης των συγκεντρώσεων η τελική τιμή να είναι το μηδέν και όχι κάποια άλλη. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 22.



Σχήμα 22: Μετατόπιση συγκεντρώσεων

Στο Σχήμα 23 παρουσιάζεται η έννοια του μοντέλου του αντεστραμμένου καταρράκτη που αποτυπώνει γραφικά την επίλυση που γίνεται στο μοντέλο της επιλογής διεργασίας επεξεργασίας προτού γίνει η μετατόπιση των συγκεντρώσεων. Το παρακάτω Σχήμα αποτυπώνει το σύστημα τριών διεργασιών, με δύο μεθόδους επεξεργασίας και τρία διαστήματα συγκεντρώσεων.



Σχήμα 23: Αντεστραμμένος καταρράκτης

8.2.1 Εξισώσεις Μοντέλου

Το προηγούμενο μοντέλο με την επίλυση του έχει προσφέρει χρήσιμα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιούνται στο μοντέλο που περιγράφεται παρακάτω. Θεωρείται με το γράμμα m όλες οι ροές των λυμάτων που οδηγούνται για επεξεργασία. Με το γράμμα n ορίζονται τα διαστήματα συγκεντρώσεων και με το γράμμα s τα ρεύματα επεξεργασίας των λυμάτων.

Με την επίλυση του παραπάνω μοντέλου έχουν βρεθεί οι οριακές ροές των λυμάτων (MWF_m). Η μάζα που μεταφέρεται από το ρεύμα λύματος m διαμέσου του διαστήματος συγκέντρωσης n ($M_{m,n}^p$) δίνεται από τον τύπο:

$$M_{m,n}^p = MWF_m \cdot (C_{n+1} - C_n), \forall m \quad (14)$$

Όπου C_n η συγκέντρωση εξόδου του διαστήματος συγκεντρώσεων n

Με παρόμοιο τρόπο υπολογίζεται η μάζα που μεταφέρεται στο ρεύμα επεξεργασίας s διαμέσου του διαστήματος συγκέντρωσης n ($M_{n,s}^W$):

$$M_{n,s}^W = Ft_s \cdot (C_{n+1} - C_n) \quad (15)$$

Το Ft_s είναι οι ροές των ρευμάτων επεξεργασίας που θα χρησιμοποιηθούν. Με την επίλυση του προβλήματος για ελαχιστοποίηση του κόστους προκύπτουν οι τιμές για αυτές.

Εάν με fc_s συμβολίζεται το σταθερό κόστος και με $coef_s$ ο συντελεστής του μεταβλητού κόστους του ρεύματος επεξεργασίας s , τότε το πρόβλημα εύρεσης των ροών αλλά και της ελαχιστοποίησης του κόστους επεξεργασίας επιλύεται με τη χρήση των

παρακάτω εξισώσεων όπου $u_{m,n}$ είναι το υπόλειμμα που του ρεύματος m που φεύγει από το διάστημα συγκεντρώσεων n .

Η αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, δηλαδή το κόστος της επεξεργασίας είναι:

$$Treatment\ Cost = \sum (fc_s \cdot x_s + coef_s \cdot Ft_s \cdot exponent) \quad (16)$$

Το x_s είναι μία δυαδική μεταβλητή η οποία παίρνει τιμή ένα όταν το αντίστοιχο ρεύμα επεξεργασίας s χρησιμοποιείται και μηδέν όταν δεν χρησιμοποιείται και ο $exponent$ είναι ένας εκθετικός όρος που εκφράζει το μεταβλητό κόστος.

Όπως και το προηγούμενο μοντέλο έτσι και σε αυτό υπάρχει ένα ισοζύγιο μάζας για κάθε διάστημα συγκεντρώσεων το οποίο πρέπει να ικανοποιείται και είναι:

$$u_{n-1,m} - u_{n,m} + \sum M_{m,n,s} = M_{m,n}^P, \forall m, n \quad (17)$$

Το άθροισμα των μαζικών φορτίων του ρυπαντή που μεταφέρεται μεταξύ των λυμάτων m και των ρευμάτων νερού s διαμέσου των διαστημάτων n , δηλαδή το $W_{m,n,s}$ πρέπει να είναι ίσο με τη ποσότητα ρυπαντή που μεταφέρεται στα ρεύματα νερού s διαμέσου του διαστήματος n δηλαδή το $W_{s,n}^W$

$$\sum M_{m,n,s} = M_{s,n}^W, \forall n, s \quad (18)$$

Το μαζικό φορτίο που μεταφέρεται στο ρεύμα νερού s στο διάστημα συγκεντρώσεων n θα πρέπει να είναι ίσο με το γινόμενο της ροής s και της διαφοράς των συγκεντρώσεων εισόδου δύο διαδοχικών διαστημάτων συγκέντρωσης δηλαδή:

$$M_{s,n}^W = Ft_s \cdot (C_{n+1} - C_n), \forall n \quad (19)$$

Οι ροές των ρευμάτων επεξεργασίας s θα πρέπει να οριοθετούνται από μία μεγάλη τιμή με σκοπό να μην υπάρχει η δυνατότητα να απειρίζονται. Η εξίσωση αυτή είναι:

$$0 \leq Ft_s \leq Ft_s^U, \forall s \quad (20)$$

Τα υπολείμματα $u_{n,m}$ που βρίσκονται στο ισοζύγιο μάζας έχουν τιμή μηδέν για το πρώτο και το τελευταίο διάστημα συγκεντρώσεων n δηλαδή:

$$u_{0,m} = u_{n,m} = 0, \forall n, m \quad (21)$$

Τέλος οι ροές των ρευμάτων επεξεργασίας πρέπει να είναι μικρότερες οι ίσες από ένα μεγάλο αριθμό P ο οποίο πολλαπλασιάζεται με το x_s δηλαδή:

$$x_s \cdot P \leq Ft_s, \forall s \quad (22)$$

8.3 Σύνδεση Των Δύο Μοντέλων

Τα δύο μοντέλα που αναπτύχθηκαν παραπάνω είναι ξεχωριστά και είναι αναγκαίο να φτιαχτεί ο συνδυαστικός τους κρίκος ώστε τα δεδομένα από το πρώτο μοντέλο να περνάνε αυτόματα στο δεύτερο αλλά και να γίνεται ο υπολογισμός κάποιων δεδομένων τα οποία

όπως είναι τα δύο μοντέλα δεν είναι δυνατό να γίνει απευθείας. Ο κόμβος ανάσχεσης έχει υπολογιστεί οπότε είναι γνωστά τα διαστήματα συγκεντρώσεων τα οποία βρίσκονται πάνω από αυτό και κάτω από αυτό αντίστοιχα.

Έστω ότι το σύστημα αποτελείται από k διαστήματα συγκεντρώσεων όπου σε κάποιο σημείο βρίσκεται το διάστημα a , δηλαδή τα διαστήματα αυτά είναι τα $\{k/k=1,2,\dots,a-1,a,a+1,a+2,\dots,K\}$. Οι πηγές νερού συμβολίζονται με j και είναι $\{j/j=1,2,\dots,J\}$. Είναι γνωστό ότι ο κόμβος ανάσχεσης είναι στο διάστημα συγκεντρώσεων a . Προκειμένου να υπολογιστεί η ροή που φεύγει από τον κόμβο ανάσχεσης και πάει για επεξεργασία αλλά και η ροή που φεύγει πάνω από το pinch πρέπει να βρεθεί η μάζα πάνω και κάτω από αυτό. Ορίζεται ως MBP_j (mass below pinch) η μάζα του ρυπαντή που είναι κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στο πρώτο μοντέλο η μάζα που φεύγει από κάποιο διάστημα συγκεντρώσεων και πάει στις πηγές νερού είναι το $W_{j,k}^W$. Η μάζα κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης είναι το άθροισμα της μάζας των επιμέρους διαστημάτων συκέντρωσης κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης δηλαδή:

$$MBP_j = W_{j,a}^W + W_{j,a+1}^W + \dots + W_{j,K}^W \quad (23)$$

Έτσι υπολογίζεται η επιμέρους μάζα ρυπαντή που πάει σε κάθε πηγή νερού j . Προκειμένου να υπολογιστεί η συνολική ποσότητα ($TMBP$) απλά προστίθενται οι επιμέρους μάζες δηλαδή:

$$TMBP = \sum_j MBP_j \quad (24)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η ροή που πηγαινει από κάθε διάστημα συγκεντρώσεων στις επιμέρους πηγές και συμβολίζεται FBP (flow below pinch). Έτσι οι επιμέρους ροές είναι:

$$FBP_1 = \frac{MBP_1}{C_{up\alpha} - C_{lo_1}} \quad (25a),$$

$$FBP_2 = \frac{MBP_2}{C_{up\alpha} - C_{lo_2}} \quad (25b),$$

..... ,

$$FBP_j = \frac{MBP_j}{C_{up\alpha} - C_{lo_j}} \quad (25c)$$

Όπου $C_{up\alpha}$ είναι η μέγιστη συγκέντρωση του διαστήματος συγκεντρώσεων που βρίσκεται ο κόμβος ανάσχεσης και C_{lo_j} είναι η συγκέντρωση εξόδου της αντίστοιχης πηγής νερού j .

Για να υπολογιστεί η συνολική ροή κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης, $TFBP$ (total flow below pinch) αρκεί μόνο να προστεθούν οι παραπάνω επιμέρους ροές δηλαδή:

$$TFBP = \sum_j FBP_j \quad (26)$$

Η ίδια λογική ισχύει και για τον υπολογισμό της ροής που είναι πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης. Αρχικά υπολογίζεται η μάζα που πηγαίνει σε κάθε πηγή νερού j και συμβολίζεται ως MAP_j (mass above pinch). Στη συνέχεια υπολογίζεται η ροή που πηγαίνει σε κάθε πηγή νερού, FAP_j (flow above pinch) και στο τέλος αθροίζοντας τις επιμέρους ροές αυτές υπολογίζεται η συνολική ροή πάνω από το κόμβο ανάσχεσης, $TFAP$ (total flow above pinch). Πιο αναλυτικά:

$$MAP_j = W_{j,1}^W + W_{j,2}^W + \dots + W_{j,\alpha-1}^W \quad (27)$$

Στη συνέχεια ο υπολογισμός των ροών πάνω από το κόμβο ανάσχεσης δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$FAP_1 = \frac{MAP_1}{C_{up1} - C_p} \quad (28a)$$

$$FAP_2 = \frac{MAP_2}{C_{up1} - C_p} \quad (28b)$$

.....,

$$FAP_j = \frac{MAP_j}{C_{up1} - C_p} \quad (28c)$$

Όπου C_{up1} είναι η μέγιστη συγκέντρωση στο πρώτο διάστημα συγκεντρώσεων και C_p είναι η συγκέντρωση στο κόμβο ανάσχεσης.

Η ροή που πηγαίνει για επεξεργασία είναι το άθροισμα των παραπάνω ροών και είναι:

$$TFAP = \sum_j FAP_j \quad (29)$$

Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται η ροή που πάει για επεξεργασία πάνω από το κόμβο ανάσχεσης. Για να υπολογιστεί η ροή που πάει για επεξεργασία στο κόμβο ανάσχεσης (TFP) απλά αφαιρείται η ροή που αντιστοιχεί για πάνω από το κόμβο ανάσχεσης από τη ροή που υπάρχει κάτω αυτόν. Δηλαδή:

$$TFP = TFBP - TFAP \quad (30)$$

9. Εφαρμογή Μεθοδολογίας-Αποτελέσματα

Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε παραπάνω εφαρμόζεται σε δύο παραδείγματα διεργασιών που κάνουν χρήση νερού, από τις οποίες εξέρχονται λύματα τα οποία απελευθερώνονται στο περιβάλλον αφού υποστούν επεξεργασία.

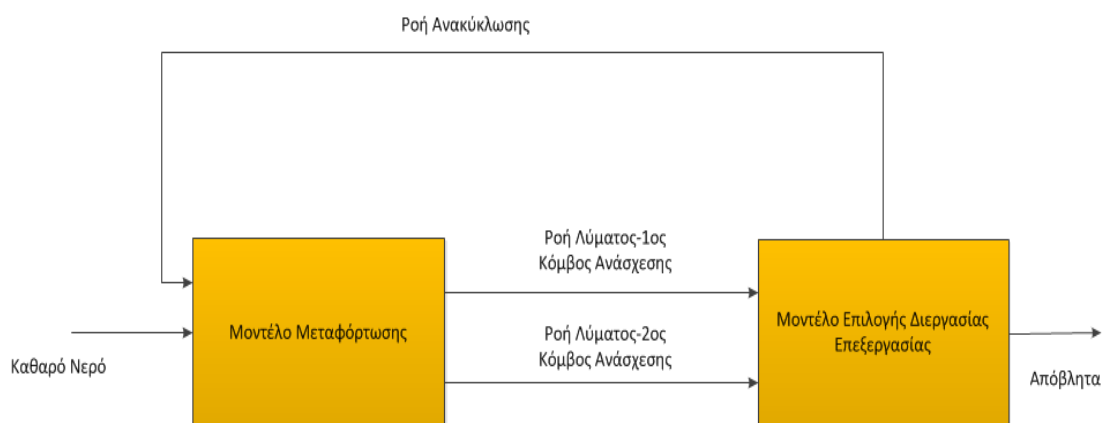
9.1 Πρώτο Παράδειγμα

Στο παράδειγμα αυτό το σύστημά μας αποτελείται από 4 διεργασίες που χρησιμοποιούν νερό. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται τα δεδομένα των διεργασιών για τη μάζα του ρυπαντή, τη μέγιστη συγκέντρωση εισόδου και εξόδου καθώς και την οριακή ροή νερού.

Πίνακας 4: Δεδομένα διεργασιών χρήσης νερού πρώτου παραδείγματος

Διεργασίες Χρήσης Νερού				
Αριθμός διεργασίας	Μαζικό φορτίο ρυπαντή(kg/h)	C_{in} (ppm)	C_{out} (ppm)	Οριακή ροή νερού (t/h)
1	2	0	100	20
2	5	50	100	100
3	30	50	800	40
4	4	400	800	10

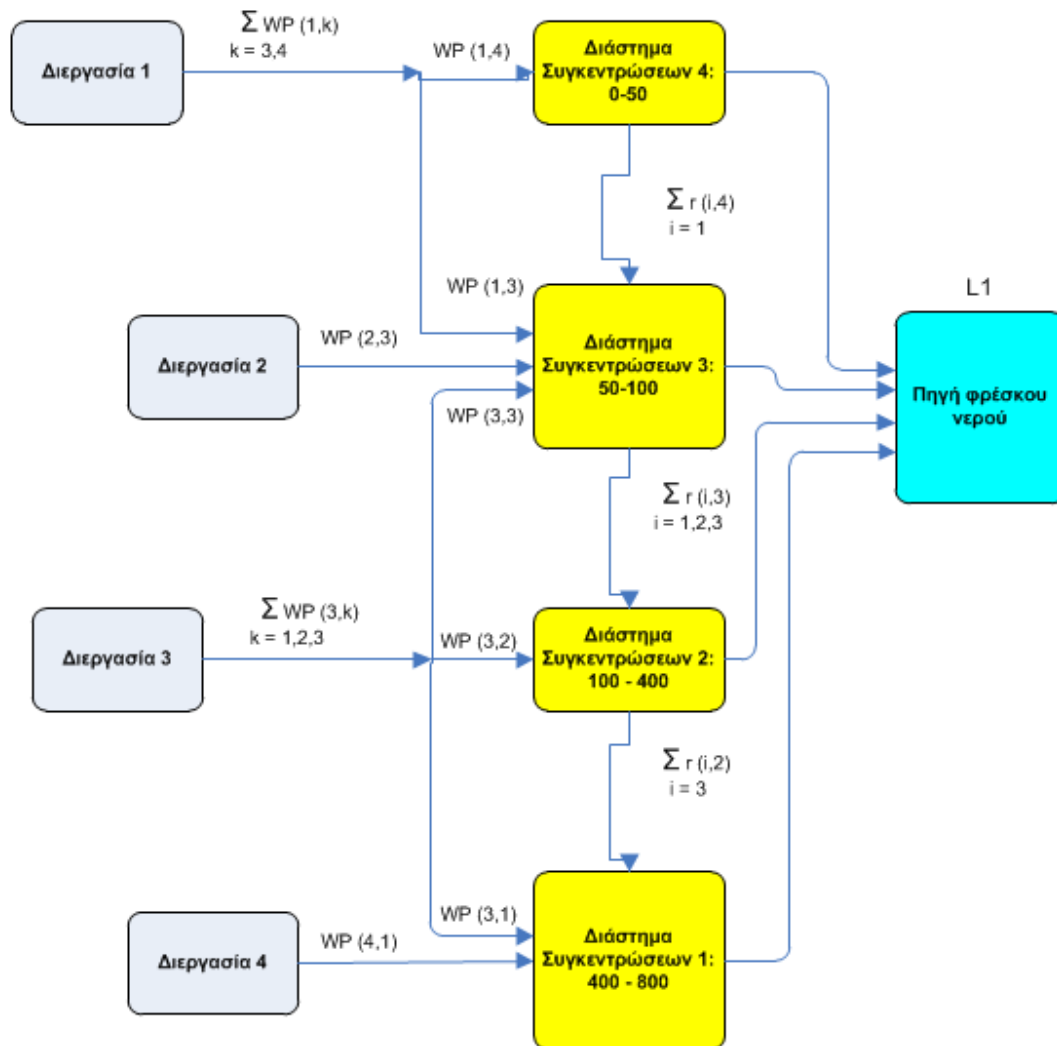
Στο Σχήμα 24 παρουσιάζεται ολόκληρο το σύστημα του παραδείγματος στο οποίο φαίνονται οι ροές φρέσκου νερού και ανακύκλωσης καθώς και οι ροές των λυμάτων που πάνε για επεξεργασία.



Σχήμα 24: Σύστημα νερού πρώτου παραδείγματος

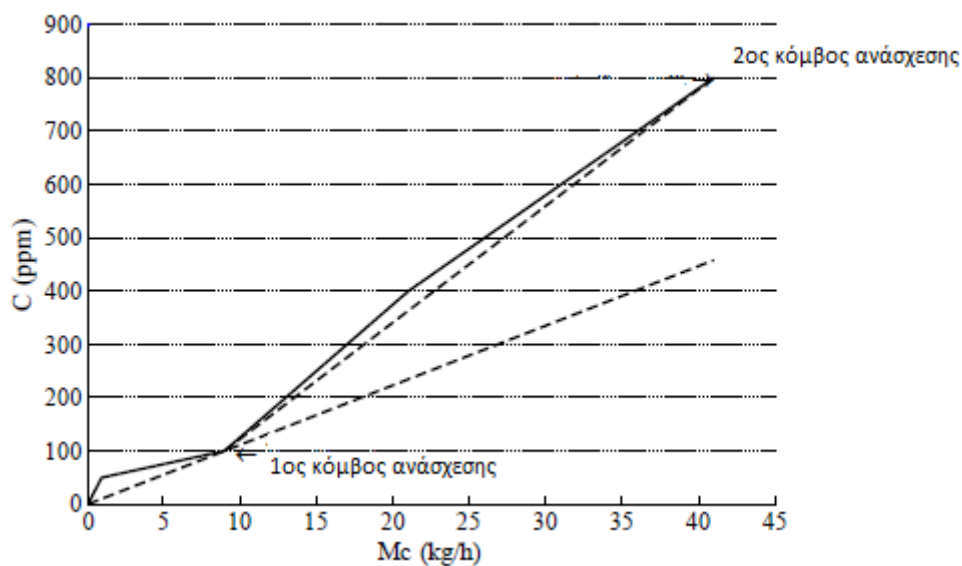
Φρέσκο νερό μαζί με νερό που ανακυκλώνεται από την επεξεργασία των λυμάτων τροφοδοτείται στο μοντέλο μεταφόρτωσης το οποίο υπολογίζει τις ροές των λυμάτων. Οι ροές αυτές περνάνε από το μοντέλο επιλογής διεργασιών επεξεργασίας, καθαρίζονται από το ρυπαντή, του οποίου η συγκέντρωση πέφτει στην επιθυμητή τιμή που είναι η συγκέντρωση περιβάλλοντος και μέρος από αυτές ανατροφοδοτείται στο μοντέλο μεταφόρτωσης.

Το διάγραμμα των διαστημάτων συγκέντρωσης και από ποιές διεργασίες αυτά δέχονται νερό καθώς και ο τελικός προορισμός που είναι μία πηγή φρέσκου νερού παρουσιάζεται στο Σχήμα 25.



Σχήμα 25: Διαστήματα συγκεντρώσεων πρώτου παραδείγματος

Το σύστημα νερού αλλά και οι δύο κόμβοι ανάσχεσης για το συγκεκριμένο παράδειγμα από τους οποίους φεύγουν τα λύματα που πάνε στη συνέχεια για επεξεργασία φαίνεται στη γραφική απεικόνιση του Σχήματος 26.



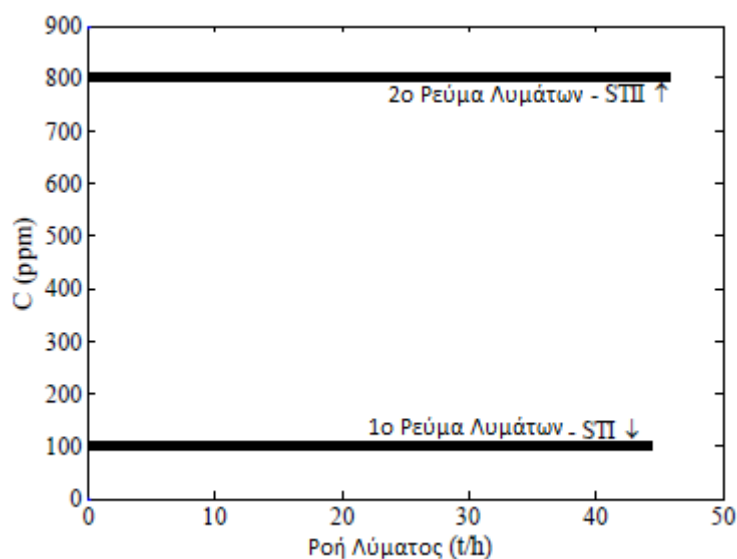
Σχήμα 26:Κόμβοι ανάσχεσης πρώτου παραδείγματος

Με τη χρήση του μοντέλου μεταφόρτωσης υπολογίζονται οι ροές των λυμάτων που προκύπτουν από τους δύο κόμβους ανάσχεσης κατά την πρώτη επανάληψη και τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Αποτελέσματα πρώτου μοντέλου

Διεργασίες Χρήσης Νερού		
Ελάχιστη ροή φρέσκου νερού		90t /h
Ρεύματα λυμάτων	Συγκέντρωση(ppm)	Ροή(t/h)
ST I	100	44,3
ST II	800	45,7

Το πρώτο ρεύμα που προκύπτει (ST I) είναι τα λύματα που πάνε για επεξεργασία από το πρώτο κόμβο ανάσχεσης με ροή 44,3t/h και συγκέντρωση 100 ppm ενώ η ροή 45,7t/h (ST II) είναι αυτή που φεύγει από το δεύτερο κόμβο ανάσχεσης σε συγκέντρωση 800ppm. Στο Σχήμα 27 φαίνονται σχηματικά οι δύο ροές και οι συγκεντρώσεις από τις οποίες προκύπτουν.



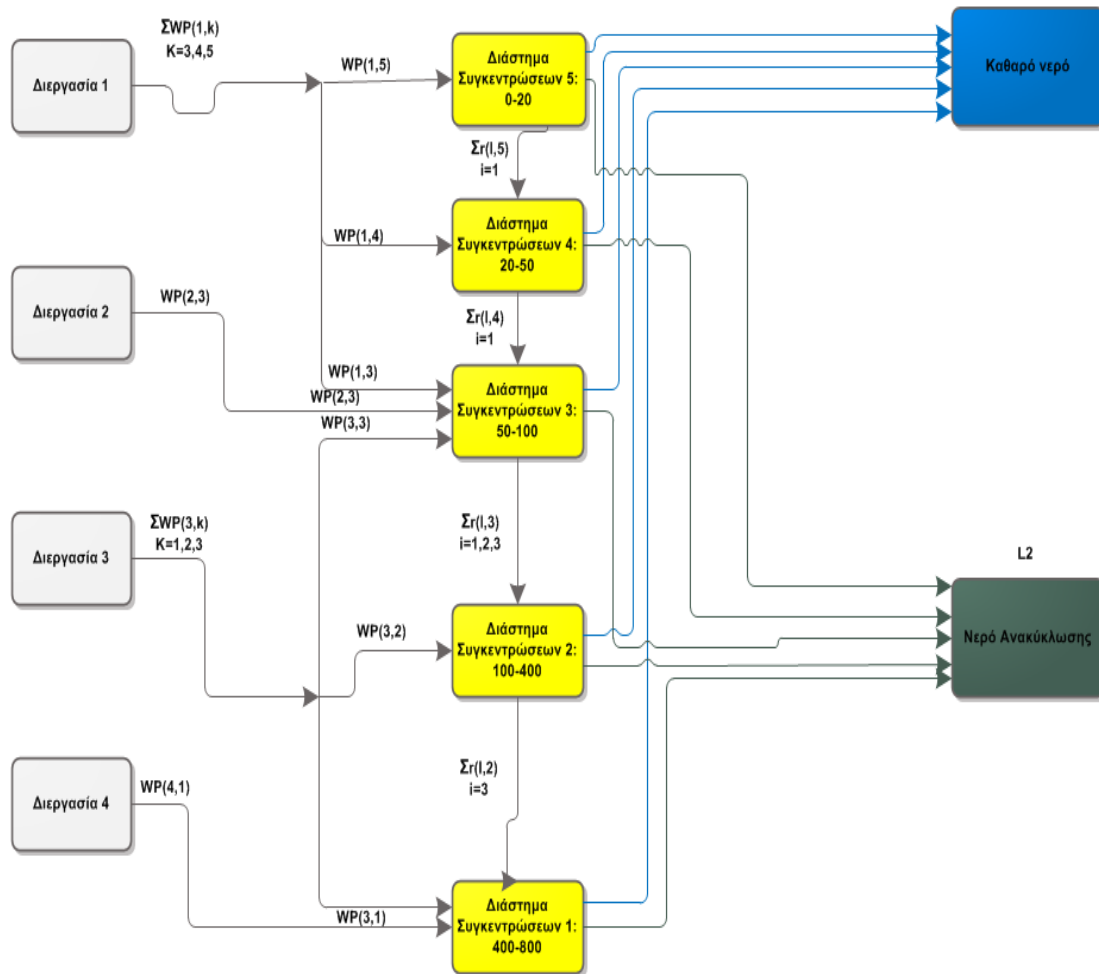
Σχήμα 27: Ρεύματα λυμάτων

Αφού έχει βρεθεί ο αριθμός, οι συγκεντρώσεις και οι ροές των ρευμάτων που πάνε για επεξεργασία, χρησιμοποιείται το δεύτερο μοντέλο για την εύρεση του ελάχιστου δυνατού κόστους επεξεργασίας, επιλέγοντας κάποιες από τις διαθέσιμες μεθόδους και υπολογίζοντας τις ελάχιστες απαιτούμενες ροές αποβλήτων προς αυτές. Στον Πίνακα 6 φαίνονται τα δεδομένα που υπάρχουν για αυτές τις μεθόδους.

Πίνακας 6: Δεδομένα επεξεργασίας λυμάτων πρώτου παραδείγματος

Διεργασίες Επεξεργασίας Λυμάτων				
Αριθμός Διεργασίας	C_{in} (ppm)	C_{out} (ppm)	Σταθερό Κόστος (χιλ.€)	Συντελεστής Μεταβλητού Κόστους(χιλ.€/t/h)
I	50	10	200	15
IIa	900	30	50	10
IIb	900	30	150	8
Όριο απόθεσης στο περιβάλλον $C_e=20$ ppm				

Στο παραπάνω πίνακα φαίνονται οι συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου των ρευμάτων επεξεργασίας, τα σταθερά και μεταβλητά κόστη για την χρήση τους καθώς και η συγκέντρωση απόθεσης στο περιβάλλον. Σκοπός όπως προαναφέρθηκε είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους. Επειδή υπάρχει συγκεκριμένο όριο απόθεσης είναι απαραίτητο αυτό να υπάρχει στα διαστήματα συγκεντρώσεων. Έτσι κατασκευάζεται το Σχήμα 28 στο οποίο φαίνονται τα νέα διαστήματα συγκεντρώσεων καθώς και το νερό ανακύκλωσης το οποίο είναι μία νέα διαθέσιμη πηγή από την στιγμή που έχει ήδη γίνει η πρώτη επανάληψη.



Σχήμα 28: Διαστήματα συγκεντρώσεων με τη συγκέντρωση περιβάλλοντος

Το όριο συγκέντρωσης για το περιβάλλον είναι τα 20 ppm οπότε από τα δεδομένα είναι βέβαιο ότι θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η διεργασία I και μία από τις διεργασίες IIa και IIb. Ποιά από τις δύο εξαρτάται από τα κόστη και τις ροές των λυμάτων που έρχονται για επεξεργασία. Επιλύοντας με τη χρήση του δεύτερου μοντέλου κατά την πρώτη επανάληψη και χωρίς τη χρήση ανακύκλωσης παράγονται τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 7: Αποτελέσματα επεξεργασίας λυμάτων

Διεργασίες Επεξεργασίας Λυμάτων	
Επιλεχθήσες διεργασίες επεξεργασίας	I,IIb
Κόστος Επεξεργασίας	2,57Μ€
Ροές Διεργασιών Επεξεργασία Λυμάτων	
I	90
IIb	64,28

Παρατηρείται λοιπόν ότι επεξεργάζονται 90t/h από τη πρώτη διεργασία (I) και 64,28 t/h από τη δεύτερη (IIb). Οι 90 t/h είναι η συνολική ποσότητα που μπορεί να ανακυκλωθεί σε συγκέντρωση 20 ppm. Δηλαδή η τιμή αυτή περιλαμβάνει τη ροή που προκύπτει και από τη δεύτερη διεργασία. Η τιμή του 64,28 t/h είναι η ποσότητα που περνάει από τη δεύτερη διεργασία.

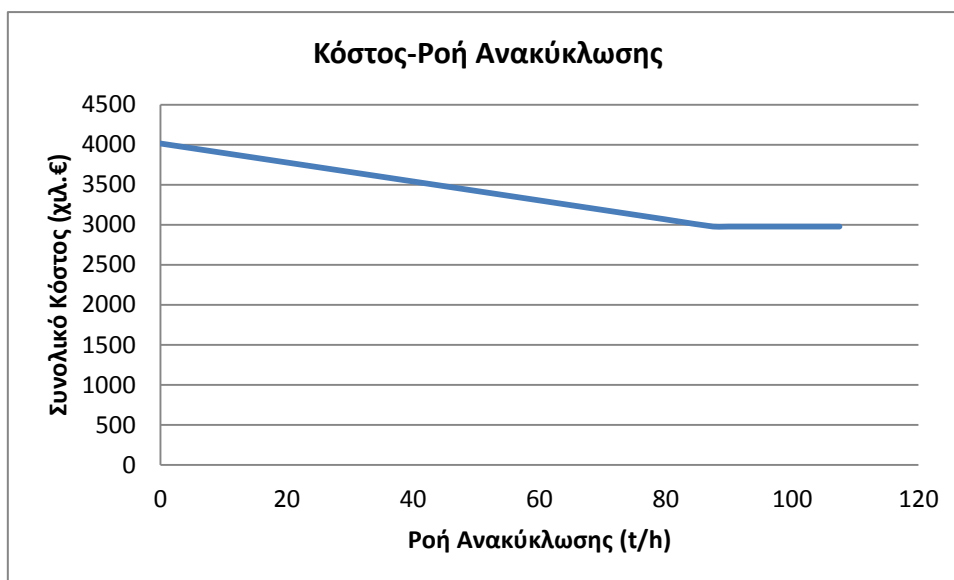
Στη συνέχεια σκοπός είναι να γίνει επαναχρησιμοποίηση μίας ποσότητας νερού ώστε να ελαχιστοποιηθεί η χρήση φρέσκου νερού σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε παραπάνω. Χρησιμοποιήθηκαν τιμές για τη ροή ανακύκλωσης μεταξύ 0 και της διαθέσιμης ποσότητας. Αρχικά αυξάνοντας από το 0 ανά 10 t/h υπολογίζονται οι τιμές φρέσκου νερού και το συνολικό κόστος όπως φαίνεται στον Πίνακα 9. Οι επαναλήψεις συνεχίζονται έως ότου η τιμή του φρέσκου νερού να σταθεροποιηθεί σε μία τιμή.

Πίνακας 8: Αποτελέσματα ροής φρέσκου νερού και κόστους για διάφορες τιμές ροής ανακύκλωσης

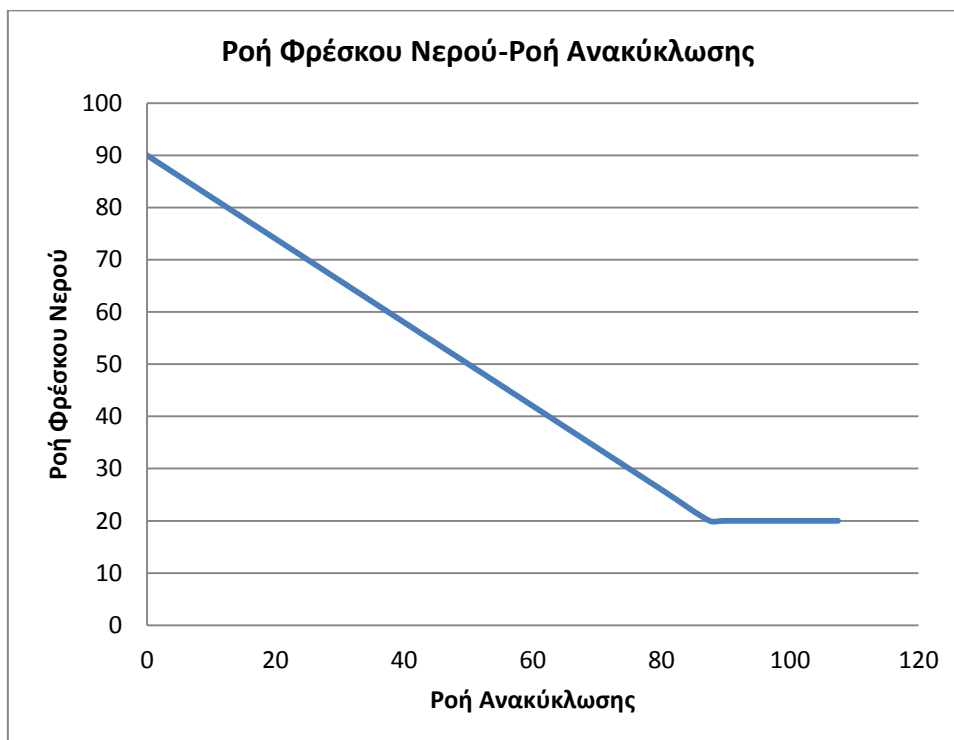
Ροή Νερού Ανακύκλωσης (t/h)	Ροή Φρέσκου Νερού (t/h)	Συνολικό Κόστος (χιλ.€)
0	90	4014,3
10	82	3895,7
20	74	3777,1
30	66	3658,6
40	58	3540
50	50	3421,4
60	42	3302,9
70	34	3184,3
80	26	3065,7
87,5	20	2976,8
90	20	2976,8
107,5	20	2976,8

Η τιμή των 87,5 t/h αποτελεί τη βέλτιστη τιμή η οποία υπολογίζεται μετά από τις συνεχόμενες επαναλήψεις.

Στα Σχήματα 29 και 30 φαίνεται πως μεταβάλλεται το κόστος και η ροή του φρέσκου νερού συναρτήσει της ροής ανακύκλωσης.



Σχήμα 29: Κόστος συναρτήσει της ροής ανακύκλωσης



Σχήμα 30: Ροή φρέσκου νερού συναρτήσει της ροής ανακύκλωσης

Παρατηρείται ότι και στα δύο διαγράμματα η καμπύλη είναι φθίνουσα μέχρι ένα σημείο όπου η κλίση της μηδενίζεται. Η τιμή στην οποία μηδενίζεται η κλίση είναι αυτή

όπου παρουσιάζεται η βέλτιστη τιμή ανακύκλωσης με την οποία ελαχιστοποιείται το κόστος. Ακόμα και αν αυξανόταν η ροή ανακύκλωσης πέρα από το βέλτιστο σημείο δεν θα υπήρχε κάποια οικονομική βελτίωση καθώς το σύστημα χρειάζεται οποσδήποτε 20 t/h φρέσκου νερού για να καλύψει πλήρως τις απαιτήσεις του αλλά και για να επιτευχθεί η συγκέντρωση περιβάλλοντος. Έτσι το κόστος θα παρέμενε το ίδιο καθώς η επιπλέον διαθέσιμη ροή δεν θα χρησιμοποιόταν. Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται οι βέλτιστες τιμές για τη ροή ανακύκλωσης και για το συνολικό κόστος καθώς και οι ροές των ρευμάτων που οδηγούνται για επεξεργασία.

Πίνακας 9: Βέλτιστα αποτελέσματα

Ροή φρέσκου νερού(t/h)	20
Ροή νερού ανακύκλωσης(t/h)	87,5
Ροή Λύματος-1 ^{ος} κόμβος ανάσχεσης	61,79
Ροή Λύματος-2 ^{ος} κόμβος ανάσχεσης	45,71
Κόστος Επεξεργασίας (χιλ.€)	2576,8
Κόστος Χρήσης Φρέσκου Νερού (χιλ.€)	400
Συνολικό Κόστος (χιλ.€)	2976,8

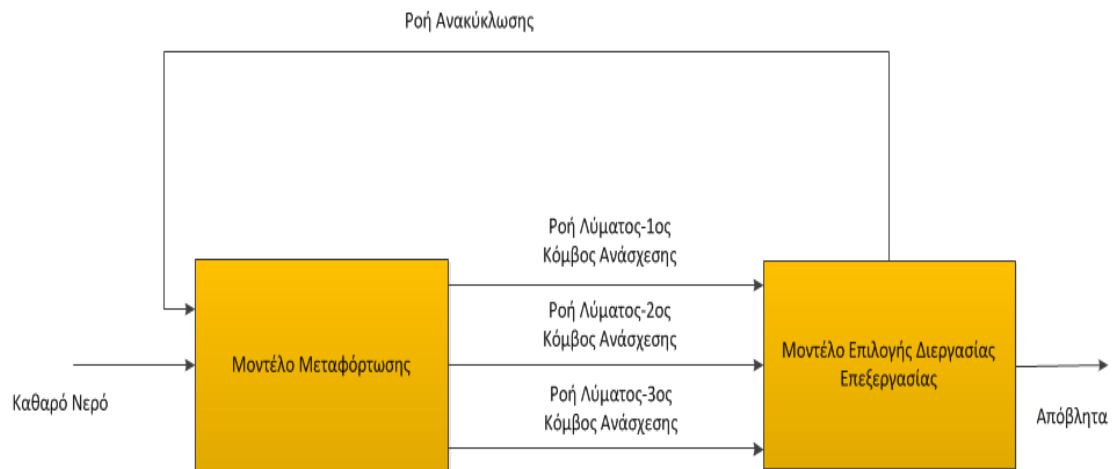
9.2 Δεύτερο Παράδειγμα

Στο δεύτερο παράδειγμα που θα μελετηθεί οι διεργασίες που εκτελούνται με τη χρήση νερού είναι περισσότερες. Στον Πίνακα 118 φαίνονται τα δεδομένα των διεργασιών για τη μάζα του ρυπαντή, τη μέγιστη συγκέντρωση εισόδου και εξόδου καθώς και την οριακή ροή νερού.

Πίνακας 10: Δεδομένα διεργασιών χρήσης νερού δεύτερου παραδείγματος

Διεργασίες Χρήσης Νερού				
Αριθμός Διεργασιών	Μαζικό Φορτίο Ρυπαντή (kg/h)	C _{in} (ppm)	C _{out} (ppm)	Οριακή Ροή (t/h)
1	8	0	200	40
2	5	100	200	50
3	9	100	400	20
4	6	300	400	60
5	8	400	600	40

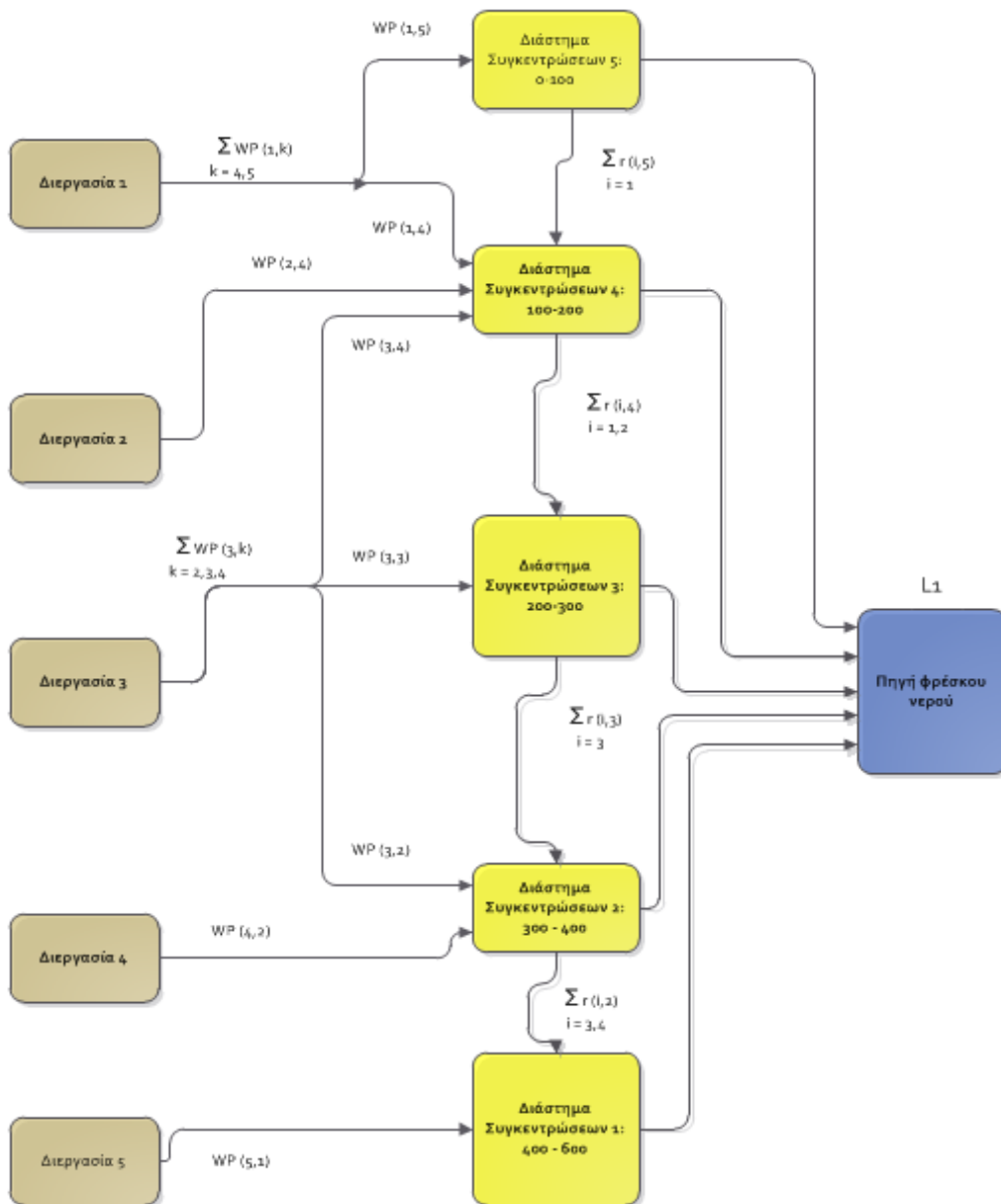
Στο Σχήμα 31 γίνεται σχηματική απεικόνιση του συστήματος στο οποίο φαίνονται οι ροές φρέσκου νερού και ανακύκλωσης καθώς και οι ροές των λυμάτων που προκύπτουν από τους κόμβους ανάσχεσης και πάνε για επεξεργασία.



Σχήμα 31: Σύστημα νερού δεύτερου παραδείγματος

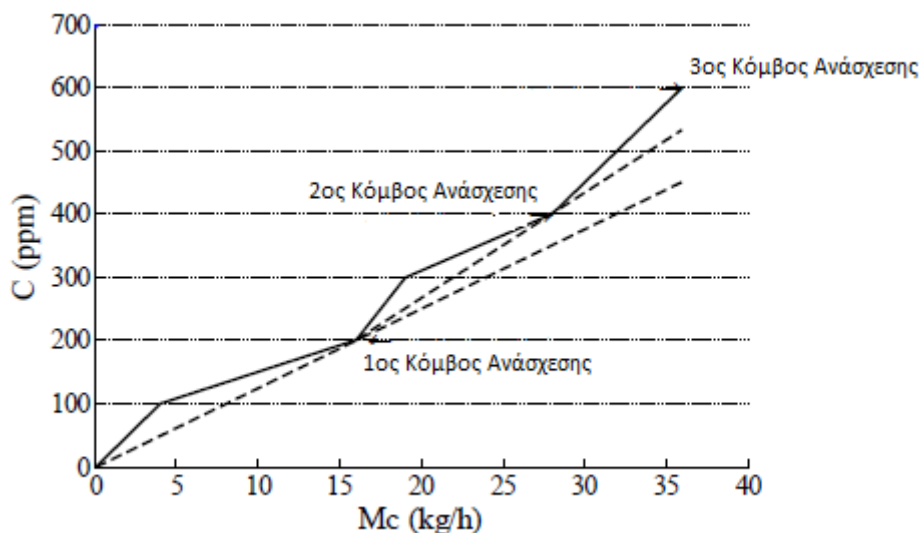
Σε αντίθεση με το προηγούμενο παράδειγμα, σε αυτό έχουμε τρεις κόμβους ανάσχεσης αντί για δύο με αποτέλεσμα ο αριθμός των ροών που πάνε για επεξεργασία να είναι μεγαλύτερος και συγκεκριμένα τρεις. Σε αυτή τη περίπτωση το μοντέλο μεταφόρτωσης θα υπολογίσει τρεις ροές οι οποίες θα οδηγηθούν στο μοντέλο επιλογής διεργασίας επεξεργασίας.

Στο Σχήμα 32 απεικονίζεται το διάγραμμα των διαστημάτων συγκέντρωσης και από ποιές διεργασίες αυτά δέχονται νερό καθώς και ο τελικός προορισμός που είναι μία πηγή φρέσκου νερού.



Σχήμα 32: Διαστήματα συγκεντρώσεων δεύτερου παραδείγματος

Στη γραφική απεικόνιση του Σχήματος 33 φαίνονται οι τρεις κόμβοι ανάσχεσης από τους οποίους προκύπτουν τα λύματα που πάνε για επεξεργασία. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται τα οριακά προφίλ νερού τα οποία αποτελούν τις ευθείες γραμμές που ενώνουν τους κόμβους ανάσχεσης μεταξύ τους και την αρχή των αξόνων με το πρώτο κόμβο ανάσχεσης.



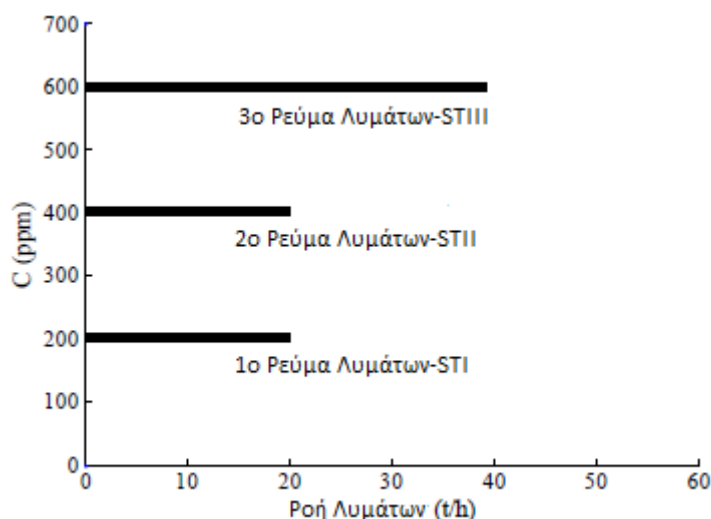
Σχήμα 33: Κόμβοι ανάσχεσης δεύτερου παραδείγματος

Με τη χρήση του μοντέλου μεταφόρτωσης υπολογίζονται οι ροές των λυμάτων που προκύπτουν από τους τρεις κόμβους ανάσχεσης κατά την πρώτη επανάληψη και τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 12.

Πίνακας 11: Αποτελέσματα πρώτου μοντέλου

Διεργασίες Χρήσης Νερού		
Ρεύματα Λυμάτων	Συγκέντρωση(ppm)	Ροή (t/h)
STI	200	20
STII	400	20
STIII	600	40
Ελάχιστη ροή φρέσκου νερού		80 t/h

Το STI είναι η ροή που φεύγει από τη συγκέντρωση των 200 ppm δηλαδή το πρώτο κόμβο ανάσχεσης και έχει τιμή 20 t/h. Από το δεύτερο κόμβο ανάσχεσης φεύγει το STII σε συγκέντρωση 400 ppm και ροής 20 t/h και από τον τρίτο κόμβο ανάσχεσης η ροή STII με συγκέντρωση 600 ppm και τιμή 40 t/h. Στο Σχήμα 34 φαίνονται οι ροές και οι συγκεντρώσεις αυτές.



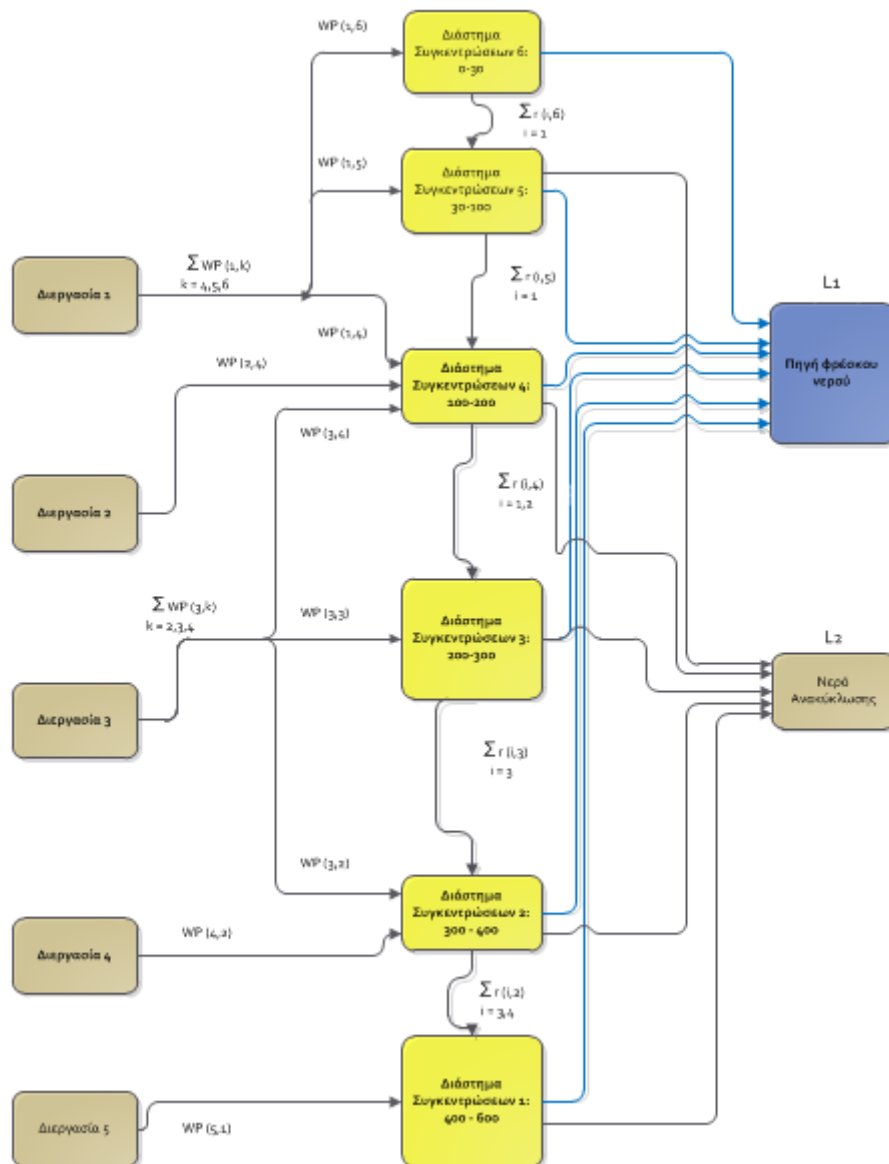
Σχήμα 34: Ρεύματα λυμάτων

Αφού έχει βρεθεί ο αριθμός, οι συγκεντρώσεις και οι ροές των ρευμάτων που πάνε για επεξεργασία, χρησιμοποιείται το δεύτερο μοντέλο για την εύρεση του ελάχιστου δυνατού κόστους επεξεργασίας, επιλέγοντας κάποιες από τις διαθέσιμες μεθόδους και υπολογίζοντας τις ελάχιστες απαιτούμενες ροές αποβλήτων προς αυτές. Στον Πίνακα 13 φαίνονται τα δεδομένα που υπάρχουν για αυτές τις μεθόδους.

Πίνακας 12: Δεδομένα επεξεργασίας λυμάτων δεύτερου παραδείγματος

Διεργασίες Επεξεργασίας Λυμάτων				
Αριθμός Διεργασιών	C_{in} (ppm)	C_{out} (ppm)	Σταθερό Κόστος (χιλ.€)	Συντελεστής Μεταβλητού Κόστους (χιλ.€/t/h)
I	200	5	200	15
IIa	1000	50	50	13
IIb	1000	50	150	8
Όριο απόθεσης στο περιβάλλον $C_e=30$ ppm				

Στο παραπάνω πίνακα φαίνονται οι συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου των ρευμάτων επεξεργασίας, τα σταθερά και μεταβλητά κόστη για την χρήση τους καθώς και η συγκέντρωση απόθεσης στο περιβάλλον. Σκοπός όπως προαναφέρθηκε είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους. Επειδή υπάρχει συγκεκριμένο όριο απόθεσης είναι απαραίτητο αυτό να υπάρχει στα διαστήματα συγκεντρώσεων. Έτσι κατασκευάζεται το Σχήμα 35 στο οποίο φαίνονται τα νέα διαστήματα συγκεντρώσεων καθώς και το νερό ανακύκλωσης το οποίο είναι μία νέα διαθέσιμη πηγή από την στιγμή που έχει ήδη γίνει η πρώτη επανάληψη.



Σχήμα 35: Διαστήματα συγκεντρώσεων μαζί με τη συγκέντρωση περιβάλλοντος

Το όριο συγκέντρωσης για το περιβάλλον είναι τα 30 ppm οπότε από τα δεδομένα είναι βέβαιο ότι θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η διεργασία I και μία από τις διεργασίες IIa και IIb. Ποιά από τις δύο εξαρτάται από τα κόστη και τις ροές των λυμάτων που έρχονται για επεξεργασία. Επιλύοντας με τη χρήση του δεύτερου μοντέλου κατά την πρώτη επανάληψη και χωρίς τη χρήση ανακύκλωσης παράγονται τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 14.

Πίνακας 13: Αποτελέσματα επεξεργασίας λυμάτων

Διεργασίες Επεξεργασίας Λυμάτων	
Επιλεχθήσες διεργασίες επεξεργασίας	I,IIb
Κόστος Επεξεργασίας	2,08Μ€
Ροές Διεργασιών Επεξεργασία Λυμάτων	
I	80
IIb	50,909

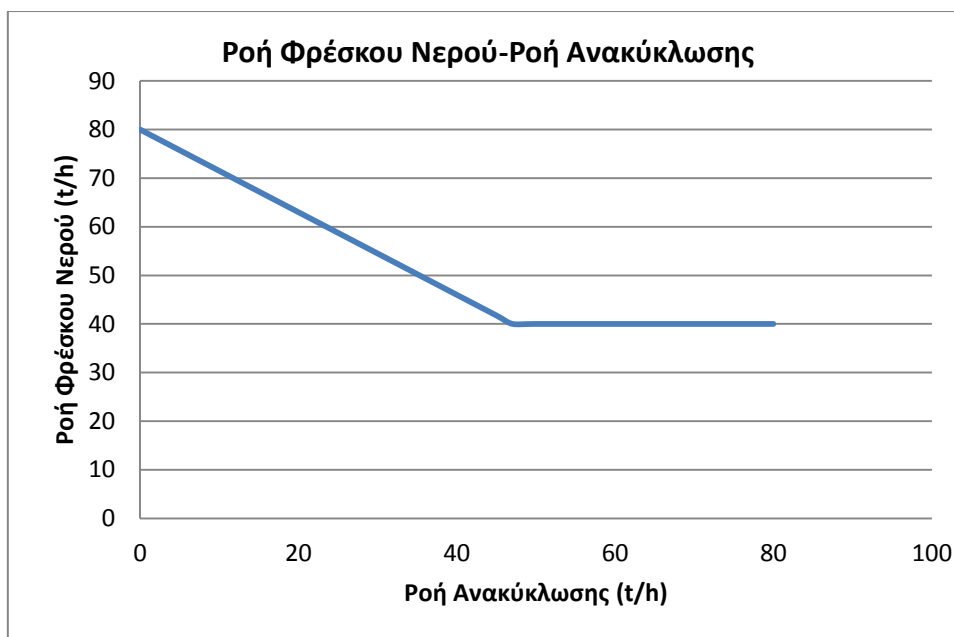
Παρατηρείται λοιπόν ότι επεξεργάζονται 80t/h από τη πρώτη διεργασία (I) και 50,909 t/h από τη δεύτερη (IIb). Οι 80 t/h είναι η συνολική ποσότητα που μπορεί να ανακυκλωθεί σε συγκέντρωση 30 ppm. Δηλαδή η τιμή αυτή περιλαμβάνει τη ροή που προκύπτει και από τη δεύτερη διεργασία. Η τιμή του 50,909 είναι η ποσότητα που περνάει από τη δεύτερη διεργασία.

Στη συνέχεια σκοπός είναι να γίνει επαναχρησιμοποίηση μίας ποσότητας νερού ώστε να ελαχιστοποιηθεί η χρήση φρέσκου νερού σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε παραπάνω. Χρησιμοποιήθηκαν τιμές για τη ροή ανακύκλωσης μεταξύ 0 και της διαθέσιμη ποσότητας. Αρχικά αυξάνοντας από το 0 ανά 5 t/h υπολογίζονται οι τιμές φρέσκου νερού και το συνολικό κόστος όπως φαίνεται στον Πίνακα 15. Οι επαναλήψεις συνεχίζονται έως ότου η τιμή του φρέσκου νερού να σταθεροποιηθεί σε μία τιμή.

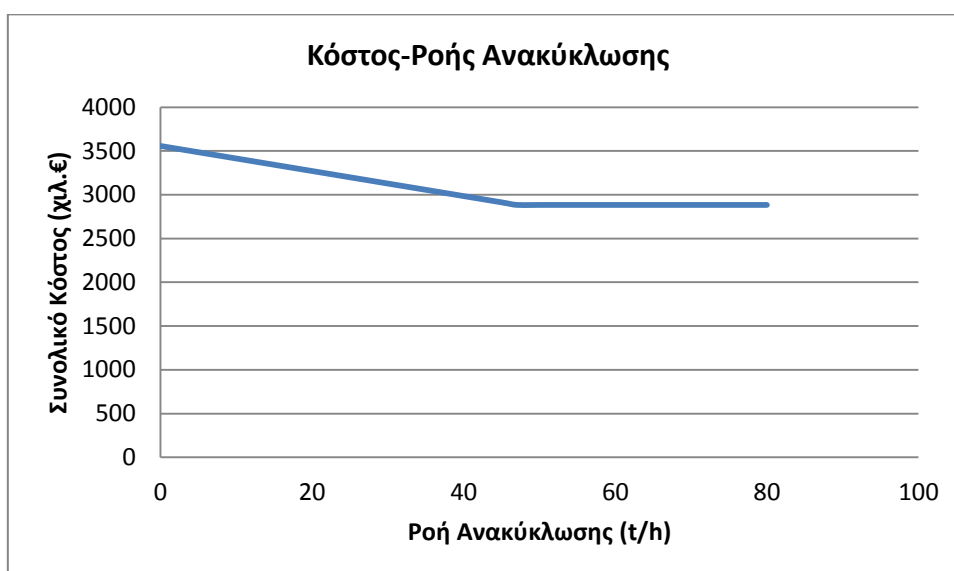
Πίνακας 14: Αποτελέσματα ροής φρέσκου νερού και κόστους για διάφορες τιμές ροής ανακύκλωσης

Ροή Νερού Ανακύκλωσης (t/h)	Ροή Φρέσκου Νερού (t/h)	Συνολικό Κόστος (χιλ.€)
0	80	3557,3
5	75,75	3485,7
10	71,5	3414,1
15	67,25	3342,6
20	63	3271
25	58,75	3199,4
30	54,5	3127,9
35	50,25	3056,3
40	46	2984,7
45	41,75	2913,2
47,059	40	2883,7
50	40	2883,7
60	40	2883,7
70	40	2883,7
80	40	2883,7

Στα Σχήματα 36 και 37 φαίνεται πως μεταβάλλεται το κόστος και η ροή του φρέσκου νερού συναρτήσει της ροής ανακύκλωσης.



Σχήμα 36: Κόστος συναρτήσει της ροής ανακύκλωσης



Σχήμα 37: Ροή φρέσκου νερού συναρτήσει της ροής ανακύκλωσης

Παρατηρείται ότι και στα δύο διαγράμματα η καμπύλη είναι φθίνουσα μέχρι ένα σημείο όπου η κλίση της μηδενίζεται. Η τιμή στην οποία μηδενίζεται η κλίση είναι αυτή όπου παρουσιάζεται η βέλτιστη τιμή ανακύκλωσης με την οποία ελαχιστοποιείται το κόστος. Ακόμα και αν αυξανόταν η ροή ανακύκλωσης πέρα από το βέλτιστο σημείο δεν θα υπήρχε κάποια οικονομική βελτίωση καθώς το σύστημα χρειάζεται οποσδήποτε 40 t/h φρέσκου νερού για να καλύψει πλήρως τις απαιτήσεις του αλλά και για να επιτευχθεί η συγκέντρωση περιβάλλοντος. Έτσι το κόστος θα παρέμενε το ίδιο καθώς η επιπλέον διαθέσιμη ροή δεν θα χρησιμοποιούταν. Στον Πίνακα 16 παρουσιάζονται οι βέλτιστες τιμές για τη ροή ανακύκλωσης και για το συνολικό κόστος καθώς και οι ροές των ρευμάτων που οδηγούνται για επεξεργασία.

Πίνακας 15: Βέλτιστα αποτελέσματα

Ροή φρέσκου νερού(t/h)	40
Ροή νερού ανακύκλωσης(t/h)	47,059
Ροή Λύματος-1^{ος} κόμβος ανάσχεσης	27,059
Ροή Λύματος-2^{ος} κόμβος ανάσχεσης	20
Ροή Λύματος-3^{ος} κόμβος ανάσχεσης	40
Κόστος Επεξεργασίας (χιλ.€)	2083,69
Κόστος Χρήσης Φρέσκου Νερού (χιλ.€)	800
Συνολικό Κόστος (χιλ.€)	2883,69

10. Συμπεράσματα

Από τα δύο παραδείγματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω παρατηρήθηκε ότι τόσο το συνολικό κόστος του συστήματος όσο και η ροή του φρέσκου νερού λαμβάνουν μία σταθερή τιμή από μία τιμή ροής ανακύκλωσης και μετά. Κάτι τέτοιο είναι λογικό καθώς από ένα σημείο και μετά όση ροή ανακύκλωσης και να τροφοδοτηθεί είναι αναγκαία μία συγκεκριμένη ποσότητα καθαρού νερού. Αυτό συμβαίνει γιατί η συγκέντρωση της ροής ανακύκλωσης δεν μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις που υπάρχουν για συγκεκριμένη απομάκρυνση ρυπαντή σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Για το σκοπό αυτό μία ελάχιστη ροή φρέσκου νερού με συγκέντρωση μηδέν είναι αναγκαία. Από το σημείο λοιπόν αυτό και μετά οποιαδήποτε επιπλέον ποσότητα ανακύκλωσης δίνεται στο σύστημα απλά αγνοείται από τα μοντέλα κατά τους υπολογισμούς και για αυτό το λόγο τόσο το κόστος επεξεργασίας όσο και το κόστος χρήσης φρέσκου νερού παραμένουν σταθερά.

Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε παραπάνω αφορά μόνο την περίπτωση όπου η συγκέντρωση εξόδου μετά την επεξεργασία είναι σταθερή. Μία βελτίωση που μπορεί να γίνει είναι η προσαρμογή του για διεργασίες με δεδομένα λόγων απομάκρυνσης. Σε αυτή τη περίπτωση η συγκέντρωση εξόδου μεταβάλλεται συνεχώς και πρέπει να χρησιμοποιηθούν επιπλέον μη γραμμικές εξισώσεις εκτός από όσες χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μεθοδολογία. Μία επιπλέον επέκταση της μεθοδολογίας θα μπορούσε να ήταν η εφαρμογή της για ένα σύστημα με πολλαπλούς ρυπαντές. Η επίλυση είναι αρκετά πιο δύσκολη καθώς θα πρέπει να υπολογιστούν διαφορετικές ροές για κάθε ρυπαντή και να εφαρμοστούν διαφορετικές διεργασίες επεξεργασίας με διαφορετικές συγκεντρώσεις απόθεσης στο περιβάλλον που σημαίνει ότι ο αριθμός των εξισώσεων και των παραμέτρων αυξάνεται σημαντικά. Τέλος μία τελευταία βελτίωση θα ήταν η χρήση μη γραμμικών ισοζυγίων και εξισώσεων στο μοντέλο για πιο ακριβή πρόβλεψη των λυμάτων που πάνε για επεξεργασία καθώς και της ροής ανακύκλωσης. Με τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε υπολογίζεται το μέγιστο ελάχιστο, μπορεί δηλαδή να ερμηνευτεί σαν ένας συντελεστής ασφαλείας. Η ροές που υπολογίζονται καθώς και τα κόστη είναι λίγο μεγαλύτερα από τα βέλτιστα αλλά με τη χρήση μη γραμμικών εξισώσεων θα είναι δυνατός ο υπολογισμός της πραγματικά βέλτιστης λύσης.

11. Βιβλιογραφία

1. A. Alva-Argáez, A. Vallianatos, A. Kokossis, 1999, A multi-contaminant transshipment model for mass exchange networks and wastewater minimization problems, *Computers and Chemical Engineering*, 23, 1439–1453
2. R. Smith, 2005, *Chemical Process Design and Integration*, John Wiley & Sons, Chichester, UK
3. A. Nikolakopoulos, A. Kokossis, 2015, A mathematical programming targeting method to select treatment technologies ahead of design, *Computer Aided Chemical Engineering*
4. Nikolakopoulos, L. Thomaidis, A. Kokossis, 2014, Mathematical Programming Shortcut Screening Models for the Design of Integrated Waste Treatment Systems, *Computer Aided Chemical Engineering*, 34, 381-386
5. Weisberg, E., & Stockton, D.L. (1973). Water-use in a petroleum refinery. Complete water reuse: industry's opportunity. Based on papers presented at the National Conference on Complete Water Reuse (pp. 400-406. April 23-27
6. Wang, Y. P., Smith, R. (1995). Wastewater minimization with flowrate constraints. *Transactions of the Institute of Chemical Engineering A*, 73, 889-904
7. Wang, Y. P., Smith, R. (1994a). Wastewater minimization. *Chemical Engineering Science*, 49(7), 981-1006
8. Wang, Y. P., Smith, R. (1994b). Design of distributed effluent treatment systems. *Chemical Engineering Science*, 49(18), 3127-3145
9. Papalexandri, K. P., Pistikopoulos, E. N., & Floudas, A. (1994). Mass exchange networks for waste minimization: A simultaneous approach. *Transactions of the Institute of Chemical Engineering (A)*, 72, 279–294.
10. Gg Rossiter, A. P. (1995). *Waste minimization through process design* (1st ed.). New York: McGraw Hill
11. Mavromatis, S. P., & Kokossis, A. C. (1998c). Conceptual optimization of utility networks for operational variations — I. Targets and level optimization. *Chemical Engineering Science*, 53 (8), 1585–1608.
12. Srinivas, B. K., & El-Halwagi, M. M. (1994). Synthesis of reactive mass exchange networks with general nonlinear equilibrium functions. *American Institute of Chemical Engineering Journal*, 40 (3), 463–472.
13. Mavromatis, S. P., & Kokossis, A. C. (1998b). Hardware composites: A new conceptual tool for the analysis and optimization of steam turbine networks in chemical process industry — Part II: Applications to operation and design. *Chemical Engineering Science*, 53 (7), 1435–1464.
14. Magnanti, T. L., & Wong, R. T. (1984). Network design and transportation planning: models and algorithms. *Transportation Science*, 18 (1), 1–55.
15. Marcoulaki, E., & Kokossis, A. (1999). Scoping and screening complex reactor networks using stochastic optimization. *AIChE Journal*, 45 (9), 1977–1991.

12. Παράρτημα 1:Κώδικας Gams Πρώτου Παραδείγματος

1st example

sets

i operations /1*4/

k intervals /1*5/

opk (i,k) intervals - k - receiving contaminant from operation - i -. /1.(3, 4, 5), 2.3, 3.(1, 2, 3), 4.1/

op (i,k) intervals - k - NOT!! receiving contaminant from operation - i -. /1.(1, 2), 2.(1, 2, 4, 5), 3.(4, 5), 4.(2, 3, 4, 5)/

alias (k,kp)

parameters

mc(i) contaminant mass in process i /1 2000, 2 5000, 3 30000, 4 4000/

Cin_max(i) maximum allowed inlet concentration in process i /1 0, 2 50, 3 50, 4 400/

Cout_max(i) maximum allowed outlet concentration in process i /1 100, 2 100, 3 800, 4 800/

Clo(k) lower limit concentrations of concentration intervals /1 400, 2 100, 3 50, 4 20, 5 0/

Cup(k) upper limit concentrations of concentration intervals /1 800, 2 400, 3 100, 4 50, 5 20/

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 Fli for the water-using operation - i -

Equations

FlEquation(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 -;

$$FliEquation(i).. \quad Fl(i)=e= mc(i)/(Cout_max(i) - Cin_max(i));$$

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

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

sets

kk(k) subset of intervals for the constraint SMB /1*5/

j streams /1*2/

parameter

LU(j) Upper bound for the flowrate of freshwater stream - j -. /1 10000 , 2 90 /

cost(j) unit cost of freshwater source j /1 20 , 2 0.00001 /

MCtot total mass of contaminant

Cmax the maximum concentration of all

M sufficiently large number for the -YpEq- constraint;

$$MCtot = \text{sum}(i, mc(i));$$

$$Cmax = \text{smax}(k, Cup(k));$$

$$M = 99999;$$

parameter

Cp pinch point;

$$Cp=100 \quad ;$$

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 - ($g \cdot h^1$).

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 - through concentration interval - k -.

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). ;

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)) =e= WW(j,k);

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

***bound**

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,'5') = 0;

WW.fx('2','5')=0;

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

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

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

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

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

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

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

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

W.fx('2','4','1')=0;

W.fx('2','4','2')=0;

W.fx('2','5','1')=0;

W.fx('2','5','2')=0;

W.fx('3','4','1')=0;

W.fx('3','4','2')=0;

W.fx('3','5','1')=0;

W.fx('3','5','2')=0;

W.fx('4','2','1')=0;

$W.fx('4','2','2')=0;$
 $W.fx('4','3','1')=0;$
 $W.fx('4','3','2')=0;$
 $W.fx('4','4','1')=0;$
 $W.fx('4','4','2')=0;$
 $W.fx('4','5','1')=0;$
 $W.fx('4','5','2')=0;$

Model Simple_model_fig26_24_optimal /all/;

Solve Simple_model_fig26_24_optimal using minlp minimizing Total_cost;

parameter WWW1(j) mass of contaminant in intervals 3 4 5 ;

$WWW1(j)=WW.l(j,'3')+WW.l(j,'4')+WW.l(j,'5');$

parameter FFF1(j) flow of water in intervals 3 4 5 ;

$FFF1('1')=WWW1('1')/Cup('3');$

$FFF1('2')=WWW1('2')/(Cup('3')-20);$

parameter FFFSum sum of flow water in intervals 3 4 5 ;

$FFFSum=sum(j,FFF1(j));$

parameter WWW2(j) mass of contaminant in intervals 1 and 2;

$WWW2(j)=WW.l(j,'1')+WW.l(j,'2');$

parameter FFF2(j) flow of water in intervals 1 2;

$FFF2('2')=WWW2('2')/(Cup('1')-Cp);$

$FFF2('1')=WWW2('1')/(Cup('1')-Cp);$

parameter FFF2Sum sum of flow water in intervals 1 2;

FFF2Sum=sum(j,FFF2(j));

parameter FFF1Sum;

FFF1Sum=FFFSum-FFF2Sum ;

sets

i2 operations /1*2/

k2 intervals /1*6/

opk2 (i2,k2) intervals - k - receiving contaminant from operation - i -. /1.(3,4,5), 2.(2,3,4,5)/

op2 (i2,k2) intervals - k - NOT!! receiving contaminant from operation - i -. /1.(1,2,6), 2.(1,6)/

parameters

Cin_max2(i2) maximum allowed inlet concentration in process i /1 10 , 2 10/

Cout_max2(i2) maximum allowed outlet concentration in process i /1 90, 2 790/

Clo2(k2) lower limit concentrations of concentration intervals /1 790 , 2 90 , 3 40, 4 20, 5 10, 6 0/

Cup22(k2) upper limit concentrations of concentration intervals /1 990 , 2 790 , 3 90, 4 40, 5 20, 6 10/ ;

parameter Fpp2 the flow of fresh water -j- from pinch to processes above pinch and finally to the treatment process that was calculated in the previous model ;

Fpp2=FFF1Sum;

Parameter Fpt2 the flow of fresh water -j- from pinch to treatment that was calculated in the previous model ;

Fpt2=FFF2Sum ;

parameter Cp2 the concentration of the pinch point that was calculated in the previous model ;

Cp2=Cp;

parameter Cpmax ;

Cpmax=smax(i,Cout_max(i));

variables

WP2(i2,k2) Mass load of a contaminant transferred from water-using operation - i - through the concentration interval - k -.

Fl2(i2) The limiting water flowrate Fli for the water-using operation - i -

z2

mc2(i2) contaminant mass in process i

Equations

FliEquation2(i2) The limiting water flowrate Fli for the water-using operation - i -

WPikEquation12(i2,k2) Mass load of a contaminant transferred from water-using operation - i - through the concentration interval - k -.

WPikEquation22(i2,k2) Mass load of a contaminant transferred from water-using operation - i - through the concentration interval - k -.

obj2 Dummy objective

FptEquation

FppEquation ;

obj2.. z2 =e= 5;

FliEquation2(i2).. Fl2(i2)=e= mc2(i2)/(Cout_max2(i2) - Cin_max2(i2));

WPikEquation12(i2,k2)\$ (opk2(i2,k2)).. WP2(i2,k2) =e= Fl2(i2)*(Cup22(k2) - Clo2(k2));

WPikEquation22(i2,k2)\$ (op2(i2,k2)).. WP2(i2,k2) =e= 0;

FppEquation.. Fpp2=e=Fl2('1');

FptEquation.. Fpt2=e=Fl2('2');

Model limiting_water_flowrate /obj2,FliEquation2,WPikEquation12,WPikEquation22,FptEquation,FppEquation/;

Solve limiting_water_flowrate using minlp minimizing z2

sets

kk2(k2) subset of intervals for the constraint SMB /2*6/

j2 treatment processes /1, 2a, 2b/

S_no_T2(i2,k2,j2) stream -i- not giving in interval -k- to treatment process -j- /1.(1,2,3,6).1, 1.(1,2,5,6).2a, 2.(1,2,3,6).1, 2.(1,5,6).2a, 1.(1,2,5,6).2b, 2.(1,5,6).2b/

com2(k2) common intervals of treatment processes /4/

parameters

LU2(j2) Upper bound for the flowrate of freshwater stream - j -. /1 150000, 2a 150000, 2b 150000/

exponent2(j2) unit cost of freshwater source j /1 1, 2a 1, 2b 1 /

fixed_c2(j2) fixed cost of treatment process j /1 200, 2a 50, 2b 150/

tr_cost_coef2(j2) coefficient of the treatment cost /1 15, 2a 10, 2b 8/

BigM2 sufficiently large number /99999999/

variables

Total_cost2 the total cost for the use of freshwater

L2(j2) Inlet freshwater flows for the system

r2(i2,k2) Residual mass of the contaminant from rich stream - i - in interval - k - ($g \cdot h^1$).

WW2(j2,k2) Mass load transferred to the water stream - j - in concentration interval - k -.

aux_var12(i2)

Variable_Cost the variable cost

Fixed_Cost the fixed cost

binary variables

y2(j2) Selection -1- or not -0- of treatment process -j-

positive variable

W2(i2,k2,j2) Mass load of contaminant exchanged between water-using operation - i - and freshwater source - j - in each interval - k -.

Equations

ObjFun2 Objective function (minimum freshwater cost)

SMB2(i2,kk2) Successive material balances for each water-using operation - i - in each interval - k - (constraint set (1)from paper).

SMBint_02(i2) Successive material balances for each water-using operation - i - in interval - 0 - (constraint missing from paper).

ConstSet22(j2,k2) Constraint for mass load transferred to the water stream - j - in concentration interval - k - (constraint set (2)from paper).

ConstSet32(j2,k2) Constraint for mass load transferred to the water stream - j - in concentration interval - k - (constraint set (3)from paper).

auxEq12(i2) Auxiliary equation to check the residuals

ComInt2(com2) Do not allow more than one treatment process to treat the same quantity of polluted stream

Bin_const2(j2) The binary constraint

FixedCost

VariableCost;

ObjFun2.. Total_cost2 =e=Total_cost+ sum(j2, fixed_c2(j2)*y2(j2)) + sum(j2, tr_cost_coef2(j2)*L2(j2));

SMB2(i2,kk2).. r2(i2,kk2) - r2(i2,kk2-1) + sum(j2, W2(i2,kk2,j2)) =e= WP2(i2,kk2);

SMBint_02(i2).. r2(i2,'1') + sum(j2, W2(i2,'1',j2)) =e= WP2(i2,'1');

ConstSet22(j2,k2).. sum(i2, W2(i2,k2,j2)) =l= WW2(j2,k2);

ConstSet32(j2,k2).. WW2(j2,k2) =e= L2(j2)*(Cup22(k2) - Clo2(k2));

auxEq12(i2).. aux_var12(i2) =e= sum(j2, W2(i2,'1',j2));

ComInt2(com2).. sum(j2,L2(j2)*(Cup22(com2)-Clo2(com2))) =e= sum((i2,j2),W2(i2,com2,j2));

Bin_const2(j2).. L2(j2) =l= y2(j2)*BigM2;

VariableCost.. Variable_Cost=e=sum(j2, tr_cost_coef2(j2)*L2(j2));

FixedCost.. Fixed_Cost=e=sum(j2, fixed_c2(j2)*y2(j2));

* Bounds

r2.lo(i2,kk2) = 0;

L2.up(j2) = LU2(j2);

L2.lo(j2) = 0;

*fixed values

WP2.fx(op2) = 0;

r2.fx(i2,'1') = 0;

r2.fx(i2,'6') = 0;

W2.fx(S_no_T2)=0;

Model Simple_model_fig26_24_optimal2 /all/;

Solve Simple_model_fig26_24_optimal2 using mip minimizing Total_cost2;

parameter Total_cost_treatment;

Total_cost_treatment=Total_cost2.l-Total_cost.l;

display MCtot,FFFsum,FFF1Sum,FFF2Sum,Total_cost_treatment;

13. Παράρτημα 2:Κώδικας Gams Δεύτερου Παραδείγματος

2nd example

sets

i operations /1*5/

k intervals /1*6/

opk (i,k) intervals - k - receiving contaminant from operation - i -. /1.(4, 5,6) , 2.4 , 3.(2 , 3, 4), 4.2, 5.1/

op (i,k) intervals - k - NOT!! receiving contaminant from operation - i -. /1.(1 , 2, 3) , 2.(1 , 2 , 3, 5,6) , 3.(1, 5,6), 4.(1, 3 , 4, 5,6),
5.(2,3,4,5,6)/

alias (k,kp)

parameter

mc(i) contaminant mass in process i /1 8000, 2 5000 , 3 9000 , 4 6000, 5 8000/

Cin_max(i) maximum allowed inlet concentration in process i /1 0 , 2 100 , 3 100 , 4 300, 5 400/

Cout_max(i) maximum allowed inlet concentration in process i /1 200 , 2 200 , 3 400 , 4 400, 5 600/

Clo(k) lower limit concentrations of concentration intervals /1 400 , 2 300 , 3 200 , 4 100, 5 30, 6 0 /

Cup(k) upper limit concentrations of concentration intervals /1 600 , 2 400 , 3 300 , 4 200, 5 100, 6 30/

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 Fli for the water-using operation - i -

z

Equations

FlEquation(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 -.

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)\$(op(i,k)).. $WP(i,k) = e= Fl(i) * (C_{up}(k) - C_{lo}(k));$

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

Model limiting_water_flowrate /all/;

Solve limiting_water_flowrate using minlp minimizing z;

sets

kk(k) subset of intervals for the constraint SMB /1*6/

j streams /1*2/

parameter

LU(j) Upper bound for the flowrate of freshwater stream - j -. /1 100000, 2 60/

cost(j) unit cost of freshwater source j /1 20, 2 0.001/

parameter Cp1;

Cp1=200 ;

parameter Cp2;

Cp2=400 ;

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 - ($g \cdot h^1$).

positive variable

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

variables

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

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).;

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)) =e= WW(j,k);

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

* 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,'6') = 0;
```

```
WW.fx('2','6')=0;
```

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

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

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

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

```
W.fx('1','3','1')=0;
```

```
W.fx('1','3','2')=0;
```

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

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

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

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

```
W.fx('2','3','1')=0;
```

```
W.fx('2','3','2')=0;
```

```
W.fx('2','5','1')=0;
```

```
W.fx('2','5','2')=0;
```

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

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

W.fx('3','1','1')=0;

W.fx('3','1','2')=0;

W.fx('3','5','1')=0;

W.fx('3','5','2')=0;

W.fx('3','6','1')=0;

W.fx('3','6','2')=0;

W.fx('4','1','1')=0;

W.fx('4','1','2')=0;

W.fx('4','3','1')=0;

W.fx('4','3','2')=0;

W.fx('4','4','1')=0;

W.fx('4','4','2')=0;

W.fx('4','5','1')=0;

W.fx('4','5','2')=0;

W.fx('4','6','1')=0;

W.fx('4','6','2')=0;

W.fx('5','2','1')=0;

W.fx('5','2','2')=0;

W.fx('5','3','1')=0;

W.fx('5','3','2')=0;

W.fx('5','4','1')=0;

W.fx('5','4','2')=0;

W.fx('5','5','1')=0;

W.fx('5','5','2')=0;

W.fx('5','6','1')=0;

W.fx('5','6','2')=0;

Model Simple_model_Askisi02_optimal /all/;

Solve Simple_model_Askisi02_optimal using minlp minimizing Total_cost;

parameter WWW1(j) mass of contaminant in intervals 4 5 6 ;

WWW1(j)=WW.l(j,'4')+WW.l(j,'5')+WW.l(j,'6');

parameter FFF1(j) flow of contaminant in intervals 4 5 6 ;

FFF1('1')=WWW1('1')/(Cup('4'));

FFF1('2')=WWW1('2')/(Cup('4')-30);

parameter FFFsum total flow of contaminant ;

FFFsum=sum(j,FFF1(j));

parameter WWW2(j) mass of contaminant in intervals 2 3;

WWW2(j)=WW.l(j,'2')+WW.l(j,'3');

parameter FFF2(j) flow of contaminant in intervals 2 3;

FFF2('1')=WWW2('1')/(Cup('2')-Cp1);

FFF2('2')=WWW2('2')/(Cup('2')-Cp1);

parameter FFF2sum total flow of contaminant in pinch 2;

FFF2sum=sum(j,FFF2(j));

parameter WWW3(j) mass of contaminant in interval 1;

$$WWW3(j)=WW.l(j,'1');$$

parameter FFF3(j) flow of contaminant in interval 1;

$$FFF3('1')=WWW3('1')/(Cup('1')-Cp2);$$

$$FFF3('2')=WWW3('2')/(Cup('1')-Cp2);$$

parameter FFF3sum total flow of contaminant in pinch 3;

$$FFF3sum=sum(j,FFF3(j));$$

parameter FP1 flow of contaminant in first pinch point;

$$FP1=FFFsum-FFF2sum;$$

parameter FP2 flow of contaminant in second pinch point;

$$FP2=FFF2sum-FFF3sum;$$

parameter FP3 flow of contaminant in third pinch point;

$$FP3=FFF3sum;$$

display FFFsum,FFF2sum,FFF3sum,FP1,FP2,FP3,FFF3,FFF2,FFF1,WWW1,WWW2,WWW3;

sets

i2 operations /1*3/

k2 intervals /1*6/

opk2 (i2,k2) intervals - k - receiving contaminant from operation - i -. /1.(3,4,5), 2.(2,3,4,5), 3.(2, 3, 4, 5)/

op2 (i2,k2) intervals - k - NOT!! receiving contaminant from operation - i -. /1.(1,2,6), 2.(1,6), 3.(1, 6)/

parameter

Cin_max2(i2) maximum allowed inlet concentration in process i /1 25 , 2 25, 3 25/

Cout_max2(i2) maximum allowed outlet concentration in process i /1 195, 2 395, 3 595/

Clo2(k2) lower limit concentrations of concentration intervals /1 595 , 2 395 , 3 195, 4 45 , 5 25, 6 0/

Cup2(k2) upper limit concentrations of concentration intervals /1 995 , 2 595 , 3 395, 4 195, 5 45, 6 25/

parameter FPP1 flow of contaminant in pinch point 1 ;

FPP1=FP1;

parameter FPP2 flow of contaminant in pinch point 2;

FPP2=FP2;

parameter FPP3 flow of contaminant in pinch point 3;

FPP3=FP3;

variables

WP2(i2,k2) Mass load of a contaminant transferred from water-using operation - i - through the concentration interval - k -.

mc2(i2) contaminant mass in process i

Fl2(i2) The limiting water flowrate Fli for the water-using operation - i -

z2

Equations

FliEquation2(i2) The limiting water flowrate Fli for the water-using operation - i -

WPikEquation12(i2,k2) Mass load of a contaminant transferred from water-using operation - i - through the concentration interval - k -.

WPikEquation22(i2,k2) Mass load of a contaminant transferred from water-using operation - i - through the concentration interval - k -.

obj2 Dummy objective

FPP1Equation

FPP2Equation

FPP3Equation;

obj2.. z2 =e= 5;

FliEquation2(i2).. F12(i2)=e= mc2(i2)/(Cout_max2(i2) - Cin_max2(i2));

WPikEquation12(i2,k2)\$ (opk2(i2,k2)).. WP2(i2,k2) =e= F12(i2)*(Cup2(k2) - Clo2(k2));

WPikEquation22(i2,k2)\$ (op2(i2,k2)).. WP2(i2,k2) =e= 0;

FPP1Equation.. FPP1=e=F12('1');

FPP2Equation.. FPP2=e=F12('2');

FPP3Equation.. FPP3=e=F12('3');

Model limiting_water_flowrate2

/obj2,FliEquation2,WPikEquation12,WPikEquation22,FPP1Equation,FPP2Equation,FPP3Equation/;

Solve limiting_water_flowrate2 using minlp minimizing z2;

display L.I;

sets

kk2(k2) subset of intervals for the constraint SMB /2*6/

j2 treatment processes /1, 2a, 2b/

S_no_T2(i2,k2,j2) stream -i- not giving in interval -k- to treatment process -j- /1.(1,2,3,6).1, 1.(1,2,5,6).2a, 2.(1,2,3,6).1, 2.(1,5,6).2a, 1.(1,2,5,6).2b, 2.(1,5,6).2b, 3.(1,2,3,6).1, 3.(1,5,6).2a, 3.(1,5,6).2b/

com2(k2) common intervals of treatment processes /4/

parameter

LU2(j2) Upper bound for the flowrate of freshwater stream -j-. /1 150000, 2a 150000, 2b 150000/

exponent2(j2) unit cost of freshwater source j /1 1, 2a 1, 2b 1 /

fixed_c2(j2) fixed cost of treatment process j /1 200, 2a 50, 2b 150/

tr_cost_coef2(j2) coefficient of the treatment cost /1 15, 2a 13, 2b 8/

BigM2 sufficiently large number /99999999/

variables

Total_cost2 the total cost for the use of freshwater

L2(j2) Inlet freshwater flows for the system

r2(i2,k2) Residual mass of the contaminant from rich stream - i - in interval - k - ($g \cdot h^1$).

WW2(j2,k2) Mass load transferred to the water stream - j - in concentration interval - k -.

aux_var12(i2)

binary variables

y2(j2) Selection -1- or not -0- of treatment process -j-

positive variable

W2(i2,k2,j2) Mass load of contaminant exchanged between water-using operation - i - and freshwater source - j - in each interval - k -.

Equations

ObjFun2 Objective function (minimum freshwater cost)

SMB2(i2,kk2) Successive material balances for each water-using operation - i - in each interval - k - (constraint set (1)from paper).

SMBint_02(i2) Successive material balances for each water-using operation - i - in interval - 0 - (constraint missing from paper).

ConstSet22(j2,k2) Constraint for mass load transferred to the water stream - j - in concentration interval - k - (constraint set (2)from paper).

ConstSet32(j2,k2) Constraint for mass load transferred to the water stream - j - in concentration interval - k - (constraint set (3)from paper).

auxEq12(i2) Auxiliary equation to check the residuals

ComInt2(com2) Do not allow more than one treatment process to treat the same quantity of polluted stream

Bin_const2(j2) The binary constraint;

ObjFun2.. Total_cost2 =e=Total_cost + sum(j2, fixed_c2(j2)*y2(j2)) + sum(j2, tr_cost_coef2(j2)*L2(j2));

SMB2(i2,kk2).. r2(i2,kk2) - r2(i2,kk2-1) + sum(j2, W2(i2,kk2,j2)) =e= WP2(i2,kk2);

```

SMBint_02(i2).. r2(i2,'1') + sum(j2, W2(i2,'1',j2)) =e= WP2(i2,'1');
ConstSet22(j2,k2).. sum(i2, W2(i2,k2,j2)) =l= WW2(j2,k2);
ConstSet32(j2,k2).. WW2(j2,k2) =e= L2(j2)*(Cup2(k2) - Clo2(k2));
auxEq12(i2).. aux_var12(i2) =e= sum(j2, W2(i2,'1',j2));
ComInt2(com2).. sum(j2,L2(j2)*(Cup2(com2)-Clo2(com2))) =e= sum((i2,j2),W2(i2,com2,j2));
Bin_const2(j2).. L2(j2) =l= y2(j2)*BigM2;

```

* Bounds

```

*****
r2.lo(i2,k2) = 0;
L2.up(j2) = LU2(j2);
L2.lo(j2) = 0;
*****

```

*fixed values

```

*****
WP2.fx(op2) = 0;
r2.fx(i2,'1') = 0;
r2.fx(i2,'6') = 0;
W2.fx(S_no_T2)=0;
*****

```

Model Simple_model_fig26_24_optimal2 /all/;

Solve Simple_model_fig26_24_optimal2 using mip minimizing Total_cost2;

```

*****
parameter treatment_cost;
treatment_cost=Total_cost2.l-Total_cost.l;
*****

```

display treatment_cost;