

ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΕΡΟΒΙΑΣ  
ΒΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ - ΛΥΜΑΤΩΝ  
ΓΙΑ ΜΙΚΡΟΜΕΣΑΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η εργασία υποβάλλεται για την μερική κάλυψη των απαιτήσεων με στόχο  
την απόκτηση του διπλώματος

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ  
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ  
από  
ΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ ΚΑΙ ΤΟ ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΜΕΣΣΑΡΙΤΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

## **Τίτλος**

«Πολυκριτηριακή Ανάλυση Τεχνολογιών Αερόβιας Βιολογικής Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων – Λυμάτων για Μικρομεσαίες Εφαρμογές.»

## **Δήλωση**

Η εργασία αυτή είναι πρωτότυπη και εκπονήθηκε αποκλειστικά και μόνο για την απόκτηση του «Μεταπτυχιακού Διπλώματος Εξειδίκευσης στα Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας και Προστασίας Περιβάλλοντος».

Ο Δηλών

Μεσσαριτάκης Γεώργιος

## **Περίληψη**

Απαραίτητη προϋπόθεση στην περιβαλλοντική πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της αειφόρου ανάπτυξης είναι η διαχείριση των αστικών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων με μεθόδους οι οποίες είναι φυσικές και όσο το δυνατό με μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Από τις δύο βασικές κατηγορίες τεχνολογίας αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας, την αιωρούμενης βιομάζας και την προσκολλούμενης βιομάζας, ξεχωρίζουν οι τεχνολογίες της δραστικής ιλύος, του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης, του βιολογικού φίλτρου, του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου και των βιορότορων. Μεγάλο ποσοστό των εγκαταστάσεων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων είναι στην κατηγορία των μικρομεσαίων εφαρμογών ισοδύναμου πληθυσμού έως 5000 ατόμων. Συνεπώς η κρισιμότητα της επιλογής της φάσης της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας είναι πολύ μεγάλη. Έτσι λοιπόν, δημιουργήθηκε ένα εργαλείο ιεράρχησης των τεχνολογιών δευτεροβάθμιας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με την χρήση της μεθόδου της πολυκριτηριακής ανάλυσης “SIR SAW”. Σε αυτό το μοντέλο λαμβάνονται υπόψη όλες τις σημαντικές παράμετροι, τεχνικές, οικονομικές, περιβαλλοντικές και εμπειρικές, οι οποίες ανάλογα την εφαρμογή και τον σκοπό της εφαρμογής έχουν την ανάλογη βαρύτητα.

## **Λέξεις κλειδιά**

Βιολογική επεξεργασία, αερόβια βιολογική επεξεργασία, τεχνολογίες αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας, δραστική ιλύς, βιοαντιδραστήρας μεμβράνης, βιολογικό φίλτρο, εμβαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο, βιορότορες, βιολογικοί δίσκοι, αιωρούμενη βιομάζα, προσκολλούμενη βιομάζα, πολυκριτηριακή ανάλυση, ανάλυση με πολλαπλά κριτήρια, SIR SAW.

## **Abstract**

Europe’s environmental policy and sustainable development is undertaking the management of urban and industrial waste water, using techniques that are as natural and energy saving as possible. The most popular technologies from the two categories of suspended growth process and attached growth process are the activated sludge, the membrane bioreactor, the trickling filter, the submerged biofilter and the biorotors. Most of the applications in waste water treatment plants sized less than 5000 population equivalents. So it is critical to choose the right technique of a secondary treatment in a waste water treatment plant. For this purpose, we develop a model that classifies the secondary treatment techniques using the multicriteria method “SIR SAW”. In this model we take in consideration the major technical, economical, environmental and experimental parameters, with different weight, depending the application.

## **Key words**

Biological treatment, aerobic biological treatment, aerobic biological treatment technologies, activated sludge, membrane bioreactor, trickling filters, submerged biofilter, biorotors, biodisks, rotating biological contractors (RBC), suspended growth process, attached growth process, multicriteria analysis, SIR SAW, Superiority and Inferiority Ranking – Simple Additive Weighting.

## Πίνακας Περιεχομένων

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 1     | Εισαγωγή.....  | 10  |
| 1.1   | Πρόβλημα - Υπόβαθρο έρευνας.....                                     | 10  |
| 1.2   | Υποθέσεις της έρευνας.....   | 11  |
| 1.3   | Τεκμηρίωση της αναγκαιότητας της έρευνας.....                        | 12  |
| 1.4   | Μεθοδολογία.....   | 13  |
| 1.5   | Βήματα που ακολουθήθηκαν για την εκπόνηση της μελέτης.....           | 14  |
| 1.6   | Συμβολισμοί.....   | 16  |
| 2     | Μελέτη σχετικής βιβλιογραφίας.....                                   | 17  |
| 2.1   | Εισαγωγή.....  | 17  |
| 2.2   | Τεχνολογίες αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.....    | 18  |
| 2.2.1 | Τεχνολογία Δραστηκής ύλης.....                                       | 18  |
| 2.2.2 | Τεχνολογία Βιοαντιδραστήρα μεμβράνης - εμβαπτιζόμενος.....           | 23  |
| 2.2.3 | Τεχνολογία Βιολογικών φίλτρων (Trickling filters).....               | 28  |
| 2.2.4 | Εμβαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο.....                                  | 35  |
| 2.2.5 | Επεξεργασία αποβλήτων με Βιορότορες (RBC).....                       | 41  |
| 3     | Μεθοδολογία.....   | 47  |
| 3.1   | Εισαγωγή.....  | 47  |
| 3.2   | Μεθοδολογία πολύκριτηριακής ανάλυσης.....                            | 50  |
| 3.3   | Παρουσίαση και ομαδοποίηση των κριτηρίων αξιολ. των τεχνολογιών..... | 56  |
| 3.4   | Ορισμός τιμών κριτηρίων για κάθε τεχνολογία.....                     | 61  |
| 3.4.1 | Τεχνικά – λειτουργικά κριτήρια.....                                  | 61  |
| 3.4.2 | Οικονομικά κριτήρια.....   | 68  |
| 3.4.3 | Απόβλητα.....  | 71  |
| 3.4.4 | Εκμετάλλευση πόρων.....  | 78  |
| 3.4.5 | Εμπειρία εφαρμογών.....  | 81  |
| 3.5   | Συντελεστές βαρύτητας κριτηρίων.....                                 | 86  |
| 3.6   | Σενάρια ανάλυσης τεχνολογιών.....                                    | 87  |
| 3.7   | Ανάλυση ευαισθησίας.....   | 87  |
| 4     | Ανάλυση Δεδομένων.....   | 88  |
| 4.1   | Εισαγωγή.....  | 88  |
| 4.2   | Σενάρια εφαρμογής πολυκριτηριακής ανάλυσης.....                      | 88  |
| 4.2.1 | Σενάριο τεχνολογικού ρίσκου.....                                     | 89  |
| 4.2.2 | Βιομηχανικό σενάριο.....   | 90  |
| 4.2.3 | Σενάριο Αειφόρου ανάπτυξης.....                                      | 91  |
| 4.2.4 | Οικολογικό σενάριο.....  | 92  |
| 4.3   | Συντελεστές βαρύτητας κριτηρίων για κάθε κατηγορία κριτηρίων.....    | 92  |
| 4.4   | Συντελεστές βαρύτητας κριτηρίων.....                                 | 96  |
| 4.5   | Αποτελέσματα υπολογιστικού μοντέλου.....                             | 96  |
| 4.5.1 | Βιομηχανικό σενάριο.....   | 102 |
| 4.5.2 | Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο.....                                      | 103 |
| 4.5.3 | Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο.....                                     | 103 |
| 4.5.4 | Οικολογικό σενάριο.....  | 104 |
| 4.6   | Ανάλυση ευαισθησίας.....   | 105 |
| 4.6.1 | Συντελεστές βαρύτητας μοντέλου ανάλυσης ευαισθησίας.....             | 105 |
| 4.6.2 | Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας.....                               | 107 |
| 5     | Συμπεράσματα.....  | 130 |
| 5.1   | Συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.....                         | 130 |
| 5.2   | Περιορισμός της έρευνας.....   | 131 |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 5.3 | Προτάσεις για εφαρμογή ή περαιτέρω μελέτη .....                     | 132 |
|     | Βιβλιογραφία.....   | 133 |
| 6   | Παράρτημα .....   | 137 |
| 6.1 | Συντελεστές βαρύτητας κριτηρίων σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας ..... | 137 |

## Κατάλογος πινάκων

|   |     |
|---|-----|
| Πίνακας 3.2-1. Πίνακας τιμών ψευδοκριτηρίου και προϋποθέσεις αντικατάστασης πραγματικών τιμών κριτηρίων. ....   | 51  |
| Πίνακας 3.3-1. Κατηγορίες κριτηρίων και κριτήρια για την εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης.....   | 60  |
| Πίνακας 3.4-1. Βαθμός απόδοσης τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων. ....   | 63  |
| Πίνακας 3.4-2. Χρόνος ζωής εγκατάστασης τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων. ...   | 64  |
| Πίνακας 3.4-3. Ευελιξία τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων. ....  | 66  |
| Πίνακας 3.4-4. Απαιτήσεις συντήρησης συστημάτων επεξεργασίας αποβλήτων.....   | 68  |
| Πίνακας 3.4-5. Ανηγμένο κόστος επένδυσης μονάδων επεξεργασίας αποβλήτων. ....   | 70  |
| Πίνακας 3.4-6. Λειτουργικό κόστος μονάδων επεξεργασίας αποβλήτων. ....  | 71  |
| Πίνακας 3.4-7. Μέση τιμή εκπομπών ειδικών βακτηριδίων και μυκήτων.....  | 73  |
| Πίνακας 3.4-8. Εκπομπές αέριων ρύπων τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων. ....   | 74  |
| Πίνακας 3.4-9. Επίπεδο οσμών συστημάτων επεξεργασίας αποβλήτων.....   | 76  |
| Πίνακας 3.4-10. Παραγόμενη ποσότητα ιλύος από την αποικοδόμηση του BOD <sub>5</sub> σε κάθε τεχνολογία επεξεργασίας αποβλήτων.....  | 78  |
| Πίνακας 3.4-11. Καταναλισκόμενη ενέργεια τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων. .  | 79  |
| Πίνακας 3.4-12. Σχετική αξιολόγηση τεχνολογίας στην χρήση γής. ....   | 81  |
| Πίνακας 3.4-13. Ωριμότητα τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων.....   | 82  |
| Πίνακας 3.4-14. Εμπορικές μονάδες τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων.....   | 83  |
| Πίνακας 3.4-15. Πίνακας κριτηρίων με τις αντίστοιχες τιμές για κάθε τεχνολογία. ....  | 84  |
| Πίνακας 3.4-16. Πίνακας κριτηρίων και τιμών για την εφαρμογή του μοντέλου της πολυκριτηριακής ανάλυσης.....   | 85  |
| Πίνακας 4.2-1 Συντελεστές βαρύτητας κατηγοριών κριτηρίων για κάθε σενάριο αξιολόγησης.....  | 89  |
| Πίνακας 4.3-1. Πίνακας συντελεστών βαρύτητας κριτηρίων.....   | 95  |
| Πίνακας 4.4-1. Πίνακας συντελεστών βαρύτητας $w_j$ , .....  | 96  |
| Πίνακας 4.5-1. Αποτελέσματα ροών από την εφαρμογή του μοντέλου της πολυκριτηριακής ανάλυσης.....  | 98  |
| Πίνακας 4.5-2. Αδιάστατες τιμές καθαρής και σχετικής ροής.....  | 99  |
| Πίνακας 4.6-1. Πίνακας συντελεστών βαρύτητας κριτηρίων για την ανάλυση ευαισθησίας. ....  | 107 |
| Πίνακας 4.6-2. Πίνακας ανάλυσης ευαισθησίας της καθαρής ροής (net flow) $\varphi_n (A_i)$ για κάθε σενάριο ανάλυσης και κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία.....                  | 113 |
| Πίνακας 4.6-3. Πίνακας ανάλυσης ευαισθησίας της σχετικής ροής (relative flow) $\varphi_r (A_i)$ για κάθε σενάριο ανάλυσης και κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία. ....           | 114 |
| Πίνακας 4.6-4. Πίνακας ανάλυσης ευαισθησίας της αδιάστατης καθαρής ροής (net flow) $\varphi_n (A_i)$ για κάθε σενάριο ανάλυσης και κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία. ....      | 115 |
| Πίνακας 4.6-5. Πίνακας ανάλυσης ευαισθησίας της αδιάστατης σχετικής ροής (relative flow) $\varphi_r (A_i)$ για κάθε σενάριο ανάλυσης και κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία..... | 116 |

## Κατάλογος σχημάτων

|   |    |
|---|----|
| Εικόνα 2.2-1. Διάγραμμα ροής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων τεχνολογίας Δραστικής<br>Ιλύος.....                   | 23 |
| Εικόνα 2.2-2. Διάγραμμα ροής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων τεχνολογίας<br>Βιοαντιδραστήρα Μεμβράνης.....         | 28 |
| Εικόνα 2.2-3. Αρχή λειτουργίας του βιολογικού φίλτρου.....  | 34 |
| Εικόνα 2.2-4. Διάγραμμα ροής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων τεχνολογίας<br>Βιολογικού φίλτρου.....                | 35 |
| Εικόνα 2.2-5. Διάγραμμα ροής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων τεχνολογίας<br>εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου..... | 41 |
| Εικόνα 2.2-6. Σχηματική διάταξη βιολογικού δίσκου.....  | 46 |
| Εικόνα 2.2-7. Διάγραμμα ροής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων τεχνολογίας<br>Βιορότων. ....                         | 46 |
| Εικόνα 3.2-1. Διάγραμμα συνάρτησης γενικευμένου κριτηρίου $f(d)$ .....  | 52 |

## Κατάλογος διαγραμμάτων

|   |     |
|---|-----|
| Διάγραμμα 4.5-1. Διάγραμμα της καθαρής ροής $\varphi_n(A_i)$ για κάθε μία τεχνολογία σε κάθε ένα σενάριο ανάλυσης.....  | 99  |
| Διάγραμμα 4.5-2. Διάγραμμα της σχετικής ροής $\varphi_r(A_i)$ για κάθε μία τεχνολογία σε κάθε ένα σενάριο ανάλυσης.....   | 100 |
| Διάγραμμα 4.5-3. Διάγραμμα της αδιάστατης καθαρής ροής $\varphi_n(A_i)$ για κάθε μία τεχνολογία σε κάθε ένα σενάριο ανάλυσης.....   | 100 |
| Διάγραμμα 4.5-4. Διάγραμμα της αδιάστατης σχετικής ροής $\varphi_r(A_i)$ για κάθε μία τεχνολογία σε κάθε ένα σενάριο ανάλυσης.....  | 101 |
| Διάγραμμα 4.5-5. Διάγραμμα της σχετικής θέσης της θετικής και της αρνητικής ροής για κάθε μία τεχνολογία σε κάθε ένα σενάριο ανάλυσης. ....                                   | 101 |
| Διάγραμμα 4.6-1. Ανάλυση ευαισθησίας της καθαρής ροής (net flow) $\varphi_n(A_i)$ για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο Βιομηχανικό σενάριο. ....                               | 117 |
| Διάγραμμα 4.6-2. Ανάλυση ευαισθησίας της αδιάστατης καθαρής ροής (net flow) $\varphi_n(A_i)$ για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο Βιομηχανικό σενάριο. ....                    | 117 |
| Διάγραμμα 4.6-3. Ανάλυση ευαισθησίας της καθαρής ροής (net flow) $\varphi_n(A_i)$ για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο σενάριο της Αειφόρου ανάπτυξης. ....                    | 118 |
| Διάγραμμα 4.6-4. Ανάλυση ευαισθησίας της αδιάστατης καθαρής ροής (net flow) $\varphi_n(A_i)$ για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο σενάριο της Αειφόρου ανάπτυξης. ..           | 118 |
| Διάγραμμα 4.6-5. Ανάλυση ευαισθησίας της καθαρής ροής (net flow) $\varphi_n(A_i)$ για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο σενάριο του Τεχνολογικού ρίσκου. ....                   | 119 |
| Διάγραμμα 4.6-6. Ανάλυση ευαισθησίας της αδιάστατης καθαρής ροής (net flow) $\varphi_n(A_i)$ για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο σενάριο του Τεχνολογικού ρίσκου. .           | 119 |
| Διάγραμμα 4.6-7. Ανάλυση ευαισθησίας της καθαρής ροής (net flow) $\varphi_n(A_i)$ για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο Οικολογικό σενάριο. ....                                | 120 |
| Διάγραμμα 4.6-8. Ανάλυση ευαισθησίας της αδιάστατης καθαρής ροής (net flow) $\varphi_n(A_i)$ για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο Οικολογικό σενάριο. ....                     | 120 |
| Διάγραμμα 4.6-9. Ανάλυση ευαισθησίας της σχετικής ροής (relative flow) $\varphi_r(A_i)$ για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο Βιομηχανικό σενάριο.....                          | 121 |
| Διάγραμμα 4.6-10. Ανάλυση ευαισθησίας της αδιάστατης σχετικής ροής (relative flow) $\varphi_r(A_i)$ για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο Βιομηχανικό σενάριο. ....             | 121 |
| Διάγραμμα 4.6-11. Ανάλυση ευαισθησίας της σχετικής ροής (relative flow) $\varphi_r(A_i)$ για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο σενάριο της Αειφόρου ανάπτυξης.....              | 122 |
| Διάγραμμα 4.6-12. Ανάλυση ευαισθησίας της αδιάστατης σχετικής ροής (relative flow) $\varphi_r(A_i)$ για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο σενάριο της Αειφόρου ανάπτυξης. ....  | 122 |
| Διάγραμμα 4.6-13. Ανάλυση ευαισθησίας της σχετικής ροής (relative flow) $\varphi_r(A_i)$ για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο σενάριο του Τεχνολογικού ρίσκου. ....            | 123 |
| Διάγραμμα 4.6-14. Ανάλυση ευαισθησίας της αδιάστατης σχετικής ροής (relative flow) $\varphi_r(A_i)$ για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο σενάριο του Τεχνολογικού ρίσκου. .... | 123 |
| Διάγραμμα 4.6-15. Ανάλυση ευαισθησίας της σχετικής ροής (relative flow) $\varphi_r(A_i)$ για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο Οικολογικό σενάριο.....                          | 124 |
| Διάγραμμα 4.6-16. Ανάλυση ευαισθησίας της αδιάστατης σχετικής ροής (relative flow) $\varphi_r(A_i)$ για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο Οικολογικό σενάριο. ....              | 124 |
| Διάγραμμα 4.6-17. Απεικόνιση της καθαρής ροής (net flow) $\varphi_n(A_i)$ για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία σε κάθε σενάριο $\Gamma$ της ανάλυσης ευαισθησίας. ....             | 125 |
| Διάγραμμα 4.6-18. Απεικόνιση της αδιάστατης καθαρής ροής (net flow) $\varphi_n(A_i)$ για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία σε κάθε σενάριο $\Gamma$ της ανάλυσης ευαισθησίας....    | 125 |



|  |     |
|--|-----|
| Διάγραμμα 4.6-19. Απεικόνιση της σχετικής ροής (relative flow) $\varphi_n (A_i)$ για κάθε<br>εξεταζόμενη τεχνολογία σε κάθε σενάριο $\Gamma$ της ανάλυσης ευαισθησίας. ....          | 126 |
| Διάγραμμα 4.6-20. Απεικόνιση της αδιάστατης σχετικής ροής (relative flow) $\varphi_n (A_i)$ για<br>κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία σε κάθε σενάριο $\Gamma$ της ανάλυσης ευαισθησίας.... | 126 |
| Διάγραμμα 4.6-21. Ανάλυση ευαισθησίας της μερικής ιεράρχησης των τεχνολογιών για<br>το Βιομηχανικό σενάριο.....  | 127 |
| Διάγραμμα 4.6-22. Ανάλυση ευαισθησίας της μερικής ιεράρχησης των τεχνολογιών για<br>το σενάριο της Αειφόρου ανάπτυξης.....   | 127 |
| Διάγραμμα 4.6-23. Ανάλυση ευαισθησίας της μερικής ιεράρχησης των τεχνολογιών για<br>το σενάριο του Τεχνολογικού ρίσκου.....  | 128 |
| Διάγραμμα 4.6-24. Ανάλυση ευαισθησίας της μερικής ιεράρχησης των τεχνολογιών για<br>το Οικολογικό σενάριο.....   | 128 |
| Διάγραμμα 4.6-25. Μερική ιεράρχηση των τεχνολογιών για τα σενάρια της $\Gamma$ ανάλυσης<br>ευαισθησίας. ....   | 129 |

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Πρόβλημα - Υπόβαθρο έρευνας

Απαίτηση στην περιβαλλοντική πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της αειφόρου ανάπτυξης είναι η διαχείριση των αστικών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων με μεθόδους οι οποίες είναι φυσικές και όσο το δυνατό με μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.

Μεγάλο ποσοστό των εγκαταστάσεων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων είναι στην κατηγορία των μικρομεσαίων εφαρμογών ισοδύναμου πληθυσμού έως 5000 ατόμων. Αυτές οι εγκαταστάσεις αποτελούνται κυρίως από συστήματα πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας επεξεργασίας και σπανιότερα από τριτοβάθμιας. Η πρωτοβάθμια επεξεργασία είναι η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων με φυσική ή και χημική μέθοδο με σκοπό την μείωση του αρχικού οργανικού φορτίου κατά ένα σημαντικό ποσοστό πριν την είσοδο του στην δευτεροβάθμια φάση επεξεργασίας. Η δευτεροβάθμια φάση επεξεργασίας είναι η βιολογική επεξεργασία η οποία κατά κύριο λόγο είναι η σημαντικότερη φάση και η πιο δαπανηρή και από πλευράς εγκατάστασης και από κατανάλωσης ενέργειας.

Συνεπώς η κρισιμότητα της επιλογής της φάσης της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας είναι πολύ μεγάλη. Είναι σημαντική λοιπόν η δημιουργία ενός εργαλείου επιλογής τεχνολογίας δευτεροβάθμιας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, το οποίο θα λαμβάνει υπόψη όλες τις σημαντικές παραμέτρους οι οποίες ανάλογα την εφαρμογή και τον σκοπό της εφαρμογής θα έχουν την ανάλογη βαρύτητα.

Την λύση του προβλήματος μπορεί να την δώσει η ανάλυση των στοιχείων με την μέθοδο της πολυκριτηριακής ανάλυσης.

## **1.2 Υποθέσεις της έρευνας**

Τα υγρά απόβλητα ανήκουν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα αστικά και τα βιομηχανικά απόβλητα. Τα αστικά απόβλητα έχουν σχεδόν πάντα την ίδια ποιότητα η οποία μεταβάλλεται μόνο από περιοχή σε περιοχή και από χώρα σε χώρα σε περιορισμένη κλίμακα. Οι μεγάλες διαφοροποιήσεις παρουσιάζονται στα βιομηχανικά απόβλητα τα οποία διαφοροποιούνται από δραστηριότητα σε δραστηριότητα και από διεργασία σε διεργασία στην ίδια δραστηριότητα, ως προς την ποιότητα τους όταν είναι ανεπεξέργαστα και ως προς την απαιτούμενη ποιότητα τους μετά την επεξεργασία.

Για την εφαρμογή του μοντέλου που θα δημιουργήσουμε σε μία ευρύτερη κατηγορία δραστηριοτήτων, θεωρούμε ότι μετά την φάση της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα έχουν κατ' ελάχιστο την ποιότητα που απαιτείται να έχει το επεξεργασμένο νερό των αστικών αποβλήτων. Με αυτό τον τρόπο γίνεται μία γενίκευση του προβλήματος προς την δυσμενέστερη κατάσταση μια και τα όρια διάθεση των αστικών αποβλήτων μετά από επεξεργασία είναι αρκετά χαμηλά σε σχέση με τα βιομηχανικά απόβλητα.

Οι τεχνολογίες που θα εξεταστούν ως εναλλακτικές λύσης του υποτιθέμενου προβλήματος είναι πέντε. Οι δύο ανήκουν στην κατηγορία των συστημάτων αιωρούμενης βιομάζας και η υπόλοιπες τρεις στην κατηγορία προσκολλούμενης

βιομάζας. Στην πρώτη κατηγορία οι δύο εναλλακτικές λύσεις είναι η τεχνολογία της δραστικής ύλης και η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης ενώ στην δεύτερη κατηγορία οι εναλλακτικές λύσεις είναι η τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου, η τεχνολογία του εμβαιπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου και η τεχνολογία του Βιορότορα. Όλες οι τεχνολογίες έχουν κοινό στόχο, την βιολογική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, αλλά από πλευράς διεργασίας διαφοροποιούνται μεταξύ τους.

Ο κορμός του μοντέλου της πολυκριτηριακής ανάλυσης είναι η δημιουργία μία μήτρας της οποίας τα στοιχεία αποτελούν τιμές κριτηρίων για κάθε μία τεχνολογία. Οι τιμές αυτές μπορούν να είναι είτε ποιοτικές είτε ποσοτικές. Τα ποσοτικά δεδομένα είναι προτιμότερα από τα ποιοτικά διότι προσδίδουν μία μεγαλύτερη αξιοπιστία στο μοντέλο που θα δημιουργήσουμε. Έτσι λοιπόν θα γίνει μία προσπάθεια εξεύρεσης ποσοτικών δεδομένων όπου αυτό είναι δυνατό. Οι τιμές αυτές θα προκύπτουν από διεθνή βιβλιογραφία και από εμπειρικά δεδομένα της αγοράς.

### **1.3 Τεκμηρίωση της αναγκαιότητας της έρευνας**

Η ανάγκη που υπάρχει για την καλύτερη διαχείριση των υγρών αποβλήτων και την επεξεργασία τους με αποδοτικό τρόπο δίνοντας βαρύτητα και στην εξοικονόμηση ενέργειας, απαιτεί ολοκληρωμένη διερεύνηση των τεχνολογιών δευτεροβάθμιας βιολογικής επεξεργασίας.

Η μέθοδος επιλογής μίας τεχνολογίας λαμβάνοντας υπόψη μόνο το σταθερό κόστος ή κάνοντας μία καταγραφή των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων, δεν είναι η καταλληλότερη για την λήψη μίας απόφασης ενός έργου με μεγάλο χρόνο ζωής.

Είναι ανάγκη λοιπόν, η δημιουργία ενός πρωτότυπου μοντέλου το οποίο θα χρησιμοποιεί μία μοντέρνα μέθοδο λήψης αποφάσεων, λαμβάνοντας υπόψη πολλές παραμέτρους τις οποίες θα αξιολογεί.

#### **1.4 Μεθοδολογία**

Η επιλογή της καταλληλότερης τεχνολογίας δευτεροβάθμιας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων δεν είναι ένα απλό πρόβλημα. Απαιτεί ανάλυση πολλών κριτηρίων με διαφορετική βαρύτητα το κάθε ένα ανάλογα την εφαρμογή.

Η διαδικασία λήψης της απόφασης βασίζεται στην θέσπιση ορισμένων κριτηρίων τα οποία ο αποφασίζων θεωρεί σημαντικά. Το πλήθος των κριτηρίων αυτών είναι μεγάλο και η αποδοχή ή απόρριψη μίας λύσης είναι δύσκολη λόγω της ιδιομορφίας του προβλήματος το οποίο έχει οικονομικό-κοινωνικές επιπτώσεις. Το πρόβλημα γίνεται ακόμη πιο δύσκολο διότι ο αποφασίζων καλείται να συγκρίνει διαφορετικές προτεινόμενες λύσεις με αλληλοσυγκρουόμενες επιδόσεις στα θεσπισμένα κριτήρια.

Τα παραπάνω καθιστούν φανερή την ανάγκη της χρήσης μίας μεθόδου που είναι ικανή να επεξεργάζεται και να συγκρίνει μεγάλο πλήθος δεδομένων προκειμένου να ληφθεί κατά το δυνατόν η βέλτιστη απόφαση και να αξιολογηθούν μεθοδικά οι εναλλακτικές λύσεις ενός προβλήματος. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως πολυκριτηριακή ανάλυση και αποτελεί ένα βοηθητικό αν όχι καθοριστικό εργαλείο στο στάδιο λήψης αποφάσεων.

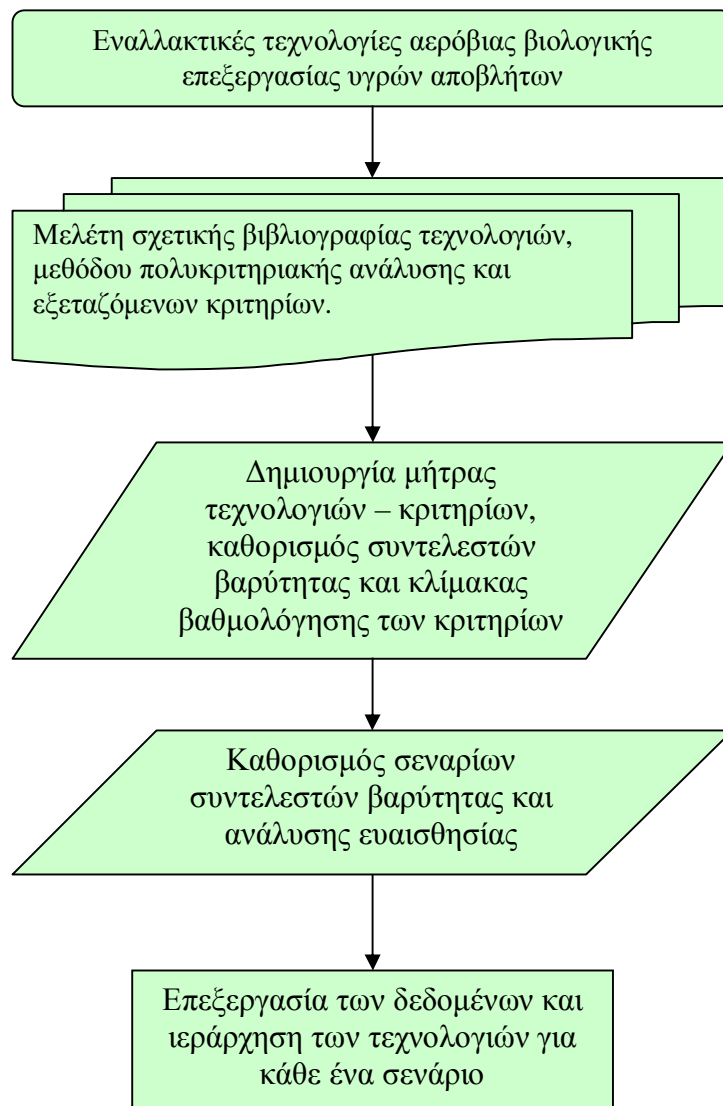
### **1.5 Βήματα που ακολουθήθηκαν για την εκπόνηση της μελέτης**

Η μελέτη αφορά την δημιουργία ενός μοντέλου το οποίο θα είναι δομημένο με τέτοιο τρόπο ώστε αναλύοντας το πολυκριτηριακά να εξάγονται αξιόπιστα αποτελέσματα λαμβάνοντας υπόψη τους προαναφερόμενους περιορισμούς και υποθέσεις.

Με δεδομένο το γεγονός ότι θα αναλύσουμε πέντε διαφορετικές τεχνολογίες αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, θα γίνει η απαιτούμενη μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας τόσο για τις εξεταζόμενες τεχνολογίες όσο και για την μέθοδο και την επιλογή των κριτηρίων και υποκριτηρίων της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Η μέθοδος της πολυκριτηριακής ανάλυσης που θα χρησιμοποιήσουμε για να δημιουργήσουμε το μοντέλο ανάλυσης είναι η “SIR-SAW” (Superiority and Inferiority Ranking – Simple Additive Weighting) και πρόκειται για μια παραλλαγή – επέκταση της ευρύτατα χρησιμοποιημένης μεθόδου “PROMETHEE”. Παράλληλα, από μία σειρά κριτηρίων που πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μας για την επιλογή και την αξιολόγηση των εν λόγω συστημάτων αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, και λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχουν τα κριτήρια όπως ορίζεται από την μέθοδο της πολυκριτηριακής ανάλυσης, θα γίνει ο καθορισμός και η ομαδοποίηση των σημαντικών κριτηρίων.

Ύστερα από την μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας, θα γίνει ο καθορισμός των τιμών του κάθε κριτηρίου για τις εξεταζόμενες τεχνολογίες. Είναι σημαντικό να γίνει προσπάθεια εύρεσης ποσοτικών τιμών για κάθε κριτήριο με κοινή μονάδα μέτρησης, όπου είναι δυνατό, και όχι ποιοτικών. Βέβαια στις περιπτώσεις των κριτηρίων όπου δεν είναι δυνατό να βρεθούν ποσοτικά στοιχεία, θα οριστούν ποιοτικά τα οποία θα τα αντιστοιχίσουμε σε τιμές μίας κλίμακας.

Για κάθε κατηγορία κριτηρίων και υποκριτηρίων θα ορίσουμε κατάλληλους συντελεστές βαρύτητας για τέσσερα βασικά σενάρια αξιολόγησης. Τα σενάρια αξιολόγησης θα επηρεάζουν τους συντελεστές βαρύτητας μόνο των κριτηρίων και όχι των υποκριτηρίων. Σε ακόλουθη ανάλυση ευαισθησίας θα μεταβάλλουμε τους συντελεστές βαρύτητας των υποκριτηρίων και θα αξιολογήσουμε τις μεταβολές στην ιεράρχηση των εξεταζόμενων τεχνολογιών.



## 1.6 Συμβολισμοί

|   |   |
|---|---|
| kWh   | : Μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας   |
| BOD <sub>5</sub>  | : Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο   |
| p.e.  | : Ισοδύναμος πληθυσμός = 54grBOD <sub>5</sub> /day  |
| MLSS  | : Αιωρούμενα στερεά   |
| MLVSS   | : Πτητικά αιωρούμενα στερεά   |
| mg  | : Μονάδα μέτρησης μάζας   |
| l   | : Μονάδα μέτρησης όγκου   |
| A <sub>i</sub>  | : Εναλλακτική λύση  |
| U(A <sub>i</sub> )  | : Συνάρτηση χρησιμότητας (utility function) της εναλλακτικής A <sub>i</sub>                   |
| w <sub>j</sub> =w <sub>ug</sub>                                       | : Συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου g <sub>j</sub> που ανήκει στην κατηγορία κριτηρίων u    |
| w <sub>u</sub>  | : Συντελεστής βαρύτητας της κατηγορίας κριτηρίων u  |
| w <sub>g</sub>  | : Συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου g <sub>j</sub> μέσα στην κατηγορία κριτηρίων u          |
| I   | : Σύμβολο κατάστασης αδιαφορίας   |
| Q   | : Σύμβολο κατάστασης ασθενούς προτίμησης  |
| P   | : Σύμβολο κατάστασης ισχυρής προτίμησης   |
| g <sub>j</sub> (A <sub>i</sub> )                                      | : Επίδοση εναλλακτικής A <sub>i</sub> στο κριτήριο g <sub>j</sub>                             |
| q <sub>j</sub>  | : Κατώφλι αδιαφορίας κριτηρίου g <sub>j</sub>   |
| p <sub>j</sub>  | : Κατώφλι προτίμησης κριτηρίου g <sub>j</sub>   |
| g <sub>j</sub>  | : Κριτήριο g <sub>j</sub>   |
| m   | : Πλήθος εναλλακτικών λύσεων  |
| n   | : Πλήθος κριτηρίων  |
| D   | : Πίνακας επιδόσεων   |
| d=(g <sub>j</sub> (A <sub>k</sub> )-g <sub>j</sub> (A <sub>i</sub> )) | : Διαφορά επιδόσεων των εναλλακτικών A <sub>k</sub> και A <sub>i</sub>                        |
| f(d), P(A <sub>k</sub> ,A <sub>i</sub> )                              | : «Γενικευμένο κριτήριο» ή «Ψευδοκριτήριο»  |
| P(A <sub>k</sub> ,A <sub>i</sub> )                                    | : Ένταση υπεροχής εναλλακτικής λύσης A <sub>k</sub>   |
| I(A <sub>i</sub> ,A <sub>k</sub> )                                    | : Ένταση υστέρησης εναλλακτικής λύσης A <sub>k</sub>  |
| S <sub>j</sub> (A <sub>i</sub> )                                      | : Δείκτης υπεροχής εναλλακτικής λύσης A <sub>i</sub> αναφορικά με το κριτήριο g <sub>j</sub>  |
| I <sub>j</sub> (A <sub>i</sub> )                                      | : Δείκτης υστέρησης εναλλακτικής λύσης A <sub>i</sub> αναφορικά με το κριτήριο g <sub>j</sub> |
| S   | : Πίνακας υπεροχής  |
| I   | : Πίνακας υστέρησης   |
| φ <sup>&gt;</sup> (A <sub>i</sub> )                                   | : Ροή υπεροχής της εναλλακτικής A <sub>i</sub>  |
| φ <sup>&lt;</sup> (A <sub>i</sub> )                                   | : Ροή υστέρησης της εναλλακτικής A <sub>i</sub>   |
| V(S <sub>j</sub> (A <sub>i</sub> ))                                   | : Συνάρτηση σύνθεσης  |
| φ <sub>n</sub> (A <sub>i</sub> )                                      | : Καθαρή ροή της εναλλακτικής A <sub>i</sub>  |
| φ <sub>r</sub> (A <sub>i</sub> )                                      | : Σχετική ροή της εναλλακτικής A <sub>i</sub>   |



## **2 ΜΕΛΕΤΗ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ**

### ***2.1 Εισαγωγή***

Για την καλύτερη κατανόηση των τεχνολογιών αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, με σκοπό τον καθορισμό των κριτηρίων και των τιμών για αυτά τα κριτήρια, είναι απαραίτητη η μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας. Η σχετική βιβλιογραφία αποτελείται από διεθνή βιβλιογραφία και δημοσιευμένα κείμενα σε επίσημα συνέδρια και επιστημονικά περιοδικά.

Από αυτή την μελέτη θα παρουσιαστούν όλα τα απαραίτητα στοιχεία τα οποία κρίνονται απαραίτητα για την δημιουργία του μοντέλου της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Σκοπός της σε βάθος έρευνας είναι η εξεύρεση ποσοτικών στοιχείων που θα απεικονίζουν την κάθε τεχνολογία

Οι τεχνολογίες οι οποίες θα εξετάσουμε είναι πέντε στον αριθμό οι οποίες δεν είναι εντελώς ανεξάρτητες μεταξύ τους. Οι δύο πρώτες ανήκουν στην κατηγορία της αιωρούμενης βιομάζας (Suspended growth process) και οι υπόλοιπες τρεις στην κατηγορία της προσκολλούμενης βιομάζας (attached-growth process). Στην πρώτη κατηγορία ανήκει η τεχνολογία της δραστικής ιλύος και η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης, ενώ στην δεύτερη κατηγορία ανήκει η τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου, η τεχνολογία του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου και η τεχνολογία των βιορότορων ή βιολογικών δίσκων. Το γεγονός ότι οι τεχνολογίες ανήκουν σε δύο μεγάλες κατηγορίες τεχνολογιών δεν σημαίνει ότι δεν είναι ανεξάρτητες και διαφορετικές μεταξύ τους. Με τον τρόπο που γίνεται η έρευνα και η

αξιολόγηση των τεχνολογιών παρουσιάζονται διαφορετικές σε πολλά από τα εξεταζόμενα κριτήρια. Δεν αποκλείεται βέβαια το γεγονός ύπαρξης και κοινών σημείων.

## **2.2 Τεχνολογίες αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων**

### **2.2.1 Τεχνολογία Δραστικής ιλύος**

Η δραστική ιλύς είναι μία μέθοδος αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας των αποβλήτων που συνίσταται σε ένα σύστημα ανάμιξης του ρυπασμένου νερού σε έναν αντιδραστήρα παρουσία καλλιέργειας αερόβιων μικροοργανισμών οι οποίοι βρίσκονται σε αιώρηση. Αποτέλεσμα αυτής της ανάμιξης είναι η ανάπτυξη της μικροβιακής βιομάζας, με την χρησιμοποίηση των διαλυμένων και αιωρούμενων οργανικών στερεών ως πηγή άνθρακα και ενέργειας για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών. [4, σελ. 177]

Η επίτευξη του αερόβιου περιβάλλοντος μέσα στον αντιδραστήρα επιτυγχάνεται με την εισαγωγή αέρα στο σύστημα. Η ποσότητα του οξυγόνου που μεταφέρεται στην δεξαμενή αερισμού, θεωρητικά είναι ίση με την ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται από τους μικροοργανισμούς στο σύστημα της δραστικής ιλύος, για την οξείδωση του οργανικού υλικού και για την διατήρηση αερόβιας κατάστασης στο σύστημα. Στην πράξη, η συγκέντρωση του οξυγόνου μέσα στα απόβλητα, πρέπει να διατηρείται μεταξύ 1,5 και 4 mg/l σε όλες τις περιοχές. Η συνήθης τιμή είναι 2 mg/l. Τιμές πάνω από 4 mg/l δεν αυξάνουν την απόδοση της λειτουργίας του συστήματος αλλά αυξάνουν το κόστος αερισμού. [2, σελ 544-545]

Η μεταφορά του οξυγόνου στο σύστημα μπορεί να γίνει είτε με μηχανικό αερισμό είτε με διάχυση αέρα εντός των δεξαμενών [2, πίνακας 10-4]. Το σύστημα αερισμού το οποίο είναι συμβατό και με ανοιχτές και κλειστές δεξαμενές είναι το σύστημα διάχυσης αέρα. Αυτό παρουσιάζεται σε διάφορες μορφές, με σύστημα διαχυτήρων και φυσητήρων, με υποβρύχιους αεριστήρες κ.α. Η επιλογή του συστήματος εξαρτάται από τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής.

Συνήθως στα εξεταζόμενα συστήματα η επεξεργασία είναι συνεχής. Μετά την δεξαμενή αερισμού και ύστερα από συγκεκριμένη χρονική περίοδο, μίγμα νέας και παλαιάς βιομάζας περνάει σε δεξαμενή διαχωρισμού - καθίζησης από όπου η βιομάζα διαχωρίζεται από το επεξεργασμένο νερό. Μέρος της ποσότητας των μικροοργανισμών επιστρέφει στον αντιδραστήρα έτσι ώστε να διατηρηθεί η επιθυμητή συγκέντρωση τους μέσα σε αυτόν. Η περίσσια ποσότητα απομακρύνεται περιοδικά. [2, σελ. 379]

Ο βαθμός απόδοσης ενός συστήματος που χρησιμοποιεί την τεχνολογία της συμβατικής δραστικής ιλύος, κυμαίνεται από 85% έως 95% [2, πίνακας 10-4]. Σε αυτή την τεχνολογία, ο χρόνος παραμονής των αποβλήτων εντός του αντιδραστήρα κυμαίνεται από 4 έως 8 ώρες. Η ημερήσια υδραυλική φόρτιση του συστήματος μπορεί να είναι από 0,32 έως 0,64 kgBOD<sub>5</sub>/(m<sup>3</sup> /d). Η οργανική φόρτιση του συστήματος κυμαίνεται από 0,2 έως 0,4 kgBOD<sub>5</sub>/kgMLVSS d και η ηλικία της ιλύος από 5 έως 15 ημέρες. [2, πίνακας 10-5]

Το υπόλειμμα της βιολογικής επεξεργασίας από έναν αντιδραστήρα δραστικής ιλύος, είναι η βιολογική ιλύς η οποία είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε στερεά, περίπου 1,0% με 1,5% κατά βάρος περιεκτικότητα σε νερό. Η μάζα της παραγόμενης βιολογική ιλύς

από ένα τέτοιο σύστημα είναι 0,6 kg/kgBOD<sub>5</sub> [6, πίνακας 1]. Η βιολογική ιλύς πρέπει να αφυδατώνεται και να διατίθεται ως στερεό απόβλητο αφού πρώτα αδρανοποιηθεί.

Η τεχνολογία της βιολογικής επεξεργασίας δραστικής ιλύος έχει υψηλές καταναλώσεις ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλίσκεται στο σύστημα παρέχεται κυρίως για την οξυγόνωση των αποβλήτων και την διατήρηση αερόβιων συνθηκών σε αυτά. Το επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας σε ένα τέτοιο σύστημα είναι 0,1kWh/p.e. [5, σελ 146] και αντιστοιχεί σε 2,1kWh/kgBOD<sub>5</sub> [14].

Η λειτουργία ενός συστήματος δραστικής ιλύος, εκτός από την κατανάλωση ενέργειας η οποία από μόνη της έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις, έχει και επιπτώσεις στην ποιότητα της ατμόσφαιρας. Σε μία μονάδα δραστικής ιλύος οι κυριότερες αέριες εκπομπές είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) το οποίο προκύπτει από την οξείδωση του οργανικού φορτίου, το μονοξείδιο του αζώτου (NO), οι πτητικές οργανικές ενώσεις (TVOCs) και τα σωματίδια οργανικού άνθρακα (POC). Ειδικότερα οι ετήσιες αέριες εκπομπές για μία τέτοια μονάδα είναι 27.400 g/p.e. διοξείδιο του άνθρακα, 0,58 g/p.e. μονοξείδιο του άνθρακα, 244 g/p.e. πτητικές οργανικές ενώσεις και 0,08 g/p.e. POC [18, πίνακας 2].

Εξ' αιτίας του ισχυρού αερισμού που υφίστανται τα υγρά απόβλητα κατά την αερόβια βιολογική επεξεργασία δραστικής ιλύος, οι ποσότητες σωματιδίων που εκπέμπονται είναι σημαντικές [18]. Μαζί με τα σωματίδια του οργανικού άνθρακα, εξίσου σημαντικές είναι και οι εκπομπές μικροοργανισμών οι οποίες παρουσιάζονται υπό μορφή αερολυμάτων (aerosols). Επειδή τα υγρά απόβλητα είναι πιθανοί φορείς

παθογόνων μικροοργανισμών, η εισπνοή των σωματιδίων, η επαφή και η απορρόφηση τους είναι επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία [19].

Ένα από τα συνήθη προβλήματα που παρουσιάζονται στις μονάδες αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας των αποβλήτων είναι η παρουσία οσμών, ένδειξη δυσλειτουργίας για τις μονάδες αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας. Γενικά οι τεχνολογίες της κατηγορίας της αιωρούμενης βιομάζας (Suspended growth process) όπως είναι και η τεχνολογία της δραστικής ιλύος, έχουν μικρά επίπεδα οσμών.

Ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί την τεχνολογία της δραστικής ιλύος είναι ένα ευαίσθητο σύστημα σε οργανικά φορτία αιχμής και ιδιαίτερα σε τοξικά στοιχεία που είναι πιθανό να περιέχονται στα απόβλητα. [ 3]

Το κόστος επένδυσης μίας τέτοιας εγκατάστασης διαφοροποιείται από περιοχή σε περιοχή και από χώρα σε χώρα. Εμπειρικά δεδομένα από την Γαλλία για εγκαταστάσεις ισοδύναμου πληθυσμού χιλίων ατόμων (1000p.e.) ανέρχονται σε €230.000 ± 30% [13] (FNDAE technical document n°22, 1998). Άλλη πηγή κατασκευαστή αναφέρει ότι το κόστος μίας ανάλογης εγκατάστασης είναι στην τάξη μεγέθους των € 155.000 [13] χωρίς να λαμβάνεται υπόψη του το κόστος χρήσης γης. Μία τρίτη πηγή αναφέρει ότι για εγκαταστάσεις ισοδύναμου πληθυσμού από δύο χιλιάδων ατόμων (2.000p.e.) έως δεκαπέντε χιλιάδων ατόμων (15.000p.e.) με μία προσαύξηση ασφαλείας 15-20% στο μέγεθος της εγκατάστασης το κόστος επένδυσης είναι €185/p.e [13]. Από το αναφερόμενο κόστος επένδυσης, το 50% περιλαμβάνει τα έργα πολιτικού μηχανικού, δηλαδή €92,5/p.e. και το άλλο 50% το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού

εγκατεστημένο. Ο χρόνος ζωής των έργων πολιτικού μηχανικού εκτιμάται στα 20 χρόνια ενώ του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού στα 12 χρόνια. [13]

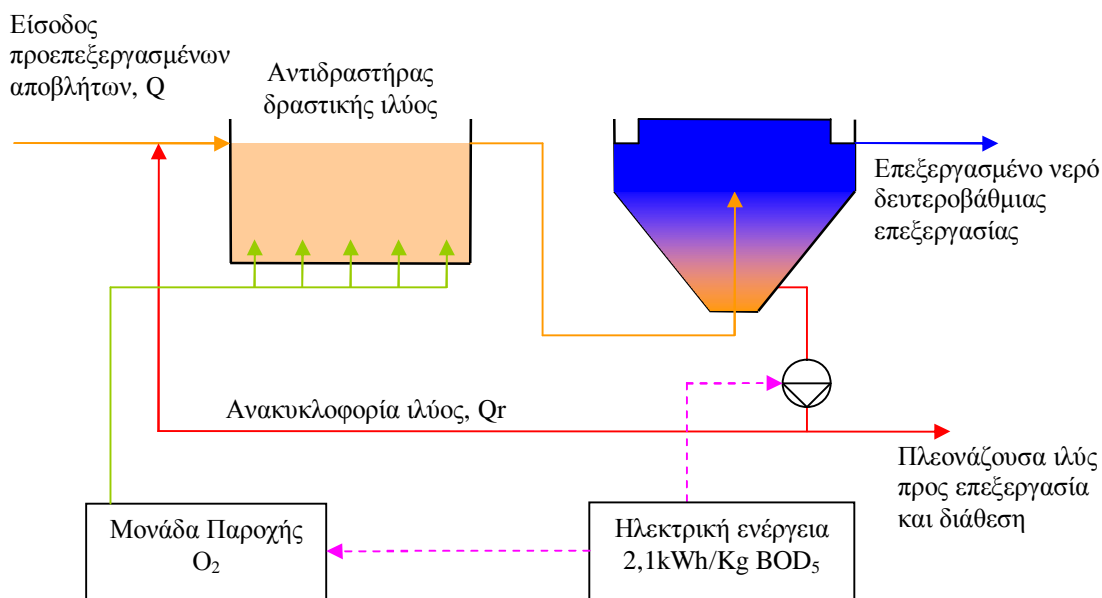
Το λειτουργικό κόστος ενός συστήματος που χρησιμοποιεί την τεχνολογία της δραστικής ιλύος αναφέρεται γενικά ότι είναι υψηλό [12, πίνακας 7.1]. Εμπειρικά δεδομένα για εγκαταστάσεις ισοδύναμου πληθυσμού χιλίων ατόμων (1000 p.e.) αναφέρουν ότι το ετήσιο λειτουργικό κόστος ανέρχεται σε € 11.500 [13] (FNDAE technical document n°22, 1998) το οποίο περιλαμβάνει και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Για ανάλογοι μεγέθους εγκαταστάσεις, το ετήσιο λειτουργικό κόστος ανηγμένο σε ανά kgBOD<sub>5</sub> που εισέρχεται στο σύστημα προς επεξεργασία είναι €0,60 [14].

Οι απαιτήσεις συντήρησης του συστήματος κατά την λειτουργία, δηλαδή η παρακολούθηση της μονάδας και οι απαιτήσεις σε εξειδικευμένο προσωπικό για την ορθή και απρόσκοπτη λειτουργία είναι υψηλή σε σχέση με άλλα συστήματα. Το κόστος αυτό ανέρχεται σε €8,27/p.e. [14].

Οι απαιτήσεις των μονάδων δραστικής ιλύος σε χρήση γης είναι υψηλές και αυτό προκύπτει από τον μεγάλο χρόνο παραμονής που απαιτεί η διεργασία της δραστικής ιλύος σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες.

Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται πάρα πολλά χρόνια, είναι μία ώριμη τεχνολογία και από πλευράς διεργασίας και από πλευράς χρησιμοποιούμενου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Στο σύνολο της χαρακτηρίζεται ώριμη και με πάρα πολλές εφαρμογές. Το

μεγαλύτερο ποσοστό των εγκαταστάσεων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων έχει συμπεριλάβει σε κάποια φάση της επεξεργασίας την τεχνολογία αυτή.



Εικόνα 2.2-1. Διάγραμμα ροής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων τεχνολογίας Δραστικής Ιλύος.

### 2.2.2 Τεχνολογία Βιοαντιδραστήρα μεμβράνης - εμβαπτιζόμενος

Ο βιοαντιδραστήρας μεμβράνης είναι μία τεχνολογία αερόβιας επεξεργασίας αποβλήτων όπου έχει εφαρμογή σε επεξεργασία λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων, όπως χημικής βιομηχανίας, βιομηχανίας τροφίμων, χαρτοβιομηχανίας κτλ. [5, σελ 143]

Είναι μία σχετικά νέα υποσχόμενη τεχνολογία η οποία είναι συνδυασμός βιολογικής επεξεργασίας δραστικής ιλύος με φίλτραυση σε μεμβράνη. Το σύστημα διαχωρισμού στερεών – υγρών εμφανίζεται σε δύο τύπους: τον εμβαπτιζόμενο τύπο της μεμβράνης και τον τύπο της πλήρους ανακυκλοφορίας μέσα από την μεμβράνη. Η μεμβράνη

διαχωρίζει τα στερεά και τους μικροοργανισμούς από το νερό το οποίο επιτρέπει η μεμβράνη να περάσει μαζί με άλλα διαλυτά στοιχεία. [6]

Η οξείδωση του οργανικού φορτίου γίνεται μέσα στον αντιδραστήρα με την βοήθεια του οξυγόνου το οποίο παρέχεται από τον αέρα που διοχετεύεται σε αυτόν μέσω μίας μονάδας παροχής αέρα. Έτσι με την βοήθεια του αέρα, αναπτύσσονται οι μικροοργανισμοί μέσα σε αυτόν και επιτυγχάνεται και η απαιτούμενη ανάδευση στο σύστημα. Συνήθως οι βιοαντιδραστήρες μεμβράνης με εμβαπτιζόμενο σύστημα μεμβρανών, χρησιμοποιούν αερισμό με διάχυση αέρα χοντρής φυσαλίδας. Αυτό το σύστημα διάχυσης αέρα δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικό, αλλά έχει το πλεονέκτημα ότι οι αναδυόμενες φυσαλίδες δημιουργούν στροβιλισμό στην επιφάνεια των μεμβρανών και βοηθούν στον διαχωρισμό του νερού από την βιομάζα καθαρίζοντας την επιφάνεια τους. [7] Με αυτό τον τρόπο η ενέργεια που χρησιμοποιείται για τον αερισμό των αποβλήτων, εκμεταλλεύεται αποδοτικά για την συντήρηση των μεμβρανών στο σύστημα [8]. Η απουσία της τελικής δεξαμενής καθίζησης από το σύστημα και η αντικατάσταση του από το σύστημα των μεμβρανών, δίνει την δυνατότητα στον αντιδραστήρα της δραστικής ιλύος μεγαλώσει το επίπεδο φόρτισης της δεξαμενής με ξηρή ουσία (έως και πάνω από 20.000mg/l MLSS) μειώνοντας έτσι τον όγκο του αντιδραστήρα [8]. Ο βαθμός απόδοσης ενός συστήματος δραστικής ιλύος σε βιοαντιδραστήρα μεμβράνης, είναι 97% έως 99% [5, σελ. 145],[7, πίνακας 3]. Σε αυτή την τεχνολογία, ο χρόνος παραμονής των αποβλήτων εντός του αντιδραστήρα έχει μία μέση τιμή τριών ωρών [7]. Η ημερήσια υδραυλική φόρτιση του συστήματος μπορεί να είναι από 0,39 έως 0,7 kgBOD<sub>5</sub>/m<sup>3</sup> d [7] και ηλικία της ιλύος από 40 έως 70 ημέρες. [8]



Το πλεονέκτημα που προσφέρει ένας βιοαντιδραστήρας μεμβράνης από ένα κοινό σύστημα με αντιδραστήρα δραστικής ιλύος είναι ότι καταλαμβάνει πολύ μικρότερη επιφάνεια, περίπου το 50% μία συμβατικής [6], στο οποίο συντελεί και η απουσία της τελικής δεξαμενής καθίζησης [7]. Η υψηλή συγκέντρωση βιομάζας στον βιοαντιδραστήρα μεμβράνης επιτρέπει την πλήρη αποικοδόμηση του ανθρακούχου υλικού και της νιτροποίησης των λυμάτων σε ένα μέσο χρόνο παραμονής τριών ωρών [7].

Το υπόλειμμα της βιολογικής επεξεργασίας από έναν βιοαντιδραστήρα μεμβράνης είναι η βιολογική ιλύς η οποία είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε στερεά, πυκνότητας πάνω από 2% [8]. Το βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας σε σχέση με την τεχνολογία της δραστικής ιλύος είναι η μειωμένη παραγωγή βιολογικής ιλύος [6], πράγμα που συντελεί και στην μείωση του συνολικού λειτουργικού κόστους [7] και σε γενικότερα περιβαλλοντικά οφέλη. Η παραγόμενη βιολογική ιλύς από ένα τέτοιο σύστημα είναι έως 0,3 kg/kgBOD<sub>5</sub> [6, πίνακας 1].

Το πλεονέκτημα από πλευράς λειτουργικότητας που έχει η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης είναι ότι δεν παρουσιάζει προβλήματα διόγκωσης της βιομάζας (bulking) [8] σε αντίθεση με την τεχνολογία της δραστικής ιλύος όπου το φαινόμενο της διόγκωσης της βιομάζας και η δυσκολία της να καθιζάνει είναι πιθανή.

Η μικρότερη επιφάνεια σε σχέση με την κλασσική τεχνολογία της δραστικής ιλύος [11], προσδίδει το χαρακτηριστικό στην τεχνολογία ότι έχει ελάχιστες οσμές [8] ή σχεδόν μηδαμινές.

Το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας που απαιτείται για την λειτουργία του συστήματος, χρησιμοποιείται για την οξυγόνωση των αποβλήτων και τον καθαρισμό της επιφάνειας των μεμβρανών. Μικρότερο ποσοστό της ενέργειας καταναλίσκεται για την άντληση των επεξεργασμένων αποβλήτων και την απόρριψη της βιολογικής ιλύος. Σε μία τυπική εγκατάσταση η κατανάλωση ενέργειας είναι 2 kWh/kgBOD<sub>5</sub>.

Το κόστος επένδυσης μίας εγκατάστασης που χρησιμοποιεί την τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης είναι σχετικά υψηλό. Η μία τυπική διακύμανση του κόστους επένδυσης για μονάδες επεξεργασίας λυμάτων είναι \$4,8 έως \$6,5 ανά γαλόνι η οποία εξαρτάται από το μέγεθος της εγκατάστασης, την ποιότητα του εξοπλισμού, τον συντελεστή υπερδιαστασιολόγησης, την αρχιτεκτονική μελέτη κ.α. [11]. Για μία τυπική εγκατάσταση δυναμικότητας 4000 ισοδύναμων ατόμων, το κόστος επένδυσης για όλη την εγκατάσταση £4.000.000 [6], δηλαδή € 1430/p.e. Το κόστος αυτό περιλαμβάνει το κόστος των έργων του πολιτικού μηχανικού και του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που από αυτό το μεγαλύτερο ποσοστό είναι το κόστος των μεμβρανών. Ο χρόνος ζωής των μεμβρανών είναι περίπου επτά με οκτώ χρόνια [11], [6].

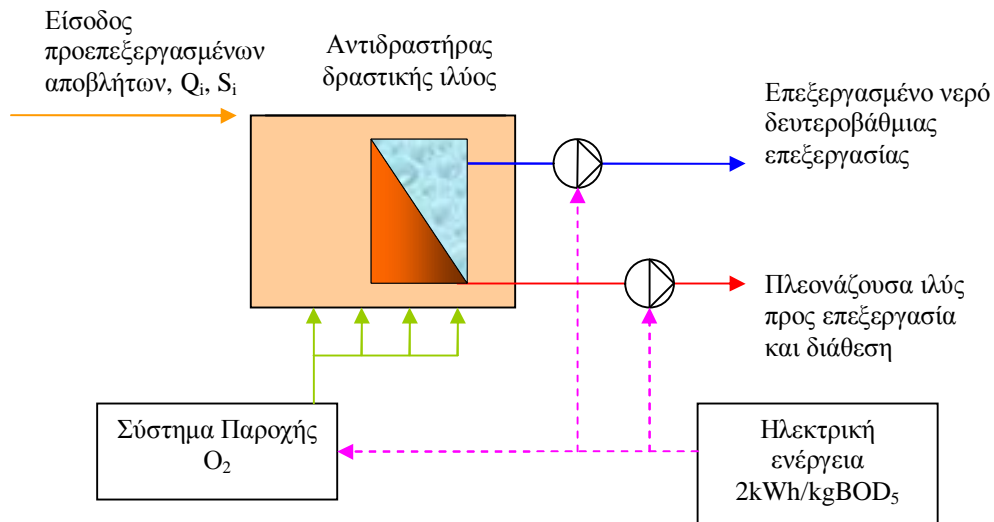
Το λειτουργικό κόστος μίας εγκατάστασης τεχνολογίας βιοαντιδραστήρα μεμβράνης συμπεριλαμβανομένου και του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας είναι €0,43/kgBOD<sub>5</sub> δυναμικότητας της μονάδας [15].

Εκτός από τις απαιτήσεις συντήρησης του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, αυτό που ενδιαφέρει ιδιαίτερα είναι οι απαιτήσεις συντήρησης της διεργασίας στο σύστημα. Η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης έχει τις μικρότερες απαιτήσεις σε

συντήρηση και παρακολούθηση στο σύστημα και αυτό λόγω των μικρών διαστάσεων της μονάδας σε σχέση με τις αντίστοιχες τεχνολογίες και του διαφορετικού τρόπου διαχωρισμού του επεξεργασμένου νερού από την ιλύς.

Εξ' αιτίας του ισχυρού αερισμού που υφίστανται τα υγρά απόβλητα κατά την αερόβια βιολογική επεξεργασία δραστικής ιλύος, οι ποσότητες σωματιδίων που εκπέμπονται είναι σημαντικές [18]. Μαζί με τα σωματίδια του οργανικού άνθρακα, εξίσου σημαντικές είναι και οι εκπομπές μικροοργανισμών οι οποίες παρουσιάζονται υπό μορφή αερολυμάτων (aerosols). Επειδή τα υγρά απόβλητα είναι πιθανοί φορείς παθογόνων μικροοργανισμών, η εισπνοή των σωματιδίων, η επαφή και η απορρόφηση τους είναι επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία [19]. Η επιφάνεια του αντιδραστήρα έχει άμεση σχέση με την εκπομπή των αερολυμάτων. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια του αντιδραστήρα τόσο μεγαλύτερη είναι και η εκπομπή των αερολυμάτων. Σε σύγκριση με την τεχνολογία της δραστικής ιλύος, η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης έχει ελαφρώς μικρότερο μέγεθος αντιδραστήρα αλλά θεωρούμε ότι έχει τις ίδιες εκπομπές με ένα σύστημα τεχνολογίας δραστικής ιλύος.

Η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης είναι μία νέα σχετικά τεχνολογία της τελευταίας δεκαετίας. Δεν είναι ώριμη τεχνολογία και αυτό είναι έντονο όσον αφορά την τεχνολογία των μεμβρανών που εφαρμόζεται. Στο σύνολο της χαρακτηρίζεται ως μία αναπτυσσόμενη τεχνολογία με πολύ λίγες εφαρμογές.



**Εικόνα 2.2-2. Διάγραμμα ροής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων τεχνολογίας Βιοαντιδραστήρα Μembrάνης.**

### 2.2.3 Τεχνολογία Βιολογικών φίλτρων (Trickling filters)

Τα βιολογικά φίλτρα χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου από τα υγρά απόβλητα. Είναι ένα αερόβιο σύστημα επεξεργασίας το οποίο αξιοποιεί την βιολογική δράση των μικροοργανισμών οι οποίοι είναι σε επαφή με την επιφάνεια του υλικού πλήρωσης και αποικοδομούν το οργανικό φορτίο από τα απόβλητα. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί μία αρχή λειτουργίας η οποία είναι συνηθισμένη σε εφαρμογή πολλών τεχνολογιών όπως οι βιολογικοί δίσκοι και οι βιολογικοί πύργοι “packed – bed reactors”. Αυτό το είδος της επεξεργασίας είναι γνωστό ως προσκολλούμενης βιομάζας (attached-growth process) [3]

Τα βιολογικά φίλτρα δημιουργούν τις συνθήκες έτσι ώστε τα οργανικά στοιχεία που βρίσκονται μέσα στα απόβλητα να απορροφούνται από τον πληθυσμό των μικροοργανισμών (αερόβιοι, αναερόβιοι μικροοργανισμοί και ισχυρά βακτήρια όπως

μύκητες, άλγη και πρωτόζωα) οι οποίοι βρίσκονται σε επαφή με την επιφάνεια του υλικού πλήρωσης δημιουργώντας ένα λεπτό στρώμα πάχους περίπου 0,1 με 0,2mm. Κατά την διάρκεια που τα υγρά απόβλητα ρέουν στην επιφάνεια του υλικού πλήρωσης, οι ήδη υπάρχοντες μικροοργανισμοί των αποβλήτων βαθμιαία έρχονται σε επαφή με το υλικό πλήρωσης και προσκολλούνται πάνω σε αυτό δημιουργώντας ένα λεπτό στρώμα (βλέπε εικόνα 2.2.-2). Το οργανικό υλικό των αποβλήτων αποικοδομείται από τους αερόβιους μικροοργανισμούς στο εξωτερικό μέρος του λεπτού στρώματος. Όσο μεγαλώνει το πάχος του στρώματος από την ανάπτυξη των μικροοργανισμών, η διείσδυση του οξυγόνου στο ενδιάμεσο στρώμα μειώνεται και έτσι αρχίζει η ανάπτυξη αναερόβιων μικροοργανισμών. Όσο συνεχίζεται η ανάπτυξη του βιολογικού στρώματος, κάποια στιγμή η εξωτερική στοιβάδα των μικροοργανισμών χάνει την ικανότητα της προσκόλλησης με το υλικό πλήρωσης και έτσι πέφτει από το φίλτρο. Αυτή η βιομάζα δεσμεύεται από έναν διαχωριστή (δεξαμενή καθίζησης) και απορρίπτεται ως στερεό απόβλητο. [3]

Η ειδική μορφή των βιολογικών φίλτρων που θα εξετάσουμε είναι ο βιολογικός πύργος. Αποτελείται από βιομηχανοποιημένο υλικό πλήρωσης, συνήθως για τα μοντέρνα συστήματα PVC, που εξασφαλίζεται μεγάλη ειδική επιφάνεια ανά μονάδα όγκου με αντίστοιχο μεγάλο ποσοστό κενών. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η ουσιαστική αύξηση της βιολογικής δράσης χωρίς εμφράξεις των διόδων και με απρόσκοπτο αερισμό. Η ομοιομορφία του υλικού, το μικρό βάρος και η ευκολία μεταφοράς (λόγω συσκευασίας σε περιορισμένο όγκο) επιτρέπουν την κατασκευή κλινών μεγάλου ύψους και το χειρισμό πυκνών αποβλήτων. [1, σελ 151]

Οι βιολογικοί πύργοι κατασκευάζονται κυκλικοί ή ορθογωνικοί με περιστρεφόμενο βραχίονα ή σταθερά ακροφύσια [1, σελ 151]. Μπορούν να κατασκευαστούν σε μεγάλη διάμετρο, 6-12m [3] και σε μεγάλο ύψος που μπορεί να φτάσει και τα 12m [2, πίνακας 10-13]. Οι διαστάσεις αυτές εξαρτώνται από το υλικό κατασκευής και τον κατασκευαστή. Το μεγάλο ύψος στους βιολογικούς πύργους εξασφαλίζει μεγάλους χρόνους παραμονής των αποβλήτων με αποτέλεσμα η βιολογική δράση να προχωράει περισσότερο στην ενδογενή φάση και στην πληρέστερη οξείδωση των οργανικών ουσιών [1, σελ 151].

Τα βιολογικά φίλτρα από βιομηχανοποιημένο υλικό είναι υψηλού ρυθμού και μπορούν να φορτιστούν με υψηλά οργανικά φορτία. Μία τυπική τιμή οργανικής φόρτισης σε κιλά BOD<sub>5</sub> ανά κυβικό μέτρο υλικού πλήρωσης την ημέρα είναι 0,6 έως 1,6 kgBOD<sub>5</sub>/(m<sup>3</sup>/d) [3]. Υπάρχουν κατασκευαστές που δηλώνουν τυπικές τιμές φόρτισης υψηλότερες οι οποίες είναι 2,0-5,0 kgBOD<sub>5</sub>/(m<sup>3</sup>/d).

Ο βαθμός απόδοσης απόρριψης του διαλυμένου ημιδιαλυτού και αδιάλυτου οργανικού φορτίου κυμαίνεται από 65-85%. Η τιμή αυτή είναι χαμηλότερη από τις τιμές του βαθμού απόδοσης που μπορεί να φτάσει ένα σύστημα δραστικής ιλύος. [3]

Το σύστημα είναι ευέλικτο και έχει την δυνατότητα και το πλεονέκτημα εξάλειψης φορτίων αιχμής χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα και γενικά παρουσιάζεται ως ένα σύστημα αξιόπιστο. Παρόλο την μεγάλη αξιοπιστία του συστήματος παρουσιάζονται και λειτουργικά προβλήματα. Μερικά από τα πιο συνηθισμένα προβλήματα αποδίδονται στην ανάπτυξη του βιολογικού στρώματος, σε σχεδιαστικά λάθη, σε αλλαγή των χαρακτηριστικών των αποβλήτων ή σε αστοχία του ηλεκτρομηχανολογικού

εξοπλισμού. [3] Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας, δηλαδή ο βαθμός καθαρισμού, είναι χρονικά μεταβαλλόμενος [4, σελ. 222] και αυτό συμβαίνει φυσιολογικά εξ' αιτίας της αρχής λειτουργίας των βιολογικών φίλτρων.

Το σύστημα των βιολογικών φίλτρων είναι απλό στον σχεδιασμό του. Στην καθημερινή του λειτουργία είναι η τεχνολογία με τα λιγότερα προβλήματα. Απαιτεί πολύ λιγότερη προσοχή κατά την λειτουργία του σε σχέση με την τεχνολογία της δραστικής ιλύος, αλλά παρόλα αυτά κάποια τεχνικά προβλήματα μπορεί να υπάρξουν, όπως πιθανές εμφράξεις στα βιολογικά φίλτρα και στο σύστημα διαβροχής του υγρού αποβλήτου πάνω από το βιολογικό φίλτρο [12, πίνακας 7.1]. Ο χρόνος ζωής του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού εκτιμάται στα 12 χρόνια. [13]

Η ανάπτυξη των μικροοργανισμών πάνω στο υλικό πλήρωσης του βιολογικού φίλτρου είναι εξαρτημένη από τις κλιματολογικές αλλαγές οι οποίες επηρεάζουν την απόδοση των φίλτρων. Ο ρυθμός μεταβολισμού των μικροοργανισμών μεγαλώνει με την αύξηση της θερμοκρασίας και με τον αίθριο καιρό. Αυτό σημαίνει ότι μεγαλύτερα οργανικά φορτία μπορούν να απομακρυνθούν και μεγάλοι βαθμοί απόδοσης είναι δυνατό να επιτευχθούν στα θερμά κλίματα, με την προϋπόθεση διατήρησης αερόβιων συνθηκών στο βιολογικό φίλτρο. Αντίθετα, στα ψυχρά κλίματα μειώνεται ο βαθμός απόδοσης και παρουσιάζονται προβλήματα από πιθανή δημιουργία πάγων πάνω στα φίλτρα και στο σύστημα διασποράς των αποβλήτων.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας είναι η χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση της. Η ενεργειακή κατανάλωση περιορίζεται στην άντληση και ανακυκλοφορία των αποβλήτων στην είσοδο του βιολογικού φίλτρου. Επειδή συνήθως η κυκλοφορία του

αέρα γίνεται με φυσική ροή, δεν είναι απαραίτητη η χρήση μονάδας μεγάλης ισχύος ακόμα και στην περίπτωση που απαιτείται η χρήση φυσητήρα. Μία ενδεικτική τιμή κατανάλωσης ενέργειας που δίνεται από κάποιον κατασκευαστή είναι 0,15kWh/kgBOD<sub>5</sub>. Άλλες πηγές αναφέρουν ότι η καταναλισκόμενη ενέργεια για τέτοιες μονάδες είναι 0,39kWh/kgBOD<sub>5</sub> [14].

Τα βιολογικά φίλτρα γενικά αναδύουν οσμές από αναερόβιες ζυμώσεις και η χρήση τους περιορίζεται μόνο σε υπαίθριες εγκαταστάσεις [4, σελ. 222]. Τα συνήθη προβλήματα που παρουσιάζονται σε ένα σύστημα βιολογικών φίλτρων είναι η παρουσία οσμών και εντόμων στην περιοχή πάνω από την εγκατάσταση. Η παρουσία τους είναι πολλές φορές έντονη και ενοχλητική και γίνεται πολλές φορές απαγορευτική εάν δεν είναι απομακρυσμένη από άλλες εγκαταστάσεις.

Σε μία μονάδα αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας με σκοπό την μείωση του οργανικού φορτίου, οι κυριότερες αέριες εκπομπές είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) το οποίο προκύπτει από την οξείδωση του οργανικού φορτίου, το οξείδιο του αζώτου (NO), οι πτητικές οργανικές ενώσεις (TVOCs) και τα σωματίδια οργανικού άνθρακα (POC) [18]. Μαζί με τα σωματίδια του οργανικού άνθρακα, εξίσου σημαντικές είναι και οι εκπομπές μικροοργανισμών οι οποίες παρουσιάζονται υπό μορφή αερολυμάτων (aerosols). Επειδή τα υγρά απόβλητα είναι πιθανοί φορείς παθογόνων μικροοργανισμών, η εισπνοή των σωματιδίων, η επαφή και η απορρόφηση τους είναι επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία [19]. Από πειραματικές μετρήσεις που έγιναν σε πιλοτικούς αντιδραστήρες βιολογικού φίλτρου σε τέσσερις τύπους μικροοργανισμών που περιέχονται σε αερολύματα, προέκυψαν οι παρακάτω τιμές: Mesophilic bacteria



5,8 x 10<sup>3</sup> CFU/p.e, TSA-SB bacteria 1,4 x 10<sup>3</sup> CFU/p.e, Mesophilic fungi 350 CFU/p.e, Thermophilic fungi 28 CFU/p.e. [19, πίνακας 2].

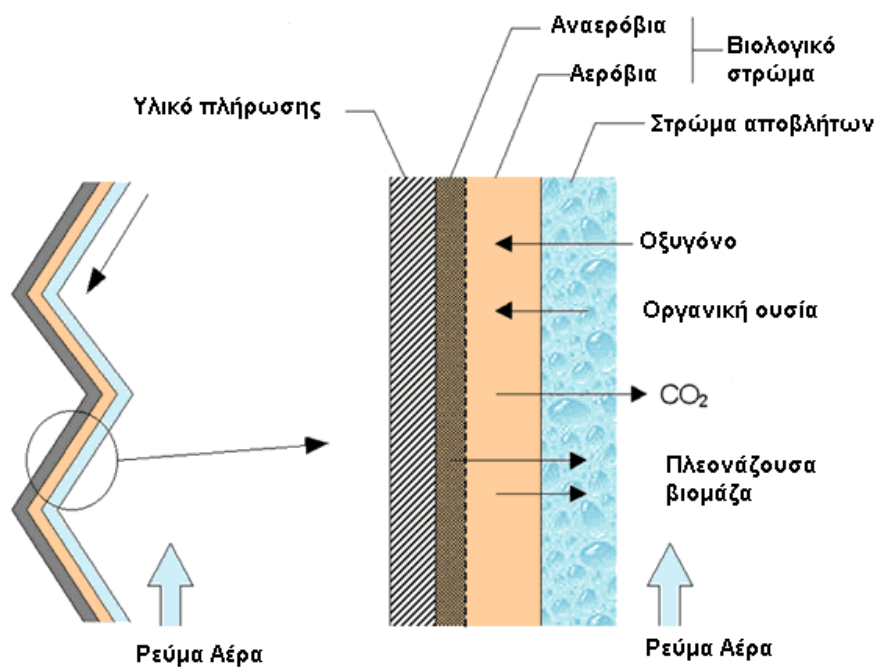
Το υπόλειμμα της βιολογικής επεξεργασίας είναι η βιολογική ιλύς η οποία είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε στερεά, περίπου 1,5% κατά βάρος περιεκτικότητα σε νερό. Η παραγόμενη βιολογική ιλύς από ένα σύστημα βιολογικών φίλτρων διαβροχής κυμαίνεται από 0,3 έως 0,5 kg/kgBOD<sub>5</sub> [6, πίνακας 1].

Το κόστος επένδυσης μίας εγκατάστασης που χρησιμοποιεί την τεχνολογία των βιολογικών φίλτρων διαβροχής διαφοροποιείται από περιοχή σε περιοχή και από χώρα σε χώρα. Γενικά το κόστος μίας τέτοιας εγκατάστασης είναι σχετικά υψηλό [12, πίνακας 7.1]. Εμπειρικά δεδομένα από την Γαλλία για εγκαταστάσεις 1000p.e. ανέρχονται σε € 180.000 ± 50% [13] (FNDAE technical document n°22, 1998). Το κόστος κατασκευής της μονάδας στην Ελλάδα είναι αρκετά μικρότερο από την Γαλλία [13]. Η τιμή αυτή κυμαίνεται από χώρα σε χώρα και γι' αυτό δεν μπορούμε να είμαστε απόλυτοι. Μία τυπική τιμή κόστους επένδυσης μίας τέτοιας μονάδας είναι €156/p.e [14].

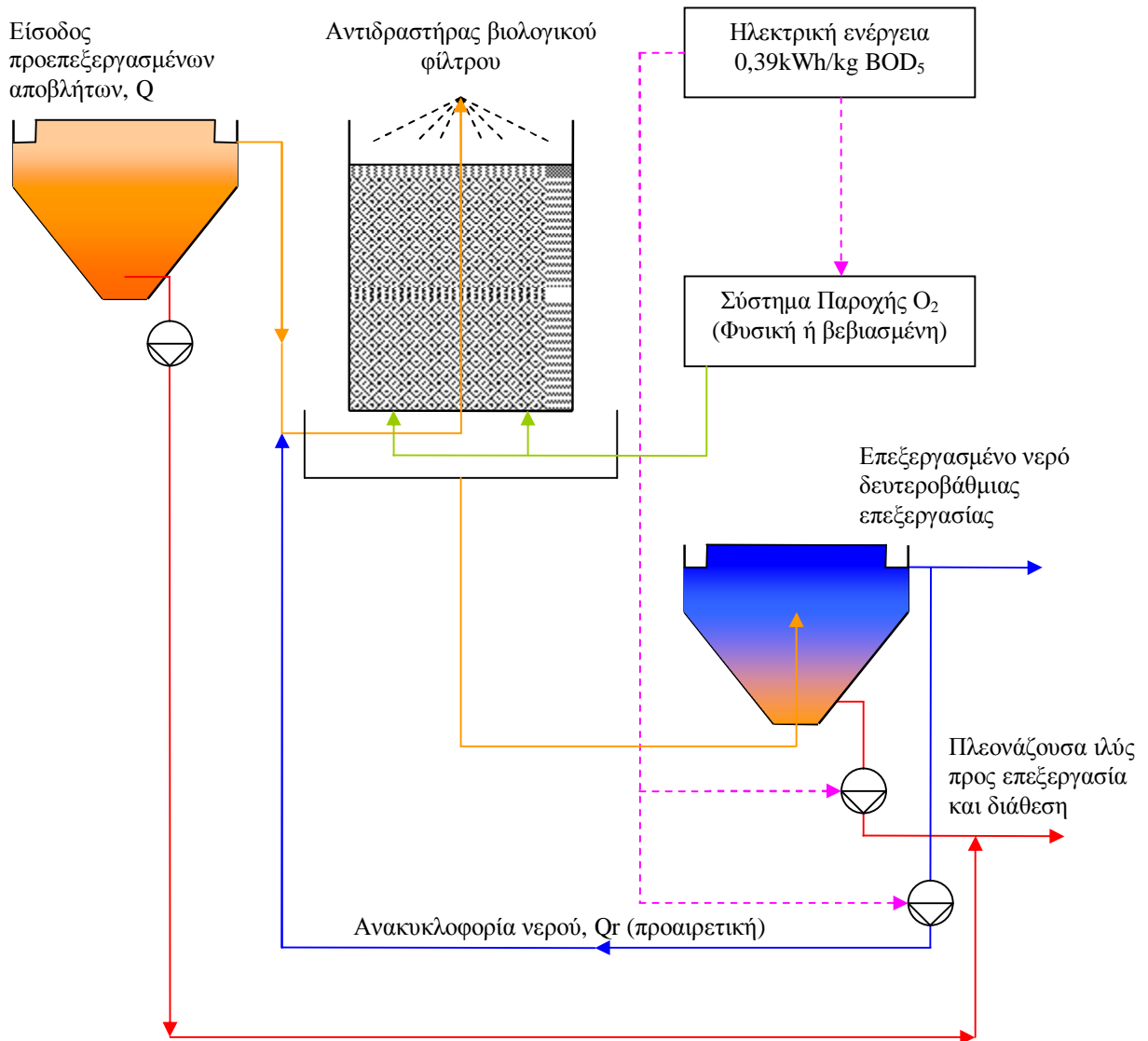
Το λειτουργικό κόστος ενός συστήματος που χρησιμοποιεί την τεχνολογία των βιολογικών φίλτρων, από εμπειρικά δεδομένα από την Γαλλία, για εγκαταστάσεις 1000p.e. αναφέρουν ότι ανέρχεται σε €7.000 [13] (FNDAE technical document n°22, 1998) το οποίο περιλαμβάνει και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Με δεδομένες αυτές τις τιμές, το ετήσιο λειτουργικό κόστος ανηγμένο ανά kgBOD<sub>5</sub> που εισέρχεται στο σύστημα προς επεξεργασία είναι €0,36 [14]. Μέσα στο λειτουργικό κόστος δεν

περιλαμβάνεται το κόστος αντικατάστασης του εξοπλισμού που για τέτοιου είδους εγκαταστάσεις έχει ένα χρόνο ζωής δώδεκα έτη [13].

Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται πάρα πολλά χρόνια, είναι μία ώριμη τεχνολογία και από πλευράς διεργασίας και από πλευράς χρησιμοποιούμενου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Στο σύνολο της χαρακτηρίζεται ώριμη και με πολλές εφαρμογές.



Εικόνα 2.2-3. Αρχή λειτουργίας του βιολογικού φίλτρου. [Munters Euroform GmbH]



Εικόνα 2.2-4. Διάγραμμα ροής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων τεχνολογίας Βιολογικού φίλτρου.

#### 2.2.4 Εμβαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο

Η μέθοδος βιολογικής επεξεργασίας με εμβαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο βασίζεται στην ίδια αρχή λειτουργίας με το βιολογικό φίλτρο, δηλαδή το οργανικό και αμμωνιακό φορτίο που βρίσκεται μέσα στα απόβλητα, αποικοδομείται με την βοήθεια των μικροοργανισμών που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του βιολογικού φίλτρου σχηματίζοντας ένα λεπτό στρώμα.

Οι μικροοργανισμοί (αερόβιοι, αναερόβιοι μικροοργανισμοί και ισχυρά βακτήρια όπως μύκητες, άλγη και πρωτόζωα) βρίσκονται σε επαφή με την επιφάνεια του βιολογικού φίλτρου όπου εκεί ζουν και αναπτύσσονται σαν ένα στρώμα ιλύος. Για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών, όταν τα απόβλητα έρχονται σε επαφή με την επιφάνεια του βιολογικού φίλτρου, είναι απαραίτητο το οργανικό φορτίο των αποβλήτων, τα οργανικά άλατα φωσφόρου και αζώτου, και το οξυγόνο. Η επιφάνεια του βιολογικού φίλτρου δρα ως φορέας για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου από τους μικροοργανισμούς. Οι μικροοργανισμοί πάνω στο βιολογικό φίλτρο δημιουργούν ένα στρώμα πάνω στην επιφάνεια του βιολογικού φίλτρου το οποίο μεγαλώνει συνεχώς λόγω της ανάπτυξης των μικροοργανισμών. Η περίσσεια βιομάζα απομακρύνεται από το βιολογικό φίλτρο με την βοήθεια του ίδιου του νερού που ρέει πάνω σε αυτό.

Ο αερισμός κάτω από το βιολογικό φίλτρο, παρέχει την απαιτούμενη ποσότητα του οξυγόνου για την οξειδωση του οργανικού φορτίου που εμπεριέχεται μέσα στα υπό επεξεργασία απόβλητα. Την ίδια στιγμή με την βοήθεια του αέρα γίνεται και η κυκλοφορία του νερού μέσα από τα κανάλια του βιολογικού φίλτρου ενώ παράλληλα με κατάλληλους χειρισμούς γίνεται και η απομάκρυνση της περίσσειας βιομάζας από την επιφάνεια του βιολογικού φίλτρου (flushing). Ο αερισμός των αποβλήτων γίνεται με διάχυση αέρα εντός της δεξαμενής και γι' αυτό απαιτείται μονάδα παροχή αέρα.

Ο βαθμός απόδοσης απόρριψης του διαλυμένου και αδιάλυτου οργανικού φορτίου κυμαίνεται από 85-90%. Η τιμή αυτή είναι χαμηλότερη από τις τιμές του βαθμού απόδοσης που μπορεί να φτάσει ένα σύστημα δραστικής ιλύος. [Munters Euroform GmbH]

Ο έλεγχος της διεργασίας είναι απλός και αυτό εξαιτίας της σταθερότητας που την χαρακτηρίζει λόγω της σταθερής βιομάζας στο σύστημα. Η σταθερή βιομάζα στο σύστημα του βιολογικού φίλτρου επιτυγχάνει υψηλής ηλικίας βιομάζα η οποία προσφέρει υψηλή προσαρμοστικότητα στο σύστημα σε βιομηχανικά απόβλητα και σε απόβλητα χαμηλής ικανότητας βιοαποικοδόμησης. [Munters Euroform GmbH] Παράλληλα το σύστημα λόγω της παραπάνω ιδιότητας του χαρακτηρίζεται ως ευέλικτο και έχει την δυνατότητα και το πλεονέκτημα εξάλειψης φορτίων αιχμής χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα και γενικά παρουσιάζεται ως ένα σύστημα αξιόπιστο. Παρόλο την μεγάλη αξιοπιστία του συστήματος παρουσιάζονται και λειτουργικά προβλήματα. Μερικά από τα πιο συνηθισμένα προβλήματα αποδίδονται στην ανάπτυξη του βιολογικού στρώματος, σε σχεδιαστικά λάθη, σε αλλαγή των χαρακτηριστικών των αποβλήτων ή σε αστοχία του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. [3]

Το υπόλειμμα της βιολογικής επεξεργασίας από έναν αντιδραστήρα με εμβαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο, είναι η βιολογική ιλύς η οποία είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε στερεά αλλά υψηλότερης πυκνότητας σε σχέση με την τεχνολογία της δραστικής ιλύος [Munters Euroform GmbH], η συνολική απορριπτόμενη ιλύς είναι 10-30% λιγότερη σε στερεά αλλά μέχρι και 50% λιγότερη σε ποσότητα. Η παραγόμενη βιολογική ιλύς από ένα τέτοιο σύστημα είναι 0,5-0,7 kgDSM/kgBOD<sub>5</sub>Removed [Munters Euroform GmbH].

Για την απόρριψη του οργανικού φορτίου BOD<sub>5</sub> ισχύουν οι τυπικοί κανόνες που εφαρμόζονται και στους βιορότορες, δηλαδή η γενική ημερήσια οργανική φόρτιση του συστήματος είναι 8gBOD<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>d εάν απαιτείται το αποτέλεσμα της επεξεργασίας να είναι κάτω από 20mg/l BOD<sub>5</sub>. Αυτή η τιμή φόρτισης μειώνεται στην τιμή των

4gBOD<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>d για μικρές μονάδες επεξεργασίας κάτω από 50 ατόμων ισοδύναμου πληθυσμού. Σε μεγάλες μονάδες η σε φάση προεπεξεργασίας η τιμή φόρτισης μπορεί να είναι έως και 30gBOD<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>d [Munters Euroform GmbH]. Μία τυπική περιοχή φόρτισης είναι 1,3-10 kgBOD<sub>5</sub>/(m<sup>3</sup>/d) [5, πίνακας 3.10].

Με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει η βιολογική δράση πάνω στα βιολογικά φίλτρα. Παρόλα αυτά, η θερμοκρασία των εισερχόμενων αποβλήτων πρέπει να μην υπερβαίνει τους 30°C. Πάνω από αυτή την θερμοκρασία μειώνεται η απόδοση του βιολογικού φίλτρου. Η κανονική θερμοκρασία λειτουργίας κυμαίνεται από 10-25°C. [Munters Euroform GmbH]

Το σύστημα της τεχνολογίας του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου δεν επηρεάζεται από διακυμάνσεις της ροής. Η σταθερή βιομάζα στο βιολογικό φίλτρο δεν διαχέεται και δεν χάνεται από το σύστημα, όπως μπορεί να συμβεί σε ένα σύστημα δραστικής ιλύος το οποίο επηρεάζεται από την ανακυκλοφορία της ιλύος [Munters Euroform GmbH]. Η απόδοση της δεξαμενής καθίζησης του συστήματος δεν επηρεάζεται από την απόδοση του βιολογικού φίλτρου, όπως γίνεται στο σύστημα της δραστικής ιλύος, και αυτό για το λόγω της καλής καθιζησιμότητας της βιομάζας μπορεί η δεξαμενή καθίζησης να φορτιστεί υδραυλικά περισσότερο.

Το σύστημα του βιολογικού φίλτρου και ιδιαίτερα το σύστημα διάχυσης του αέρα σε αυτό απαιτεί ιδιαίτερη συντήρηση και προσοχή διότι σε οποιαδήποτε ενδεχόμενη βλάβη στην σωστή διάχυση του αέρα θα προκαλέσει τοπικές εμφράξεις στο βιολογικό φίλτρο [Munters Euroform GmbH]. Παρόλα αυτά, επειδή το σύστημα του αερισμού

είναι μικρότερο σε μέγεθος σε σχέση με ένα σύστημα αερισμού δραστικής ιλύος οι απαιτήσεις συντήρησης θα είναι μικρότερες.

Το κόστος επένδυσης μίας εγκατάστασης που χρησιμοποιεί την τεχνολογία των εμβαπτιζόμενων βιολογικών φίλτρων διαφοροποιείται από περιοχή σε περιοχή και από χώρα σε χώρα. Μία τυπική τιμή κόστους επένδυσης μίας τέτοιας μονάδας είναι €160/p.e.

Το λειτουργικό κόστος ενός συστήματος που χρησιμοποιεί την τεχνολογία των εμβαπτιζόμενων βιολογικών φίλτρων ανηγμένο ανά  $\text{kgBOD}_5$  που εισέρχεται στο σύστημα προς επεξεργασία είναι €0,39 [5, σελ 146]. Μέσα στο λειτουργικό κόστος δεν περιλαμβάνεται το κόστος αντικατάστασης του εξοπλισμού που για τέτοιου είδους εγκαταστάσεις έχει ένα χρόνο ζωής δώδεκα έτη [13].

Η κατανάλωση ενέργειας σε ένα σύστημα εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου είναι πολύ μικρότερη από ένα σύστημα που χρησιμοποιεί την τεχνολογία της δραστικής ιλύος. Είναι στα ίδια επίπεδα με την τεχνολογία των βιολογικών φίλτρων διαβροχής και αναφέρεται ότι η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι σχεδόν πέντε φορές μικρότερη από την κατανάλωση σε ένα σύστημα δραστικής ιλύος [13]. Βέβαια πολλές φορές και για λόγους εφεδρείας η διαστασιολόγηση του συστήματος αερισμού είναι μεγαλύτερη οπότε το σύστημα έχει μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας που μπορεί να φτάσει και την  $1\text{kWh/kgBOD}_5$ .

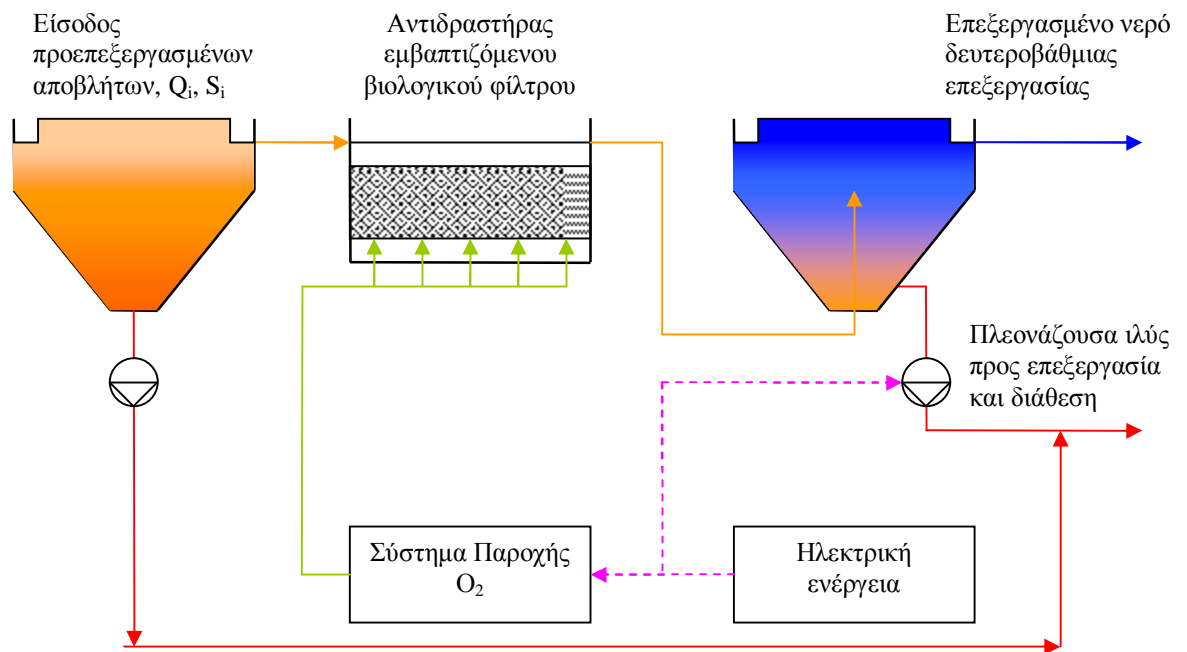
Τα εμβαπτιζόμενα βιολογικά φίλτρα γενικά αναδύουν οσμές από αναερόβιες ζυμώσεις και η χρήση τους περιορίζεται μόνο σε υπαίθριες εγκαταστάσεις [4, σελ. 222]. Είναι

όμως λιγότερες από αυτές που μπορούν να παρουσιαστούν σε ένα σύστημα με βιολογικά φίλτρα διαβροχής.

Σε μία μονάδα αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας με σκοπό την μείωση του οργανικού φορτίου, οι κυριότερες αέριες εκπομπές είναι το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) το οποίο προκύπτει από την οξείδωση του οργανικού φορτίου, το οξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}$ ), οι πτητικές οργανικές ενώσεις (TVOCs) και τα σωματίδια οργανικού άνθρακα (POC) [18]. Μαζί με τα σωματίδια του οργανικού άνθρακα, εξίσου σημαντικές είναι και οι εκπομπές μικροοργανισμών οι οποίες παρουσιάζονται υπό μορφή αερολυμάτων (aerosols). Επειδή τα υγρά απόβλητα είναι πιθανοί φορείς παθογόνων μικροοργανισμών, η εισπνοή των σωματιδίων, η επαφή και η απορρόφηση τους είναι επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία [19]. Από πειραματικές μετρήσεις που έγιναν σε πιλοτικούς αντιδραστήρες βιολογικού φίλτρου σε τέσσερις τύπους μικροοργανισμών που περιέχονται σε αερολύματα, προέκυψαν οι παρακάτω τιμές: Mesophilic bacteria  $5,8 \times 10^3$  CFU/p.e, TSA-SB bacteria  $1,4 \times 10^3$  CFU/p.e, Mesophilic fungi 350 CFU/p.e, Thermophilic fungi 28 CFU/p.e. [19, πίνακας 2].

Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται πάρα πολλά χρόνια, είναι μία ώριμη τεχνολογία και από πλευράς διεργασίας και από πλευράς χρησιμοποιούμενου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Στο σύνολο της χαρακτηρίζεται ώριμη και με πολλές εφαρμογές.





Εικόνα 2.2-5. Διάγραμμα ροής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων τεχνολογίας εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου.

### 2.2.5 Επεξεργασία αποβλήτων με Βιορότορες (RBC)

Οι βιορότορες ή αλλιώς βιολογικοί δίσκοι είναι μία τεχνολογία δευτεροβάθμιας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Στηρίζεται στην ίδια αρχή λειτουργίας με το βιολογικό φίλτρο, με την διαφορά ότι το σταθερό υπόβαθρο της βιομάζας είναι κινητό και έρχεται περιοδικά σε επαφή με τα απόβλητα και τον αέρα [1]. Με αυτό τον τρόπο η τεχνολογία αυτή επιτρέπει την μείωση του οργανικού φορτίου του αποβλήτου. Μία από τις παλαιότερες αναφορές σχετικά με την επεξεργασία αποβλήτων χρησιμοποιώντας την τεχνολογία του βιορότορα ήταν το 1926 και περίπου το 1965 αυτή η τεχνολογία έγινε εμπορική [17]. Υπάρχουν αρκετοί τύποι βιολογικών δίσκων διαθέσιμοι αυτή την στιγμή, αλλά η πιο απλή μορφή του αποτελείται από μία σειρά δίσκων τοποθετημένη σε έναν άξονα ο οποίος περιστρέφεται. Αυτοί οι δίσκοι είναι κατασκευασμένοι από πολυαιθυλένιο, από PVC ή από διογκωμένη πολυστερίνη και είναι εμβαπτισμένοι σε

μία δεξαμενή κατά 40% [17]. Συνήθως αυτή η κατασκευή είναι προστατευμένη από τις καιρικές συνθήκες είτε με κάποιο κάλυμμα εάν πρόκειται για μικρή μονάδα, είτε είναι στεγασμένος σε περίπτωση μεγαλύτερης κατασκευής.

Οι βιορότορες είναι συνήθως εγκατεστημένοι σε τσιμεντένιες δεξαμενές οι οποίοι περιστρέφονται με λίγες στροφές (1 - 2 rpm) [17]. Πάνω στα διαβρεχόμενα σημεία του βιορότορα αναπτύσσεται η βιομάζα η οποία έχει πάχος 2 - 4mm [17]. Ο αερισμός των αποβλήτων γίνεται με την περιστροφή του βιορότορα μετά την επαφή του με τα απόβλητα. Όταν η μεμβράνη της βιομάζας αποκτήσει ορισμένο πάχος, αποκολλάται και παρασύρεται στην δεξαμενή της δευτεροβάθμιας καθίζησης όπου και συλλέγεται [1].

Ένα σύστημα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με βιολογικούς δίσκους είναι ικανό να απορρίψει το οργανικό φορτίο των αποβλήτων κατά 65-85%, τιμή ίδια με αυτή της τεχνολογίας του βιολογικού φίλτρου. Το σύστημα είναι πιο αξιόπιστο από ένα σύστημα δραστικής ιλύος και αυτό γιατί γίνεται αποδοτικότερη δέσμευση και ρύθμιση των αιωρούμενων στερεών [16, TFS-9]. Στις χαμηλές περιοχές φόρτισης επιτυγχάνεται νιτροποίηση και ιδιαίτερα στα θερμά κλίματα. Η απόδοση του συστήματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υγρού αποβλήτου, το οργανικό φορτίο και την υδραυλική παροχή, από το είδος του υλικού κατασκευής των βιολογικών δίσκων και την συντήρηση του απαιτούμενου διαλυμένου οξυγόνου [16].

Όπως και η τεχνολογία των βιολογικών φίλτρων, είναι ένα σύστημα ευέλικτο και έχει την δυνατότητα και το πλεονέκτημα εξάλειψης φορτίων αιχμής χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα και γενικά παρουσιάζεται ως ένα σύστημα αξιόπιστο. Παρόλο την μεγάλη αξιοπιστία του συστήματος παρουσιάζονται και λειτουργικά προβλήματα. Μερικά από

τα πιο συνηθισμένα προβλήματα αποδίδονται στην ανάπτυξη του βιολογικού στρώματος, σε σχεδιαστικά λάθη, σε αλλαγή των χαρακτηριστικών των αποβλήτων ή σε αστοχία του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. [3]

Το σύστημα των βιορότορων είναι ένα απλό σύστημα στην λειτουργία του και απαιτεί μικρή συντήρηση και παρακολούθηση σε σχέση με την τεχνολογία της δραστικής ιλύος, παρόλα αυτά παρουσιάζονται πιθανά προβλήματα εμφράξεων [13].

Η επίδραση του συστήματος από τις καιρικές συνθήκες είναι μικρή, αντιστέκεται στη επίδραση των χαμηλών θερμοκρασιών και αυτό γιατί συνήθως αυτές οι εγκαταστάσεις είναι προστατευμένες από κάποιο κάλυμμα [13]. Οι χαμηλές θερμοκρασίες μειώνουν τον ρυθμό μεταβολισμού των μικροοργανισμών με αποτέλεσμα την μείωση του βαθμού απόδοσης του συστήματος.

Η σωστή διαχείριση αυτών των συστημάτων έχει ως αποτέλεσμα την καλή αξιοπιστία του συστήματος και την ελαχιστοποίηση πιθανής αστοχίας του συστήματος. Σε αντίθετη περίπτωση, υπάρχουν πιθανότητες παρουσίας έντονων οσμών και ταυτόχρονα μείωση της ποιότητας του εξερχόμενου επεξεργασμένου νερού.

Σε μία μονάδα αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας με σκοπό την μείωση του οργανικού φορτίου, οι κυριότερες αέριες εκπομπές είναι το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) το οποίο προκύπτει από την οξείδωση του οργανικού φορτίου, το οξείδιο του αζώτου (NO), οι πτητικές οργανικές ενώσεις (TVOCs) και τα σωματίδια οργανικού άνθρακα (POC) [18]. Μαζί με τα σωματίδια του οργανικού άνθρακα, εξίσου σημαντικές είναι και οι εκπομπές μικροοργανισμών οι οποίες παρουσιάζονται υπό μορφή αερολυμάτων

(aerosols). Επειδή τα υγρά απόβλητα είναι πιθανοί φορείς παθογόνων μικροοργανισμών, η εισπνοή των σωματιδίων, η επαφή και η απορρόφηση τους είναι επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία [19]. Από πειραματικές μετρήσεις που έγιναν σε πιλοτικούς αντιδραστήρες βιολογικού φίλτρου σε τέσσερις τύπους μικροοργανισμών που περιέχονται σε αερολύματα, προέκυψαν οι παρακάτω τιμές: Mesophilic bacteria  $5,8 \times 10^3$  CFU/p.e, TSA-SB bacteria  $1,4 \times 10^3$  CFU/p.e, Mesophilic fungi 350 CFU/p.e, Thermophilic fungi 28 CFU/p.e. [19, πίνακας 2]. Επειδή το σύστημα των βιολογικών δίσκων έχει την ίδια αρχή λειτουργίας, θεωρούμε ότι έχουν και τις ίδιες αέριες εκπομπές.

Το υπόλειμμα της βιολογικής επεξεργασίας από έναν αντιδραστήρα με βιορότορες, είναι η βιολογική ιλύς η οποία είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε στερεά. Η παραγόμενη βιολογική ιλύς από ένα τέτοιο σύστημα είναι 0,6-1,1 kgDSM/kgBOD<sub>5</sub>Removed [16, σελ TFS-9].

Για την απόρριψη του οργανικού φορτίου BOD<sub>5</sub> ισχύουν οι τυπικοί κανόνες που εφαρμόζονται στους βιορότορες, δηλαδή η γενική ημερήσια οργανική φόρτιση του συστήματος είναι 8gBOD<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>d εάν απαιτείται το αποτέλεσμα της επεξεργασίας να είναι κάτω από 20mg/l BOD<sub>5</sub>. Μία τυπική περιοχή φόρτισης είναι 1,3-10 kgBOD<sub>5</sub>/(m<sup>3</sup>/d) [5, πίνακας 3.10].

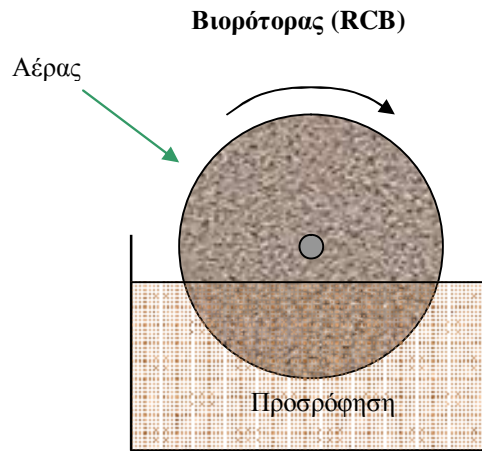
Το κόστος επένδυσης μίας εγκατάστασης που χρησιμοποιεί την τεχνολογία των βιολογικών δίσκων διαφοροποιείται από περιοχή σε περιοχή και από χώρα σε χώρα. Εμπειρικά δεδομένα από την Γαλλία για εγκαταστάσεις ισοδύναμου πληθυσμού χιλίων ατόμων (1000p.e.) ανέρχονται σε €220.000 ± 45% [13] (FNDAE technical document

n°22, 1998). Μία τυπική τιμή κόστους επένδυσης μίας τέτοιας μονάδας είναι €93/p.e [14].

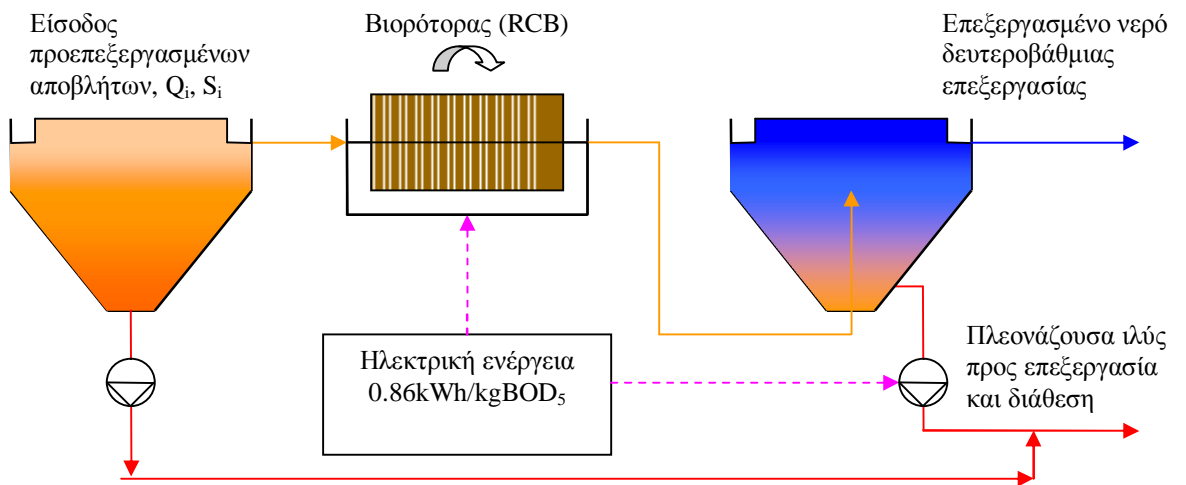
Το λειτουργικό κόστος ενός συστήματος που χρησιμοποιεί την τεχνολογία των βιολογικών φίλτρων, από εμπειρικά δεδομένα από την Γαλλία, για εγκαταστάσεις 1000p.e. αναφέρουν ότι ανέρχεται σε €7.000 [13] (FNDAE technical document n°22, 1998) το οποίο περιλαμβάνει και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Με δεδομένες αυτές τις τιμές, το ετήσιο λειτουργικό κόστος ανηγμένο ανά kgBOD<sub>5</sub> που εισέρχεται στο σύστημα προς επεξεργασία είναι €0,36 [14]. Μέσα στο λειτουργικό κόστος δεν περιλαμβάνεται το κόστος αντικατάστασης του εξοπλισμού που για τέτοιου είδους εγκαταστάσεις έχει ένα χρόνο ζωής δώδεκα έτη [13].

Η ενεργειακή κατανάλωση ενός τέτοιου συστήματος περιορίζεται στην άντληση και απόρριψη της πλεονάζουσας ιλύος και στην περιστροφή του βιορότορα. Μία ενδεικτική τιμή της κατανάλωσης ενέργειας είναι 0,86kWh/kgBOD<sub>5</sub> [14].

Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται πάρα πολλά χρόνια, είναι μία ώριμη τεχνολογία και από πλευράς διεργασίας και από πλευράς χρησιμοποιούμενου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Στο σύνολο της χαρακτηρίζεται ώριμη και με πολλές εφαρμογές.



Εικόνα 2.2-6. Σχηματική διάταξη βιολογικού δίσκου.



Εικόνα 2.2-7. Διάγραμμα ροής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων τεχνολογίας Βιορότορων.

### 3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

#### 3.1 Εισαγωγή

Η λήψη μίας απόφασεως εξαρτάται πολύ συχνά από την ικανότητα που έχει αυτός που αποφασίζει να επεξεργάζεται και να αξιολογεί ένα ορισμένο αριθμό ετερόκλητων πληροφοριών. Υπάρχουν προβλήματα στα οποία η εύρεση της προτιμότερης λύσης είναι πολύ απλή και δεν απαιτεί καμία ιδιαίτερη νοητική διαδικασία συγκρίσεως ή σύνθεσης πληροφοριών. Πολλές φορές η λήψη μία απόφασης ακολουθεί μια πιο σύνθετη διαδικασία στην οποία ο αποφασίζων κάνει καταγραφή των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων ενός συνόλου χαρακτηριστικών και με βάση αυτά κάνει την ιεράρχηση του σύμφωνα με την υποκειμενική του άποψη. Αυτός ο τρόπος ιεράρχησης έχει εφαρμογή σε μικρά καθημερινά προβλήματα.

Ωστόσο υπάρχουν προβλήματα όπου η απόφαση πρέπει να βασίζεται σε μία πιο αντικειμενική εξέταση των δεδομένων τους εξαιτίας της πολυπλοκότητας τους ή ακόμη των σοβαρών επιπτώσεων που θα μπορούσε να επιφέρει μια λανθασμένη επιλογή. Έτσι π.χ κάποιος που εντυπωσιάζεται από την εξωτερική εμφάνιση ενός αυτοκινήτου και το αγοράζει, σύντομα θα απογοητευτεί πιθανόν από την έλλειψη μηχανικής αξιοπιστίας.

Η διαδικασία λήψης μίας απόφασης βασίζεται στην θέσπιση ορισμένων κριτηρίων τα οποία ο αποφασίζων θεωρεί σημαντικά. Όταν το πλήθος των κριτηρίων αυτών είναι μεγάλο η αποδοχή ή απόρριψη μίας λύσης είναι δύσκολη ιδιαίτερα μάλιστα εάν η επιλογή έχει σημαντικές π.χ οικονομικο-κοινωνικές επιπτώσεις (μία εγκατάσταση βιολογικού καθαρισμού, μία μονάδα επεξεργασίας αστικών απορριμμάτων κ.α). Το

πρόβλημα γίνεται ακόμη πιο δύσκολο όταν ο αποφασίζων καλείται όχι να αποδεχτεί ή να απορρίψει αλλά να συγκρίνει διαφορετικές προτεινόμενες λύσεις με αλληλοσυγκρουόμενες επιδόσεις στα θεσπισμένα κριτήρια.

Τα παραπάνω καθιστούν φανερή την ανάγκη της ανάπτυξης μίας μεθόδου που να επεξεργάζεται και να συγκρίνει μεγάλο πλήθος δεδομένων προκειμένου να ληφθεί κατά το δυνατόν η βέλτιστη απόφαση και να αξιολογηθούν μεθοδικά οι εναλλακτικές λύσεις ενός προβλήματος. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως πολυκριτηριακή ανάλυση και αποτελεί ένα βοηθητικό αν όχι καθοριστικό εργαλείο στο στάδιο λήψης αποφάσεων.

Τα βασικά στοιχεία ενός προβλήματος λήψης απόφασης είναι:

- Ο αποφασίζων (decision maker - μπορεί να είναι περισσότεροι από ένας)
- Οι εναλλακτικές λύσεις (Alternatives)
- Ο στόχος της απόφασης.
- Τα επιλεγόμενα κριτήρια στα οποία βασίζονται οι αποφάσεις.

Τα κριτήρια αποτελούν τα μέσα μέτρησης των επιδιώξεων του αποφασίζοντα. Η επιλογή τους είναι από τα σημαντικότερα και λεπτότερα σημεία της όλης διαδικασίας και ένας επιτυχημένος καθορισμός κριτηρίων χαρακτηρίζεται από πληρότητα, μη επικάλυψη, σαφήνεια [20].

Ιδιαίτερη σημασία έχει ο καθορισμός των συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται. Μέσω αυτής της διαδικασίας αποδίδεται σε κάθε κριτήριο η βαρύτητα του στη λήψη της απόφασης. Οι συντελεστές αντικατοπτρίζουν τις αξίες και τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα, οι οποίες με δυσκολία μπορούν να εκφραστούν με



σαφήνεια. Όπως θα αναλυθεί πιο κάτω η ανάθεση συντελεστών βαρύτητας έχει χαρακτήρα υποκειμενικό ωστόσο εξαρτάται από την γνώση των αναγκών θεωρητικών και πρακτικών του προβλήματος που έχει ο αποφασίζων καθώς και την αξιοπιστία (επιδόσεις) των αριθμητικών δεδομένων που χρησιμοποιεί.

Η πολυκριτηριακή ανάλυση χρησιμοποιεί πρακτικά μία μαθηματική μεθοδολογία η οποία αποσκοπεί στην προσομοίωση της διαδικασίας λήψης αποφάσεως μέσα από σύγκριση εναλλακτικών επιλογών λαμβάνοντας υπόψη πολλά κριτήρια.

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες μεθόδων στην πολυκριτηριακή ανάλυση που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές προσεγγίσεις στην επίλυση των προβλημάτων [20]:

- Οι μέθοδοι Σύνθεσης Κριτηρίων
- Οι μέθοδοι Ιεράρχησης λύσεων

Οι παραπάνω μέθοδοι διαφοροποιούνται ως προς την μαθηματική επεξεργασία των δεδομένων του προβλήματος και τον τρόπο σύγκρισης των αποτελεσμάτων. Το υπολογιστικό εργαλείο που αναπτύχθηκε και χρησιμοποιείται για την σύγκριση, βασίζεται στην μέθοδο SIR-SAW (Superiority and Inferiority Ranking – Simple Additive Weighting) μία παραλλαγή της γνωστής και ευρύτατα χρησιμοποιούμενης μεθόδου PROMETHEE. Η μέθοδος αυτή ανήκει στην δεύτερη κατηγορία μεθόδων, δηλαδή τις μεθόδους ιεράρχησης λύσεων οι οποίες προσφέρουν ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των μεθόδων σύνθεσης κριτηρίων [20].

Η κατηγορία των μεθόδων ιεράρχησης βασίζεται στην κατά ζεύγη σύγκριση των επιδόσεων των λύσεων. Υποθέτουν ότι στην πραγματικότητα ο αποφασίζων

αντιπαραθέτει κάθε λύση έναντι των άλλων μια προς μια. Επίσης, η διαδικασία σύγκρισης στηρίζεται στην παραδοχή ότι μικρές διαφορές στις επιδόσεις δεν προϋποθέτουν καταστάσεις «πλήρους» ή «καθολικής» προτίμησης

### 3.2 Μεθοδολογία πολύκριτηριακής ανάλυσης

Η μέθοδος της πολυκριτηριακής ανάλυσης που θα χρησιμοποιήσουμε είναι η μέθοδος “SIR-SAW” στην οποία στηρίζεται το χρησιμοποιούμενο στην σύγκριση υπολογιστικό εργαλείο. Η ονομασία της μεθόδου προέρχεται από τα αρχικά Superiority and Inferiority Ranking – Simple Additive Weighting. Πρόκειται για μια παραλλαγή – επέκταση της ευρύτατα χρησιμοποιημένης μεθόδου “PROMETHEE”. Όπως είναι εμφανές από τα αρχικά, γίνεται χρήση δυο ειδών πληροφορίας, υπεροχής και υστέρησης. Τα μεγέθη που κρίνουν την κατάταξη είναι αντίστοιχα οι ροές υπεροχής και υστέρησης (superiority - inferiority flow) και υπολογίζονται με τη μέθοδο του σταθμισμένου αθροίσματος.

Έστω  $A_1, A_2, \dots, A_m$  οι  $m$  εναλλακτικές λύσεις,  $g_1, g_2, \dots, g_n$  τα  $n$  κριτήρια και  $g_j(A_i)$  η επίδοση της λύσης  $A_i$  στο κριτήριο  $g_j$ . Οι επιδόσεις αυτές συντάσσονται στον πίνακα επιδόσεων  $D$  του προβλήματος:

$$D = \begin{pmatrix} g_1(A_1) & \dots & g_j(A_1) & \dots & g_n(A_1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_1(A_i) & \dots & g_j(A_i) & \dots & g_n(A_i) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_1(A_m) & \dots & g_j(A_m) & \dots & g_n(A_m) \end{pmatrix} \quad (3.2-1)$$

Για να γίνουν οι συγκρίσεις μεταξύ των επιδόσεων των κριτηρίων (π.χ.  $A_k$  και  $A_l$ ), ορίζεται η συνάρτηση

$$f(d) = f[g(A_k) - g(A_l)] = P(A_k, A_l) \quad (3.2-2)$$

$$f(d) = f[g(A_l) - g(A_k)] = I(A_l, A_k) \quad (3.2-3)$$

Η  $f(d)$  αποτελεί μία μη φθίνουσα συνάρτηση, με πεδίο ορισμού το σύνολο των πραγματικών αριθμών και πεδίο τιμών το κλειστό διάστημα  $[0,1]$  και αντιστοιχεί στην ένταση της υπεροχής της επίδοσης του  $A_l$  επί του  $A_k$  (όπως επίσης και στην ένταση της υστέρησης του  $A_k$  επί του  $A_l$ ). Καλείται και «γενικευμένο κριτήριο» ή «ψευδοκριτήριο» και η ερμηνεία των τιμών του γίνεται στον παρακάτω πίνακα.

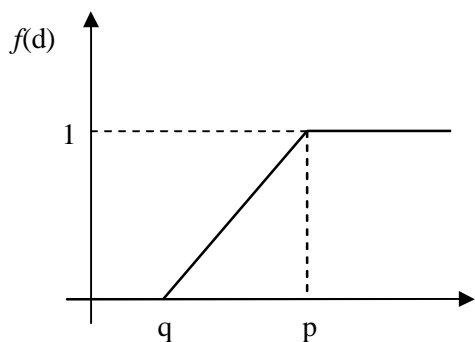
**Πίνακας 3.2-1. Πίνακας τιμών ψευδοκριτηρίου και προϋποθέσεις αντικατάστασης πραγματικών τιμών κριτηρίων. [20]**

| Τιμή ψευδοκριτηρίου   | Κατάσταση προτίμησης          | Προϋποθέσεις   |
|---|-------------------------------|--|
| 0   | Κατάσταση αδιαφορίας          | $A_k I A_l$ και $[g_j(A_k) - g_j(A_l)] < q_j$                      |
| (0,1)   | Κατάσταση ασθενούς προτίμησης | $A_k Q A_l$ και $g_j(A_l) + p_j \geq g_j(A_k) \geq g_j(A_l) + q_j$ |
| 1   | Κατάσταση σαφούς προτίμησης   | $A_k P A_l$ και $g_j(A_k) \geq g_j(A_l) + p_j$ ,                   |
| $g_j(A_i) \rightarrow$ οι επιδόσεις της εναλλακτικής $A_i$ στο κριτήριο $j$<br>$A_k, A_l \rightarrow$ οι εναλλακτικές λύσεις $k$ και $l$  |                               |  |
| $q_j \rightarrow$ το κατώφλι αδιαφορίας του κριτηρίου $j$ : Η μέγιστη διαφορά μεταξύ των επιδόσεων για το συγκεκριμένο κριτήριο, η οποία θεωρείται ασήμαντη για τον αποφασίζοντα. |                               |  |
| $p_j \rightarrow$ το κατώφλι προτίμησης του κριτηρίου $j$ : Η ελάχιστη διαφορά η οποία συνεπάγεται πλήρη υπεροχή της μιας επίδοσης έναντι της άλλης.                              |                               |  |

Υπάρχουν διάφορα είδη «ψευδοκριτηρίων» καθένα από το οποίο αντιμετωπίζει με διαφορετικό τρόπο την υπεροχή της μιας επίδοσης έναντι μιας άλλης. Το θέμα της επιλογής τους εξαρτάται από το είδος του κάθε κριτηρίου (αν π.χ. είναι ποιοτικό ή ποσοτικό) και το πώς θέλει να χειριστεί ο αποφασίζων την ένταση της προτίμησης [20]. Στην ανάλυση που ακολουθεί για την επιλογή της τεχνολογίας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, χρησιμοποιείται η συνάρτηση με κριτήριο γραμμικής προτίμησης και η συνάρτηση με κριτήριο γραμμικής προτίμησης και περιοχής αδιαφορίας. Ο αποφασίζων ορίζει κατ' επιλογήν του το κατώφλι αδιαφορίας  $q$  και υπεροχής  $p$  για κάθε ένα κριτήριο.

Η συνάρτηση του κριτηρίου γραμμικής προτίμησης και περιοχής αδιαφορίας ταυτίζεται με την συνάρτηση του κριτηρίου γραμμικής προτίμησης όταν η τιμή του κατωφλίου αδιαφορίας πάρει την τιμή μηδέν. Οπότε τελικά η συνάρτηση που χρησιμοποιείται είναι η ακόλουθη:

$$f(d) = \begin{cases} 1 & \text{αν } d > p \\ \frac{(d-q)}{(p-q)} & \text{αν } q < d < p \\ 0 & \text{αν } d \leq q \end{cases} \quad (3.2-4)$$



Εικόνα 3.2-1. Διάγραμμα συνάρτησης γενικευμένου κριτηρίου  $f(d)$ . [20]

Για κάθε εναλλακτική λύση  $A_i$  ορίζεται ο δείκτης υπεροχής (superiority index)  $S_j(A_i)$  και ο δείκτης υστέρησης (inferiority index)  $I_j(A_i)$  αναφορικά με το κριτήριο  $j$  .[20] Οι τύποι υπολογισμού είναι οι εξής:

$$S_j(A_i) = \sum_{k=1}^m P_j(A_i, A_k) = \sum_{k=1}^m f_i(g_j(A_i) - g_j(A_k)) \quad (3.2-5)$$

$$I_j(A_i) = \sum_{k=1}^m I_j(A_k, A_i) = \sum_{k=1}^m f_i(g_j(A_k) - g_j(A_i)) \quad (3.2-6)$$

Με αυτόν τον τρόπο, υπολογίζονται οι πίνακες υπεροχής και υστέρησης που έχουν τη μορφή:

$$S = \begin{pmatrix} S_1(A_1) & \dots & S_j(A_1) & \dots & S_n(A_1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_1(A_i) & \dots & S_j(A_i) & \dots & S_n(A_i) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_1(A_m) & \dots & S_j(A_m) & \dots & S_n(A_m) \end{pmatrix} \quad (3.2-7)$$

$$I = \begin{pmatrix} I_1(A_1) & \dots & I_j(A_1) & \dots & I_n(A_1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_1(A_i) & \dots & I_j(A_i) & \dots & I_n(A_i) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_1(A_m) & \dots & I_j(A_m) & \dots & I_n(A_m) \end{pmatrix} \quad (3.2-8)$$

Οι πίνακες αυτοί περιέχουν λεπτομερέστερη πληροφορία από τον αρχικό πίνακα  $D$  (4.2-1). Επίσης, δεν είναι απαραίτητο να συμφωνούν απόλυτα, καθώς αφορούν

διαφορετικούς τύπους συγκριτικών αποτελεσμάτων. Ο πίνακας S αναφέρεται στο κατά πόσο υπερτερεί η κάθε εναλλακτική τεχνολογία έναντι των υπολοίπων, ενώ ο I στο αντίστοιχο φαινόμενο της έντασης της υστέρησης. [20]

Στο τελευταίο στάδιο της μεθοδολογίας πολυκριτηριακής ανάλυσης γίνεται η σύνθεση της πληροφορίας που περιέχουν οι πίνακες S και I με τη μέθοδο του σταθμισμένου αθροίσματος. Το αποτέλεσμα της σύνθεσης είναι οι ροές υπεροχής  $f^>(A_i)$  και υστέρησης  $f^<(A_i)$  (superiority and inferiority flows) που αντιπροσωπεύουν τη συνολική ένταση της υπεροχής ή της υστέρησης της εναλλακτικής τεχνολογίας  $A_i$ . [20]

Έστω V μια συνάρτηση σύνθεσης (aggregation function), τότε η συνάρτηση της ροής υπεροχής και της ροής υστέρησης είναι η ακόλουθη:

$$f^>(A_i) = V(S_1(A_i), \dots, S_j(A_i), \dots, S_n(A_i)) \quad (3.2-9)$$

$$f^<(A_i) = V(I_1(A_i), \dots, I_j(A_i), \dots, I_n(A_i)) \quad (3.2-10)$$

Η συνάρτηση που επιλέχθηκε αντιστοιχεί στο απλό μοντέλο του σταθμισμένου αθροίσματος και οι ροές δίνονται από τις εξισώσεις:

$$f^>(A_i) = \sum_{j=1}^n w_j S_j(A_i) \quad (3.2-11)$$

$$f^<(A_i) = \sum_{j=1}^n w_j I_j(A_i) \quad (3.2-12)$$

όπου  $w_j$  ο συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου  $g_j$ . Αποδεικνύεται ότι οι ροές που υπολογίζονται με αυτόν τον τρόπο είναι ίδιες με τις ροές «εισόδου» και «εξόδου» της μεθόδου “PROMETHEE”. [20]

Η εναλλακτική λύση που επιτυγχάνει μεγαλύτερη ροή υπεροχής και μικρότερη ροή υστέρησης είναι η επικρατέστερη. Με αυτόν τον τρόπο παράγονται δυο διατεταγμένες σειρές των λύσεων, μια για κάθε ροή (S-ranking και I-ranking). Το αποτέλεσμα αυτό είναι η μερική ιεράρχηση (partial ranking) της μεθόδου. Λόγω του γεγονότος ότι οι πίνακες  $S$  και  $I$  περιέχουν διαφορετικής υφής πληροφορία, δεν είναι απαραίτητο να συμφωνούν. Σε μια τέτοια περίπτωση ισχύει ότι:

$$f^{\succ}(A) > f^{\succ}(A') \text{ και } f^{\prec}(A) > f^{\prec}(A') \quad (3.2-13)$$

και χαρακτηρίζεται ως «κατάσταση ασυγκρισιμότητας» μεταξύ των εναλλακτικών  $A$  και  $A'$ . Τέτοιου είδους καταστάσεις υποβοηθούνται από μεγάλες και αντίρροπες διαφορές στις επιδόσεις των εναλλακτικών. [20]

Σε περίπτωση που απαιτείται κάποιου είδους ολική ιεράρχηση (complete ranking) οι δυο ροές είναι δυνατόν να συντεθούν με δύο τρόπους:

«Καθαρή» ροή  $\varphi_n(A_i)$  (net flow)

$$f_n(A_i) = f^{\succ}(A_i) - f^{\prec}(A_i) \quad (3.2-14)$$

«Σχετική» ροή  $\varphi_r(A_i)$  (relative flow)

$$f_r(A_i) = \frac{f^>(A_i)}{(f^<(A_i) + f^>(A_i))} \quad (3.2-15)$$

Η «καθαρή ροή»  $\varphi_n$  μπορεί να πάρει θετικές και αρνητικές τιμές. Εάν η τιμή της καθαρής ροής είναι θετική σημαίνει ότι η εναλλακτική τεχνολογία  $A_i$  υπερέχει έναντι των υπολοίπων περισσότερο απ' ότι υστερεί. Το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση που η τιμή της «καθαρής ροής» είναι αρνητική.

Η «σχετική ροή» παίρνει τιμές στο διάστημα  $[0,1]$  των πραγματικών αριθμών. Μηδενίζεται όταν η τιμή της θετικής ροής είναι μηδέν και γίνεται μονάδα όταν η τιμή της αρνητικής ροής είναι μηδέν. Η τιμή μηδέν ερμηνεύεται σε πλήρη υστέρηση και η τιμή ένα σε πλήρη υπεροχή της εναλλακτικής τεχνολογίας.

### **3.3 Παρουσίαση και ομαδοποίηση των κριτηρίων αξιολόγησης των τεχνολογιών.**

Η επιλογή των κριτηρίων, όπως προαναφέραμε, είναι ένα από τα σημαντικότερα σημεία της έρευνας μας και πρέπει να πληρούν τις παρακάτω προϋποθέσεις έτσι ώστε να είναι επιτυχημένη η ανάλυση μας, δηλαδή η επιλογή των κριτηρίων πρέπει να χαρακτηρίζεται από:

- **Πληρότητα:** Είναι αναγκαία η επιλογή των πιο αντιπροσωπευτικών για την σύγκριση κριτηρίων που να καλύπτουν επαρκώς όλες τις βασικές πτυχές ενός προβλήματος. [20]



- Μη επικάλυψη: Τα κριτήρια οφείλουν να είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους ώστε να εκφράζουν διακριτά χαρακτηριστικά των εναλλακτικών που συγκρίνονται. [20]
- Σαφήνεια: Τα κριτήρια πρέπει να είναι κατανοητά από όλους, να καθορίζεται ο λόγος επιλογής και οι διαστάσεις τους. [20]

Η επιλογή των κριτηρίων είναι ένα υποσύνολο από ένα πλήθος κριτηρίων που χαρακτηρίζουν μία τεχνολογία. Κάποια από τα χαρακτηριστικά είναι μειωμένης βαρύτητας και δεν προσδίδουν κάποια ιδιαίτερη πληροφορία στο επίπεδο που κάνουμε την ανάλυση. Εξετάζοντας μακροσκοπικά μία τεχνολογία επιλέγουμε κριτήρια που χαρακτηρίζουν τα βασικά χαρακτηριστικά μίας τεχνολογίας.

Τα κριτήρια που επιλέξαμε είναι τα πιο αντιπροσωπευτικά και αφορούν βασικά το κόστος, την λειτουργία, την φιλικότητα στο περιβάλλον και την εμπειρία που υπάρχει από την κάθε τεχνολογία. Με αυτό τον τρόπο τον όρο της «πληρότητας» τον καλύπτουμε επαρκώς αλλά όχι πλήρως. Είναι πάρα πολλά τα κριτήρια τα οποία θα μπορούσαμε να συμπεριλάβουμε από τα οποία πολλά αφορούν κριτήρια κατά την κατασκευή μίας μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων και άλλα την ανάλυση κύκλου ζωής. Αυτά τα κριτήρια δεν έχουν ληφθεί υπόψη διότι σε αυτή την ανάλυση δίνουμε μεγαλύτερη βαρύτητα στα αποτελέσματα και τις επιπτώσεις κατά την λειτουργία μία μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων.

Με βάση αυτές τις προϋποθέσεις και με δεδομένο ότι όλα τα κριτήρια δεν αλληλεπικαλύπτονται και είναι σαφή, κάνουμε την επιλογή των κριτηρίων τα οποία ομαδοποιούνται σε πέντε κύριες κατηγορίες κριτηρίων. Στην κατηγορία των Τεχνικών

– Λειτουργικών κριτηρίων, των οικονομικών κριτηρίων, των Αποβλήτων, της Εκμετάλλευση πόρων και της Εμπειρίας εφαρμογών.

Στην κατηγορία των Τεχνικών – Λειτουργικών κριτηρίων, έχουμε συμπεριλάβει τα παρακάτω τέσσερα κριτήρια:

- «Βαθμός απόδοσης» της εγκατάστασης: Αφορά το ποσοστό μείωσης του οργανικού φορτίου από μία μονάδα επεξεργασίας που χρησιμοποιεί την εκάστοτε τεχνολογία και την ικανότητα της εγκατάστασης να πετύχει υψηλές τιμές μείωσης. Το κριτήριο παίρνει τιμές σε επί τις εκατό (%) μείωσης.
- «Αντοχή του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού»: Το κριτήριο αυτό εξετάζει τον μέσο χρόνο ζωής του βασικού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που αφορά την επεξεργασία των αποβλήτων και παίρνει τιμές σε έτη.
- «Ευελιξία»: Το κριτήριο της ευελιξίας αξιολογεί την ικανότητα της τεχνολογίας να ανταποκριθεί σε αλλαγές συνθηκών οργανικής φόρτισης και ιδιαίτερα σε φορτία αιχμής, σε τοξικά υλικά, σε κλιματολογικές αλλαγές κτλ για αποφυγή αστοχίας. Οι τιμές που δίνουμε για κάθε τεχνολογία είναι ποιοτικές και σχετικές με τις άλλες τεχνολογίες.
- «απαίτηση συντήρησης»: Αφορά την απαίτηση του συστήματος για συντήρηση κατά την διάρκεια της λειτουργίας του και όχι του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Οι τιμές που δίνουμε για κάθε τεχνολογία είναι ποιοτικές και σχετικές με τις άλλες τεχνολογίες.

Στην κατηγορία των Οικονομικών, έχουμε συμπεριλάβει τα παρακάτω δύο κριτήρια:

- «Κόστος επένδυσης» της εγκατάστασης: Το κόστος επένδυσης για κάθε μία εξεταζόμενη τεχνολογία, περιλαμβάνει το κόστος της μελέτης, προμήθειας και

εγκατάστασης της εκάστοτε μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων, ανηγμένο ανά μονάδα ισοδύναμου πληθυσμού δυναμικότητας της μονάδας.

- «Λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης»: Εξετάσει το λειτουργικό κόστος και το κόστος συντήρησης μίας εγκατάστασης εκφρασμένο σε €/kgBOD<sub>5</sub> δυναμικότητας της μονάδας. Μέσα στο λειτουργικό κόστος περιλαμβάνεται και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας για την λειτουργία της κάθε μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων.

Στην κατηγορία των Αποβλήτων, έχουμε συμπεριλάβει τα παρακάτω τρία κριτήρια:

- «Αέρια απόβλητα»: Ως κριτήριο αξιολόγησης της κάθε εξεταζόμενης τεχνολογίας είναι και οι αέριες εκπομπές στην ατμόσφαιρα οι οποίες συμβάλουν και αυτές στην υποβάθμιση της ποιότητας της ατμόσφαιρας. Οι τιμές που δίνουμε για κάθε τεχνολογία είναι ποιοτικές και σχετικές με τις άλλες τεχνολογίες.
- «Οσμές»: Το κριτήριο αυτό αξιολογεί στις τεχνολογίες επεξεργασίας αποβλήτων το ενδεχόμενο εμφάνισης οσμών από την διεργασία. Οι τιμές που δίνουμε για κάθε τεχνολογία είναι ποιοτικές και σχετικές με τις άλλες τεχνολογίες.
- «Στερεά απόβλητα»: Το κριτήριο αυτό εξετάζει την ποσότητα της βιολογικής ιλύος που προκύπτει από την διεργασία μείωσης του οργανικού φορτίου των υγρών αποβλήτων. Η τιμές που δίνουμε σε αυτό το κριτήριο είναι εκφρασμένες σε kg στερεού ανά kgBOD<sub>5</sub> που αποβάλλεται.

Στην κατηγορία της εκμετάλλευσης των πόρων έχουμε συμπεριλάβει τα παρακάτω δύο κριτήρια:

- «Κατανάλωση ενέργειας»: Το κριτήριο αυτό εξετάζει την κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα κατά την διάρκεια όλης της διεργασίας. Η μονάδα μέτρησης η οποία καθορίζει το μέγεθος της καταναλισκόμενης ενέργειας στην κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας είναι οι kWh ανά kgBOD<sub>5</sub> απομάκρυνσης από τα απόβλητα
- «Χρήση γης»: Το κριτήριο αυτό εξετάζει την απαιτούμενη επιφάνεια που απαιτείται για το σύστημα επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων. Η τιμές που ορίζουμε στο κριτήριο αυτό για κάθε μία τεχνολογία είναι σχετικές μεταξύ τους.

Και τέλος στην κατηγορία των κριτηρίων της εμπειρίας εφαρμογών έχουμε συμπεριλάβει τα παρακάτω δύο κριτήρια:

- «Επίπεδο ανάπτυξης τεχνολογίας»: Το κριτήριο αυτό εξετάσει την ωριμότητα της κάθε τεχνολογίας και οι τιμές που δίνουμε στο κριτήριο αυτό είναι ποιοτικές.
- «Εμπορικές μονάδες»: Το κριτήριο αυτό εξετάζει τον αριθμό των εγκαταστάσεων που έχουν γίνει σε σχέση με την άλλες τεχνολογίες. Η τιμή του κριτηρίου είναι ποιοτική και σχετική με τις άλλες τεχνολογίες.

**Πίνακας 3.3-1. Κατηγορίες κριτηρίων και κριτήρια για την εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης.**

| Τεχνικά – Λειτουργικά                      | Οικονομικά                               | Απόβλητα               | Εκμετάλλευση πόρων   | Εμπειρία εφαρμογών            |
|--|--|------------------------|----------------------|-------------------------------|
| Βαθμός απόδοσης                            | Κόστος επένδυσης                         | Αέρια απόβλητα         | Κατανάλωση ενέργειας | Επίπεδο ανάπτυξης τεχνολογίας |
| Αντοχή Η/Μ εξοπλισμού.                     |  | Οσμές                  |                      |                               |
| Ευελξία                                    | Λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης | Στερεά απόβλητα (ιλύς) | Χρήση γης            | Εμπορικές μονάδες             |
| Απαιτήσεις συντήρησης κατά την λειτουργία. |  |                        |                      |                               |

### **3.4 Ορισμός τιμών κριτηρίων για κάθε τεχνολογία**

Ο ορισμός των τιμών στα κριτήρια της πολυκριτηριακής ανάλυσης, γίνεται ύστερα από την μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας και από εμπειρικές πληροφορίες μέσα από τον σχετικό χώρο. Για αρκετά κριτήρια υπάρχουν ποσοτικά δεδομένα και για άλλα μόνο ποιοτικά τα οποία βαθμολογούνται αναλογικά δίνοντας την ανάλογη σχετική βαθμολογία σε κάθε τεχνολογία σε μία κλίμακα βαθμολογίας από το ένα έως το πέντε με καλύτερο βαθμό το πέντε.

Κάποια από τα κριτήρια έχουν τιμές σε περιοχή τιμών. Από αυτές τις περιπτώσεις, σε κάποια κριτήρια λαμβάνουμε την μέση τιμή και σε άλλα την μέγιστη τιμή. Αυτό εξαρτάται από την έννοια του κριτηρίου και τον τρόπο που θέλουμε να το βαθμολογήσουμε.

Ένα σημαντικό μέρος της μεθόδου της πολυκριτηριακής ανάλυσης, είναι ο καθορισμός του τρόπου βαθμολόγησης του κάθε κριτηρίου. Όσον αφορά τα κριτήρια τα οποία βαθμολογούνται ποιοτικά και ανάλογα, όπως προαναφέραμε, θα βαθμολογηθούν με την ίδια κλίμακα από το ένα έως το πέντε με καλύτερο βαθμό το πέντε σε όλες τις περιπτώσεις. Στα υπόλοιπα κριτήρια όπου υπάρχουν τιμές, θα ορίσουμε την κλίμακα βαθμολογίας, δηλαδή την συνάρτηση  $f(d)$  του γενικευμένου κριτηρίου η οποία σε όλες τις περιπτώσεις είναι γραμμικό.

#### **3.4.1 Τεχνικά – λειτουργικά κριτήρια**

Η τεχνολογία σχεδιάζεται συνεχώς έτσι ώστε να είναι ικανή να εκπληρώσει κάποιες υπηρεσίες, όπως στην περίπτωση μας την επεξεργασία και εξυγίανση ρυπασμένου

νερού. Τα λειτουργικά κριτήρια κάθε τεχνολογίας παρουσιάζουν την αποδοτικότητα της κάθε τεχνολογίας στο να εκπληρώσει την ζητούμενη υπηρεσία, δηλαδή την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων στην βιομηχανία. Τα τεχνικά – λειτουργικά κριτήρια που θα αναλύσουμε και θα συγκρίνουμε παρουσιάζονται παρακάτω.

#### 3.4.1.1 Βαθμός απόδοσης

Ο δείκτης που θα χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση του βαθμού απόδοσης της κάθε τεχνολογίας, είναι η ικανότητα της τεχνολογίας να ελαττώσει το οργανικό φορτίο που περιέχεται διαλυμένο και αδιάλυτο μέσα στα υγρά απόβλητα και εκφράζεται σε ποσοστό επί τις εκατό (%) ελάττωσης.

Η κάθε τεχνολογία έχει έναν βαθμό απόδοσης ο οποίος κυμαίνεται σε κάποια περιοχή τιμών. Η τιμή που μας ενδιαφέρει για την αξιολόγηση είναι η μέγιστη και αυτό γιατί εξετάζουμε από τεχνολογικής άποψης την ικανότητα της τεχνολογίας να πετύχει υψηλές τιμές απορρύπανσης του νερού.

Για την σύγκριση των τιμών πρέπει να ορίσουμε την συνάρτηση  $f(d)$  του γενικευμένου κριτηρίου και τις τιμές του κατωφλίου αδιαφορίας ( $q_j$ ) και του κατωφλίου προτίμησης ( $p_j$ ). Οι τιμές των κατωφλίων  $q_j$  και  $p_j$  που ορίζουμε, λαμβάνουν τιμές αντίστοιχα 1 και 15. Στην τιμή  $q_j$  δίνουμε την τιμή 1 η οποία είναι η μέγιστη διαφορά της τιμής του κριτηρίου η οποία μπορεί να θεωρηθεί αδιάφορη στην σύγκριση δύο τεχνολογιών. Αντίστοιχα στην τιμή  $p_j$  δίνουμε την τιμή 15 η οποία είναι η μέγιστη διαφορά στις τιμές του βαθμού απόδοσης των τεχνολογιών.

Έτσι λοιπόν, η συνάρτηση  $f(d)$  παίρνει την μορφή της παρακάτω συνάρτησης.

$$f(d) = \begin{cases} 1 & \text{αν } d > 15 \\ \frac{(d-1)}{(15-1)} & \text{αν } 1 < d < 15 \\ 0 & \text{αν } d \leq 1 \end{cases} \quad (3.4-1)$$

Για τις εξεταζόμενες τεχνολογίες ο βαθμός απόδοσης κάθε τεχνολογίας απεικονίζεται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 3.4-1. Βαθμός απόδοσης τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων.**

| Τεχνολογία επεξεργασίας αποβλήτων | Βαθμός απόδοσης | Τιμή βαθμού απόδοσης που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των τεχνολογιών |
|-----------------------------------|-----------------|--|
| Δραστική ιλύς                     | 85-95 %         | 95 %   |
| Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης        | 97-99 %         | 99 %   |
| Βιολογικό φίλτρο                  | 65-85 %         | 85 %   |
| Εμβαιπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο   | 85-90 %         | 90 %   |
| Βιορότορες (RBCs)                 | 85-90 %         | 90 %   |

#### 3.4.1.2 Αντοχή

Το κριτήριο της αντοχής εξετάζει το χρόνο ζωής μία εγκατάστασης και ιδιαίτερα του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Επειδή περίπου όλες οι τεχνολογίες εκτός του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης χρησιμοποιούν ανάλογο ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό, ο χρόνος ζωής τους είναι ίδιος και αναφέρεται ότι για αυτές τις εγκαταστάσεις είναι περίπου 12 χρόνια. Το μικρότερο χρόνο ζωής των εξεταζόμενων τεχνολογιών έχει η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης. Το σύστημα αυτό έχει χρόνο ζωής για τις μεμβράνες περίπου 7 με 8 χρόνια [11] [6], και το οποίο περιλαμβάνει περίπου το 55% του κόστους του εξοπλισμού.

Για την σύγκριση των τιμών πρέπει να ορίσουμε την συνάρτηση  $f(d)$  του γενικευμένου κριτηρίου και τις τιμές του κατωφλιού αδιαφορίας ( $q_j$ ) και του κατωφλιού προτίμησης ( $p_j$ ). Οι τιμές των κατωφλίων  $q_j$  και  $p_j$  που ορίζουμε, λαμβάνουν τιμές αντίστοιχα 0 και 12. Για την τιμή  $q_j$  θεωρούμε ότι οποιαδήποτε διαφορά θεωρείται σημαντική. Αντίστοιχα στην τιμή  $p_j$  δίνουμε την τιμή 12 η οποία είναι η διαφορά πάνω από την οποία οποιαδήποτε τιμή θα έπαιρνε τον μέγιστο βαθμό.

Έτσι λοιπόν, η συνάρτηση  $f(d)$  παίρνει την μορφή της παρακάτω συνάρτησης.

$$f(d) = \begin{cases} 1 & \text{αν } d > 12 \\ d/12 & \text{αν } 0 < d < 12 \\ 0 & \text{αν } d \leq 0 \end{cases} \quad (3.4-2)$$

**Πίνακας 3.4-2. Χρόνος ζωής εγκατάστασης τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων.**

| Τεχνολογία επεξεργασίας αποβλήτων | Χρόνος ζωής μίας εγκατάστασης | Τιμή του χρόνου ζωής που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των τεχνολογιών |
|-----------------------------------|-------------------------------|--|
| Δραστική ιλύς                     | 12 χρόνια                     | 12 χρόνια  |
| Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης        | 7-8 χρόνια                    | 8 χρόνια   |
| Βιολογικό φίλτρο                  | 12 χρόνια                     | 12 χρόνια  |
| Εμβαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο    | 12 χρόνια                     | 12 χρόνια  |
| Βιορότορες (RBCs)                 | 12 χρόνια                     | 12 χρόνια  |

#### 3.4.1.3 Ευελιξία

Το κριτήριο της ευελιξίας αξιολογεί την ικανότητα της τεχνολογίας να ανταποκριθεί σε αλλαγές συνθηκών οργανικής φόρτισης και ιδιαίτερα σε φορτία αιχμής, σε τοξικά υλικά, σε κλιματολογικές αλλαγές κτλ. [10]

Μία αρχική σύγκριση που μπορούμε να κάνουμε όσον αφορά την ευελιξία, είναι η σύγκριση των τεχνολογιών της δραστικής ιλύος και των βιολογικών φίλτρων (trickling



filters). Η τεχνολογία της δραστικής ιλύος είναι λιγότερο ευέλικτη και αυτό λόγω της ευαισθησίας της σε φορτία αιχμής και σε τοξικά υλικά που μπορεί να περιέχονται στα απόβλητα [3]. Αντίθετα, η τεχνολογία των βιολογικών φίλτρων διαβροχής είναι πιο ευέλικτη και λιγότερο ευαίσθητη στα οργανικά φορτία αιχμής και στις τοξικές ουσίες.

Οι τεχνολογίες του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου και των βιορότορων έχουν την ίδια αρχή επεξεργασίας και ανήκουν στην ίδια κατηγορία με τα βιολογικά φίλτρα. Έτσι λοιπόν η ευελιξία των συστημάτων αυτών είναι ίδια και βαθμολογείται αντίστοιχα το ίδιο με τον μέγιστο βαθμό. Κάνοντας την ίδια σκέψη και για την τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης συγκρίνοντας τον με την τεχνολογία της δραστικής ιλύος, θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι το ίδιο ευαίσθητα συστήματα. Πράγματι υπάρχει μία ευαισθησία στο σύστημα του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης αλλά λόγω της λειτουργίας του συστήματος με υψηλή συγκέντρωση MLSS, το κάνει πιο σταθερό, έτσι η βαθμολογία που του δίνουμε είναι το 2.

Για την σύγκριση των τιμών πρέπει να ορίσουμε την συνάρτηση  $f(d)$  του γενικευμένου κριτηρίου και τις τιμές του κατωφλίου αδιαφορίας ( $q_j$ ) και του κατωφλίου προτίμησης ( $p_j$ ). Οι τιμές των κατωφλίων  $q_j$  και  $p_j$  που ορίζουμε, λαμβάνουν τιμές αντίστοιχα 0 και 4. Για την τιμή  $q_j$  θεωρούμε ότι οποιαδήποτε διαφορά θεωρείται σημαντική μία και η κλίμακα βαθμολόγησης μας είναι διακριτή και έχει μικρή διαβάθμιση. Αντίστοιχα στην τιμή  $p_j$  δίνουμε την τιμή 4 η οποία είναι η μέγιστη διαφορά που μπορεί να υπάρξει.

Έτσι λοιπόν, η συνάρτηση  $f(d)$  παίρνει την μορφή της παρακάτω συνάρτησης.

$$f(d) = \begin{cases} 1 & \text{αν } d > 4 \\ d/4 & \text{αν } 0 < d < 4 \\ 0 & \text{αν } d \leq 0 \end{cases} \quad (3.4-3)$$

**Πίνακας 3.4-3. Ευελιξία τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων.**

| Τεχνολογία επεξεργασίας αποβλήτων | Ευελιξία |
|-----------------------------------|----------|
| Δραστική ιλύς                     | 1        |
| Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης        | 2        |
| Βιολογικό φίλτρο                  | 5        |
| Εμβαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο    | 5        |
| Βιορότορες (RBCs)                 | 5        |

#### 3.4.1.4 Απαιτήσεις συντήρησης

Το κριτήριο της απαίτησης συντήρησης για την κάθε τεχνολογία αφορά την απαίτηση του συστήματος για συντήρηση κατά την διάρκεια της λειτουργίας του. Για παράδειγμα απόρριψη της ιλύος ή το καθάρισμα των μεμβρανών σε ένα σύστημα με βιοαντιδραστήρα μεμβράνης. Δεν αφορά απαιτήσεις συντήρησης του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Ουσιαστικά περιγράφεται και η απαίτηση σε εξειδικευμένο προσωπικό για την λειτουργία του συστήματος.

Η αξιολόγηση των τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων με βάση το κριτήριο αυτό είναι υποκειμενική. Μπορεί να ποσοτικοποιηθεί καθορίζοντας την απαιτούμενη συχνότητα συντήρησης, το κόστος και τον χρόνο που απαιτείται γι' αυτή. Όπως αναφέρεται σε έρευνα του Γαλλικού Υπουργείου Γεωργίας [14] οι απαιτήσεις συντήρησης ετησίως σε ένα σύστημα δραστικής ιλύος είναι μεγαλύτερες από ένα σύστημα βιολογικών φίλτρων και σχεδόν ίδιες με ένα σύστημα με βιορότορες. Η συχνότητα όμως ελέγχου του συστήματος των βιολογικών φίλτρων είναι λίγο

μεγαλύτερες από ενός συστήματος δραστικής ιλύος. Αντίθετα οι συχνότητα ελέγχου σε ένα σύστημα με βιορότορες είναι μικρότερη.

Για την πιο αντικειμενική αξιολόγηση των τεχνολογιών, θα κάνουμε την σύγκριση σε όσες μπορούμε ανάλογα με το κόστος συντήρησης. Αναφερόμενοι ξανά στην έρευνα του Γαλλικού Υπουργείου Γεωργίας, το κόστος συντήρησης για ένα σύστημα επεξεργασίας αποβλήτων είναι αντίστοιχα για τις τεχνολογίες δραστικής ιλύος, βιολογικού φίλτρου και βιορότορων, €8,27/p.e., €6,18/p.e., €5,52/p.e. [14] Από αυτές τις τιμές είναι ξεκάθαρο ότι οι απαιτήσεις συντήρησης ενός συστήματος δραστική ιλύος είναι πολύ μεγαλύτερες από τα άλλα δύο συστήματα.

Η τεχνολογία με τις μικρότερες απαιτήσεις συντήρησης αναφέρεται ότι η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης και αυτό προκύπτει από τις μικρότερες διαστάσεις του συστήματος σε σχέση με τα υπόλοιπα και τον διαφορετικό τρόπο διαχωρισμού του νερού από την λάσπη. Έτσι σε αυτή την τεχνολογία θα δώσουμε μία βαθμολογία 4 η οποία δεν είναι η καλύτερη αλλά είναι υψηλότερη από τις άλλες.

Για την σύγκριση των τιμών πρέπει να ορίσουμε την συνάρτηση  $f(d)$  του γενικευμένου κριτηρίου και τις τιμές του κατωφλιού αδιαφορίας ( $q_j$ ) και του κατωφλιού προτίμησης ( $p_j$ ). Οι τιμές των κατωφλίων  $q_j$  και  $p_j$  που ορίζουμε, λαμβάνουν τιμές αντίστοιχα 0 και 4. Για την τιμή  $q_j$  θεωρούμε ότι οποιαδήποτε διαφορά θεωρείται σημαντική μία και η κλίμακα βαθμολόγησης μας είναι διακριτή και έχει μικρή διαβάθμιση. Αντίστοιχα στην τιμή  $p_j$  δίνουμε την τιμή 4 η οποία είναι η μέγιστη διαφορά που μπορεί να υπάρξει.

Έτσι λοιπόν, η συνάρτηση  $f(d)$  παίρνει την μορφή της παρακάτω συνάρτησης.

$$f(d) = \begin{cases} 1 & \text{αν } d > 4 \\ d/4 & \text{αν } 0 < d < 4 \\ 0 & \text{αν } d \leq 0 \end{cases} \quad (3.4-4)$$

**Πίνακας 3.4-4. Απαιτήσεις συντήρησης συστημάτων επεξεργασίας αποβλήτων**

| Τεχνολογία επεξεργασίας αποβλήτων | Απαίτηση συντήρησης | Τιμή της απαίτησης συντήρησης που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των τεχνολογιών |
|-----------------------------------|---------------------|---|
| Δραστική ιλύς                     | Πολύ μεγάλη         | 1   |
| Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης        | Μικρή               | 4   |
| Βιολογικό φίλτρο                  | Μεγάλη              | 2   |
| Εμβαιπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο   | Μέτρια              | 3   |
| Βιορότορες (RBCs)                 | Μέτρια              | 3   |

### 3.4.2 Οικονομικά κριτήρια

#### 3.4.2.1 Κόστος επένδυσης

Το κόστος επένδυσης για κάθε μία εξεταζόμενη τεχνολογία, περιλαμβάνει το κόστος της μελέτης, προμήθειας και εγκατάστασης της εκάστοτε μονάδας επεξεργασίας, ανηγμένο ανά μονάδα ισοδύναμου πληθυσμού δυναμικότητας της μονάδας. Παρόλο που οι μονάδες είναι μεγάλου μεγέθους και απαιτούν σημαντικές εκτάσεις γης, δεν θα λάβουμε υπόψη μας στο κόστος επένδυσης το κόστος χρήσης γης διότι αυτό μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή και εξετάζεται παρακάτω ξεχωριστά από άλλο κριτήριο.

Το κόστος επένδυσης για μία μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων δραστηκής ιλύος είναι €200/p.e [14], για μία μονάδα βιολογικών φίλτρων €156/p.e. [14], για μία μονάδα

εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου €160/p.e. και για μία μονάδα με τεχνολογία βιορότορων €93/p.e. [14].

Η πιο ακριβή τεχνολογία είναι η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης. Μία τυπική διακύμανση του κόστους επένδυσης μόνο για τον εξοπλισμό για μονάδες επεξεργασίας λυμάτων είναι \$4,8 έως \$6,5 ανά γαλόνι η οποία εξαρτάται από το μέγεθος της εγκατάστασης, την ποιότητα του εξοπλισμού, τον συντελεστή υπερδιαστασιολόγησης, την αρχιτεκτονική μελέτη κ.α. [11]. Από άλλες αναφορές, για μία εμβαπτιζόμενη μονάδα δυναμικότητας 4000p.e, το κόστος της επένδυσης για όλη την εγκατάσταση είναι £4.000.000 [6], δηλαδή €1430/p.e..

Για την σύγκριση των τιμών πρέπει να ορίσουμε την συνάρτηση  $f(d)$  του γενικευμένου κριτηρίου και τις τιμές του κατωφλίου αδιαφορίας ( $q_j$ ) και του κατωφλίου προτίμησης ( $p_j$ ). Οι τιμές των κατωφλίων  $q_j$  και  $p_j$  που ορίζουμε, λαμβάνουν τιμές αντίστοιχα €10/p.e. και €1275/p.e.. Για την τιμή  $q_j$  θεωρούμε ότι μία διαφορά αυτής της τάξης είναι αποδεκτή ενώ αντίστοιχα για την τιμή  $p_j$  δίνουμε την τιμή της μέγιστης διαφοράς που μπορεί να υπάρξει.

Έτσι λοιπόν, η συνάρτηση  $f(d)$  παίρνει την μορφή της παρακάτω συνάρτησης:

$$f(d) = \begin{cases} 1 & \text{αν } d > 1275 \\ \frac{(d-10)}{(1275-10)} & \text{αν } 0 < d < 1275 \\ 0 & \text{αν } d \leq 10 \end{cases} \quad (3.4-5)$$

Σε αυτό το κριτήριο πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η μεγαλύτερη τιμή της συνάρτησης είναι η χειρότερη τιμή του γενικευμένου κριτηρίου.

Πίνακας 3.4-5. Ανηγμένο κόστος επένδυσης μονάδων επεξεργασίας αποβλήτων.

| Τεχνολογία επεξεργασίας αποβλήτων | Κόστος επένδυσης [€p.e.] |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Δραστική ιλύς                     | 200                      |
| Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης        | 1430                     |
| Βιολογικό φίλτρο                  | 156                      |
| Εμβαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο    | 160                      |
| Βιορότορες (RBCs)                 | 193                      |

#### 3.4.2.2 Λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης

Το δεύτερο οικονομικό κριτήριο αξιολόγησης των τεχνολογιών αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας αφορά το λειτουργικό κόστος και το κόστος συντήρησης μίας εγκατάστασης εκφρασμένο σε €/kgBOD<sub>5</sub> δυναμικότητας της μονάδας. Μέσα στο λειτουργικό κόστος περιλαμβάνεται και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας για την λειτουργία της κάθε μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων.

Η τεχνολογία της δραστικής ιλύος είναι η τεχνολογία με το μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος το οποίο είναι €/6/kgBOD<sub>5</sub> [14]. Αντίστοιχα το λειτουργικό κόστος για την τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης είναι €/43/kgBOD<sub>5</sub> [15], της τεχνολογίας του βιολογικού φίλτρου €/36/kgBOD<sub>5</sub> [14], του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου €/39/kgBOD<sub>5</sub> [5, σελ 146] και της τεχνολογίας του βιορότορα στα €/36/kgBOD<sub>5</sub>.

Για την σύγκριση των τιμών πρέπει να ορίσουμε την συνάρτηση  $f(d)$  του γενικευμένου κριτηρίου και τις τιμές του κατωφλιού αδιαφορίας ( $q_j$ ) και του κατωφλιού προτίμησης ( $p_j$ ). Οι τιμές των κατωφλίων  $q_j$  και  $p_j$  που ορίζουμε, λαμβάνουν τιμές αντίστοιχα €/kgBOD<sub>5</sub> και €/3/kgBOD<sub>5</sub>. Για την τιμή  $q_j$  θεωρούμε ότι οποιαδήποτε διαφορά λειτουργικού κόστους είναι σημαντική ενώ αντίστοιχα για την τιμή  $p_j$  δίνουμε την τιμή της μέγιστης διαφοράς που μπορεί να υπάρξει.

Έτσι λοιπόν, η συνάρτηση  $f(d)$  παίρνει την μορφή της παρακάτω συνάρτησης:

$$f(d) = \begin{cases} 1 & \text{αν } d > 0,3 \\ d/0,3 & \text{αν } 0 < d < 0,3 \\ 0 & \text{αν } d \leq 0 \end{cases} \quad (3.4-6)$$

Σε αυτό το κριτήριο πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η μεγαλύτερη τιμή της συνάρτησης είναι η χειρότερη τιμή του γενικευμένου κριτηρίου.

**Πίνακας 3.4-6. Λειτουργικό κόστος μονάδων επεξεργασίας αποβλήτων.**

| Τεχνολογία επεξεργασίας αποβλήτων | Λειτουργικό κόστος [€/kgBOD <sub>5</sub> ] |
|-----------------------------------|--|
| Δραστική ιλύς                     | 0,60                                       |
| Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης        | 0,43                                       |
| Βιολογικό φίλτρο                  | 0,36                                       |
| Εμβαπτίζόμενο βιολογικό φίλτρο    | 0,39                                       |
| Βιορότορες (RBCs)                 | 0,36                                       |

### 3.4.3 Απόβλητα

Από μία μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, εκτός από τα απόβλητα τα οποία προκύπτουν κατά την κατασκευή της εγκατάστασης, παράγονται αέρια και στερεά απόβλητα κατά την λειτουργία της μονάδας. Παράλληλα στο τέλος του κύκλου ζωής της εγκατάστασης απομένουν κάποια στερεά απόβλητα τα οποία τα περισσότερα είναι δυνατό να ανακυκλωθούν.

Σε αυτή την μελέτη δεν κάνουμε ανάλυση κύκλου ζωής των τεχνολογιών αλλά εξετάζουμε τις τεχνολογίες επεξεργασίας αποβλήτων όσον αφορά την φιλικότητα τους στο περιβάλλον κατά την λειτουργία τους.

#### 3.4.3.1 Αέρια απόβλητα - Επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα

Από μία μονάδα αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας εκπέμπονται αέρια απόβλητα τα οποία εξαρτώνται από την σύσταση των υγρών αποβλήτων που επεξεργάζεται η κάθε τεχνολογία. Ως κριτήριο αξιολόγησης της κάθε εξεταζόμενης τεχνολογίας είναι και οι αέριες εκπομπές στην ατμόσφαιρα οι οποίες συμβάλουν και αυτές στην υποβάθμιση της ποιότητας της ατμόσφαιρας.

Σε μία μονάδα αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας με σκοπό την μείωση του οργανικού φορτίου, οι κυριότερες αέριες εκπομπές είναι το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) το οποίο προκύπτει από την οξείδωση του οργανικού φορτίου, το οξείδιο του αζώτου (NO), οι πτητικές οργανικές ενώσεις (TVOCs) και τα σωματίδια οργανικού άνθρακα (POC) [18]. Ειδικότερα από μία μονάδα επεξεργασίας αστικών αποβλήτων δραστηκής ιλύος, οι ετήσιες αέριες εκπομπές είναι 27.400g/p.e  $\text{CO}_2$ , 0,58g/p.e. NO, 244g/p.e. TVOC, 0.08g/p.e. POC [18, πίνακας 2].

Εξαιτίας του ισχυρού αερισμού που υφίστανται τα απόβλητα κατά την αερόβια επεξεργασία τους σε μία μονάδα δραστηκής ιλύος, οι ποσότητες σωματιδίων που εκπέμπονται είναι σημαντικές [18]. Μαζί με τα σωματίδια του οργανικού άνθρακα, εξίσου σημαντικές είναι και οι εκπομπές μικροοργανισμών οι οποίες παρουσιάζονται υπό μορφή αερολυμάτων (aerosols). Επειδή τα υγρά απόβλητα είναι πιθανοί φορείς παθογόνων μικροοργανισμών, η εισπνοή των σωματιδίων, η επαφή και η απορρόφηση τους είναι επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία [19].

Από πειραματικές μετρήσεις που έγιναν σε πιλοτικούς αντιδραστήρες δραστηκής ιλύος και βιολογικού φίλτρου σε τέσσερις τύπους μικροοργανισμών που περιέχονται σε



αερολύματα, προέκυψαν οι τιμές στον παρακάτω πίνακα. Από αυτόν προκύπτει τελικά ότι η τεχνολογία της δραστικής ιλύος έχει περισσότερες εκπομπές μικροοργανισμών κατά πολύ από την τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου. Αυτό οφείλεται στον τρόπο που γίνεται η επεξεργασία των αποβλήτων και την μέθοδο που χρησιμοποιεί η κάθε τεχνολογία για την οξυγόνωση τους. Η τεχνολογία της δραστικής ιλύος επειδή χρησιμοποιεί ισχυρό αερισμό με διάχυση αέρα, την στιγμή που οι φυσαλίδες φτάνουν στην επιφάνεια σπάνε και δημιουργούν τα αερολύματα. Αυτό σημαίνει ότι η ποσότητα των αερολυμάτων είναι συνάρτηση και της επιφάνειας του αντιδραστήρα. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια του αντιδραστήρα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ποσότητα των αερολυμάτων.

**Πίνακας 3.4-7. Μέση τιμή εκπομπών ειδικών βακτηριδίων και μυκήτων. [19, πίνακας 2]**

|                     | <b>Δραστική ιλύς</b> | <b>Βιολογικό φίλτρο</b> |
|---------------------|----------------------|-------------------------|
|                     | <b>CFU/p.e.</b>      |                         |
| Mesophilic bacteria | $5,4 \times 10^5$    | $5,8 \times 10^3$       |
| TSA-SB bacteria     | $6,4 \times 10^4$    | $1,4 \times 10^3$       |
| Mesophilic fungi    | $5,3 \times 10^4$    | 350                     |
| Thermophilic fungi  | $1,4 \times 10^3$    | 28                      |

Συγκρίνοντας έτσι την τεχνολογία της δραστικής ιλύος με την τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης ή οποία χρησιμοποιεί αντιδραστήρα ελαφρός μικρότερης επιφάνειας, θα θεωρήσουμε ότι έχουν τις ίδιες εκπομπές αερολυμάτων. Όσον αφορά τις εκπομπές αερίων, λόγω της ίδιας διεργασίας θα θεωρήσουμε ότι είναι ίδιες.

Συγκρίνοντας της τεχνολογίες του βιολογικού φίλτρου, του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου και του βιορότορα, επειδή βασίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας θα θεωρήσουμε ότι έχουν τις ίδιες εκπομπές αέριων ρύπων και αερολυμάτων.

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι γενικά στις μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων οι εκπομπές αέριων ρύπων είναι γενικά χαμηλές σε σχέση με άλλες βιομηχανικές δραστηριότητες, για την αξιολόγηση των τεχνολογιών θα λάβουμε υπόψη μας την εκπομπή των αερολυμάτων από τον αντιδραστήρα της κάθε τεχνολογίας επεξεργασίας αποβλήτων. Έτσι με αυτό τον τρόπο συμπληρώνουμε τον παρακάτω συγκριτικό πίνακα.

Για την σύγκριση των τιμών πρέπει να ορίσουμε την συνάρτηση  $f(d)$  του γενικευμένου κριτηρίου και τις τιμές του κατωφλιού αδιαφορίας ( $q_j$ ) και του κατωφλιού προτίμησης ( $p_j$ ). Οι τιμές των κατωφλίων  $q_j$  και  $p_j$  που ορίζουμε, λαμβάνουν τιμές αντίστοιχα 0 και 4. Για την τιμή  $q_j$  θεωρούμε ότι οποιαδήποτε διαφορά θεωρείται σημαντική μία και η κλίμακα βαθμολόγησης μας είναι διακριτή και έχει μικρή διαβάθμιση. Αντίστοιχα στην τιμή  $p_j$  δίνουμε την τιμή 4 η οποία είναι η μέγιστη διαφορά που μπορεί να υπάρξει.

Έτσι λοιπόν, η συνάρτηση  $f(d)$  παίρνει την μορφή της παρακάτω συνάρτησης.

$$f(d) = \begin{cases} 1 & \text{αν } d > 4 \\ d/4 & \text{αν } 0 < d < 4 \\ 0 & \text{αν } d \leq 0 \end{cases} \quad (3.4-7)$$

**Πίνακας 3.4-8. Εκπομπές αέριων ρύπων τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων.**

| Τεχνολογία επεξεργασίας αποβλήτων | Εκπομπές αέριων ρύπων | Τιμή των εκπομπών αέριων ρύπων που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των τεχνολογιών |
|-----------------------------------|-----------------------|--|
| Δραστική ιλύς                     | Πολλές                | 2  |
| Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης        | Πολλές                | 2  |
| Βιολογικό φίλτρο                  | Λίγες                 | 5  |
| Εμβαιπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο   | Λίγες                 | 5  |
| Βιορότορες (RBCs)                 | Λίγες                 | 5  |

### 3.4.3.2 Οσμές

Ένα από τα συνηθισμένα προβλήματα που παρουσιάζονται σε μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων είναι οι οσμές. Έτσι λοιπόν, ένα κριτήριο το οποίο μπορεί να αξιολογήσει τις τεχνολογίες επεξεργασίας αποβλήτων είναι η πιθανότητα εμφάνισης οσμών από την διεργασία.

Γενικά οι μονάδες αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας, όταν λειτουργούν σωστά δεν παρουσιάζουν προβλήματα οσμών. Το φαινόμενο της έντονης οσμής παρουσιάζεται μόνο σε δυσλειτουργία του συστήματος και σε υπερφόρτιση αυτού. Βέβαια επειδή πάντα υπάρχει αυτή η πιθανότητα παρουσίας του φαινομένου της έντονης δυσοσμίας, το κριτήριο αυτό εξετάζει ουσιαστικά το μέγεθος της πιθανότητας εμφάνισης των οσμών σε ένα ενδεχόμενο υπερφόρτισης ή δυσλειτουργίας.

Από την μελέτη της βιβλιογραφίας προκύπτει ότι οι τεχνολογίες με τις μικρότερες εκπομπές οσμών είναι οι τεχνολογίες της κατηγορίας αιωρούμενης βιομάζας (Suspended growth process) όπως η τεχνολογία της δραστικής ύλης και η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης. Αντίθετα οι τεχνολογίες της κατηγορίας της προσκολλούμενης βιομάζας (attached-growth process) δηλαδή η τεχνολογία των βιολογικών φίλτρων, παρουσιάζουν μεγαλύτερα επίπεδα οσμών σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες της άλλης κατηγορίας.

Για την σύγκριση των τιμών πρέπει να ορίσουμε την συνάρτηση  $f(d)$  του γενικευμένου κριτηρίου και τις τιμές του κατωφλίου αδιαφορίας ( $q_j$ ) και του κατωφλίου προτίμησης ( $p_j$ ). Οι τιμές των κατωφλίων  $q_j$  και  $p_j$  που ορίζουμε, λαμβάνουν τιμές αντίστοιχα 0 και 4. Για την τιμή  $q_j$  θεωρούμε ότι οποιαδήποτε διαφορά θεωρείται σημαντική μία και η

κλίμακα βαθμολόγησης μας είναι διακριτή και έχει μικρή διαβάθμιση. Αντίστοιχα στην τιμή  $p_j$  δίνουμε την τιμή 4 η οποία είναι η μέγιστη διαφορά που μπορεί να υπάρξει.

Έτσι λοιπόν, η συνάρτηση  $f(d)$  παίρνει την μορφή της παρακάτω συνάρτησης.

$$f(d) = \begin{cases} 1 & \text{αν } d > 4 \\ d/4 & \text{αν } 0 < d < 4 \\ 0 & \text{αν } d \leq 0 \end{cases} \quad (3.4-8)$$

**Πίνακας 3.4-9. Επίπεδο οσμών συστημάτων επεξεργασίας αποβλήτων.**

| Τεχνολογία επεξεργασίας αποβλήτων | Επίπεδο οσμών | Τιμή του επιπέδου των οσμών που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των τεχνολογιών |
|-----------------------------------|---------------|---|
| Δραστική ιλύς                     | Λίγες         | 4   |
| Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης        | Ελάχιστες     | 5   |
| Βιολογικό φίλτρο                  | Πολλές        | 2   |
| Εμβαιπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο   | Αρκετές       | 3   |
| Βιορότορες (RBCs)                 | Αρκετές       | 3   |

### 3.4.3.3 Στερεά απόβλητα

Από την βιολογική επεξεργασία εκτός από το επεξεργασμένο νερό αποβάλλεται και ποσότητα βιολογικής ιλύος η οποία περιλαμβάνει και ένα κόστος διαχείρισης της. Η βιολογική ιλύς συνήθως αφυδατώνεται και διατίθεται ως στερεό απόβλητο ή ως εδαφοβελτιωτικό ανάλογο με την σύσταση της.

Το κόστος επεξεργασίας και διάθεσης της βιολογικής ιλύος είναι ανάλογο της ποσότητας που επεξεργάζεται και διατίθεται. Ως κριτήριο αξιολόγησης των τεχνολογιών αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας θα λάβουμε την παραγόμενη ποσότητα ιλύος σε kg στερεού ανά kgBOD<sub>5</sub> που αποβάλλεται.

Η τεχνολογία της δραστικής ιλύος έχει το υψηλότερο επίπεδο παραγόμενης βιολογικής ιλύος το οποίο κυμαίνεται στα 0,6 kgDS/kgBOD<sub>5</sub> [6, πίνακας 1]. Η τεχνολογία με την μικρότερη παραγωγή βιολογικής ιλύος είναι η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης η οποία βρίσκεται στην περιοχή των 0,3 kgDS/kgBOD<sub>5</sub> [6, πίνακας 1] και ακολουθούν η τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου με τιμή 0,3-0,5 kgDS/kgBOD<sub>5</sub> [6, πίνακας 1], η τεχνολογία του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου με τιμή 0,5-0,7 kgDS/kgBOD<sub>5</sub> [Munters Euroform GmbH] και η τεχνολογία του βιορότορα με τιμή 0,6-1,1kgDS/kgBOD<sub>5</sub> [16, σελ. TFS-9].

Για την σύγκριση των τιμών πρέπει να ορίσουμε την συνάρτηση  $f(d)$  του γενικευμένου κριτηρίου και τις τιμές του κατωφλιού αδιαφορίας ( $q_j$ ) και του κατωφλιού προτίμησης ( $p_j$ ). Οι τιμές των κατωφλίων  $q_j$  και  $p_j$  που ορίζουμε, λαμβάνουν τιμές αντίστοιχα 0kgDS/kgBOD<sub>5</sub> και 0,55kgDS/kgBOD<sub>5</sub>. Για την τιμή  $q_j$  θεωρούμε ότι οποιαδήποτε διαφορά της παραγωγής ιλύος είναι σημαντική ενώ αντίστοιχα για την τιμή  $p_j$  δίνουμε την τιμή της μέγιστης διαφοράς που μπορεί να υπάρξει.

Έτσι λοιπόν, η συνάρτηση  $f(d)$  παίρνει την μορφή της παρακάτω συνάρτησης:

$$f(d) = \begin{cases} 1 & \text{αν } d > 0,55 \\ d/0,55 & \text{αν } 0 < d < 0,55 \\ 0 & \text{αν } d \leq 0 \end{cases} \quad (3.4-9)$$

Σε αυτό το κριτήριο πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η μεγαλύτερη τιμή της συνάρτησης είναι η χειρότερη τιμή του γενικευμένου κριτηρίου.

**Πίνακας 3.4-10. Παραγόμενη ποσότητα ιλύος από την αποικοδόμηση του BOD<sub>5</sub> σε κάθε τεχνολογία επεξεργασίας αποβλήτων.**

| Τεχνολογία επεξεργασίας αποβλήτων | Παραγόμενη ιλύς [kgDS/kgBOD <sub>5</sub> ] | Τιμή της παραγόμενης ιλύος που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των τεχνολογιών |
|-----------------------------------|--|--|
| Δραστική ιλύς                     | 0,6  | 0,6  |
| Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης        | έως 0,3                                    | 0,3  |
| Βιολογικό φίλτρο                  | 0,3-0,5                                    | 0,4  |
| Εμβαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο    | 0,5-0,7                                    | 0,6  |
| Βιορότορες (RBCs)                 | 0,6-1,1                                    | 0,85   |

#### 3.4.4 Εκμετάλλευση πόρων

##### 3.4.4.1 Ηλεκτρική ενέργεια

Το ενεργειακό ισοζύγιο για κάθε τεχνολογία βιολογικής επεξεργασίας των αποβλήτων απεικονίζει την ενέργεια την οποία καταναλίσκεται ή παράγεται στην όλη διεργασία [10]. Στην τεχνολογία της αερόβιας επεξεργασίας για την οποία γίνεται η ανάλυση, το ισοζύγιο της ενέργειας είναι αρνητικό, δηλαδή έχουμε μόνιμα κατανάλωση ενέργειας στο σύστημα μας κατά την διάρκεια όλης της διεργασίας.

Η ενέργεια η οποία χρησιμοποιείται σε κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας είναι ηλεκτρική. Η ηλεκτρική ενέργεια καταναλίσκεται κυρίως είτε για την παροχή οξυγόνου στα απόβλητα είτε για άντληση και ανακυκλοφορία των αποβλήτων στο σύστημα επεξεργασίας.

Η μονάδα μέτρησης η οποία καθορίζει το μέγεθος της καταναλισκόμενης ενέργειας στην κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας είναι οι kWh ανά kgBOD<sub>5</sub> απομάκρυνσης από τα απόβλητα.

Η δραστική ιλύς είναι η τεχνολογία με την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα απομάκρυνσης βιολογικού φορτίου. Η τιμή της από βιβλιογραφικές αναφορές είναι 2,1 kWh/kgBOD<sub>5</sub> [14] που απομακρύνεται από τα απόβλητα. Αντίστοιχα για τις τεχνολογίες του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης, το βιολογικό φίλτρο το εμβαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο και τους βιορότορες είναι 2kWh/kgBOD<sub>5</sub>, 0,39kWh/kgBOD<sub>5</sub> [14], 1kWh/kgBOD<sub>5</sub>, 0,86kWh/kgBOD<sub>5</sub> [14].

Για την σύγκριση των τιμών πρέπει να ορίσουμε την συνάρτηση  $f(d)$  του γενικευμένου κριτηρίου και τις τιμές του κατωφλιού αδιαφορίας ( $q_j$ ) και του κατωφλιού προτίμησης ( $p_j$ ). Οι τιμές των κατωφλίων  $q_j$  και  $p_j$  που ορίζουμε, λαμβάνουν τιμές αντίστοιχα 0kWh/kgBOD<sub>5</sub> και 1,7kWh/kgBOD<sub>5</sub>. Για την τιμή  $q_j$  θεωρούμε ότι οποιαδήποτε διαφορά κατανάλωσης ενέργειας είναι σημαντική ενώ αντίστοιχα για την τιμή  $p_j$  δίνουμε την τιμή της μέγιστης διαφοράς που μπορεί να υπάρξει.

Έτσι λοιπόν, η συνάρτηση  $f(d)$  παίρνει την μορφή της παρακάτω συνάρτησης:

$$f(d) = \begin{cases} 1 & \text{αν } d > 1,7 \\ d/1,7 & \text{αν } 0 < d < 1,7 \\ 0 & \text{αν } d \leq 0 \end{cases} \quad (3.4-10)$$

Σε αυτό το κριτήριο πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η μεγαλύτερη τιμή της συνάρτησης είναι η χειρότερη τιμή του γενικευμένου κριτηρίου.

**Πίνακας 3.4-11. Καταναλισκόμενη ενέργεια τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων.**

| Τεχνολογία επεξεργασίας αποβλήτων | Καταναλισκόμενη ενέργεια [kWh/kgBOD <sub>5</sub> ] |
|-----------------------------------|--|
| Δραστική ιλύς                     | 2,1  |
| Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης        | 2  |
| Βιολογικό φίλτρο                  | 0,39   |
| Εμβαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο    | 1  |
| Βιορότορες (RBCs)                 | 0,86   |

#### 3.4.4.2 Χρήση γης

Η χρήση γης είναι ένα σημαντικό κριτήριο για την επιλογή τεχνολογίας αερόβιας επεξεργασίας αποβλήτων. Η διαθεσιμότητα της γης είναι περιορισμένη, ιδιαίτερα στο αστικό περιβάλλον, και η κατοχή της από μία μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων δεν είναι επιθυμητή [10].

Την μεγαλύτερη έκταση εγκαταστάσεων την καταλαμβάνει η τεχνολογία της δραστικής ιλύος και αυτό λόγω της απαίτησης μεγάλων αντιδραστήρων βιολογικής επεξεργασίας. Γνωρίζοντας ότι η τεχνολογία της δραστικής ιλύος έχει τις υψηλότερες απαιτήσεις σε χρήση γης, ο καθορισμός των απαιτήσεων σε χρήση γης των υπόλοιπων τεχνολογιών έχει γίνει σε σχέση με τις απαιτήσεις της τεχνολογίας της δραστικής ιλύος.

Μία αναλογική σύγκριση της απαίτησης σε γη των εγκαταστάσεων επεξεργασίας αποβλήτων απεικονίζεται στον παρακάτω πίνακα όπου φαίνεται ότι, οι τεχνολογίες οι οποίες είναι της ίδιας οικογένειας, δηλαδή το βιολογικό φίλτρο, το εμβαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο και οι βιορότορες, έχουν σχεδόν ίδιες απαιτήσεις σε χρήση γής.

Για την σύγκριση των τιμών πρέπει να ορίσουμε την συνάρτηση  $f(d)$  του γενικευμένου κριτηρίου και τις τιμές του κατωφλιού αδιαφορίας ( $q_j$ ) και του κατωφλιού προτίμησης ( $p_j$ ). Οι τιμές των κατωφλίων  $q_j$  και  $p_j$  που ορίζουμε, λαμβάνουν τιμές αντίστοιχα 0 και 0,5. Για την τιμή  $q_j$  θεωρούμε ότι οποιαδήποτε διαφορά στην χρήση γής είναι σημαντική ενώ αντίστοιχα για την τιμή  $p_j$  δίνουμε την τιμή της μέγιστης διαφοράς που μπορεί να υπάρξει.



Έτσι λοιπόν, η συνάρτηση  $f(d)$  παίρνει την μορφή της παρακάτω συνάρτησης:

$$f(d) = \begin{cases} 1 & \text{αν } d > 0,5 \\ d/0,5 & \text{αν } 0 < d < 0,5 \\ 0 & \text{αν } d \leq 0 \end{cases} \quad (3.4-11)$$

Σε αυτό το κριτήριο πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η μεγαλύτερη τιμή της συνάρτησης είναι η χειρότερη τιμή του γενικευμένου κριτηρίου.

**Πίνακας 3.4-12. Σχετική αξιολόγηση τεχνολογίας στην χρήση γής.**

| Τεχνολογία επεξεργασίας αποβλήτων | Σχετική απαίτηση σε χρήση γής |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| Δραστική ιλύς                     | 1                             |
| Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης        | 0,5                           |
| Βιολογικό φίλτρο                  | 0,65                          |
| Εμβαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο    | 0,68                          |
| Βιορότορες (RBCs)                 | 0,67                          |

#### 3.4.5 Εμπειρία εφαρμογών

Αυτή η κατηγορία των κριτηρίων αξιολογεί την εμπειρία που υπάρχει από την εφαρμογή της κάθε τεχνολογίας. Γενικά το 80% των τεχνολογιών είναι εφαρμοσμένο με επιτυχία και μόνο η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης είναι η πιο σύγχρονη σε σχέση με τις υπόλοιπες.

##### 3.4.5.1 Επίπεδο ανάπτυξης τεχνολογίας

Στο κριτήριο αυτό αξιολογείται το επίπεδο της ανάπτυξης της τεχνολογίας δηλαδή η ωριμότητα της. Όλες οι τεχνολογίες εκτός της τεχνολογίας του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης είναι ώριμες. Η εξέλιξη τους αφορά μόνο την τεχνολογία των υλικών και του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.

Για την σύγκριση των τιμών πρέπει να ορίσουμε την συνάρτηση  $f(d)$  του γενικευμένου κριτηρίου και τις τιμές του κατωφλιού αδιαφορίας ( $q_j$ ) και του κατωφλιού προτίμησης ( $p_j$ ). Οι τιμές των κατωφλίων  $q_j$  και  $p_j$  που ορίζουμε, λαμβάνουν τιμές αντίστοιχα 0 και 4. Για την τιμή  $q_j$  θεωρούμε ότι οποιαδήποτε διαφορά θεωρείται σημαντική μία και η κλίμακα βαθμολόγησης μας είναι διακριτή και έχει μικρή διαβάθμιση. Αντίστοιχα στην τιμή  $p_j$  δίνουμε την τιμή 4 η οποία είναι η μέγιστη διαφορά που μπορεί να υπάρξει.

Έτσι λοιπόν, η συνάρτηση  $f(d)$  παίρνει την μορφή της παρακάτω συνάρτησης.

$$f(d) = \begin{cases} 1 & \text{αν } d > 4 \\ d/4 & \text{αν } 0 < d < 4 \\ 0 & \text{αν } d \leq 0 \end{cases} \quad (3.4-12)$$

**Πίνακας 3.4-13. Ωριμότητα τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων.**

| Τεχνολογία επεξεργασίας αποβλήτων | Ωριμότητα     | Τιμή του επιπέδου ανάπτυξης που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των τεχνολογιών |
|-----------------------------------|---------------|---|
| Δραστική ιλύς                     | Ωριμη         | 5   |
| Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης        | Αναπτυσσόμενη | 2   |
| Βιολογικό φίλτρο                  | Ωριμη         | 5   |
| Εμβαιπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο   | Ωριμη         | 5   |
| Βιορότορες (RBCs)                 | Ωριμη         | 5   |

#### 3.4.5.2 Εμπορικές μονάδες

Σε αυτό το κριτήριο αξιολογείται η ποσότητα των εμπορικών μονάδων που έχουν ήδη γίνει σε εφαρμογές του αντιστοίχου εξεταζόμενου μεγέθους.

Από εμπειρικά δεδομένα προκύπτει ότι οι πιο εμπορικές μονάδες είναι οι μονάδες που χρησιμοποιούν την τεχνολογία της δραστικής ιλύος και οι λιγότερο εμπορικές είναι οι

μονάδες που χρησιμοποιούν την τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης. Οι υπόλοιπες τεχνολογίες είναι σε μία ενδιάμεση κατάσταση.

Για την σύγκριση των τιμών πρέπει να ορίσουμε την συνάρτηση  $f(d)$  του γενικευμένου κριτηρίου και τις τιμές του κατωφλίου αδιαφορίας ( $q_j$ ) και του κατωφλίου προτίμησης ( $p_j$ ). Οι τιμές των κατωφλίων  $q_j$  και  $p_j$  που ορίζουμε, λαμβάνουν τιμές αντίστοιχα 0 και 4. Για την τιμή  $q_j$  θεωρούμε ότι οποιαδήποτε διαφορά θεωρείται σημαντική μία και η κλίμακα βαθμολόγησης μας είναι διακριτή και έχει μικρή διαβάθμιση. Αντίστοιχα στην τιμή  $p_j$  δίνουμε την τιμή 4 η οποία είναι η μέγιστη διαφορά που μπορεί να υπάρξει.

Έτσι λοιπόν, η συνάρτηση  $f(d)$  παίρνει την μορφή της παρακάτω συνάρτησης.

$$f(d) = \begin{cases} 1 & \text{αν } d > 4 \\ d/4 & \text{αν } 0 < d < 4 \\ 0 & \text{αν } d \leq 0 \end{cases} \quad (3.4-13)$$

**Πίνακας 3.4-14. Εμπορικές μονάδες τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων.**

| Τεχνολογία επεξεργασίας αποβλήτων | Τιμή των εμπορικών μονάδων που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των τεχνολογιών |
|-----------------------------------|--|
| Δραστική ιλύς                     | 5  |
| Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης        | 1  |
| Βιολογικό φίλτρο                  | 3  |
| Εμβαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο    | 3  |
| Βιορότορες (RBCs)                 | 3  |

Πίνακας 3.4-15. Πίνακας κριτηρίων με τις αντίστοιχες τιμές για κάθε τεχνολογία.

| Κριτήρια              |  |                          | Τεχνολογίες επεξεργασίας αποβλήτων |                            |                  |                                 |                   |
|-----------------------|--|--------------------------|------------------------------------|----------------------------|------------------|---------------------------------|-------------------|
|                       | Περιγραφή                                  | Μονάδα μέτρησης          | Δραστική ιλύς                      | Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης | Βιολογικό φίλτρο | Εμβλαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο | Βιορότορες (RBCs) |
| Τεχνικά – Λειτουργικά | Βαθμός απόδοσης                            | %                        | 85-95                              | 97-99                      | 65-85            | 85-90                           | 85-90             |
|                       | Αντοχή Η/Μ                                 | Έτη                      | 12                                 | 7-8                        | 12               | 12                              | 12                |
|                       | Ευελιξία                                   | Ποιοτικά                 | Πολύ μικρή                         | Μικρή                      | Πολύ μεγάλη      | Πολύ μεγάλη                     | Πολύ μεγάλη       |
|                       | Απαιτήσεις συντήρησης κατά την λειτουργία. | Ποιοτικά                 | Πολύ μεγάλη                        | Μικρή                      | Μεγάλη           | Μέτρια                          | Μέτρια            |
| Οικονομικά            | Κόστος επένδυσης                           | €p.e.                    | 200                                | 1430                       | 156              | 160                             | 193               |
|                       | Λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης   | €/kgBOD <sub>5</sub>     | 0,60                               | 0,43                       | 0,36             | 0,39                            | 0,36              |
| Απόβλητα              | Αέρια απόβλητα (aerosols, VOCs, Οσμές)     | Ποιοτικά                 | Πολλά                              | Πολλά                      | Λίγα             | Λίγα                            | Λίγα              |
|                       | Οσμές                                      | Ποιοτικά                 | Λίγες                              | Ελάχιστες                  | Πολλές           | Αρκετές                         | Αρκετές           |
|                       | Στερεά απόβλητα (ιλύς)                     | kgDS/ kgBOD <sub>5</sub> | 0,6                                | 0,3                        | 0,3-0,5          | 0,5-0,7                         | 0,6-1,1           |
| Εκμετάλλευση πόρων    | Κατανάλωση ενέργειας                       | kWh/ kgBOD <sub>5</sub>  | 2,1                                | 2                          | 0,39             | 1                               | 0,86              |
|                       | Χρήση γης                                  | Σχετική τιμή             | 1                                  | 0,5                        | 0,65             | 0,68                            | 0,67              |
| Εμπειρία εφαρμογών    | Επίπεδο ανάπτυξης τεχνολογίας              | Ποιοτικά                 | Ωριμη                              | Όχι ώριμη                  | Ωριμη            | Ωριμη                           | Ωριμη             |
|                       | Εμπορικές μονάδες                          | Ποιοτικά                 | Πάρα Πολλές                        | Ελάχιστες                  | Αρκετές          | Αρκετές                         | Αρκετές           |

Πίνακας 3.4-16. Πίνακας κριτηρίων και τιμών για την εφαρμογή του μοντέλου της πολυκριτηριακής ανάλυσης.

| Κριτήρια              |  |                                   |                                   |                             | Τεχνολογίες επεξεργασίας αποβλήτων |                            |                  |                                 |                   |
|-----------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|----------------------------|------------------|---------------------------------|-------------------|
|                       | Περιγραφή                                  | Κατόφλι αδιαφορίας P <sub>i</sub> | Κατόφλι προτίμησης q <sub>i</sub> | Ορισμός της βέλτιστης τιμής | Δραστική ιλύς                      | Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης | Βιολογικό φίλτρο | Εμβλαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο | Βιορότορες (RBCs) |
| Τεχνικά – Λειτουργικά | Βαθμός απόδοσης                            | 1                                 | 15                                | max                         | 95                                 | 99                         | 85               | 90                              | 90                |
|                       | Αντοχή H/M                                 | 0                                 | 12                                | max                         | 12                                 | 6                          | 12               | 12                              | 12                |
|                       | Ευελιξία                                   | 0                                 | 4                                 | max                         | 1                                  | 2                          | 5                | 5                               | 5                 |
|                       | Απαιτήσεις συντήρησης κατά την λειτουργία. | 0                                 | 4                                 | max                         | 1                                  | 4                          | 2                | 3                               | 3                 |
| Οικονομικά            | Κόστος επένδυσης                           | 10                                | 1275                              | min                         | 200                                | 1430                       | 156              | 160                             | 193               |
|                       | Λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης   | 0                                 | 0,3                               | min                         | 0,6                                | 0,43                       | 0,36             | 0,39                            | 0,36              |
| Απόβλητα              | Αέρια απόβλητα (aerosols, VOCs)            | 0                                 | 4                                 | max                         | 2                                  | 2                          | 5                | 5                               | 5                 |
|                       | Οσμές                                      | 0                                 | 4                                 | max                         | 4                                  | 5                          | 2                | 3                               | 3                 |
|                       | Στερεά απόβλητα (ιλύς)                     | 0                                 | 0,55                              | min                         | 0,6                                | 0,3                        | 0,4              | 0,6                             | 0,85              |
| Εκμετάλλευση πόρων    | Κατανάλωση ενέργειας                       | 0                                 | 1,7                               | min                         | 2,1                                | 2                          | 0,39             | 1                               | 0,86              |
|                       | Χρήση γης                                  | 0                                 | 0,5                               | min                         | 1                                  | 0,5                        | 0,65             | 0,68                            | 0,67              |
| Εμπειρία εφαρμογών    | Επίπεδο ανάπτυξης τεχνολογίας              | 0                                 | 4                                 | max                         | 5                                  | 2                          | 5                | 5                               | 5                 |
|                       | Εμπορικές μονάδες                          | 0                                 | 4                                 | max                         | 5                                  | 1                          | 3                | 3                               | 3                 |

### 3.5 Συντελεστές βαρύτητας κριτηρίων

Για την ανάλυση των τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων, στα υπό ανάλυση κριτήρια θα καθοριστούν συντελεστές βαρύτητας οι οποίοι θα είναι σταθεροί για τα κριτήρια και μεταβλητοί για τις κυρίως κατηγορίες των κριτηρίων.

Οι συντελεστές βαρύτητας τόσο για τις κυρίως κατηγορίες των κριτηρίων όσο και για τα υποκριτήρια, θα είναι εκφρασμένοι σε επί τις εκατό (%) και το άθροισμα τους θα είναι πάντα 100%, τόσο στις κατηγορίες των κριτηρίων όσο και στα κριτήρια.

Ο συντελεστής βαρύτητας  $w_j$  των κριτηρίων προκύπτει από το γινόμενο του συντελεστή βαρύτητας της κατηγορίας των κριτηρίων  $w_u$  και του συντελεστή βαρύτητας του κριτηρίου στην συγκεκριμένη κατηγορία  $w_g$ .

$$w_j = w_{ug} = w_u \cdot w_g \quad (3.5-1)$$

$$\sum_1^5 w_u = 1 = 100\% \quad (3.5-2)$$

Σε κάθε κατηγορία κριτηρίων ισχύει:

$$\sum w_g = 1 = 100\% \quad (3.5-3)$$

Το  $g$  παίρνει τιμές διαφορετικές σε κάθε μια κατηγορία κριτηρίων και αυτό λόγω του διαφορετικού αριθμού κριτηρίων σε κάθε κατηγορία κριτηρίων.

Έτσι λοιπόν θα ισχύει τελικά ότι:

$$\sum_1^j w_j = 1 = 100\% \quad (3.5-4)$$

### 3.6 Σενάρια ανάλυσης τεχνολογιών

Αλλάζοντας τον συντελεστή βαρύτητας  $w_u$  και τηρώντας πάντα την βασική συνθήκη της συνάρτησης:

$$\sum_1^5 w_u = 1 = 100\%$$

δημιουργούμε σενάρια για την εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης και την διερεύνηση του αποτελέσματος σε αυτά.

Τα σενάρια που θα δημιουργηθούν βασίζονται σε κάποιο λογικό συλλογισμό αλλά πάντα είναι δεδομένη η υποκειμενικότητα του αξιολογητή.

### 3.7 Ανάλυση ευαισθησίας

Λόγω της υποκειμενικότητας που υπάρχει στην επιλογή των συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων μέσα σε κάθε μία κατηγορία κριτηρίων, δημιουργούμε μικρές αλλά σημαντικές μεταβολές σε αυτούς τους συντελεστές σε κάθε μία κατηγορία κριτηρίων κάθε φορά. Βασική συνθήκη στην μεταβολή των συντελεστών βαρύτητας είναι η:

$$\sum w_g = 1 = 100\%$$

Έτσι λοιπόν δημιουργούνται άλλοι πέντε συνδυασμοί σε κάθε σενάριο για αξιολόγηση. Αυτό σημαίνει ότι το υπολογιστικό μοντέλο θα τρέξει είκοσι φορές και θα έχουμε μία αρκετά καλή εικόνα της ιεράρχησης των τεχνολογιών.

## **4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

### ***4.1 Εισαγωγή***

Για την ανάλυση των δεδομένων που έχουν καταχωρηθεί στον πίνακα των κριτηρίων και των τεχνολογιών, θα καθοριστούν οι συντελεστές βαρύτητας των κριτηρίων και των κατηγοριών των κριτηρίων για κάθε ένα σενάριο που έχουμε καθορίσει περιγραφικά.

Από τα αποτελέσματα των θετικών και αρνητικών ροών που θα προκύψουν από το υπολογιστικό πρόγραμμα, όσον αφορά την ολική ιεράρχηση, θα υπολογιστεί η καθαρή και η σχετική ροή της κάθε τεχνολογίας από τις οποίες προκύπτει η ιεράρχηση των τεχνολογιών. Από τις τιμές των θετικών και αρνητικών ροών, προκύπτει και η μερική ιεράρχηση των τεχνολογιών ή η ασυγκρισιμότητα τους αν υπάρχει.

Από την ανάλυση ευαισθησίας που θα γίνει παρακάτω, θα αξιολογηθούν κατά τον ίδιο τρόπο τα αποτελέσματα των σεναρίων και θα μπορέσουμε να δούμε σε ποιες περιπτώσεις αλλάζει το αποτέλεσμα της κυρίαρχης τεχνολογίας.

### ***4.2 Σενάρια εφαρμογής πολυκριτηριακής ανάλυσης***

Ο καθορισμός των συντελεστών βαρύτητας σε κάθε σενάριο ανάλυσης στηρίζεται σε κάποια λογικό συλλογισμό ενώ παράλληλα συμμετέχει η υποκειμενικότητα του βαθμολογητή.



Η βασική αρχή στον καθορισμό των συντελεστών βαρύτητας είναι, να δώσουμε τον μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας μόνο σε μία από τις πέντε κατηγορίες κριτηρίων, να είναι ίδιος για κάθε σενάριο και η τιμή του να είναι το 35%. Το υπόλοιπο 65% κατανέμεται στα υπόλοιπα κριτήρια ανάλογα με το πόσο σημαντικό είναι το κριτήριο στο σενάριο που καθορίζουμε. Ο μικρότερος συντελεστής βαρύτητας δίνεται στην κατηγορία κριτηρίων όπου είναι σχεδόν αδιάφορος για το σενάριο. Αντίθετα στις κατηγορίες κριτηρίων όπου υπάρχει κάποια σημαντική συσχέτιση με το σενάριο, δίνεται ανάλογος μεγαλύτερος συντελεστής βαρύτητας.

Με βάση τον παραπάνω συλλογισμό, καταρτίζεται ο παρακάτω πίνακας όπου περιέχει τους συντελεστές βαρύτητας των κατηγοριών των κριτηρίων για κάθε σενάριο εκφρασμένο σε ποσοστό επί τις εκατό.

**Πίνακας 4.2-1 Συντελεστές βαρύτητας κατηγοριών κριτηρίων για κάθε σενάριο αξιολόγησης.**

| <b>Κατηγορίες κριτηρίων</b>  | <b>Σενάρια ανάλυσης</b>    |                    |                           |                          |
|------------------------------|----------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------------|
|                              | <b>Τεχνολογικού ρίσκου</b> | <b>Βιομηχανικό</b> | <b>Αειφόρου ανάπτυξης</b> | <b>Ακραίο οικολογικό</b> |
| <i>Τεχνικά – Λειτουργικά</i> | 35 %                       | 20 %               | 20 %                      | 20 %                     |
| <i>Οικονομικά</i>            | 20 %                       | 35 %               | 15 %                      | 10 %                     |
| <i>Απόβλητα</i>              | 20 %                       | 10 %               | 20 %                      | 35 %                     |
| <i>Εκμετάλλευση πόρων</i>    | 20 %                       | 20 %               | 35 %                      | 25 %                     |
| <i>Εμπειρία εφαρμογών</i>    | 5 %                        | 15 %               | 10 %                      | 10 %                     |

#### 4.2.1 Σενάριο τεχνολογικού ρίσκου

Το σενάριο του τεχνολογικού ρίσκου περιγράφει μία κατάσταση όπου είναι ενδιαφέροντα τα αποτελέσματα από τεχνολογικής άποψης και λιγότερο από

ενεργειακής και περιβαλλοντικής. Σχεδόν αδιάφορη δε είναι η εμπειρία εφαρμογών για την επιλογή της τεχνολογίας.

Στο σενάριο του τεχνολογικού ρίσκου, η κατηγορία κριτηρίων με τον μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας είναι τα «Τεχνικά – Λειτουργικά». Σε αυτή την κατηγορία δίνουμε τον μεγαλύτερο συντελεστή ο οποίος όπως προαναφέραμε είναι το 35%. Η κατηγορία των κριτηρίων η οποία πρέπει να λάβει τον μικρότερο συντελεστή βαρύτητας, δηλαδή το 5%, είναι η «Εμπειρία εφαρμογών», διότι στο σενάριο που περιγράφουμε δεν απαιτείται ιδιαίτερη εμπειρία από τις εξεταζόμενες τεχνολογίες.

Το υπόλοιπο 60% ισοκατανέμεται στα υπόλοιπα τρία κριτήρια διότι κανένα δεν εκφράζει περισσότερο από τα άλλα δύο το σενάριο του τεχνολογικού ρίσκου.

#### 4.2.2 Βιομηχανικό σενάριο

Στο βιομηχανικό σενάριο περιγράφεται η κατάσταση όπου θα ενδιέφερε περισσότερο τον επενδυτή βιομήχανο ή ιδιοκτήτη της μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων. Σε αυτή την περίπτωση η σημαντικότερη κατηγορία κριτηρίων είναι τα οικονομικά κριτήρια. Βέβαια σε αυτό το σενάριο έτσι όπως έχουν καταρτιστεί τα κριτήρια, καμία κατηγορία κριτηρίων δεν μπορεί να θεωρηθεί ιδιαίτερα αδιάφορη και να της δοθεί ο μικρότερος συντελεστής βαρύτητας.

Στην κατηγορία των οικονομικών κριτηρίων δίνουμε συντελεστή βαρύτητας 35% και το υπόλοιπο 65% κατανέμεται ανάλογα στις υπόλοιπες κατηγορίες κριτηρίων.

Από τα υπόλοιπα κριτήρια, σημαντικό συντελεστή βαρύτητας, δηλαδή από 20%, δίνουμε στα «Τεχνικά – Λειτουργικά» κριτήρια και στην «εκμετάλλευση των πόρων». Και τα δύο αυτά κριτήρια έχουν οικονομικές προεκτάσεις οι οποίες είναι πολύ σημαντικές για την επιλογή της τεχνολογίας.

Μικρότερη βαρύτητα αλλά όχι αμελητέα, δίνουμε στην εμπειρία εφαρμογών δίνοντας συντελεστή βαρύτητας 15%, διότι μία δοκιμασμένη τεχνολογία με πολλές εφαρμογές είναι σημαντικό κριτήριο για την επιλογή της τεχνολογίας επεξεργασίας αποβλήτων. Τέλος με δεδομένο ότι τα στερεά και αέρια απόβλητα από μία μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων είναι σε αποδεκτά επίπεδα και παράλληλα η διάθεση των στερεών αποβλήτων είναι κόστος για την βιομηχανία, δίνουμε έναν συντελεστή βαρύτητας 10%.

#### 4.2.3 Σενάριο Αειφόρου ανάπτυξης

Η βασική προϋπόθεση της αειφόρου ανάπτυξης είναι η διατήρηση του σταθερού επιπέδου κατανάλωσης. Στο σενάριο που καταρτίζουμε, το βασικό κριτήριο που θα έχει τον αντίστοιχο υψηλό συντελεστή βαρύτητας είναι η «εκμετάλλευση των πόρων», έτσι σε αυτό το κριτήριο δίδεται ο συντελεστής 35%.

Με σημαντικό συντελεστή βαρύτητας, από 20%, ακολουθούν τα «τεχνικά – λειτουργικά» κριτήρια και τα «Απόβλητα» τα οποία είναι σημαντικά για ένα σενάριο αειφόρου ανάπτυξης.

Μικρότερο αναλογικά συντελεστή βαρύτητας 15% δίνουμε στα οικονομικά κριτήρια και το μικρότερο 10% στην εμπειρία εφαρμογών.

#### 4.2.4 Οικολογικό σενάριο

Η τεχνολογίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων είναι τεχνολογίες προστασίας του περιβάλλοντος και από μόνες τους περιέχουν έναν οικολογικό χαρακτήρα.

Σε ένα ακραίο οικολογικό σενάριο περιγράφεται μία κατάσταση όπου μεγάλη βαρύτητα δίνεται στα περιβαλλοντικά κριτήρια, στην εκμετάλλευση των πόρων και στα τεχνικά – λειτουργικά κριτήρια όπου εκεί περιγράφεται το αποτέλεσμα της επεξεργασίας των αποβλήτων. Ως σημαντικότερο κριτήριο όπου δίνουμε τον μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας, δηλαδή το 35%, είναι η κατηγορία των αποβλήτων, δηλαδή τα αέρια και τα στερεά απόβλητα. Ακολουθεί η κατηγορία της εκμετάλλευσης των πόρων με 25%, όπου όπως έχουμε αναφέρει σε αυτήν αξιολογείται η κατανάλωση ενέργειας και η χρήση γης τα οποία έχουν περιβαλλοντικές προεκτάσεις.

Το υπόλοιπο 40% κατανέμεται στα υπόλοιπα κριτήρια, στα «τεχνικά – λειτουργικά» 20%, και από 10% στα οικονομικά κριτήρια και στην εμπειρία εφαρμογών. Στα «τεχνικά – λειτουργικά» κριτήρια δίνεται ο μεγαλύτερος συντελεστής βαρύτητας από το υπόλοιπο 40% διότι, σε αυτή την κατηγορία εμπεριέχεται και το κριτήριο του βαθμού απόδοσης της επεξεργασίας των αποβλήτων ο οποίος έχει άμεση σχέση με την προστασία του περιβάλλοντος και το οικολογικό σενάριο.

#### **4.3 Συντελεστές βαρύτητας κριτηρίων για κάθε κατηγορία κριτηρίων**

Για την εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης, όπως προαναφέραμε, ορίζουμε τους συντελεστές βαρύτητας κάθε ενός κριτηρίου σε κάθε μίας κατηγορία κριτηρίων. Το

άθροισμα των συντελεστών βαρύτητας της κάθε μίας κατηγορίας κριτηρίων πρέπει να είναι 100%.

Ο τρόπος με τον οποίο έχουν δοθεί οι συντελεστές βαρύτητας είναι υποκειμενικός. Έχουν προκύψει κατόπιν κάποιας λογικής σκέψης, αλλά δεν μπορούμε να πούμε ότι αφορούν κάθε είδους εφαρμογή σε οποιαδήποτε θέση. Οι συντελεστές βαρύτητας εξαρτώνται από την εφαρμογή, τα όρια εκπομπής και διάθεσης στερεών και υγρών αποβλήτων, την αξία χρήσης της γης και την θέση όπου θα γίνει η εφαρμογή.

Για τον καθορισμό των συντελεστών βαρύτητας, λάβαμε υπόψη μας τα παραπάνω με σχεδόν την ίδια βαρύτητα, δηλαδή χωρίς να υποβαθμίσουμε ιδιαίτερα κάποιες παραμέτρους επιλογής. Έτσι λοιπόν καθορίσαμε τους συντελεστές βαρύτητας των κριτηρίων οι οποίοι απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα. Αναλυτικά καθορισμός των συντελεστών βαρύτητας έγινε ως εξής:

#### Τεχνικά – Λειτουργικά κριτήρια

Τα κριτήρια στα οποία αποδίδουμε τον μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας είναι ο βαθμός απόδοσης του συστήματος και η ευελιξία. Δίνουμε από 30% στο κάθε ένα δηλαδή συνολικά 60%. Ο βασικός σκοπός της τεχνολογίας είναι επεξεργασίας των αποβλήτων με τον καλύτερο βαθμό απόδοσης και την μεγαλύτερη σταθερότητα του συστήματος, η οποία εκφράζεται από την ευελιξία. Το υπόλοιπο 40% ισοκατανέμεται στα άλλα δύο κριτήρια της αντοχής του εξοπλισμού και της απαίτησης σε συντήρηση.

### Οικονομικά κριτήρια

Τόσο το κόστος επένδυσης όσο και το λειτουργικό κόστος και το κόστος συντήρησης είναι εξίσου σημαντικά κριτήρια σε αυτή την κατηγορία. Έτσι λοιπόν δίνουμε ίδιο συντελεστή βαρύτητας και στα δύο κριτήρια.

### Απόβλητα

Μία μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, όπως έχουμε αναφέρει, είναι μία τεχνολογία προστασίας περιβάλλοντος. Δεν παύει όμως να είναι μία εγκατάσταση η οποία και αυτή έχει τις περιβαλλοντικές της επιπτώσεις. Σε αυτή την κατηγορία τα κριτήρια που έχουμε συμπεριλάβει δεν έχουν την ίδια βαρύτητα. Τα αέρια απόβλητα είναι μικρότερης σημασίας από τα στερεά. Αν και δεν έχουμε πλήρη γνώση των αέριων εκπομπών διότι εξαρτώνται σημαντικά από την σύσταση των αποβλήτων, παρόλα αυτά υπάρχει κάποια εικόνα της κατάστασης μεταξύ των τεχνολογιών και γι' αυτό τον λόγο δίνουμε έναν μικρό σχετικά συντελεστή βαρύτητας 20%. Οι οσμές είναι ιδιαίτερα ενοχλητικές αλλά η βαρύτητα τους εξαρτάται από την θέση που βρίσκεται η εγκατάσταση. Έτσι λοιπόν δίνουμε άλλο ένα 20% και σε αυτές και το υπόλοιπο 60% το δίνουμε στα στερεά απόβλητα τα οποία πέρα από τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις έχουν και ένα σημαντικό κόστος διάθεσης.

Στην ανάλυση ευαισθησίας που θα κάνουμε παρακάτω, ο συντελεστής των αέριων αποβλήτων θα διατηρηθεί σταθερός και η μεταβολή θα είναι μόνο στα άλλα δύο κριτήρια.

### Εκμετάλλευση πόρων

Στα δύο κριτήρια αυτής της κατηγορίας, το κριτήριο στο οποίο δίνουμε ένα μεγαλύτερο πλεονέκτημα έναντι του άλλου είναι η κατανάλωση ενέργειας και αυτό γιατί είναι ανεξάρτητη από την θέση η οποία θα γίνει η εγκατάσταση. Αντίθετα το κριτήριο της χρήσης γης είναι εξαρτημένο κριτήριο από την θέση της εγκατάστασης. Γι' αυτό το λόγο δίνουμε έναν μικρότερο συντελεστή βαρύτητας. Στην ανάλυση ευαισθησίας που θα κάνουμε παρακάτω, αντιστρέφουμε τους συντελεστές βαρύτητας.

### Εμπειρία εφαρμογών

Και τα δύο κριτήρια θεωρούμε ότι είναι ισοβαρή. Στην ανάλυση ευαισθησίας που θα κάνουμε παρακάτω, δίνουμε μία υπεροχή στο κριτήριο των εμπορικών μονάδων το οποίο έχει και την μεγαλύτερη διακύμανση στις τιμές του πίνακα των τεχνολογιών.

**Πίνακας 4.3-1. Πίνακας συντελεστών βαρύτητας κριτηρίων.**

| Κατηγορία κριτηρίων u           | Περιγραφή Κριτηρίων g                          | Συντελεστής Βαρύτητας | $\sum w_j$                     |
|---------------------------------|--|-----------------------|--------------------------------|
| <b>1. Τεχνικά – Λειτουργικά</b> | 1.1 Βαθμός απόδοσης                            | 30%                   | $\sum_{1.1}^{1.4} w_j = 100\%$ |
|                                 | 1.2 Αντοχή Η/Μ                                 | 20%                   |                                |
|                                 | 1.3 Ευελιξία                                   | 30%                   |                                |
|                                 | 1.4 Απαιτήσεις συντήρησης κατά την λειτουργία. | 20%                   |                                |
| <b>2. Οικονομικά</b>            | 2.1 Κόστος επένδυσης                           | 50%                   | $\sum_{2.1}^{2.2} w_j = 100\%$ |
|                                 | 2.2 Λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης   | 50%                   |                                |
| <b>3. Απόβλητα</b>              | 3.1 Αέρια απόβλητα (aerosols, VOCs)            | 20%                   | $\sum_{3.1}^{3.3} w_j = 100\%$ |
|                                 | 3.2 Οσμές                                      | 20%                   |                                |
|                                 | 3.3 Στερεά απόβλητα (ιλύς)                     | 60%                   |                                |
| <b>4. Εκμετάλλευση πόρων</b>    | 4.1 Κατανάλωση ενέργειας                       | 60%                   | $\sum_{4.1}^{4.2} w_j = 100\%$ |
|                                 | 4.2 Χρήση γης                                  | 40%                   |                                |
| <b>5. Εμπειρία εφαρμογών</b>    | 5.1 Επίπεδο ανάπτυξης τεχνολογίας              | 50%                   | $\sum_{5.1}^{5.2} w_j = 100\%$ |
|                                 | 5.2 Εμπορικές μονάδες                          | 50%                   |                                |

#### 4.4 Συντελεστές βαρύτητας κριτηρίων

Όπως αναφέραμε σε παραπάνω παράγραφο, ο συντελεστή βαρύτητας  $w_j$  των κριτηρίων προκύπτει από το γινόμενο του συντελεστή βαρύτητας της κατηγορίας των κριτηρίων  $w_u$  και του συντελεστή βαρύτητας του κριτηρίου στην συγκεκριμένη κατηγορία  $w_g$ , δηλαδή  $w_j = w_{ug} = w_u \cdot w_g$ . Ο πίνακας που θα προκύψει από αυτό το γινόμενο θα χρησιμοποιηθεί για την πολυκριτηριακή ανάλυση των τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων.

Πίνακας 4.4-1. Πίνακας συντελεστών βαρύτητας  $w_j$ ,

| Κριτήρια                                   | Σενάρια πολυκριτηριακής ανάλυσης |                    |                     |            |
|--|----------------------------------|--------------------|---------------------|------------|
|  | Βιομηχανικό                      | Αειφόρου ανάπτυξης | Τεχνολογικού Ρίσκου | Οικολογικό |
| Περιγραφή Κριτηρίων g                      |                                  |                    |                     |            |
| Βαθμός απόδοσης                            | 6,00%                            | 6,00%              | 10,50%              | 6,00%      |
| Αντοχή H/M                                 | 4,00%                            | 4,00%              | 7,00%               | 4,00%      |
| Ευελιξία                                   | 6,00%                            | 6,00%              | 10,50%              | 6,00%      |
| Απαιτήσεις συντήρησης κατά την λειτουργία. | 4,00%                            | 4,00%              | 7,00%               | 4,00%      |
| Κόστος επένδυσης                           | 17,50%                           | 7,50%              | 10,00%              | 5,00%      |
| Λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης   | 17,50%                           | 7,50%              | 10,00%              | 5,00%      |
| Αέρια απόβλητα (aerosols, VOCs)            | 2,00%                            | 4,00%              | 4,00%               | 7,00%      |
| Οσμές                                      | 2,00%                            | 4,00%              | 4,00%               | 7,00%      |
| Στερεά απόβλητα (ύλς)                      | 6,00%                            | 12,00%             | 12,00%              | 21,00%     |
| Κατανάλωση ενέργειας                       | 12,00%                           | 21,00%             | 12,00%              | 15,00%     |
| Χρήση γης                                  | 8,00%                            | 14,00%             | 8,00%               | 10,00%     |
| Επίπεδο ανάπτυξης τεχνολογίας              | 7,50%                            | 5,00%              | 2,50%               | 5,00%      |
| Εμπορικές μονάδες                          | 7,50%                            | 5,00%              | 2,50%               | 5,00%      |

#### 4.5 Αποτελέσματα υπολογιστικού μοντέλου

Μετά την εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης και την εφαρμογή του μοντέλου στο υπολογιστικό πρόγραμμα, προέκυψαν τα αποτελέσματα των θετικών και αρνητικών ροών για την κάθε μία τεχνολογία και για τα τέσσερα σενάρια. Το ίδιο το πρόγραμμα



υπολογίζει και την καθαρή και την σχετική ροή για κάθε μία τεχνολογία και για κάθε ένα σενάριο. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα τα οποία με μία πρώτη ματιά δείχνουν ότι η κυρίαρχη τεχνολογία είναι η τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου.

Για να μπορέσουμε να έχουμε μία καλύτερη εικόνα της κατάταξης των τεχνολογιών μετά τον υπολογισμό της καθαρής και σχετικής ροής, υπολογίζουμε την αδιάστατη τιμή τους έτσι ώστε δούμε ποια είναι η σχετική θέση των τεχνολογιών από την επικρατέστερη και από την πιο αδιάφορη τεχνολογία. Στην επικρατέστερη τεχνολογία δίνουμε το 100% και στην πιο αδιάφορη το 0%, και έτσι βλέπουμε την σχετική θέση των υπόλοιπων τεχνολογιών. Αυτό υπολογίζεται με το παρακάτω πηλίκο:

$$\frac{f_n - \min\{f_{n1}, \dots, f_{n5}\}}{\max\{f_{n1} - \min\{f_{n1}, \dots, f_{n5}\}, \dots, f_{n5} - \min\{f_{n1}, \dots, f_{n5}\}\}} \quad (4.5-1)$$

Ο σκοπός αυτής της κατάταξης είναι η απεικόνιση της μεταβολής της θέσης της κάθε τεχνολογίας σε κάθε ένα σενάριο.

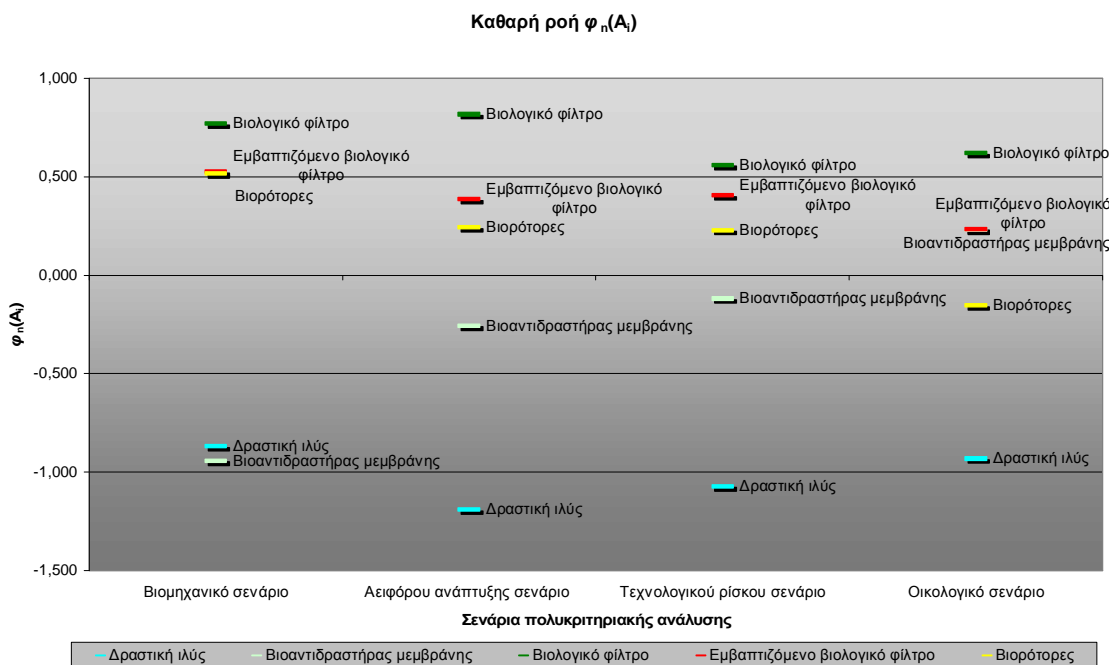
Αφού παρουσιάσουμε την κατάταξη των τεχνολογιών σε κάθε ένα σενάριο στην ολική ιεράρχηση τους, απεικονίζουμε την μερική ιεράρχηση των τεχνολογιών σε κάθε ένα σενάριο. Από αυτό το διάγραμμα μπορεί εύκολα ο αποφασίζον να δει εάν κάποιες τεχνολογίες βρίσκονται σε κατάσταση «ασυγκρισιμότητας» και να κρίνει ανάλογα την κατάταξη τους στην ολική ιεράρχηση των τεχνολογιών.

**Πίνακας 4.5-1. Αποτελέσματα ροών από την εφαρμογή του μοντέλου της πολυκριτηριακής ανάλυσης.**

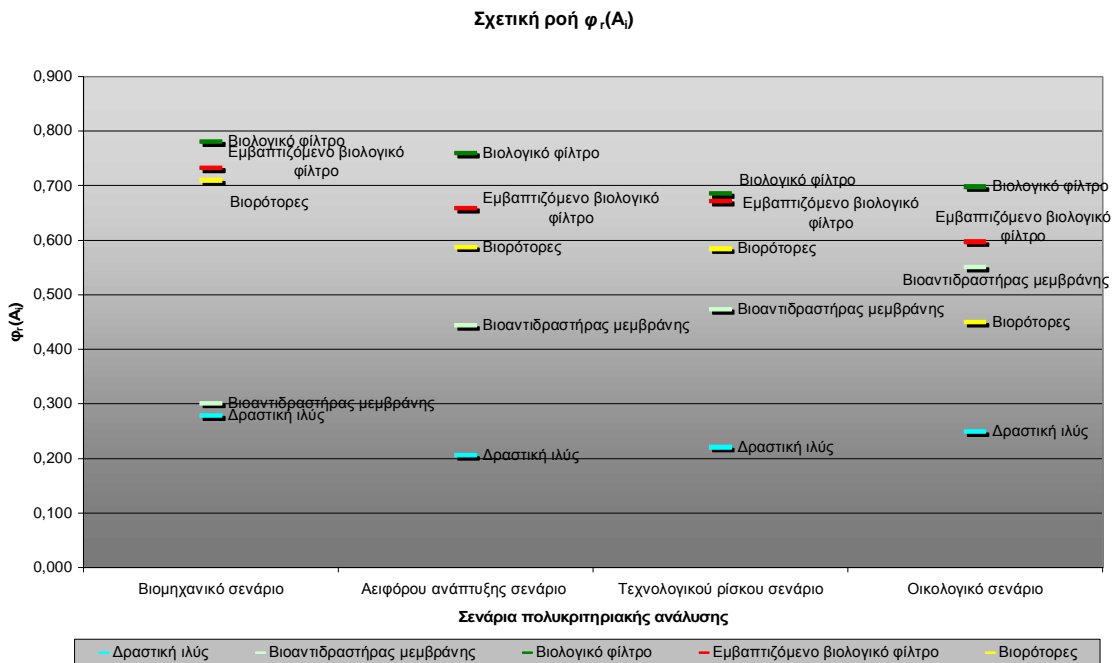
| <i>Σενάρια</i>              | <i>Ροές</i>                   | <i>Τεχνολογίες Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων</i> |                                   |                         |  |                   |
|-----------------------------|-------------------------------|---|-----------------------------------|-------------------------|--|-------------------|
|                             |                               | <i>Δραστική ιλύς</i>                            | <i>Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης</i> | <i>Βιολογικό φίλτρο</i> | <i>Εμβλαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο</i> | <i>Βιορότορες</i> |
| Βιομηχανικό σενάριο         | Θετική ροή $\varphi^>(A_i)$   | 0,546   | 0,715                             | 1,070                   | 0,828                                  | 0,875             |
|                             | Αρνητική ροή $\varphi^<(A_i)$ | 1,415   | 1,658                             | 0,300                   | 0,302                                  | 0,358             |
|                             | Καθαρή ροή $\varphi_n(A_i)$   | -0,869  | -0,943                            | 0,770                   | 0,527                                  | 0,517             |
|                             | Σχετική ροή $\varphi_r(A_i)$  | 0,278   | 0,301                             | 0,781                   | 0,733                                  | 0,710             |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο  | Θετική ροή $\varphi^>(A_i)$   | 0,416   | 1,010                             | 1,194                   | 0,802                                  | 0,822             |
|                             | Αρνητική ροή $\varphi^<(A_i)$ | 1,607   | 1,266                             | 0,377                   | 0,415                                  | 0,578             |
|                             | Καθαρή ροή $\varphi_n(A_i)$   | -1,191  | -0,257                            | 0,817                   | 0,387                                  | 0,244             |
|                             | Σχετική ροή $\varphi_r(A_i)$  | 0,205   | 0,444                             | 0,760                   | 0,659                                  | 0,587             |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο | Θετική ροή $\varphi^>(A_i)$   | 0,423   | 1,065                             | 1,033                   | 0,792                                  | 0,793             |
|                             | Αρνητική ροή $\varphi^<(A_i)$ | 1,497   | 1,185                             | 0,473                   | 0,387                                  | 0,565             |
|                             | Καθαρή ροή $\varphi_n(A_i)$   | -1,074  | -0,120                            | 0,560                   | 0,405                                  | 0,229             |
|                             | Σχετική ροή $\varphi_r(A_i)$  | 0,220   | 0,473                             | 0,686                   | 0,672                                  | 0,584             |
| Οικολογικό σενάριο          | Θετική ροή $\varphi^>(A_i)$   | 0,462   | 1,252                             | 1,092                   | 0,719                                  | 0,676             |
|                             | Αρνητική ροή $\varphi^<(A_i)$ | 1,395   | 1,021                             | 0,472                   | 0,485                                  | 0,828             |
|                             | Καθαρή ροή $\varphi_n(A_i)$   | -0,933  | 0,231                             | 0,620                   | 0,234                                  | -0,152            |
|                             | Σχετική ροή $\varphi_r(A_i)$  | 0,249   | 0,551                             | 0,698                   | 0,597                                  | 0,449             |

Πίνακας 4.5-2. Αδιάστατες τιμές καθαρής και σχετικής ροής.

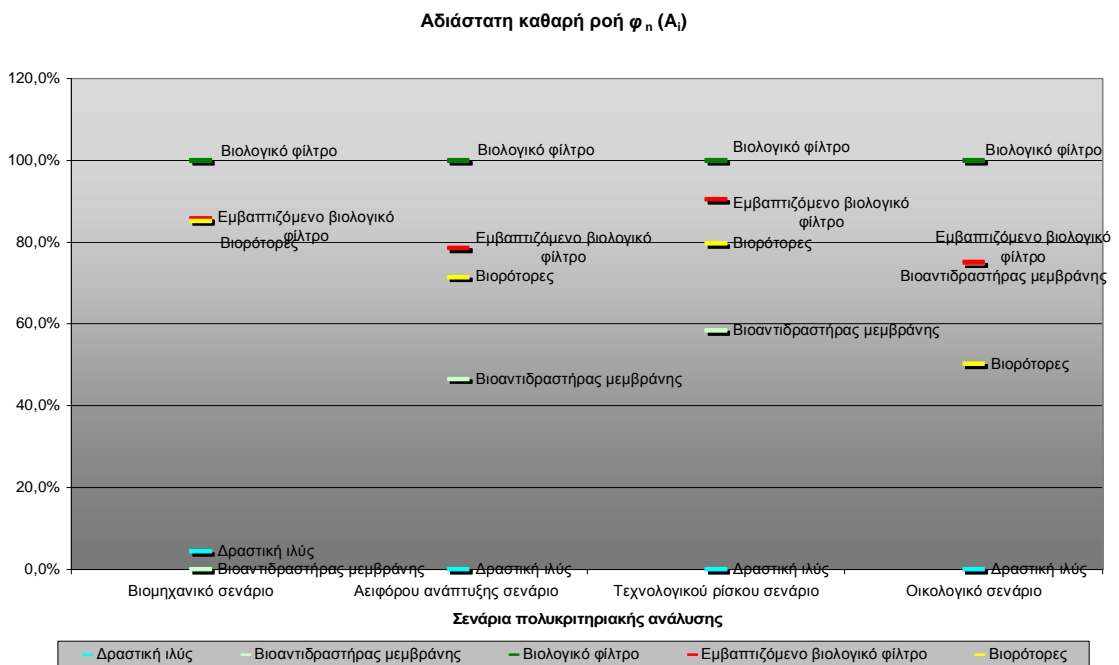
| Σενάρια                     | Ροές                         | Τεχνολογίες Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων |                            |                  |                                 |            |
|-----------------------------|------------------------------|--|----------------------------|------------------|---------------------------------|------------|
|                             |                              | Δραστική ιλύς                            | Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης | Βιολογικό φίλτρο | Εμβλαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο | Βιορότορες |
| Βιομηχανικό σενάριο         | Καθαρή ροή $\varphi_n(A_i)$  | 4,3%                                     | 0,0%                       | 100,0%           | 85,8%                           | 85,2%      |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο  |                              | 0,0%                                     | 46,6%                      | 100,0%           | 78,6%                           | 71,5%      |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο |                              | 0,0%                                     | 58,4%                      | 100,0%           | 90,5%                           | 79,7%      |
| Οικολογικό σενάριο          |                              | 0,0%                                     | 74,9%                      | 100,0%           | 75,1%                           | 50,3%      |
| Βιομηχανικό σενάριο         | Σχετική ροή $\varphi_r(A_i)$ | 0,0%                                     | 4,5%                       | 100,0%           | 90,5%                           | 85,8%      |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο  |                              | 0,0%                                     | 43,0%                      | 100,0%           | 81,8%                           | 68,9%      |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο |                              | 0,0%                                     | 54,4%                      | 100,0%           | 96,9%                           | 78,2%      |
| Οικολογικό σενάριο          |                              | 0,0%                                     | 67,2%                      | 100,0%           | 77,5%                           | 44,6%      |



Διάγραμμα 4.5-1. Διάγραμμα της καθαρής ροής  $\varphi_n(A_i)$  για κάθε μία τεχνολογία σε κάθε ένα σενάριο ανάλυσης.

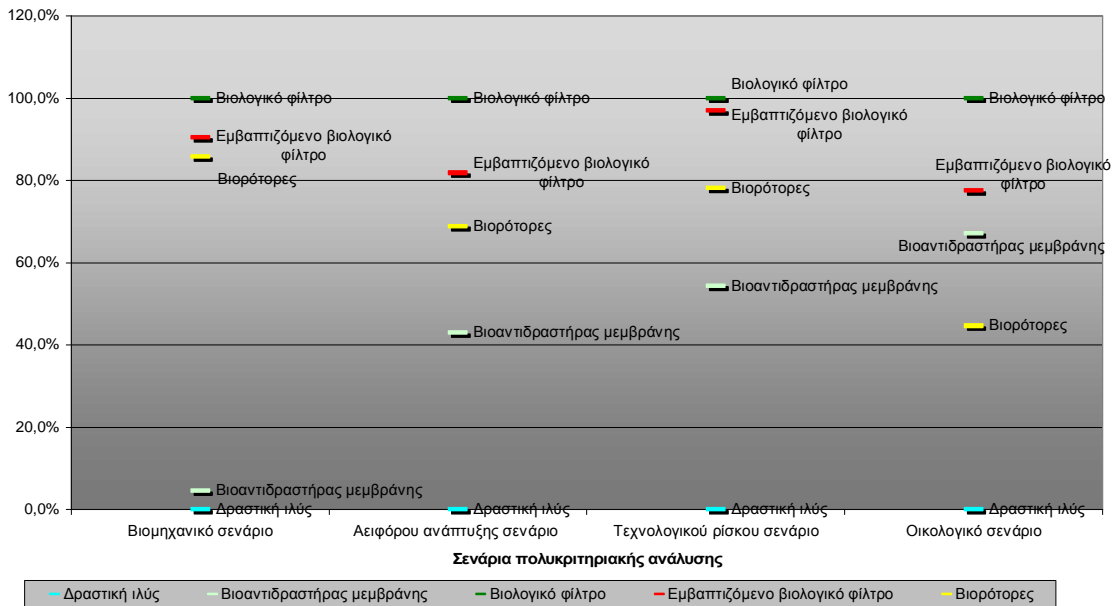


**Διάγραμμα 4.5-2. Διάγραμμα της σχετικής ροής  $\varphi_r(A_i)$  για κάθε μία τεχνολογία σε κάθε ένα σενάριο ανάλυσης.**



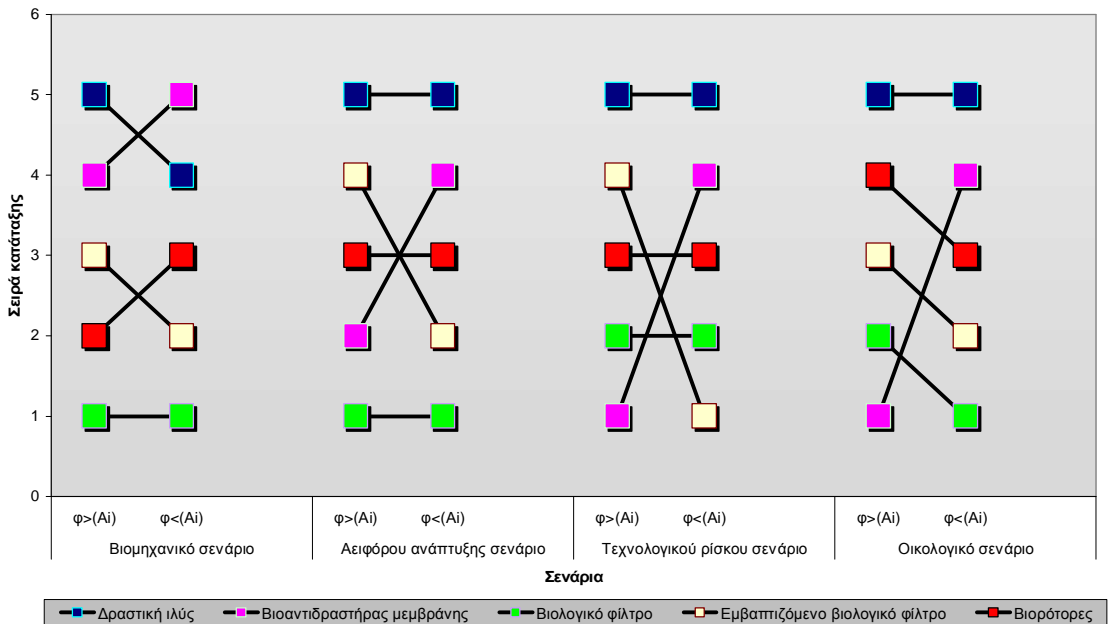
**Διάγραμμα 4.5-3. Διάγραμμα της αδιάστατης καθαρής ροής  $\varphi_n(A_i)$  για κάθε μία τεχνολογία σε κάθε ένα σενάριο ανάλυσης.**

Αδιάστατη σχετική ροή  $\varphi_r(A_i)$



Διάγραμμα 4.5-4. Διάγραμμα της αδιάστατης σχετικής ροής  $\varphi_r(A_i)$  για κάθε μία τεχνολογία σε κάθε ένα σενάριο ανάλυσης.

Μερική Ιεράρχιση Τεχνολογιών



Διάγραμμα 4.5-5. Διάγραμμα της σχετικής θέσης της θετικής και της αρνητικής ροής για κάθε μία τεχνολογία σε κάθε ένα σενάριο ανάλυσης.

#### 4.5.1 Βιομηχανικό σενάριο

Στην ολική ιεράρχηση των τεχνολογιών, η τεχνολογία που έχει την μεγαλύτερη καθαρή ροή ( $\varphi_n=0,77$ ) είναι τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου. Ακολουθούν η τεχνολογίες του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου και η τεχνολογία του βιορότορα οι οποίες είναι πολύ κοντά στην σχετική κατάταξη με την τεχνολογία που βρίσκεται στην πρώτη θέση.

Σε κατάσταση αδιαφορίας είναι οι τεχνολογίες του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης και της δραστικής ιλύος με την σειρά που αναφέρονται. Είναι πολύ κοντά μεταξύ τους και σε ασταθή κατάσταση σε σημείο που αλλάζει η σειρά κατάταξη τους στην σχετική ροή.

Η τεχνολογία που έχει την μεγαλύτερη σχετική ροή ( $\varphi_r=0,78$ ) είναι ξανά η τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου. Η ίδια κατάταξη που ισχύει στην καθαρή ροή ισχύει και στην σχετική ροή με την μόνη διαφορά ότι οι δύο τεχνολογίες οι οποίες είναι οι πιο αδιάφορες βρίσκονται σε ανάστροφη σειρά, δηλαδή η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης είναι επικρατέστερη από την τεχνολογία της δραστικής ιλύος.

Στην μερική ιεράρχηση των τεχνολογιών η σειρά κατάταξης έχει μία διαφορετική εικόνα. Καθαρά στην πρώτη θέση βρίσκεται η τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου, στην δεύτερη θέση βρίσκεται η τεχνολογία του βιορότορα και του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου και στην τρίτη θέση η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης και της δραστικής ιλύος. Σε αυτή την κατάταξη παρουσιάζεται το φαινόμενο της ασυγκρισιμότητας.

#### 4.5.2 Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο

Στην ολική ιεράρχηση των τεχνολογιών, η τεχνολογία που έχει την μεγαλύτερη καθαρή ροή ( $\varphi_n=0,817$ ) είναι τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου. Ακολουθούν η τεχνολογίες του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου και η τεχνολογία του βιορότορα οι οποίες βρίσκονται σε απόσταση και μεταξύ τους και σε σχέση με την κυρίαρχη τεχνολογία.

Σε κατάσταση αδιαφορίας είναι οι τεχνολογίες της δραστηκής ιλύος και του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης με την σειρά που αναφέρονται. Σε αυτό το σενάριο βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους.

Η τεχνολογία που έχει την μεγαλύτερη σχετική ροή ( $\varphi_r=0,76$ ) είναι ξανά η τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου. Η ίδια κατάταξη που ισχύει στην καθαρή ροή ισχύει και στην σχετική ροή.

Στην μερική ιεράρχηση των τεχνολογιών η σειρά κατάταξης έχει μία διαφορετική εικόνα. Καθαρά στην πρώτη θέση βρίσκεται η τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου, στην δεύτερη θέση η τεχνολογία του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου και ο βιοαντιδραστήρας μεμβράνης, στην τρίτη θέση η τεχνολογία του βιορότορα και στην τέταρτη θέση η τεχνολογία της δραστηκής ιλύος. Σε αυτή την κατάταξη παρουσιάζεται το φαινόμενο της ασυγκρισιμότητας.

#### 4.5.3 Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο

Στην ολική ιεράρχηση των τεχνολογιών, η τεχνολογία που έχει την μεγαλύτερη καθαρή ροή ( $\varphi_n=0,56$ ) είναι τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου. Ακολουθούν η τεχνολογίες του

εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου και η τεχνολογία του βιορότορα. Η τεχνολογία του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου βρίσκεται σε μικρή απόσταση από την επικρατέστερη τεχνολογία.

Σε κατάσταση αδιαφορίας είναι οι τεχνολογίες της δραστηκής ιλύος και του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης με την σειρά που αναφέρονται οι οποίες βρίσκονται σε αρκετή απόσταση μεταξύ τους και σε αυτό το σενάριο.

Η τεχνολογία που έχει την μεγαλύτερη σχετική ροή ( $\varphi_r=0,68$ ) είναι ξανά η τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου. Η ίδια κατάταξη που ισχύει στην καθαρή ροή ισχύει και στην σχετική ροή. Βέβαια σε αυτήν την περίπτωση η τεχνολογία του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου εμφανίζεται πάρα πολύ κοντά με την τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου. Εδώ παρατηρείται το φαινόμενο, σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια, ότι οι τεχνολογίες αρχίζουν και συγκλίνουν μεταξύ τους μειώνοντας την σχετική τους διαφορά.

Στην μερική ιεράρχηση των τεχνολογιών η σειρά κατάταξης έχει μία διαφορετική εικόνα. Καθαρά στην δεύτερη και τρίτη θέση βρίσκονται οι τεχνολογίες του βιολογικού φίλτρου και του βιορότορα αντίστοιχα. Στην πρώτη θέση εμφανίζονται οι τεχνολογίες του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης και του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου. Και σε αυτή την κατάταξη παρουσιάζεται το φαινόμενο της ασυγκρισιμότητας.

#### 4.5.4 Οικολογικό σενάριο

Σε αυτό το σενάριο, στην ολική ιεράρχηση των τεχνολογιών, η τεχνολογία που έχει την μεγαλύτερη καθαρή ροή ( $\varphi_n=0,62$ ) είναι τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου.



Ακολουθούν η τεχνολογίες του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου και η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης οι οποίες βρίσκονται σχεδόν στην ίδια θέση. Τέλος στην δυσμενέστερη θέση βρίσκονται με την σειρά η τεχνολογία του βιορότορα και η τεχνολογία της δραστηκής ιλύος με αρνητικές τιμές. Αυτό σημαίνει ότι οι θετικές ροές είναι μικρότερες από τις αρνητικές ροές.

Η τεχνολογία που έχει την μεγαλύτερη σχετική ροή ( $\varphi_r=0,698$ ) είναι ξανά η τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου. Η ίδια κατάταξη που ισχύει στην καθαρή ροή ισχύει και στην σχετική ροή. Σε αυτή την περίπτωση οι τεχνολογίες όλες βρίσκονται στην κατάταξη πιο κοντά μεταξύ τους σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια.

Στην μερική ιεράρχηση των τεχνολογιών η σειρά κατάταξης παρουσιάζει μία ιδιαιτερότητα σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια. Η μόνη τεχνολογία που έχει ξεκάθαρη θέση είναι η δραστηκή ιλύς η οποία βρίσκεται στην τελευταία σειρά κατάταξης. Οι υπόλοιπες τεχνολογίες βρίσκονται σε μία κατάσταση ασυγκρισιμότητας η οποία οφείλεται στην θέση όπου έχει η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης. Η τεχνολογία αυτή έχει την πρώτη θέση στις θετικές ροές αλλά έχει την τέταρτη θέση στις αρνητικές ροές. Αυτές οι δύο καταστάσεις είναι εντελώς αντίρροπες.

## **4.6 Ανάλυση ευαισθησίας**

### **4.6.1 Συντελεστές βαρύτητας μοντέλου ανάλυσης ευαισθησίας**

Η βασική ανάλυση των δεδομένων του πίνακα των κριτηρίων και των τεχνολογιών για κάθε σενάριο επιλογής τεχνολογίας, θα γίνει με τους συντελεστές βαρύτητας των κριτηρίων της κάθε βασικής κατηγορίας κριτηρίων.

Όπως έχει ήδη καθοριστεί, για κάθε μία κατηγορία κριτηρίων έχει δοθεί ένας συντελεστής βαρύτητας για κάθε κριτήριο. Με αυτό το δεδομένο, αλλάζουμε κάθε φορά τους συντελεστής βαρύτητας των κριτηρίων σε κάθε μία κατηγορία κριτηρίων κρατώντας σταθερούς τους υπόλοιπους συντελεστές των υπόλοιπων κριτηρίων. Έτσι δημιουργούμε ένα μοντέλο ανάλυσης το οποίο αποτελείται από πέντε συνδυασμούς. Αυτοί οι συντελεστές θα συνδυαστούν και με τα σενάρια ανάλυσης οπότε θα προκύψουν συνολικά είκοσι ακόμα συνδυασμοί. Με αυτό τον τρόπο θα δούμε ποια θα είναι η συμπεριφορά της ιεράρχησης των τεχνολογιών και κατά πόσο το μοντέλο μας είναι ευαίσθητο σε τέτοιου είδους διακυμάνσεις των συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων.

Οι συντελεστές βαρύτητας για κάθε ένα σενάριο της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί. Ο τρόπος που γίνεται αλλαγή στους συντελεστές βαρύτητας είναι υποκειμενικός και γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξομαλυνθεί ο πιθανός λανθασμένος τρόπος καθορισμού των βασικών συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων.

Πίνακας 4.6-1. Πίνακας συντελεστών βαρύτητας κριτηρίων για την ανάλυση ευαισθησίας.

| Κριτήρια              |  | Συντελεστές βαρύτητας ανάλυσης ευαισθησίας |                         |                         |                         |                         |                         |
|-----------------------|--|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Κατηγορία κριτηρίων   | Περιγραφή                                  | Συντελεστής Βαρύτητας                      | Συντελεστής Βαρύτητας Α | Συντελεστής Βαρύτητας Β | Συντελεστής Βαρύτητας Γ | Συντελεστής Βαρύτητας Δ | Συντελεστής Βαρύτητας Ε |
| Τεχνικά – Λειτουργικά | Βαθμός απόδοσης                            | 30%  | 35%                     | 30%                     | 30%                     | 30%                     | 30%                     |
|                       | Αντοχή Η/Μ                                 | 20%  | 15%                     | 20%                     | 20%                     | 20%                     | 20%                     |
|                       | Ευελιξία                                   | 30%  | 35%                     | 30%                     | 30%                     | 30%                     | 30%                     |
|                       | Απαιτήσεις συντήρησης κατά την λειτουργία. | 20%  | 15%                     | 20%                     | 20%                     | 20%                     | 20%                     |
| Οικονομικά            | Κόστος επένδυσης                           | 50%  | 50%                     | 40%                     | 50%                     | 50%                     | 50%                     |
|                       | Λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης   | 50%  | 50%                     | 60%                     | 50%                     | 50%                     | 50%                     |
| Απόβλητα              | Αέρια απόβλητα (aerosols, VOCs)            | 20%  | 20%                     | 20%                     | 20%                     | 20%                     | 20%                     |
|                       | Οσμές                                      | 20%  | 20%                     | 20%                     | 40%                     | 20%                     | 20%                     |
|                       | Στερεά απόβλητα (ιλύς)                     | 60%  | 60%                     | 60%                     | 40%                     | 60%                     | 60%                     |
| Εκμετάλλευση πόρων    | Κατανάλωση ενέργειας                       | 60%  | 60%                     | 60%                     | 60%                     | 40%                     | 60%                     |
|                       | Χρήση γης                                  | 40%  | 40%                     | 40%                     | 40%                     | 60%                     | 40%                     |
| Εμπειρία εφαρμογών    | Επίπεδο ανάπτυξης τεχνολογίας              | 50%  | 50%                     | 50%                     | 50%                     | 50%                     | 40%                     |
|                       | Εμπορικές μονάδες                          | 50%  | 50%                     | 50%                     | 50%                     | 50%                     | 60%                     |

#### 4.6.2 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

Στο μεγαλύτερο ποσοστό των περιπτώσεων η κυρίαρχη τεχνολογία παραμένει η τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου. Σε μία και μόνο περίπτωση υπάρχει αλλαγή της κυρίαρχης θέσης που βέβαια σε αυτή την περίπτωση η τεχνολογία του βιολογικού

φίλτρου παραμένει πολύ κοντά με την κυρίαρχη τεχνολογία. Αναλυτικότερα αυτά που προκύπτουν από την ανάλυση ευαισθησίας αναπτύσσονται παρακάτω.

### Βιομηχανικό σενάριο

Στο βιομηχανικό σενάριο είναι ξεκάθαρη η κυρίαρχη θέση της τεχνολογίας του βιολογικού φίλτρου στην Β και Ε περίπτωση της ανάλυσης ευαισθησίας. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις υπάρχει μία κατάσταση ασυγκρισιμότητας. Βέβαια η κατάσταση είναι πιο ξεκάθαρη όταν κάνουμε ανάλυση της καθαρής και της σχετικής ροής, που καθιστά κυρίαρχη την τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου. Στην Γ περίπτωση παρουσιάζεται το φαινόμενο μείωσης της διαφοράς της κυρίαρχης θέσης από τις δύο επόμενες τεχνολογίες που ακολουθούν, δηλαδή την τεχνολογία του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου και του βιορότορα. Αυτό συμβαίνει διότι έχει δοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα στο κριτήριο των οσμών από ότι στο κριτήριο των στερεών απόβλητων με αποτέλεσμα την μείωση της θετικής ροής με ταυτόχρονη αύξηση της αρνητικής ροής στην τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου.

Στα χαμηλά επίπεδα ιεράρχησης εμφανίζεται στην περίπτωση Β και Δ αντιστροφή της θέσης της τεχνολογίας του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης με την τεχνολογία της δραστικής ιλύος. Η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης εμφανίζεται στην τέταρτη θέση από την τελευταία θέση που βρισκόταν. Αυτό προκύπτει διότι αφ' ενός δίδεται μεγαλύτερη βαρύτητα στην περίπτωση Β στο λειτουργικό κόστος με ταυτόχρονη μείωση του συντελεστή βαρύτητας του σταθερού κόστους και αφ' ετέρου στην περίπτωση Δ μεγαλώνει ο συντελεστής βαρύτητας της χρήσης γης όπου σε αυτή την περίπτωση εμφανίζεται αρκετά πλεονεκτικότερη η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης.

### Σενάριο Αειφόρου ανάπτυξης

Εξακολουθεί να είναι ξεκάθαρη η κυρίαρχη θέση της τεχνολογίας του βιολογικού φίλτρου χωρίς να υπάρχει κίνδυνος «απειλής» από την αμέσως επόμενη τεχνολογία του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου μια και η διαφορά των δύο τεχνολογιών στην σχετική τους θέση είναι κατά μέσο όρο 20%.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα σενάρια Γ και Δ της ανάλυσης ευαισθησίας. Ειδικότερα στο Γ σενάριο εμφανίζεται μία μείωση της διαφορά της καθαρής ροής των τεχνολογιών που βρίσκονται στις τρεις πρώτες θέσεις. Αυτό συμβαίνει διότι έχει δοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα στο κριτήριο των οσμών από ότι στο κριτήριο των στερεών απόβλητων με αποτέλεσμα την μείωση της θετικής ροής με ταυτόχρονη αύξηση της αρνητικής ροής στην τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου. Όσον αφορά το Δ σενάριο υπάρχει μία τάση ανόδου της θέσης στην τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι έχει μεγάλο πλεονέκτημα η τεχνολογία στο κριτήριο χρήσης γής.

Από το διάγραμμα της μερικής ιεράρχησης των τεχνολογιών (Διάγραμμα 4.6-22), στα περισσότερα σενάρια της ανάλυσης ευαισθησίας είναι ξεκάθαρη η κυρίαρχη θέση της τεχνολογίας του βιολογικού φίλτρου. Ξεκάθαρη θέση εμφανίζουν και οι τεχνολογίες της δραστικής ιλύος (πέμπτη θέση) και του βιορότορα (τρίτη θέση).

Στο σενάριο Γ και Δ εμφανίζεται το φαινόμενο της ασυγκρισιμότητας για την πρώτη και δεύτερη θέση. Είναι δε χαρακτηριστικό ότι στο Δ σενάριο η τεχνολογία του

βιολογικού φίλτρου έχει την πρώτη θέση η θετική ροή και την τέταρτη θέση στην αρνητική ροή.

#### Σενάριο Τεχνολογικού ρίσκου

Και σε αυτό το σενάριο υπάρχει έντονη η κυριαρχία της τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου αλλά με μία διαφορά κατά μέσο όρο από την αμέσως επόμενη κατά 10%, μικρότερη σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια. Ειδικότερα στην Γ περίπτωση η διαφορά της πρώτης με την δεύτερη θέση στην κατάταξη της αδιάστατης καθαρής ροής είναι μόλις 2,2% και η πρώτη με την τρίτη είναι 8%, μικρότερη από ότι είναι η διαφορά πρώτης με δεύτερη στα άλλα σενάρια.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα σενάρια Γ και Δ της ανάλυσης ευαισθησίας στην σχετική ροή  $\varphi_r$ . Στο Γ σενάριο εμφανίζεται η τεχνολογία του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου να έχει την κυρίαρχη θέση με δεύτερη την τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου με μικρή διαφορά μεταξύ τους και τρίτη την τεχνολογία του βιορότορα πολύ κοντά στην δεύτερη θέση. Στο Δ σενάριο εμφανίζονται οι δύο τεχνολογίες πρακτικά στην ίδια θέση και να ακολουθεί με 20,7% διαφορά η τεχνολογία του βιορότορα. Αυτό συμβαίνει διότι και οι τρεις πρώτες τεχνολογίες είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους και είναι φυσικό να υπάρχει γενικά μία κατάσταση αστάθειας στην θέση τους.

Παρατηρώντας το διάγραμμα της μερικής ιεράρχησης των τεχνολογιών (Διάγραμμα 4.6-23), υπάρχει στην πρώτη θέση μία κατάσταση ασυγκρισιμότητας. Ξεκάθαρη θέση εμφανίζουν και οι τεχνολογίες της δραστηκής ιλύος (πέμπτη θέση) του βιορότορα (τρίτη θέση) στις περισσότερες περιπτώσεις και του βιολογικού φίλτρου όπου εμφανίζεται

στην δεύτερη θέση και όχι στην πρώτη. Η κατάσταση ασυγκρισιμότητας που εμφανίζεται στην Γ και Δ περίπτωση μεταξύ της τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου και του βιορότορα, δημιουργεί αυτή την αλλαγή θέσης στην σχετική ροή.

### Οικολογικό Σενάριο

Η τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου είναι και σε αυτήν την περίπτωση σαφώς η επικρατέστερη με διαφορά σε πολλές περιπτώσεις έως και 25%. Είναι ευδιάκριτο το γεγονός ότι σε αυτό το σενάριο υπάρχει η μεγαλύτερη διασπορά στην διαφορά πρώτης με δεύτερη θέση, η οποία δεν είναι και ξεκάθαρη. Στην δεύτερη και τρίτη θέση εμφανίζονται οι τεχνολογίες του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου και του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης. Η διαφορά τους κατά μέσο όρο είναι πολύ μικρή παρά μόνο στην Δ περίπτωση όπου εμφανίζεται η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης να έχει την δεύτερη θέση και με μικρή διαφορά μόνο 5,3%.

Είναι ενδιαφέρον να διερευνήσουμε, γιατί η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης κατέχει την δεύτερη θέση στην Δ περίπτωση, ενώ σε όλα τα υπόλοιπα σενάρια εμφανίζεται στην τέταρτη θέση ως επί το πλείστον και με μεγάλη διαφορά από την κυρίαρχη τεχνολογία. Αυτό συμβαίνει διότι δίνεται μεγάλος συντελεστής βαρύτητας στο κριτήριο των στερεών αποβλήτων, στο κριτήριο της κατανάλωσης ενέργειας και στο κριτήριο της χρήσης γης, ενώ τα υπόλοιπα κριτήρια έχουν σχεδόν ισοδύναμους συντελεστές. Η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης έχει την μικρότερη τιμή στο κριτήριο των στερεών αποβλήτων και στο κριτήριο της χρήσης γης.

Από το διάγραμμα της μερικής ιεράρχησης των τεχνολογιών για το οικολογικό σενάριο (Διάγραμμα 4.6-24) εμφανίζεται μία κατάσταση ασυγκρισιμότητας την οποία την δημιουργεί η τεχνολογία του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης. Εμφανίζεται αυτή η τεχνολογία να έχει σε όλες τις περιπτώσεις της ανάλυσης ευαισθησίας του σεναρίου την πρώτη θέση στην κατάταξη των θετικών ροών και την τέταρτη θέση στην κατάταξη των αρνητικών ροών.

Ένα γενικό συμπέρασμα από την ανάλυση ευαισθησίας των συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων είναι ότι στην Γ περίπτωση εμφανίζονται οι περισσότερες διαφοροποιήσεις της ιεράρχησης και την σχετικής θέσης των τεχνολογιών μεταξύ τους. Στο διάγραμμα 4.6-17 και 4.6-18 υπάρχει μία συγκριτική απεικόνιση των σεναρίων της Γ περίπτωσης. Το ενδιαφέρον που παρουσιάζεται σε αυτό το διάγραμμα είναι η σαφής βελτίωση της θέσης της τεχνολογίας του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης όχι μόνο στο σενάριο του τεχνολογικού ρίσκου που θα μπορούσε κανείς να το θεωρήσει αναμενόμενο μια και είναι μία αναπτυσσόμενη τεχνολογία, αλλά παρουσιάζεται και στο σενάριο του οικολογικού σεναρίου όπου πλησιάζει αρκετά την κυρίαρχη τεχνολογία.



Πίνακας 4.6-2. Πίνακας ανάλυσης ευαισθησίας της καθαρής ροής (net flow)  $\varphi_n$  ( $A_i$ ) για κάθε σενάριο ανάλυσης και κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία.

| Καθαρή ροή (net flow) $\varphi_n$ ( $A_i$ ) |  |                            |                  |                                 |            |
|---|--|----------------------------|------------------|---------------------------------|------------|
| Σενάρια                                     | Τεχνολογίες Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων |                            |                  |                                 |            |
|   | Δραστική ιλύς                            | Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης | Βιολογικό φίλτρο | Εμβλαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο | Βιορότορες |
| Βιομηχανικό σενάριο                         | -0,869                                   | -0,943                     | 0,770            | 0,527                           | 0,517      |
| Βιομηχανικό σενάριο Α                       | -0,875                                   | -0,944                     | 0,770            | 0,530                           | 0,520      |
| Βιομηχανικό σενάριο Β                       | -1,002                                   | -0,808                     | 0,772            | 0,513                           | 0,523      |
| Βιομηχανικό σενάριο Γ                       | -0,845                                   | -0,949                     | 0,707            | 0,526                           | 0,561      |
| Βιομηχανικό σενάριο Δ                       | -0,892                                   | -0,778                     | 0,686            | 0,503                           | 0,480      |
| Βιομηχανικό σενάριο Ε                       | -0,843                                   | -0,936                     | 0,758            | 0,516                           | 0,505      |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο                  | -1,191                                   | -0,257                     | 0,817            | 0,387                           | 0,244      |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Α                | -1,197                                   | -0,258                     | 0,816            | 0,390                           | 0,248      |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Β                | -1,248                                   | -0,198                     | 0,818            | 0,381                           | 0,247      |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Γ                | -1,143                                   | -0,267                     | 0,692            | 0,385                           | 0,333      |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Δ                | -1,231                                   | 0,034                      | 0,671            | 0,346                           | 0,181      |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Ε                | -1,174                                   | -0,252                     | 0,809            | 0,380                           | 0,237      |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο                 | -1,074                                   | -0,120                     | 0,560            | 0,405                           | 0,229      |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Α               | -1,084                                   | -0,122                     | 0,563            | 0,411                           | 0,235      |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Β               | -1,149                                   | -0,042                     | 0,562            | 0,397                           | 0,233      |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Γ               | -1,025                                   | -0,131                     | 0,435            | 0,403                           | 0,318      |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Δ               | -1,096                                   | 0,046                      | 0,477            | 0,381                           | 0,192      |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Ε               | -1,065                                   | -0,117                     | 0,555            | 0,401                           | 0,225      |
| Οικολογικό σενάριο                          | -0,933                                   | 0,231                      | 0,620            | 0,234                           | -0,152     |
| Οικολογικό σενάριο Α                        | -0,938                                   | 0,230                      | 0,620            | 0,237                           | -0,149     |
| Οικολογικό σενάριο Β                        | -0,970                                   | 0,270                      | 0,621            | 0,230                           | -0,150     |
| Οικολογικό σενάριο Γ                        | -0,848                                   | 0,212                      | 0,402            | 0,231                           | 0,004      |
| Οικολογικό σενάριο Δ                        | -0,961                                   | 0,438                      | 0,516            | 0,204                           | -0,197     |
| Οικολογικό σενάριο Ε                        | -0,915                                   | 0,236                      | 0,613            | 0,226                           | -0,160     |

Πίνακας 4.6-3. Πίνακας ανάλυσης ευαισθησίας της σχετικής ροής (relative flow)  $\varphi_r (A_i)$  για κάθε σενάριο ανάλυσης και κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία.

| Σχετική ροή (relative flow) $\varphi_r (A_i)$ |  |                            |                  |                                 |            |
|---|--|----------------------------|------------------|---------------------------------|------------|
| Σενάρια                                       | Τεχνολογίες Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων |                            |                  |                                 |            |
|   | Δραστική ιλύς                            | Βιοαντιδραστικής μεμβράνης | Βιολογικό φίλτρο | Εμβλαπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο | Βιορότορες |
| Βιομηχανικό σενάριο                           | 0,278                                    | 0,301                      | 0,781            | 0,733                           | 0,710      |
| Βιομηχανικό σενάριο Α                         | 0,280                                    | 0,302                      | 0,776            | 0,731                           | 0,708      |
| Βιομηχανικό σενάριο Β                         | 0,253                                    | 0,323                      | 0,781            | 0,727                           | 0,712      |
| Βιομηχανικό σενάριο Γ                         | 0,284                                    | 0,300                      | 0,758            | 0,734                           | 0,734      |
| Βιομηχανικό σενάριο Δ                         | 0,275                                    | 0,335                      | 0,761            | 0,727                           | 0,699      |
| Βιομηχανικό σενάριο Ε                         | 0,288                                    | 0,302                      | 0,776            | 0,727                           | 0,704      |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο                    | 0,205                                    | 0,444                      | 0,760            | 0,659                           | 0,587      |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Α                  | 0,207                                    | 0,444                      | 0,756            | 0,658                           | 0,587      |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Β                  | 0,196                                    | 0,456                      | 0,760            | 0,657                           | 0,588      |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Γ                  | 0,217                                    | 0,441                      | 0,720            | 0,660                           | 0,625      |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Δ                  | 0,202                                    | 0,507                      | 0,729            | 0,647                           | 0,567      |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Ε                  | 0,212                                    | 0,445                      | 0,757            | 0,656                           | 0,584      |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο                   | 0,220                                    | 0,473                      | 0,686            | 0,672                           | 0,584      |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Α                 | 0,224                                    | 0,473                      | 0,682            | 0,670                           | 0,585      |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Β                 | 0,206                                    | 0,491                      | 0,686            | 0,668                           | 0,586      |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Γ                 | 0,232                                    | 0,471                      | 0,644            | 0,673                           | 0,623      |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Δ                 | 0,218                                    | 0,510                      | 0,665            | 0,665                           | 0,572      |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Ε                 | 0,224                                    | 0,474                      | 0,684            | 0,670                           | 0,583      |
| Οικολογικό σενάριο                            | 0,249                                    | 0,551                      | 0,698            | 0,597                           | 0,449      |
| Οικολογικό σενάριο Α                          | 0,251                                    | 0,550                      | 0,695            | 0,597                           | 0,451      |
| Οικολογικό σενάριο Β                          | 0,241                                    | 0,560                      | 0,698            | 0,595                           | 0,450      |
| Οικολογικό σενάριο Γ                          | 0,271                                    | 0,547                      | 0,628            | 0,598                           | 0,501      |
| Οικολογικό σενάριο Δ                          | 0,245                                    | 0,597                      | 0,673            | 0,587                           | 0,433      |
| Οικολογικό σενάριο Ε                          | 0,256                                    | 0,552                      | 0,696            | 0,594                           | 0,447      |

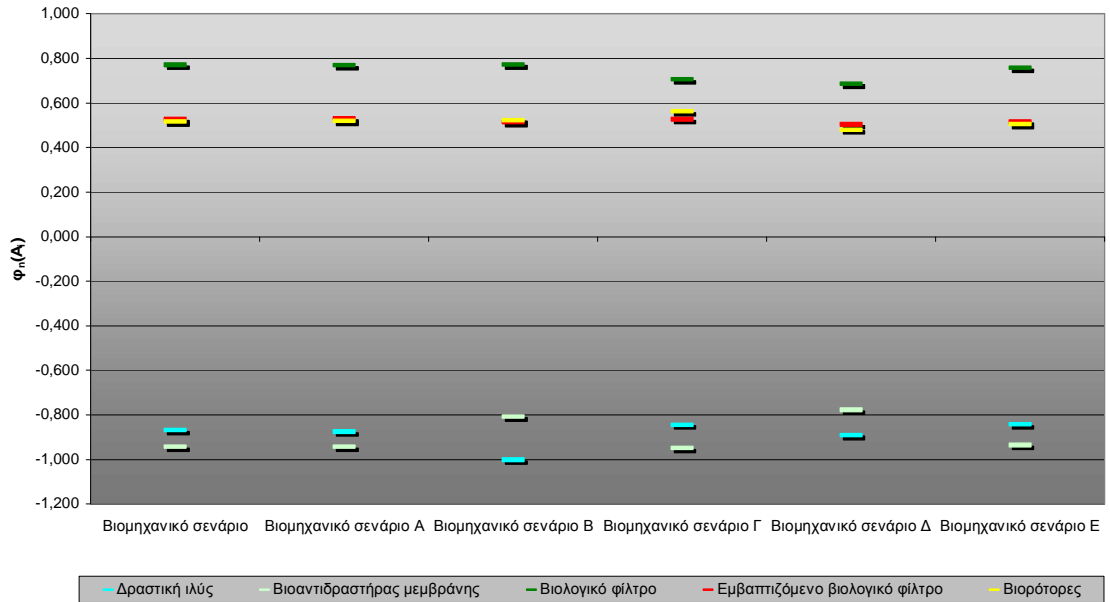
Πίνακας 4.6-4. Πίνακας ανάλυσης ευαισθησίας της αδιάστατης καθαρής ροής (net flow)  $\varphi_n (A_i)$  για κάθε σενάριο ανάλυσης και κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία.

| <b>Αδιάστατη Καθαρή ροή (net flow) <math>\varphi_n (A_i)</math></b> |   |                                   |                         |  |                   |
|---|---|-----------------------------------|-------------------------|--|-------------------|
| <b>Σενάρια</b>  | <b>Τεχνολογίες Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων</b> |                                   |                         |  |                   |
|   | <b>Δραστική ιλύς</b>                            | <b>Βιοαντιδραστικής μεμβράνης</b> | <b>Βιολογικό φίλτρο</b> | <b>Εμβαιπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο</b> | <b>Βιορότορες</b> |
| Βιομηχανικό σενάριο   | 4,3%  | 0,0%                              | 100,0%                  | 85,8%                                  | 85,2%             |
| Βιομηχανικό σενάριο Α   | 4,0%  | 0,0%                              | 100,0%                  | 86,0%                                  | 85,4%             |
| Βιομηχανικό σενάριο Β   | 0,0%  | 10,9%                             | 100,0%                  | 85,4%                                  | 86,0%             |
| Βιομηχανικό σενάριο Γ   | 6,3%  | 0,0%                              | 100,0%                  | 89,1%                                  | 91,2%             |
| Βιομηχανικό σενάριο Δ   | 0,0%  | 7,2%                              | 100,0%                  | 88,4%                                  | 87,0%             |
| Βιομηχανικό σενάριο Ε   | 5,5%  | 0,0%                              | 100,0%                  | 85,7%                                  | 85,1%             |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο  | 0,0%  | 46,6%                             | 100,0%                  | 78,6%                                  | 71,5%             |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Α  | 0,0%  | 46,6%                             | 100,0%                  | 78,8%                                  | 71,8%             |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Β  | 0,0%  | 50,8%                             | 100,0%                  | 78,9%                                  | 72,4%             |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Γ  | 0,0%  | 47,7%                             | 100,0%                  | 83,3%                                  | 80,5%             |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Δ  | 0,0%  | 66,5%                             | 100,0%                  | 82,9%                                  | 74,2%             |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Ε  | 0,0%  | 46,5%                             | 100,0%                  | 78,3%                                  | 71,1%             |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο   | 0,0%  | 58,4%                             | 100,0%                  | 90,5%                                  | 79,7%             |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Α                                       | 0,0%  | 58,4%                             | 100,0%                  | 90,8%                                  | 80,1%             |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Β                                       | 0,0%  | 64,7%                             | 100,0%                  | 90,4%                                  | 80,8%             |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Γ                                       | 0,0%  | 61,3%                             | 100,0%                  | 97,8%                                  | 92,0%             |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Δ                                       | 0,0%  | 72,6%                             | 100,0%                  | 93,9%                                  | 81,9%             |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Ε                                       | 0,0%  | 58,5%                             | 100,0%                  | 90,5%                                  | 79,6%             |
| Οικολογικό σενάριο  | 0,0%  | 74,9%                             | 100,0%                  | 75,1%                                  | 50,3%             |
| Οικολογικό σενάριο Α  | 0,0%  | 74,9%                             | 100,0%                  | 75,4%                                  | 50,7%             |
| Οικολογικό σενάριο Β  | 0,0%  | 77,9%                             | 100,0%                  | 75,4%                                  | 51,5%             |
| Οικολογικό σενάριο Γ  | 0,0%  | 84,8%                             | 100,0%                  | 86,3%                                  | 68,1%             |
| Οικολογικό σενάριο Δ  | 0,0%  | 94,7%                             | 100,0%                  | 78,9%                                  | 51,7%             |
| Οικολογικό σενάριο Ε  | 0,0%  | 75,3%                             | 100,0%                  | 74,7%                                  | 49,5%             |

Πίνακας 4.6-5. Πίνακας ανάλυσης ευαισθησίας της αδιάστατης σχετικής ροής (relative flow)  $\phi_r$  ( $A_i$ ) για κάθε σενάριο ανάλυσης και κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία.

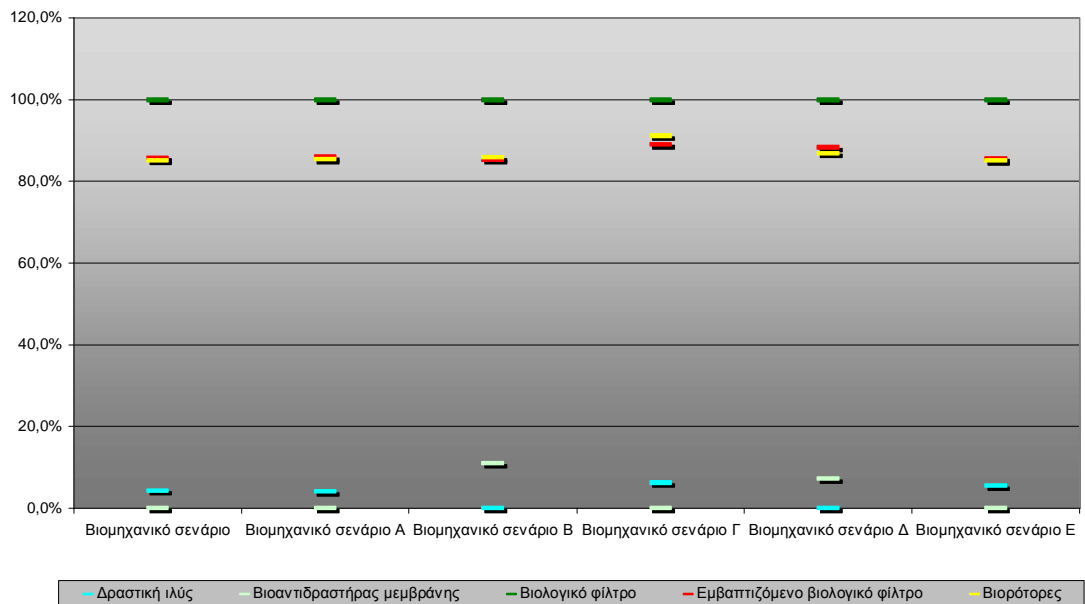
| <b>Αδιάστατη Σχετική ροή (relative flow) <math>\phi_r</math> (<math>A_i</math>)</b> |   |                                   |                         |  |                   |
|---|---|-----------------------------------|-------------------------|--|-------------------|
| <b>Σενάρια</b>  | <b>Τεχνολογίες Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων</b> |                                   |                         |  |                   |
|   | <b>Δραστική ιλύς</b>                            | <b>Βιοαντιδραστικής μεμβράνης</b> | <b>Βιολογικό φίλτρο</b> | <b>Εμβαιπτιζόμενο βιολογικό φίλτρο</b> | <b>Βιορότορες</b> |
| Βιομηχανικό σενάριο   | 0,0%  | 4,5%                              | 100,0%                  | 90,5%                                  | 85,8%             |
| Βιομηχανικό σενάριο Α   | 0,0%  | 4,6%                              | 100,0%                  | 91,0%                                  | 86,4%             |
| Βιομηχανικό σενάριο Β   | 0,0%  | 13,2%                             | 100,0%                  | 89,7%                                  | 86,9%             |
| Βιομηχανικό σενάριο Γ   | 0,0%  | 3,2%                              | 100,0%                  | 95,0%                                  | 95,0%             |
| Βιομηχανικό σενάριο Δ   | 0,0%  | 12,4%                             | 100,0%                  | 93,0%                                  | 87,2%             |
| Βιομηχανικό σενάριο Ε   | 0,0%  | 2,9%                              | 100,0%                  | 90,1%                                  | 85,4%             |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο  | 0,0%  | 43,0%                             | 100,0%                  | 81,8%                                  | 68,9%             |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Α  | 0,0%  | 43,1%                             | 100,0%                  | 82,2%                                  | 69,3%             |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Β  | 0,0%  | 46,1%                             | 100,0%                  | 81,7%                                  | 69,6%             |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Γ  | 0,0%  | 44,5%                             | 100,0%                  | 88,1%                                  | 81,2%             |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Δ  | 0,0%  | 58,1%                             | 100,0%                  | 84,5%                                  | 69,3%             |
| Αειφόρου ανάπτυξης σενάριο Ε  | 0,0%  | 42,6%                             | 100,0%                  | 81,4%                                  | 68,3%             |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο   | 0,0%  | 54,4%                             | 100,0%                  | 96,9%                                  | 78,2%             |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Α   | 0,0%  | 54,5%                             | 100,0%                  | 97,5%                                  | 78,8%             |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Β   | 0,0%  | 59,2%                             | 100,0%                  | 96,2%                                  | 79,0%             |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Γ   | 0,0%  | 54,1%                             | 93,5%                   | 100,0%                                 | 88,7%             |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Δ   | 0,0%  | 65,4%                             | 99,9%                   | 100,0%                                 | 79,3%             |
| Τεχνολογικού ρίσκου σενάριο Ε   | 0,0%  | 54,3%                             | 100,0%                  | 96,9%                                  | 77,9%             |
| Οικολογικό σενάριο  | 0,0%  | 67,2%                             | 100,0%                  | 77,5%                                  | 44,6%             |
| Οικολογικό σενάριο Α  | 0,0%  | 67,3%                             | 100,0%                  | 77,9%                                  | 45,1%             |
| Οικολογικό σενάριο Β  | 0,0%  | 69,7%                             | 100,0%                  | 77,5%                                  | 45,7%             |
| Οικολογικό σενάριο Γ  | 0,0%  | 77,2%                             | 100,0%                  | 91,4%                                  | 64,5%             |
| Οικολογικό σενάριο Δ  | 0,0%  | 82,2%                             | 100,0%                  | 79,8%                                  | 43,8%             |
| Οικολογικό σενάριο Ε  | 0,0%  | 67,3%                             | 100,0%                  | 76,8%                                  | 43,5%             |

Καθαρή ροή  $\varphi_n(A_i)$  - Ανάλυση ευαισθησίας Βιομηχανικού σεναρίου



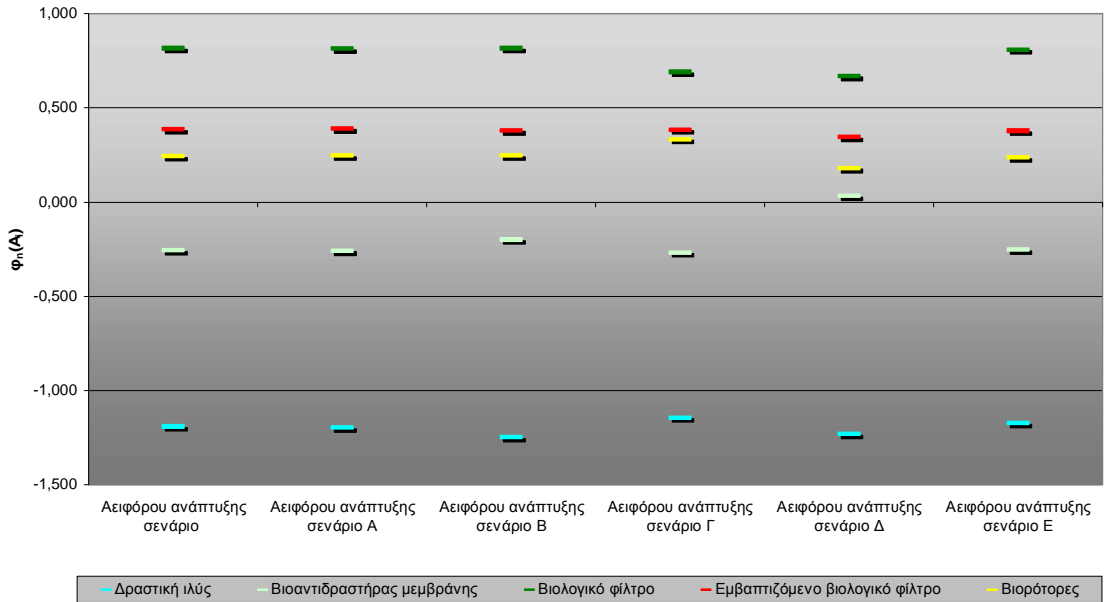
Διάγραμμα 4.6-1. Ανάλυση ευαισθησίας της καθαρής ροής (net flow)  $\varphi_n(A_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο Βιομηχανικό σενάριο.

Αδιάστατη Καθαρή ροή  $\varphi_n(A_i)$  - Ανάλυση ευαισθησίας Βιομηχανικού σεναρίου



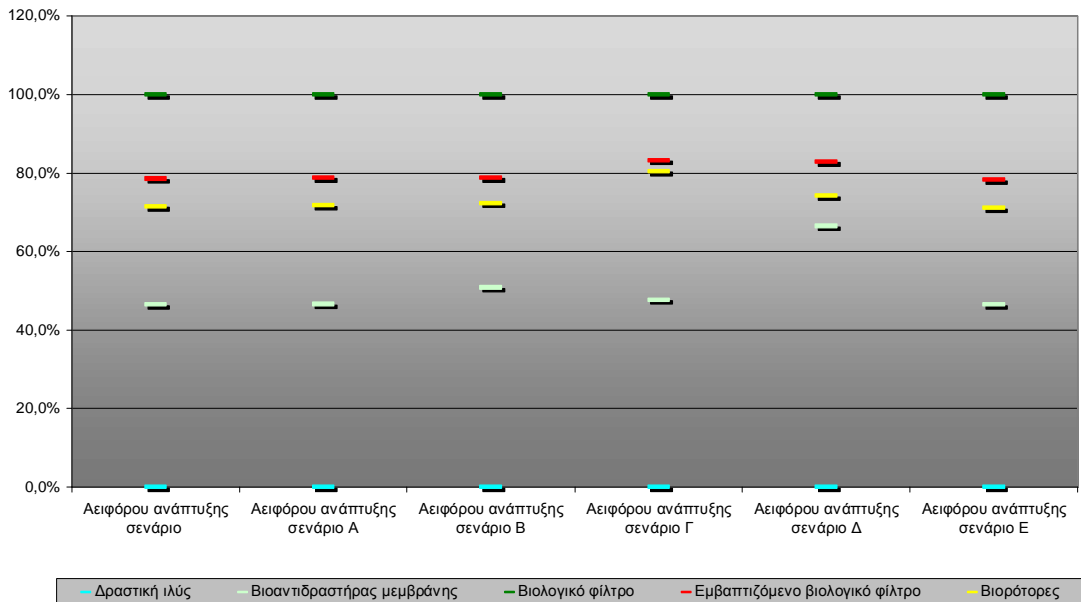
Διάγραμμα 4.6-2. Ανάλυση ευαισθησίας της αδιάστατης καθαρής ροής (net flow)  $\varphi_n(A_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο Βιομηχανικό σενάριο.

Καθαρή ροή  $\varphi_n(A_i)$  - Ανάλυση ευαισθησίας σεναρίου Αειφόρου ανάπτυξης



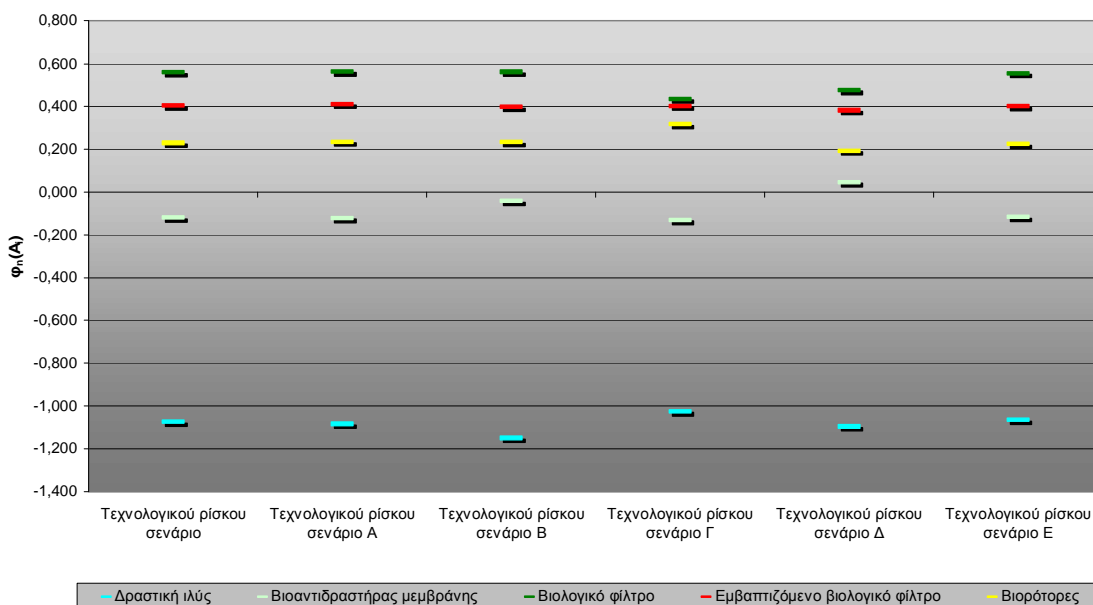
Διάγραμμα 4.6-3. Ανάλυση ευαισθησίας της καθαρής ροής (net flow)  $\varphi_n(A_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο σενάριο της Αειφόρου ανάπτυξης.

Αδιάστατη Καθαρή ροή  $\varphi_n(A_i)$  - Ανάλυση ευαισθησίας σεναρίου Αειφόρου ανάπτυξης



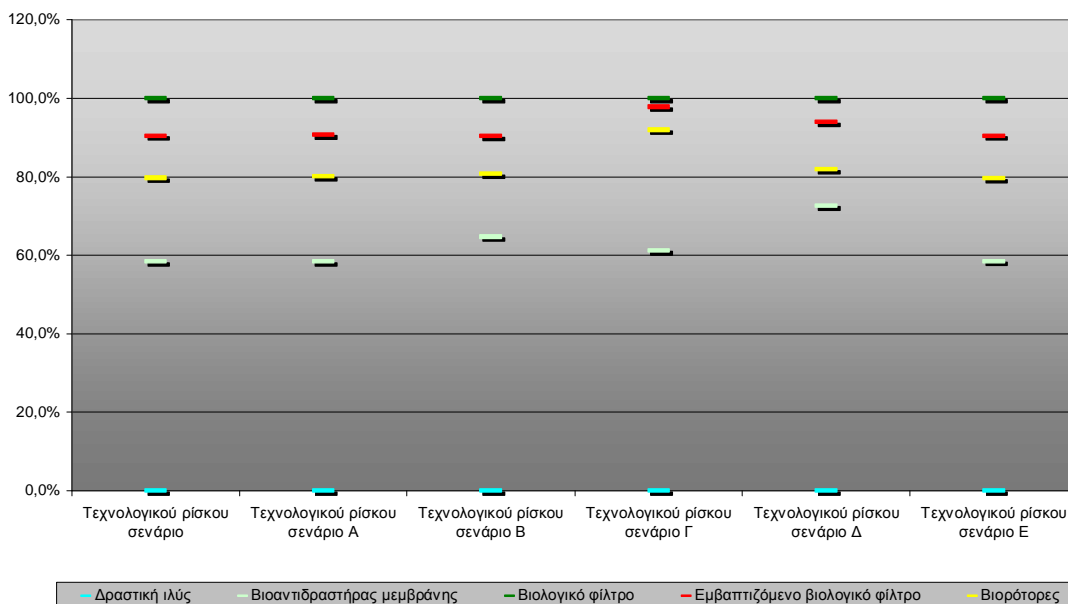
Διάγραμμα 4.6-4. Ανάλυση ευαισθησίας της αδιάστατης καθαρής ροής (net flow)  $\varphi_n(A_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο σενάριο της Αειφόρου ανάπτυξης.

Καθαρή ροή  $\varphi_n(A_i)$  - Ανάλυση ευαισθησίας σεναρίου Τεχνολογικού ρίσκου



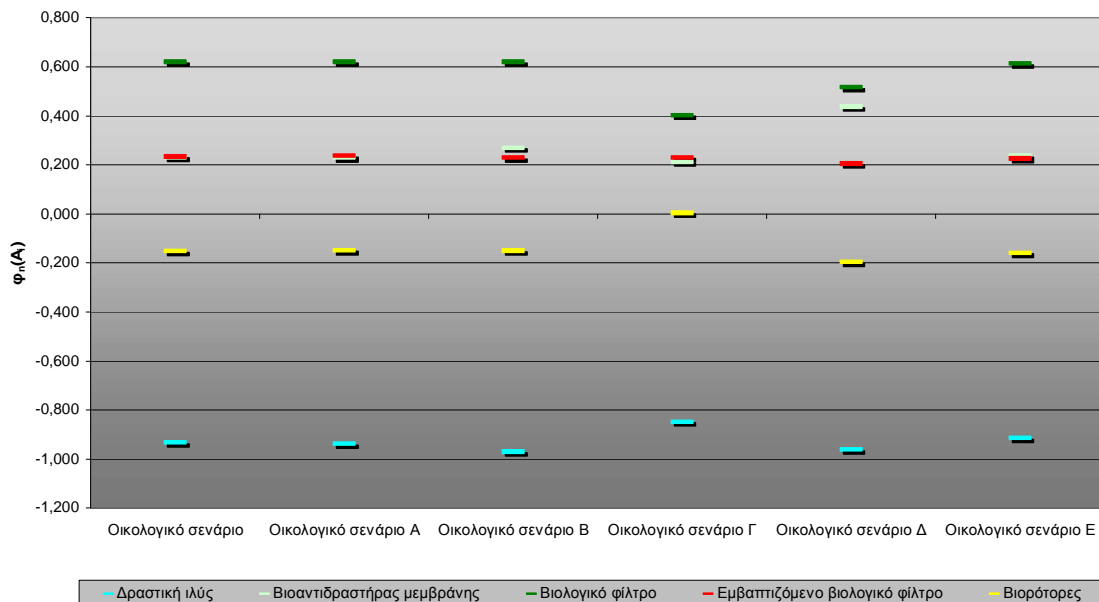
Διάγραμμα 4.6-5. Ανάλυση ευαισθησίας της καθαρής ροής (net flow)  $\varphi_n(A_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο σενάριο του Τεχνολογικού ρίσκου.

Αδιάστατη Καθαρή ροή  $\varphi_n(A_i)$  - Ανάλυση ευαισθησίας σεναρίου Τεχνολογικού ρίσκου



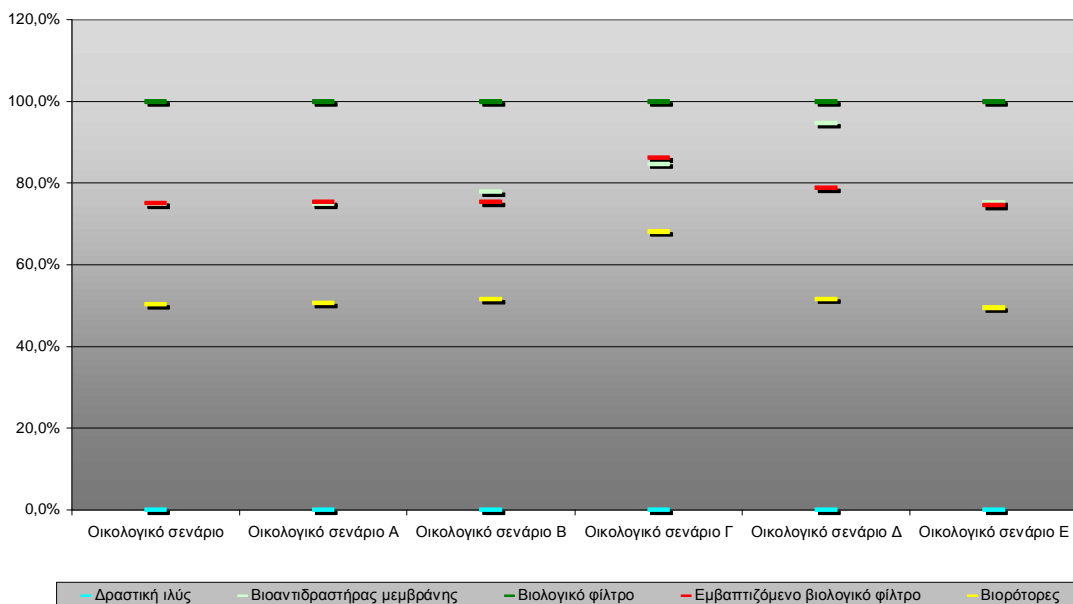
Διάγραμμα 4.6-6. Ανάλυση ευαισθησίας της αδιάστατης καθαρής ροής (net flow)  $\varphi_n(A_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο σενάριο του Τεχνολογικού ρίσκου.

Καθαρή ροή  $\varphi_n(A_i)$  - Ανάλυση ευαισθησίας Οικολογικού σεναρίου



Διάγραμμα 4.6-7. Ανάλυση ευαισθησίας της καθαρής ροής (net flow)  $\varphi_n(A_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο Οικολογικό σενάριο.

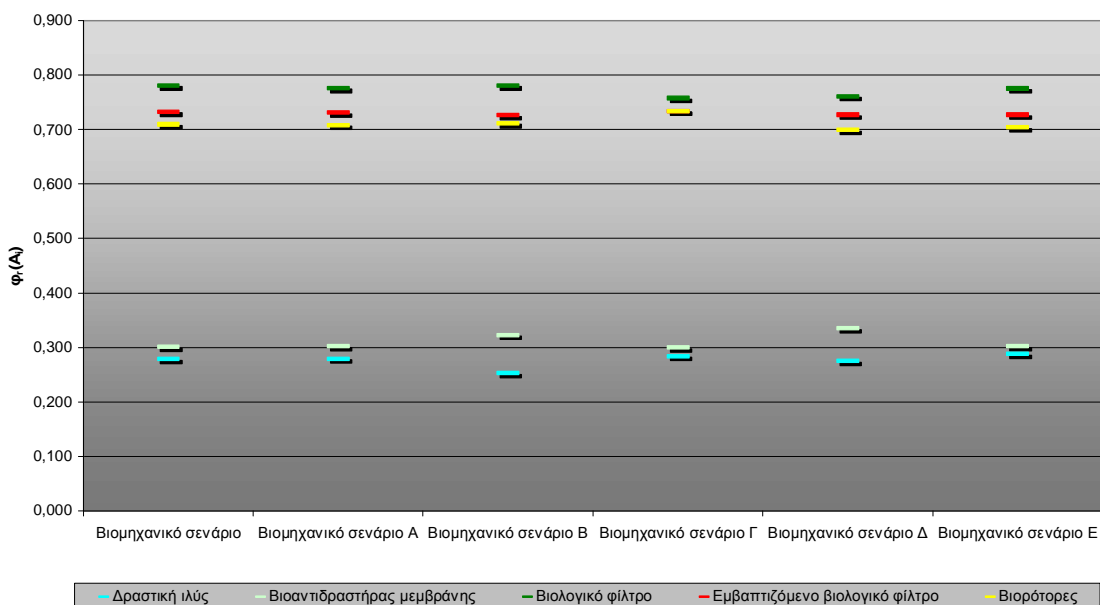
Αδιάστατη Καθαρή ροή  $\varphi_n(A_i)$  - Ανάλυση ευαισθησίας Οικολογικού σεναρίου



Διάγραμμα 4.6-8. Ανάλυση ευαισθησίας της αδιάστατης καθαρής ροής (net flow)  $\varphi_n(A_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο Οικολογικό σενάριο.

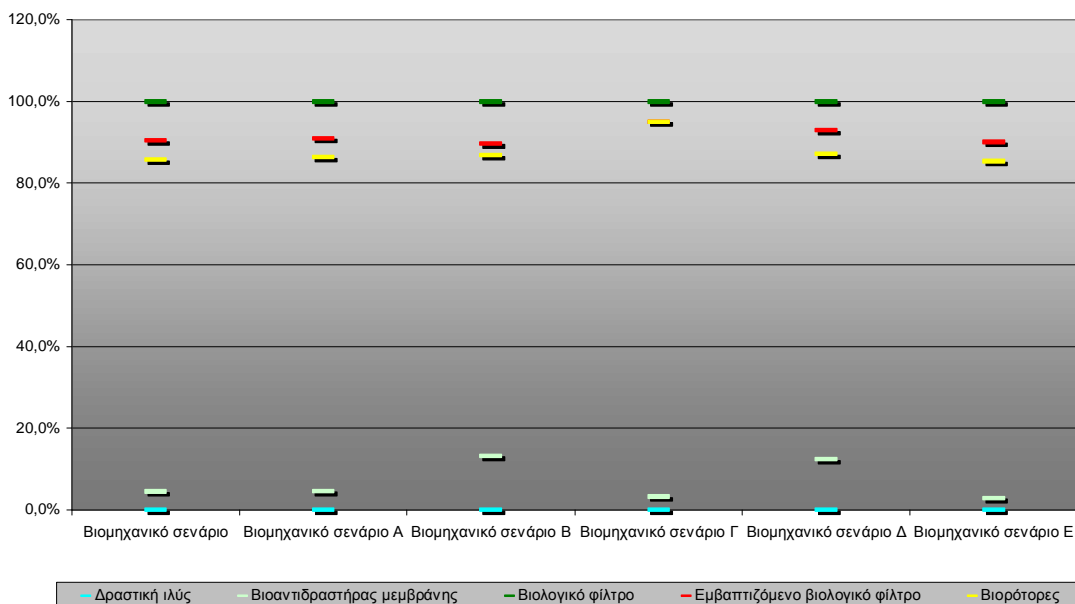


Σχετική ροή  $\varphi_r(A_i)$  - Ανάλυση ευαισθησίας Βιομηχανικού σεναρίου



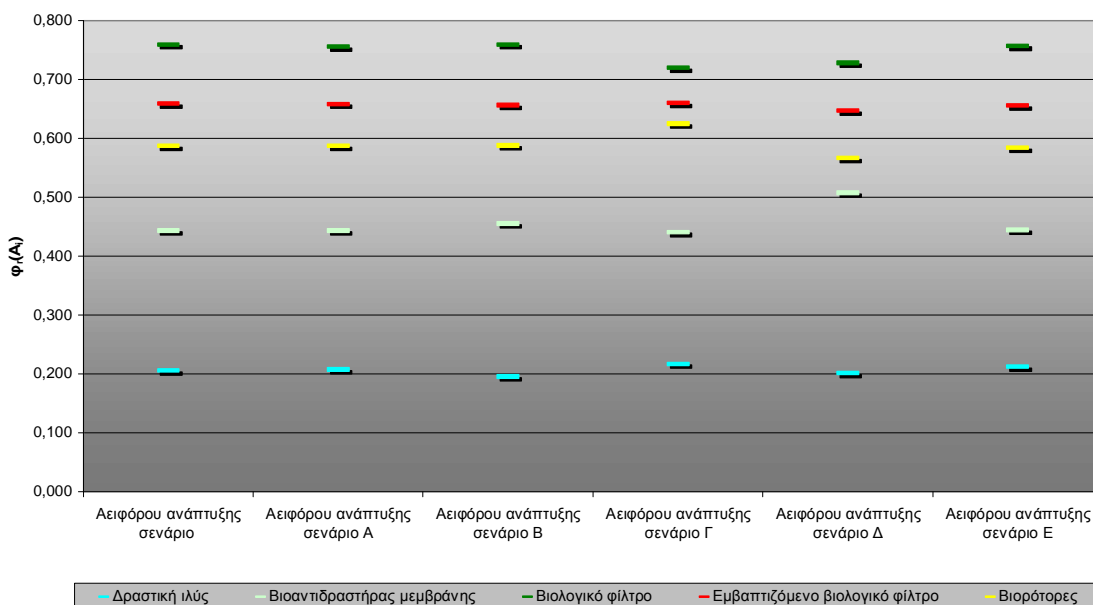
Διάγραμμα 4.6-9. Ανάλυση ευαισθησίας της σχετικής ροής (relative flow)  $\varphi_r(A_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο Βιομηχανικό σενάριο.

Αδιάστατη Σχετική ροή  $\varphi_r(A_i)$  - Ανάλυση ευαισθησίας Βιομηχανικού σεναρίου



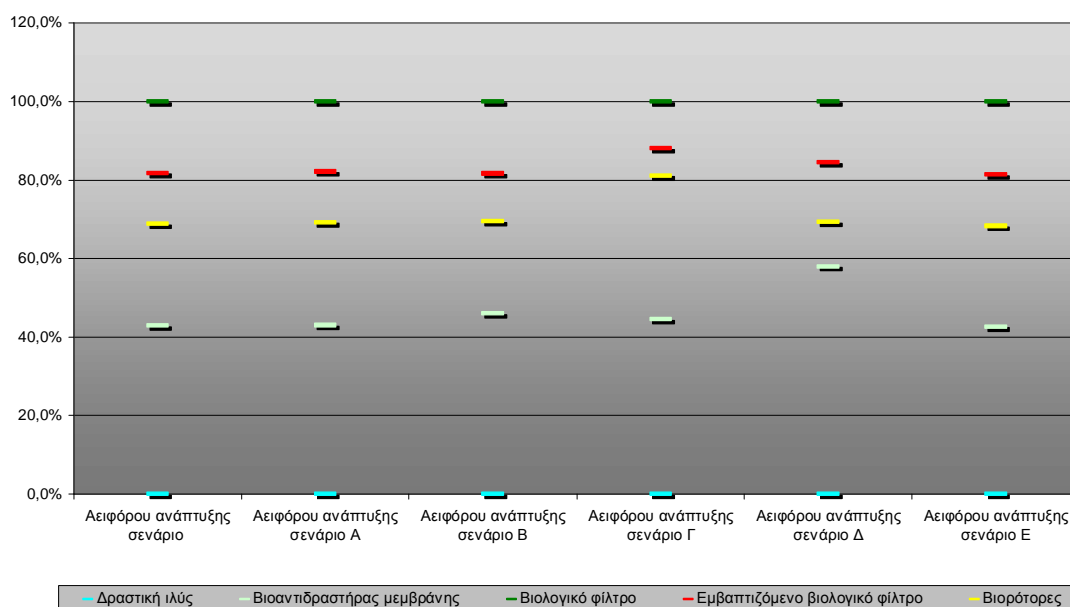
Διάγραμμα 4.6-10. Ανάλυση ευαισθησίας της αδιάστατης σχετικής ροής (relative flow)  $\varphi_r(A_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο Βιομηχανικό σενάριο.

Σχετική ροή  $\phi_r(A_i)$  - Ανάλυση ευαισθησίας σεναρίου Αειφόρου ανάπτυξης



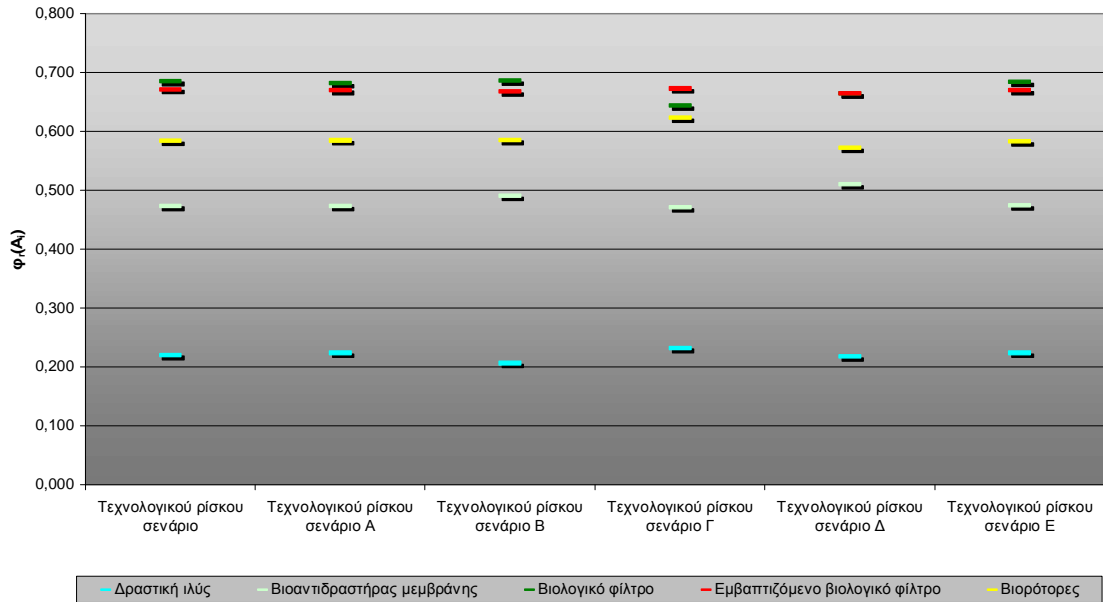
Διάγραμμα 4.6-11. Ανάλυση ευαισθησίας της σχετικής ροής (relative flow)  $\phi_r(A_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο σενάριο της Αειφόρου ανάπτυξης.

Αδιάστατη Σχετική ροή  $\phi_r(A_i)$  - Ανάλυση ευαισθησίας σεναρίου Αειφόρου ανάπτυξης



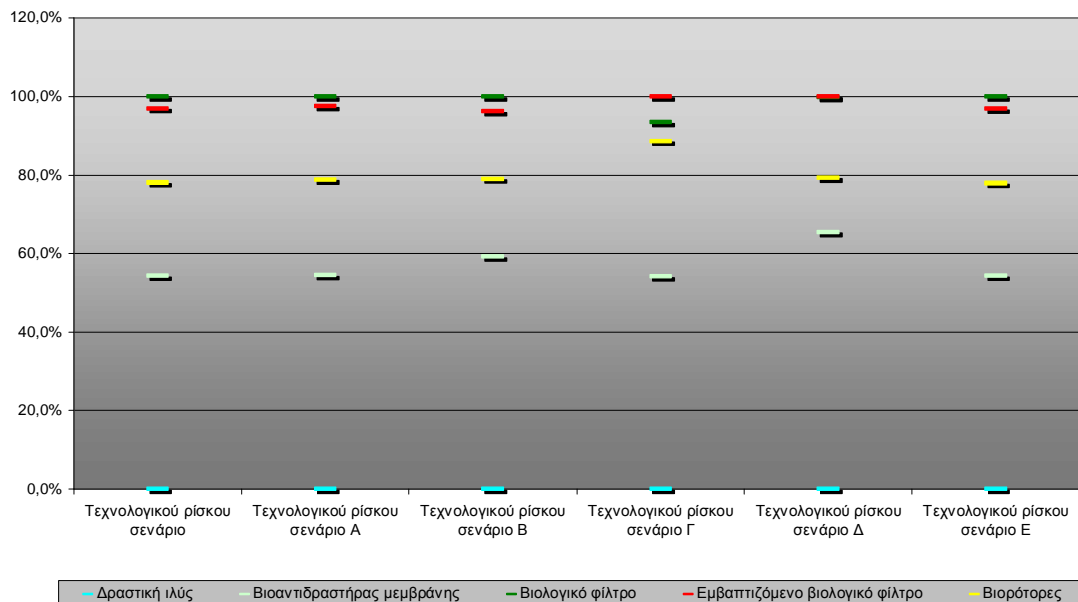
Διάγραμμα 4.6-12. Ανάλυση ευαισθησίας της αδιάστατης σχετικής ροής (relative flow)  $\phi_r(A_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο σενάριο της Αειφόρου ανάπτυξης.

Σχετική ροή  $\varphi_r(A_i)$  - Ανάλυση ευαισθησίας σεναρίου Τεχνολογικού ρίσκου



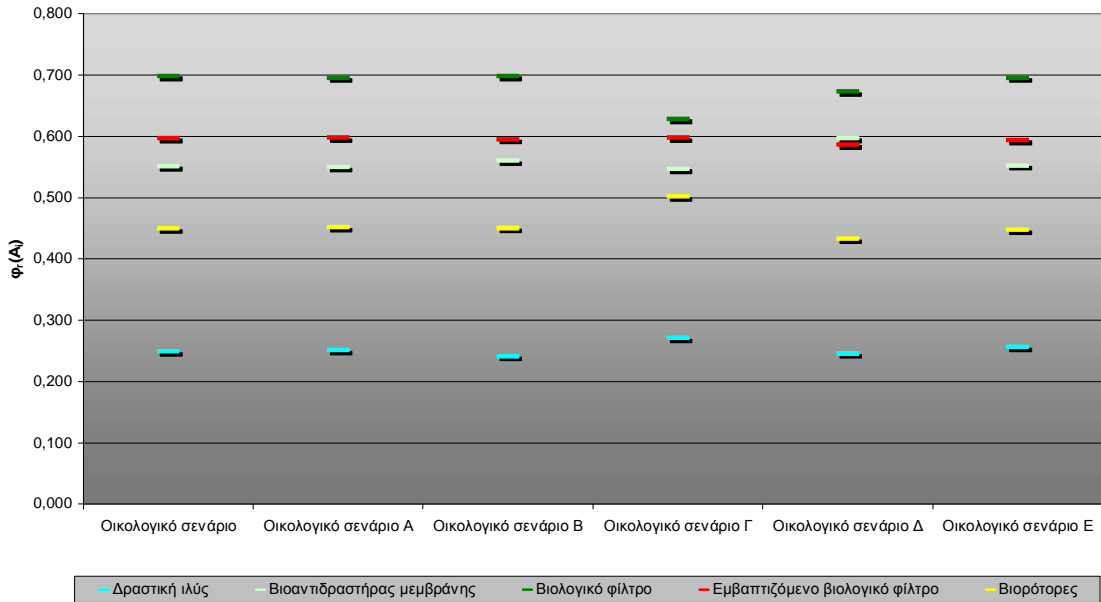
Διάγραμμα 4.6-13. Ανάλυση ευαισθησίας της σχετικής ροής (relative flow)  $\varphi_r(A_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο σενάριο του Τεχνολογικού ρίσκου.

Αδιάστατη Σχετική ροή  $\varphi_r(A_i)$  - Ανάλυση ευαισθησίας σεναρίου Τεχνολογικού ρίσκου



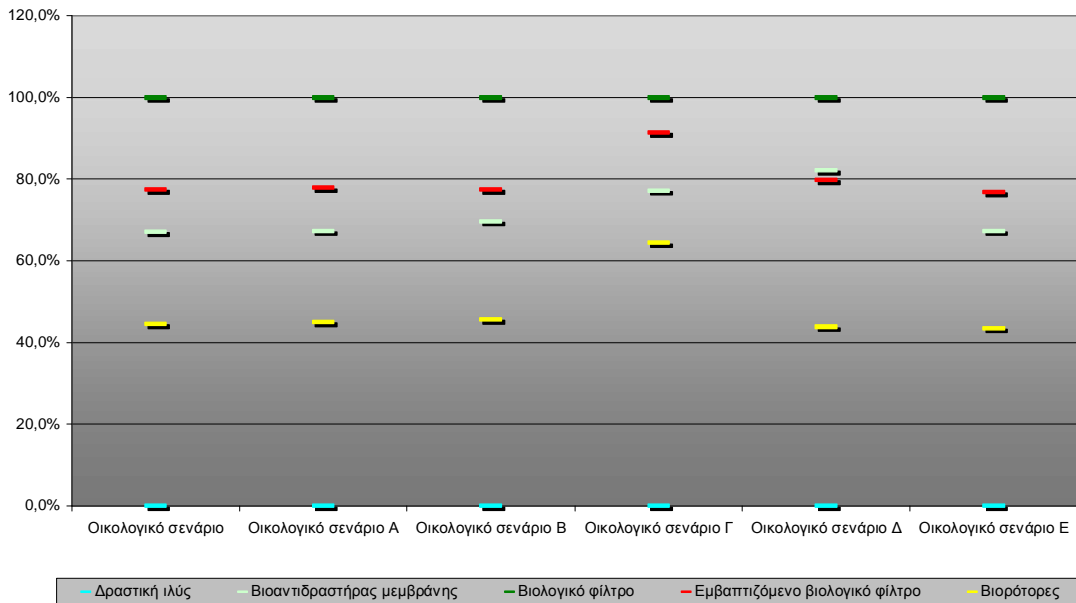
Διάγραμμα 4.6-14. Ανάλυση ευαισθησίας της αδιάστατης σχετικής ροής (relative flow)  $\varphi_r(A_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο σενάριο του Τεχνολογικού ρίσκου.

Σχετική ροή  $\varphi_r(A_i)$  - Ανάλυση ευαισθησίας Οικολογικού σεναρίου



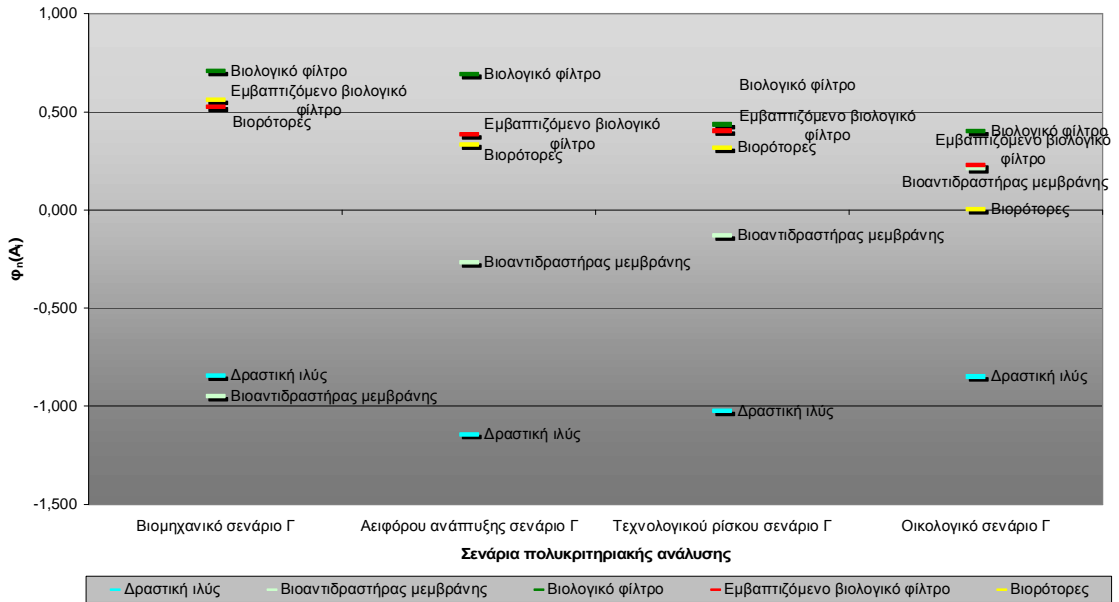
Διάγραμμα 4.6-15. Ανάλυση ευαισθησίας της σχετικής ροής (relative flow)  $\varphi_r(A_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο Οικολογικό σενάριο.

Αδιάστατη Σχετική ροή  $\varphi_r(A_i)$  - Ανάλυση ευαισθησίας Οικολογικού σεναρίου



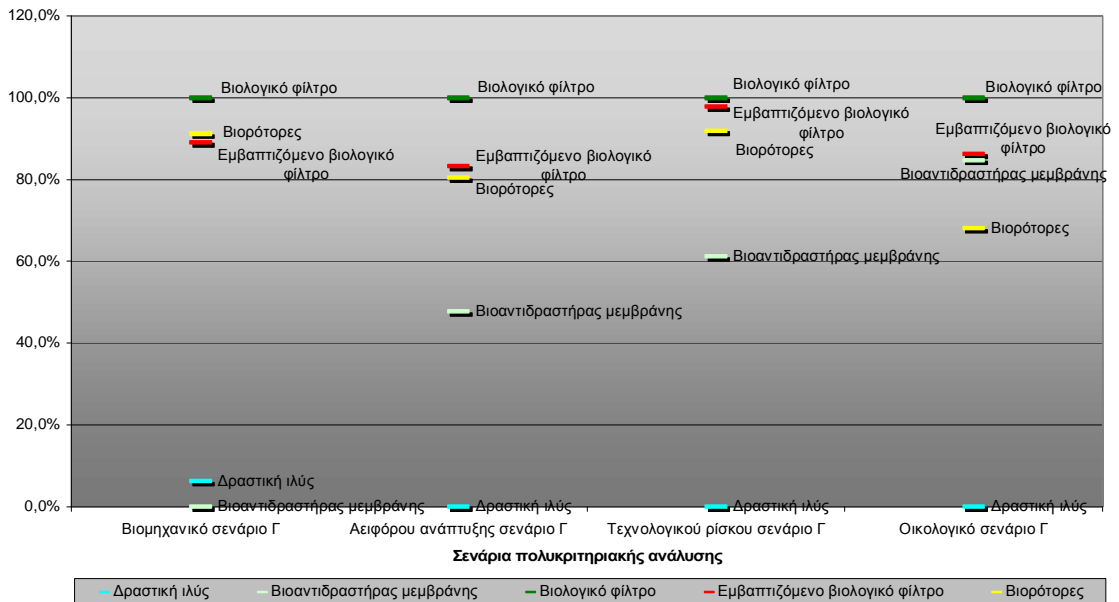
Διάγραμμα 4.6-16. Ανάλυση ευαισθησίας της αδιάστατης σχετικής ροής (relative flow)  $\varphi_r(A_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία στο Οικολογικό σενάριο.

Καθαρή ροή  $\varphi_n(A_i)$  - Σενάριο ευαισθησίας Γ



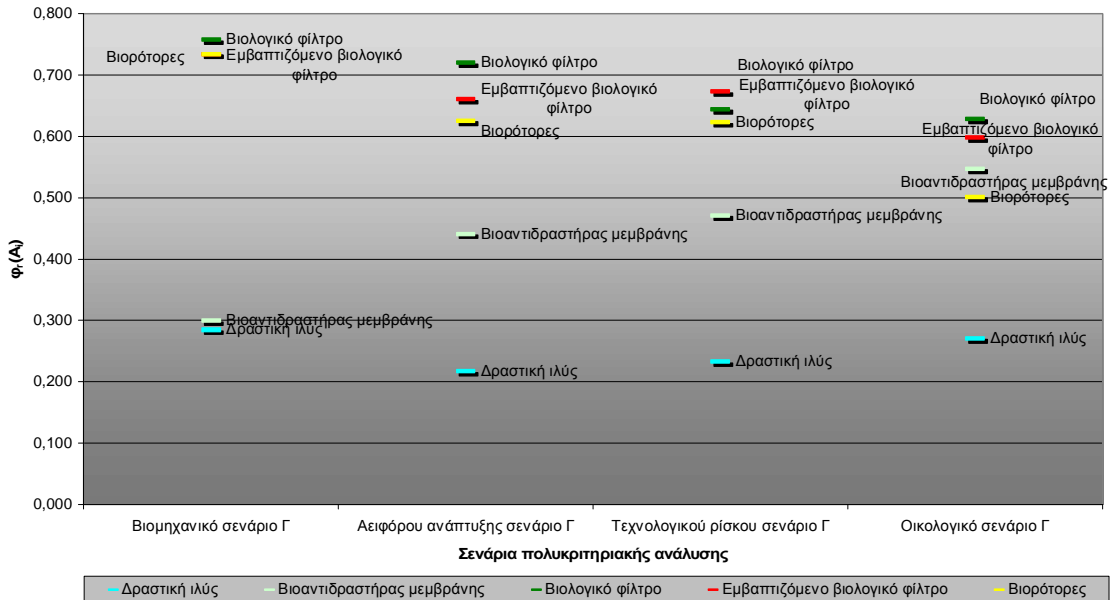
Διάγραμμα 4.6-17. Απεικόνιση της καθαρής ροής (net flow)  $\varphi_n(A_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία σε κάθε σενάριο Γ της ανάλυσης ευαισθησίας.

Αδιάστατη καθαρή ροή  $\varphi_n(\bar{A}_i)$  - Σενάριο ευαισθησίας Γ



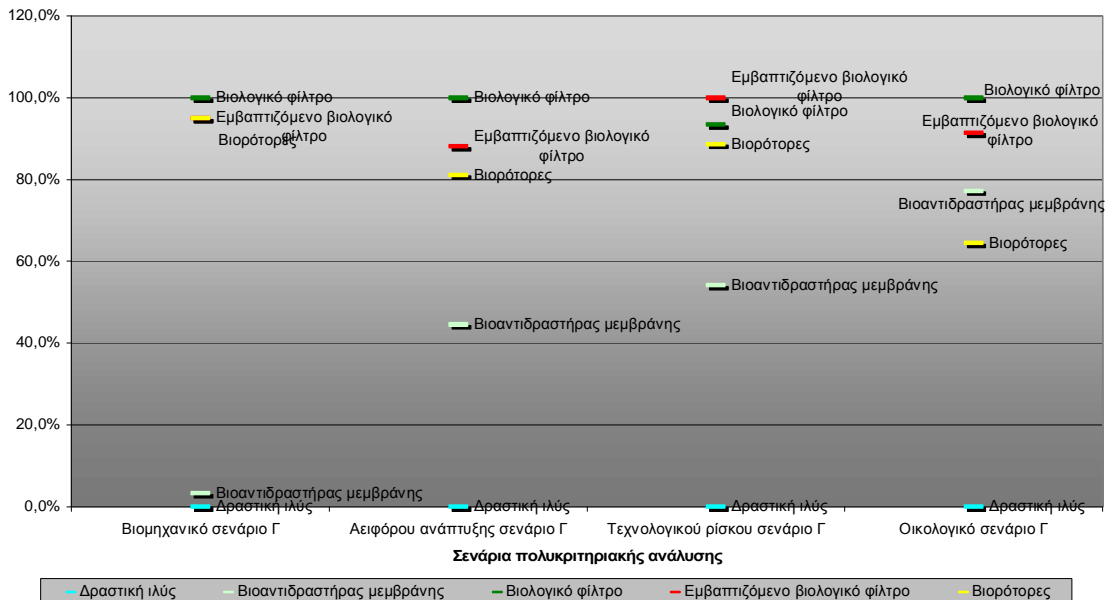
Διάγραμμα 4.6-18. Απεικόνιση της αδιάστατης καθαρής ροής (net flow)  $\varphi_n(\bar{A}_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία σε κάθε σενάριο Γ της ανάλυσης ευαισθησίας.

Σχετική ροή  $\varphi_n(A_i)$  - Σενάριο ευαισθησίας Γ



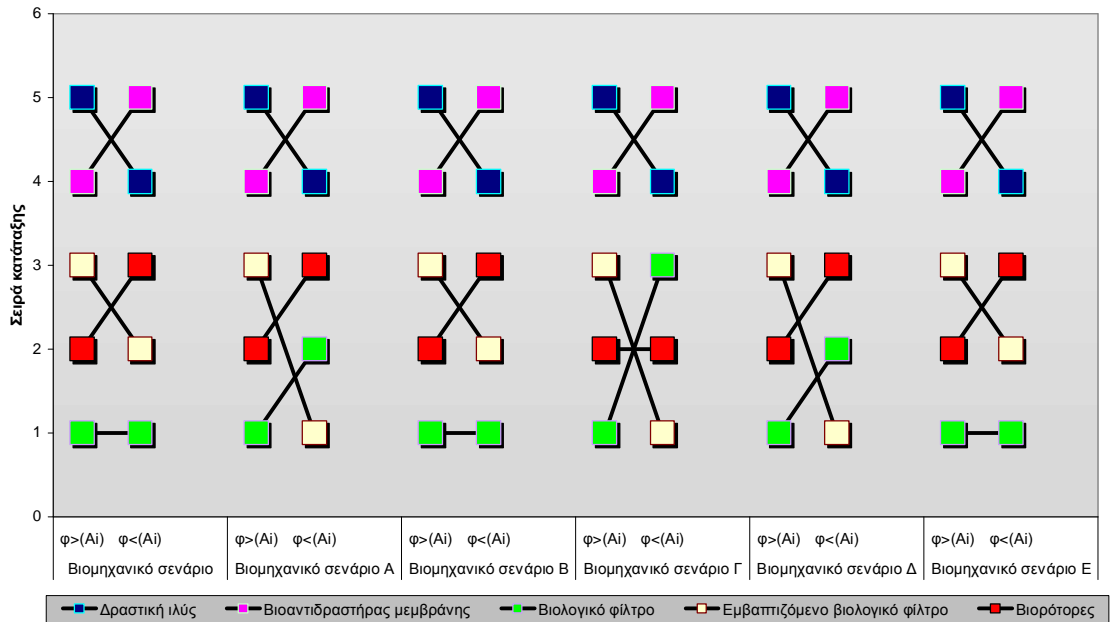
Διάγραμμα 4.6-19. Απεικόνιση της σχετικής ροής (relative flow)  $\varphi_n(A_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία σε κάθε σενάριο Γ της ανάλυσης ευαισθησίας.

Αδιάστατη σχετική ροή  $\varphi_n(A_i)$  - Σενάριο ευαισθησίας Γ



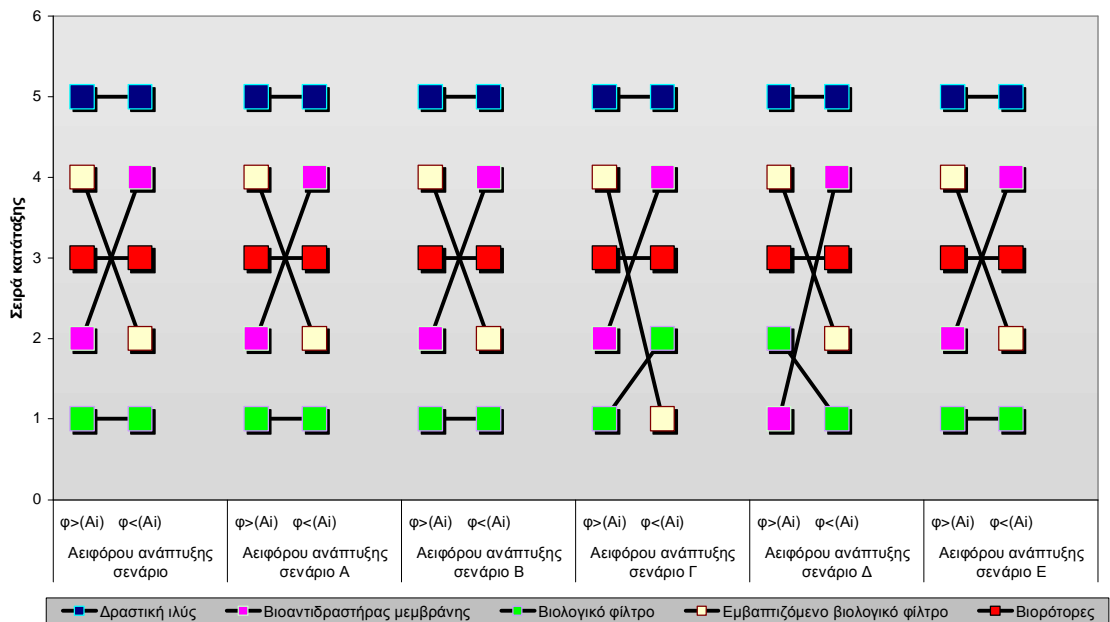
Διάγραμμα 4.6-20. Απεικόνιση της αδιάστατης σχετικής ροής (relative flow)  $\varphi_n(A_i)$  για κάθε εξεταζόμενη τεχνολογία σε κάθε σενάριο Γ της ανάλυσης ευαισθησίας.

Μερική Ιεράρχηση Τεχνολογιών - Ανάλυση ευαισθησίας



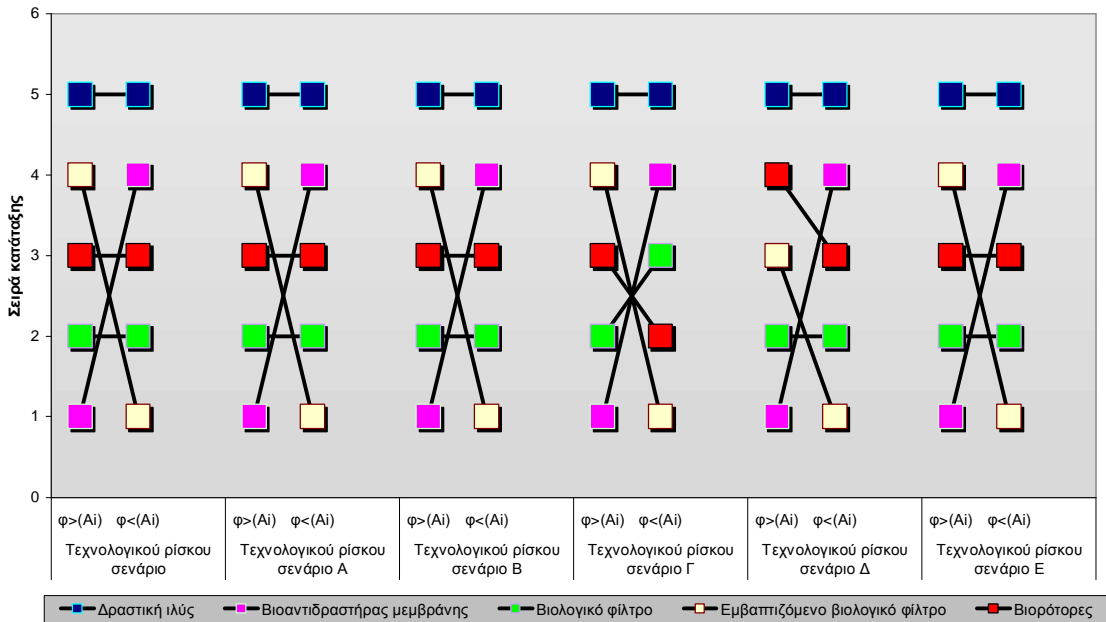
Διάγραμμα 4.6-21. Ανάλυση ευαισθησίας της μερικής ιεράρχησης των τεχνολογιών για το Βιομηχανικό σενάριο.

Μερική Ιεράρχηση Τεχνολογιών - Ανάλυση ευαισθησίας



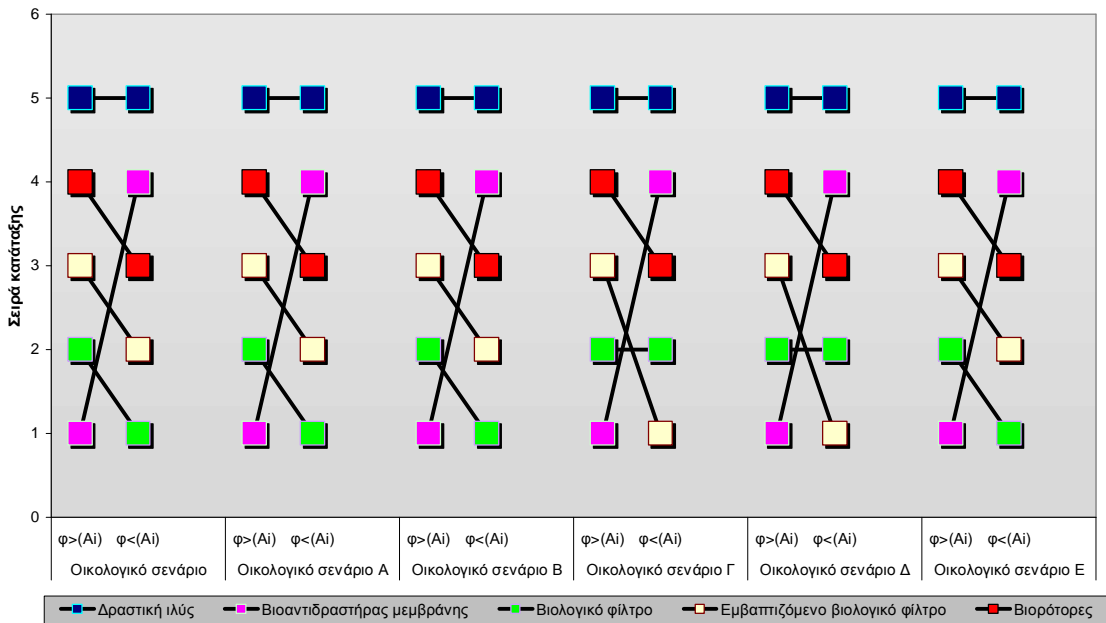
Διάγραμμα 4.6-22. Ανάλυση ευαισθησίας της μερικής ιεράρχησης των τεχνολογιών για το σενάριο της Αειφόρου ανάπτυξης.

Μερική Ιεράρχηση Τεχνολογιών - Ανάλυση ευαισθησίας



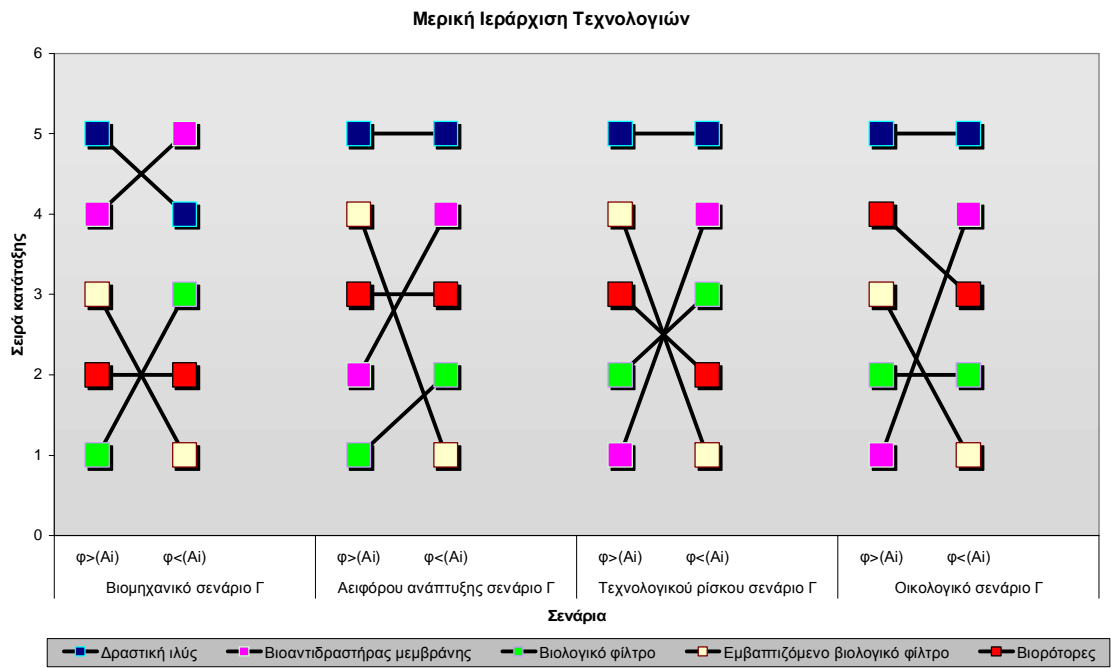
Διάγραμμα 4.6-23. Ανάλυση ευαισθησίας της μερικής ιεράρχησης των τεχνολογιών για το σενάριο του Τεχνολογικού ρίσκου.

Μερική Ιεράρχηση Τεχνολογιών - Ανάλυση ευαισθησίας



Διάγραμμα 4.6-24. Ανάλυση ευαισθησίας της μερικής ιεράρχησης των τεχνολογιών για το Οικολογικό σενάριο.





**Διάγραμμα 4.6-25.** Μερική ιεράρχηση των τεχνολογιών για τα σενάρια της Γ ανάλυσης ευαισθησίας.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 5.1 Συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Από την δημιουργία του μοντέλου αξιολόγησης των τεχνολογιών αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και την αξιολόγηση τους με την μέθοδο της πολυκριτηριακής ανάλυσης, προκύπτει σαφέστατα ότι η κυρίαρχη τεχνολογία ανήκει στην κατηγορία της προσκολλούμενης βιομάζας.

Σε πολλές περιπτώσεις εμφανίζεται η κατάσταση ασυγκρισιμότητας στην μερική ιεράρχηση των τεχνολογιών, αλλά στην ολική ιεράρχηση η τεχνολογία του βιολογικού φίλτρου εμφανίζεται στην κυρίαρχη θέση ενώ πολύ κοντά της βρίσκεται η τεχνολογία του εμβαπτιζόμενου βιολογικού φίλτρου.

Η εμπειρία εφαρμογών δείχνει όμως ότι, η πιο δημοφιλής τεχνολογία είναι η τεχνολογία της δραστικής ιλύος η οποία στην μελέτη μας παρουσιάζεται στην τελευταία θέση στην ιεράρχηση μας σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις περισσότερες περιπτώσεις λαμβάνονται υπόψη μερικά κριτήρια επιλογής και με διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας που διαφοροποιούνται από εφαρμογή σε εφαρμογή. Συνήθως λαμβάνεται υπόψη μόνο το σταθερό κόστος και η εμπειρία εφαρμογών που διευκολύνει τον μελετητή στην επιλογή και στον σχεδιασμό ενός τέτοιου μικρού συστήματος.

## 5.2 Περιορισμός της έρευνας

Το μοντέλο που δημιουργήσαμε και ο καθορισμός των σεναρίων δεν έχει λάβει υπόψη του σοβαρούς περιορισμούς που μπορεί να υπάρχουν σε κάποια εφαρμογή. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου ένα κριτήριο να είναι τόσο σοβαρό ώστε να πρέπει να δοθεί πολύ μεγάλη βαρύτητα.

Για παράδειγμα, πολλές φορές υπάρχουν περιορισμοί σε θόρυβο, οσμές, οπτική όχληση και περιορισμός χώρου στην θέση όπου πρέπει να μελετηθεί η εφαρμογή. Αυτοί οι περιορισμοί μπορεί να είναι πολύ αυστηροί σε σημείο να αποκλείονται εξ αρχής κάποιες τεχνολογίες. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να είναι περιττή η εφαρμογή της μεθόδου μια και με μία ματιά υπάρχει το ενδεχόμενο αποκλεισμού πολλών τεχνολογιών.

Όσον αφορά την δημιουργία του ίδιου του μοντέλου, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι πολλές τιμές που αφορούν κόστη και καταναλώσεις είναι τιμές που ενδεχομένως να έχουν μία διακύμανσης έως και  $\pm 35\%$ . Είναι αυτονόητο ότι τέτοιου είδους διακυμάνσεις μπορούν να μεταβάλουν εύκολα την κατάταξη στην ιεράρχηση των τεχνολογιών και να δώσουν ένα διαφορετικό αποτέλεσμα.

Επειδή γενικά τα συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, είτε αστικών είτε βιομηχανικών, προαπαιτούν προεπεξεργασία, πρέπει να εξετάζονται στο σύνολο τους και όχι σαν αυτόνομες μονάδες.

### **5.3 Προτάσεις για εφαρμογή ή περαιτέρω μελέτη**

Όπως προαναφέραμε, η δημιουργία της μήτρας για την δημιουργία του μοντέλου επεξεργασίας των δεδομένων με την μέθοδο της πολυκριτηριακής ανάλυσης, περιέχει τιμές οι οποίες έχουν μεγάλη διακύμανση έως και 35%.

Προτείνεται λοιπόν, η περαιτέρω μελέτη και ανάλυση της ευαισθησίας της διαφοράς της ιεράρχησης των δύο επικρατέστερων τεχνολογιών. Αυτό μπορεί να γίνει με την δημιουργία ενός μοντέλου ανάλυσης ευαισθησίας με μεταβολή μίας ή και δύο τιμών ενός κριτηρίου κάθε φορά και την δημιουργία μίας συνάρτησης μεταβολής της διαφοράς του αποτελέσματος της μεθόδου για τις δύο πρώτες τεχνολογίες συναρτήσει της μεταβολής της διαφοράς της τιμής ή των τιμών του κριτηρίου.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Μαρκαντωνάτος, “Επεξεργασίας και διάθεση υγρών αποβλήτων”, 1990
- [2] George Tchobanoglous, Frankline L. Burton “Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse”, Metcalf & Eddy, Inc, Third Edition 1991, McGraw-Hill International Editions, ISBN 0-07-100824-1.
- [3] U.S. Environmental Protection Agency. 2000. Wastewater Technology Fact Sheet: Trickling Filters, Washington, D.C., EPA 832-F-00-014.
- [4] Γεώργιος Βαλκανάς, «Ρύπανση Περιβάλλοντος – Επιστήμη και Τεχνική Αντιμετώπισης», Εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα 1992.
- [5] European Commission. Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques in Common Waste Water and Waste Gas Treatment / Management Systems in the Chemical Sector. Directorate – General JRC. Institute for Prospective Technological Studies (Seville). Technologies for sustainable development. European IPPC Bureau, February 2002,  
<http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>
- [6] M. Gander, B. Jefferson, S. Judd, “Aerobic MBRs for domestic wastewater treatment: a review with cost considerations”, School of Water Sciences, Cranfield University, Elsevier Science B.V., 15 Oct. 1999, PII: S1383-5866(99)00056-8

[7] Henry Mallia, Steve Till, “Membrane Bioreactors: Wastewater treatment applications to achieve high quality effluent”, Water industry Operators Association, 2001, [http://www.awwoa.org.au/conf\\_papers/2001/paper8.htm](http://www.awwoa.org.au/conf_papers/2001/paper8.htm)

[8] Steve Churchouse, “Membrane bioreactors for wastewater treatment – operating experiences with the Kubota submerged membrane activated sludge process”, Membrane Technology No 83.

[9] H. Bauer, M. Fuerhacker, F. Zibuschka, H. Schmid, H. Puxbaum. “Bacteria and fungi in aerosols generated by two different types of wastewater treatment plants”, Elsevier Science Ltd., 12 March 2002, PII: S0043-1354(02)00121-5

[10] Annelies Balkema, “Sustainability Criteria for the comparison of wastewater treatment technologies”, Paper for the 11<sup>th</sup> European Junior Scientist Meeting, “The myth of Cycles versus Sustainable Water and Material Flux Management”, 12-15 February 1998, Wildpark Eekholt, Germany.

[11] David Williams, P.E. and Karen Durden, “Membrane Bioreactors: Feasibility and Use in Wastewater Treatment”, Jordan, Jones and Goulding, Inc, Atlanta, 2003

[12] US Army Engineering Waterways Experiment Station (WES), “Treatment Selection – Chapter 7”, EM110-2-501, February 1999.

[13] European commission, “Extensive wastewater treatment process adapted to small and medium sized communities”, Luxemburg: Office of publications of the European Community, International Office for Water, 2001, ISBN 92-894-1690-4

[14] Olivier Alexandre, Catherine Boutin, Philippe Duchène, Cécile Lagrange, Abdel Lakel, Alain Liénard, Dominique Orditz, “Filières d'épuration adaptées aux petites collectivités”, Document technique FNDAE n°22, 1998, 1ère édition - ISBN 2-85362-495-1, Cemagref 1998 – Cemagref Éditions

[15] Steve Churchouse, “Membrane bioreactors process from the laboratory to full scale use”, Membrane Technology No 111.

[16] U.S. Environmental Protection Agency. “Onsite Wastewater Treatment system manual”, February 2002, EPA/625/R-00/008.

[17] “Rotating Biological Contractors”, Ground water pollution primer, Civil Engineering Dept, Virginia Tech, January 1999,  
[http://www.cee.vt.edu/program\\_areas/environmental/teach/gwprimer/group13/rbc.html](http://www.cee.vt.edu/program_areas/environmental/teach/gwprimer/group13/rbc.html)

[18] Heidrun Schmid, Heidi Bauer, Reinhard Ellinger, Maria Fuerhacker, Usha Sree, Hans Puxbaum. “Emissions of NO, TVOC, CO<sub>2</sub>, and aerosols from a pilot-scale wastewater treatment plant with intermittent aeration”, Elsevier Science Ltd., 31 August 2000, PII: S1352-2310(00)00438-6

[19] Heidi Bauer, Maria Fuerhacker, F. Zibuschka, Heidrun Schmid, Hans Puxbaum. "Bacteria and fungi in aerosols generated by two different types of wastewater treatment plants", Elsevier Science Ltd., 12 March 2002, PII: S0043-1354(02)00121-5

[20] Kolaitis D., Giannopoulos D., Founti M. Development Of A Decision Support Tool For Sustainability Assessment Of Energy Recovery Systems. Proceedings of the International Conference on New and Renewable Technologies for Sustainable Development; 24-26 June, 2002, Azores, Portugal; paper No 12.1



## 6 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### 6.1 Συντελεστές βαρύτητας κριτηρίων σεναρίων ανάλυσης ευαισθησίας

| Βιομηχανικό Σενάριο                        |                         |                         |                         |                         |                         |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Περιγραφή Κριτηρίων g                      | Συντελεστής Βαρύτητας Α | Συντελεστής Βαρύτητας Β | Συντελεστής Βαρύτητας Γ | Συντελεστής Βαρύτητας Δ | Συντελεστής Βαρύτητας Ε |
| Βαθμός απόδοσης                            | 7,00%                   | 6,00%                   | 6,00%                   | 6,00%                   | 6,00%                   |
| Αντοχή Η/Μ                                 | 3,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   |
| Ευελιξία                                   | 7,00%                   | 6,00%                   | 6,00%                   | 6,00%                   | 6,00%                   |
| Απαιτήσεις συντήρησης κατά την λειτουργία. | 3,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   |
| Κόστος επένδυσης                           | 17,50%                  | 14,00%                  | 17,50%                  | 17,50%                  | 17,50%                  |
| Λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης   | 17,50%                  | 21,00%                  | 17,50%                  | 17,50%                  | 17,50%                  |
| Αέρια απόβλητα (aerosols, VOCs)            | 2,00%                   | 2,00%                   | 2,00%                   | 2,00%                   | 2,00%                   |
| Οσμές                                      | 2,00%                   | 2,00%                   | 4,00%                   | 2,00%                   | 2,00%                   |
| Στερεά απόβλητα (ιλύς)                     | 6,00%                   | 6,00%                   | 4,00%                   | 6,00%                   | 6,00%                   |
| Κατανάλωση ενέργειας                       | 12,00%                  | 12,00%                  | 12,00%                  | 8,00%                   | 12,00%                  |
| Χρήση γης                                  | 8,00%                   | 8,00%                   | 8,00%                   | 12,00%                  | 8,00%                   |
| Επίπεδο ανάπτυξης τεχνολογίας              | 7,50%                   | 7,50%                   | 7,50%                   | 7,50%                   | 6,00%                   |
| Εμπορικές μονάδες                          | 7,50%                   | 7,50%                   | 7,50%                   | 7,50%                   | 9,00%                   |

| Σενάριο Αειφόρου Ανάπτυξης                 |                         |                         |                         |                         |                         |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Περιγραφή Κριτηρίων g                      | Συντελεστής Βαρύτητας Α | Συντελεστής Βαρύτητας Β | Συντελεστής Βαρύτητας Γ | Συντελεστής Βαρύτητας Δ | Συντελεστής Βαρύτητας Ε |
| Βαθμός απόδοσης                            | 7,00%                   | 6,00%                   | 6,00%                   | 6,00%                   | 6,00%                   |
| Αντοχή Η/Μ                                 | 3,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   |
| Ευελιξία                                   | 7,00%                   | 6,00%                   | 6,00%                   | 6,00%                   | 6,00%                   |
| Απαιτήσεις συντήρησης κατά την λειτουργία. | 3,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   |
| Κόστος επένδυσης                           | 7,50%                   | 6,00%                   | 7,50%                   | 7,50%                   | 7,50%                   |
| Λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης   | 7,50%                   | 9,00%                   | 7,50%                   | 7,50%                   | 7,50%                   |
| Αέρια απόβλητα (aerosols, VOCs)            | 4,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   |
| Οσμές                                      | 4,00%                   | 4,00%                   | 8,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   |
| Στερεά απόβλητα (ιλύς)                     | 12,00%                  | 12,00%                  | 8,00%                   | 12,00%                  | 12,00%                  |
| Κατανάλωση ενέργειας                       | 21,00%                  | 21,00%                  | 21,00%                  | 14,00%                  | 21,00%                  |
| Χρήση γης                                  | 14,00%                  | 14,00%                  | 14,00%                  | 21,00%                  | 14,00%                  |
| Επίπεδο ανάπτυξης τεχνολογίας              | 5,00%                   | 5,00%                   | 5,00%                   | 5,00%                   | 4,00%                   |
| Εμπορικές μονάδες                          | 5,00%                   | 5,00%                   | 5,00%                   | 5,00%                   | 6,00%                   |

| Σενάριο Τεχνολογικού Ρίσκου                |                         |                         |                         |                         |                         |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Περιγραφή Κριτηρίων g                      | Συντελεστής Βαρύτητας Α | Συντελεστής Βαρύτητας Β | Συντελεστής Βαρύτητας Γ | Συντελεστής Βαρύτητας Δ | Συντελεστής Βαρύτητας Ε |
| Βαθμός απόδοσης                            | 12,25%                  | 10,50%                  | 10,50%                  | 10,50%                  | 10,50%                  |
| Αντοχή Η/Μ                                 | 5,25%                   | 7,00%                   | 7,00%                   | 7,00%                   | 7,00%                   |
| Ευελιξία                                   | 12,25%                  | 10,50%                  | 10,50%                  | 10,50%                  | 10,50%                  |
| Απαιτήσεις συντήρησης κατά την λειτουργία. | 5,25%                   | 7,00%                   | 7,00%                   | 7,00%                   | 7,00%                   |
| Κόστος επένδυσης                           | 10,00%                  | 8,00%                   | 10,00%                  | 10,00%                  | 10,00%                  |
| Λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης   | 10,00%                  | 12,00%                  | 10,00%                  | 10,00%                  | 10,00%                  |
| Αέρια απόβλητα (aerosols, VOCs)            | 4,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   |
| Οσμές                                      | 4,00%                   | 4,00%                   | 8,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   |
| Στερεά απόβλητα (ιλύς)                     | 12,00%                  | 12,00%                  | 8,00%                   | 12,00%                  | 12,00%                  |
| Κατανάλωση ενέργειας                       | 12,00%                  | 12,00%                  | 12,00%                  | 8,00%                   | 12,00%                  |
| Χρήση γης                                  | 8,00%                   | 8,00%                   | 8,00%                   | 12,00%                  | 8,00%                   |
| Επίπεδο ανάπτυξης τεχνολογίας              | 2,50%                   | 2,50%                   | 2,50%                   | 2,50%                   | 2,00%                   |
| Εμπορικές μονάδες                          | 2,50%                   | 2,50%                   | 2,50%                   | 2,50%                   | 3,00%                   |

| Οικολογικό Σενάριο                         |                         |                         |                         |                         |                         |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Περιγραφή Κριτηρίων g                      | Συντελεστής Βαρύτητας Α | Συντελεστής Βαρύτητας Β | Συντελεστής Βαρύτητας Γ | Συντελεστής Βαρύτητας Δ | Συντελεστής Βαρύτητας Ε |
| Βαθμός απόδοσης                            | 7,00%                   | 6,00%                   | 6,00%                   | 6,00%                   | 6,00%                   |
| Αντοχή Η/Μ                                 | 3,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   |
| Ευελιξία                                   | 7,00%                   | 6,00%                   | 6,00%                   | 6,00%                   | 6,00%                   |
| Απαιτήσεις συντήρησης κατά την λειτουργία. | 3,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   | 4,00%                   |
| Κόστος επένδυσης                           | 5,00%                   | 4,00%                   | 5,00%                   | 5,00%                   | 5,00%                   |
| Λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης   | 5,00%                   | 6,00%                   | 5,00%                   | 5,00%                   | 5,00%                   |
| Αέρια απόβλητα (aerosols, VOCs)            | 7,00%                   | 7,00%                   | 7,00%                   | 7,00%                   | 7,00%                   |
| Οσμές                                      | 7,00%                   | 7,00%                   | 14,00%                  | 7,00%                   | 7,00%                   |
| Στερεά απόβλητα (ιλύς)                     | 21,00%                  | 21,00%                  | 14,00%                  | 21,00%                  | 21,00%                  |
| Κατανάλωση ενέργειας                       | 15,00%                  | 15,00%                  | 15,00%                  | 10,00%                  | 15,00%                  |
| Χρήση γης                                  | 10,00%                  | 10,00%                  | 10,00%                  | 15,00%                  | 10,00%                  |
| Επίπεδο ανάπτυξης τεχνολογίας              | 5,00%                   | 5,00%                   | 5,00%                   | 5,00%                   | 4,00%                   |
| Εμπορικές μονάδες                          | 5,00%                   | 5,00%                   | 5,00%                   | 5,00%                   | 6,00%                   |