



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΕΡΙΩΝ, ΥΓΡΩΝ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΩΝ**  
**ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ**

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών  
«Περιβαλλοντική και Υγειονομική Μηχανική»

Ρεβέκκα Λώλη  
Χημικός Μηχανικός

**«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ**  
**ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΜΕ ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ»**

Μεταπτυχιακή Διατριβή



Επιβλέπων Καθηγητής  
Αλέξανδρος Οικονομόπουλος

**ΧΑΝΙΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2006**

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Διαχείρισης Αερίων, Υγρών και Στερεών Αποβλήτων του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Περιβαλλοντική και Υγειονομική Μηχανική», από τον Σεπτέμβριο του 2005, μέχρι τον Δεκέμβριο του 2006.

Επιβλέπων καθηγητής της παρούσας εργασίας είναι ο Καθηγητής κ. Αλέξανδρος Οικονομόπουλος, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά για την ανάθεση και την συνολική επίβλεψη της εργασίας.

Ρεβέκκα Λώλη

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	<u>Σελ</u>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>5</b>
<b>A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b>	<b>7</b>
<b>1. ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ</b>	<b>8</b>
<b>1.1 ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΑΠΟΒΛΗΤΟΥ</b>	<b>9</b>
<b>1.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ</b>	<b>11</b>
<b>1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ</b>	<b>15</b>
<b>2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ</b>	<b>17</b>
<b>2.1 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ – ΠΡΩΤΟΒΑΘΜΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ</b>	<b>17</b>
<b>2.2 Ο ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΥΜΕΝΑΣ</b>	<b>18</b>
<b>2.3 ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΥΜΕΝΑ</b>	<b>20</b>
<b>2.4 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΤΟΥ ΒΟD</b>	<b>21</b>
<b>2.5 ΠΛΗΡΩΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ</b>	<b>23</b>
<b>2.6 ΑΝΕΠΙΘΥΜΗΤΕΣ ΟΣΜΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ</b>	<b>24</b>
<b>3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ</b>	<b>26</b>
<b>3.1 ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ</b>	<b>26</b>
<b>3.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ</b>	<b>28</b>
<b>3.3 ΔΟΣΟΜΕΤΡΙΚΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ</b>	<b>32</b>
<b>3.4 ΎΨΟΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΦΙΛΤΡΟΥ</b>	<b>36</b>
<b>3.5 ΑΕΡΙΣΜΟΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΦΙΛΤΡΟΥ</b>	<b>37</b>
<b>3.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ</b>	<b>41</b>
<b>B. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b>	<b>43</b>
<b>4. ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ</b>	<b>44</b>
<b>4.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ</b>	<b>45</b>
<b>4.1.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΟΓΚΟΥ – ΛΟΓΟΥ ΑΝΑΡΡΟΗΣ</b>	<b>46</b>
<b>4.1.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ – ΛΟΓΟΥ ΑΝΑΡΡΟΗΣ</b>	<b>49</b>
<b>5. Η ΕΞΙΣΩΣΗ NRC</b>	<b>52</b>
<b>5.1 ΔΙΑΤΑΞΗ</b>	<b>54</b>
<b>5.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΟΓΚΟΥ – ΛΟΓΟΥ ΑΝΑΡΡΟΗΣ</b>	<b>55</b>
<b>5.2.1 ΔΙΑΤΑΞΗ 1</b>	<b>55</b>
<b>5.2.1.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΙΣΟΔΟΥ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ 1</b>	<b>60</b>
<b>5.2.2 ΔΙΑΤΑΞΗ 2</b>	<b>71</b>
<b>5.2.2.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΙΣΟΔΟΥ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ 2</b>	<b>75</b>
<b>5.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ 1 ΚΑΙ 2</b>	<b>82</b>
<b>5.3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ – ΛΟΓΟΥ ΑΝΑΡΡΟΗΣ</b>	<b>95</b>
<b>5.3.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ</b>	<b>96</b>
<b>6. Η ΕΞΙΣΩΣΗ GALLER ΚΑΙ GOTAAS</b>	<b>99</b>
<b>6.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ – ΛΟΓΟΥ ΑΝΑΡΡΟΗΣ</b>	<b>102</b>
<b>6.1.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ</b>	<b>105</b>
<b>7. Η ΕΞΙΣΩΣΗ VELZ</b>	<b>106</b>
<b>7.1 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΕΞΙΣΩΣΗ VELZ</b>	<b>107</b>
<b>7.2 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ Κ</b>	<b>108</b>
<b>7.3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ – ΛΟΓΟΥ ΑΝΑΡΡΟΗΣ</b>	<b>109</b>
<b>7.3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ</b>	<b>111</b>

<b>8. Η ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΟΥ SCHULZE</b>	<b>115</b>
<b>8.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ – ΛΟΓΟΥ ΑΝΑΡΡΟΗΣ</b>	<b>119</b>
<b>8.1.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ</b>	<b>121</b>
<b>9. Η ΕΞΙΣΩΣΗ ECKENFELDER</b>	<b>123</b>
<b>9.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ – ΛΟΓΟΥ ΑΝΑΡΡΟΗΣ</b>	<b>125</b>
<b>9.1.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ</b>	<b>125</b>
<b>10. Η ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΟΥ GERMAIN</b>	<b>127</b>
<b>10.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ – ΛΟΓΟΥ ΑΝΑΡΡΟΗΣ</b>	<b>129</b>
<b>10.1.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ</b>	<b>130</b>
<b>11. ΒΡΕΤΑΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ</b>	<b>131</b>
<b>11.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ – ΛΟΓΟΥ ΑΝΑΡΡΟΗΣ</b>	<b>133</b>
<b>11.1.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ</b>	<b>135</b>
<b>12. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ</b>	<b>141</b>
<b>12.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΦΙΛΤΡΑ ΜΕ ΚΡΟΚΑΛΕΣ</b>	<b>141</b>
<b>12.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΦΙΛΤΡΑ ΜΕ ΠΛΑΣΤΙΚΟ</b>	<b>146</b>
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>152</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>156</b>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Εδώ και περισσότερο από εκατό χρόνια, έχει παρατηρηθεί ότι η διαδικασία αυτοκαθαρισμού του νερού στα ποτάμια, στα ρυάκια, στις λίμνες αλλά και στα θαλάσσια υδάτινα περιβάλλοντα, έχει συνδεθεί με την ανάπτυξη υδρόβιων μικροοργανισμών και φυτικών σχηματισμών (βρύα, λειχήνες κλπ.), που σχηματίζουν ένα βιολογικό στρώμα πάνω στις πέτρες των υδάτινων αποδεκτών. Οι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται καταναλώνοντας το οργανικό υπόστρωμα του νερού, συντελώντας έτσι στον καθαρισμό του από τους ρύπους που περιέχει.

Τα βιολογικά φίλτρα είναι μία από τις μεθόδους επεξεργασίας που αναπτύχθηκαν προκειμένου να αντιγράψουν αυτή την φυσική διεργασία, επιταχύνοντάς την με έναν οικονομικό και αποτελεσματικό τρόπο, έτσι ώστε να αναπτυχθεί μια ικανοποιητική μέθοδος επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων. Στόχος ήταν να παρασχεθεί μια κατάλληλη επιφάνεια ανάπτυξης των μικροοργανισμών, έτσι ώστε να μπορούν να έρχονται σε επαναλαμβανόμενη επαφή με το απόβλητο και με τον αέρα, που θα τους παρέχει το κατάλληλο υπόστρωμα και το οξυγόνο για την ανάπτυξή τους. Έτσι, παράλληλα με την ανάπτυξη των μικροοργανισμών γίνεται και ο καθαρισμός του αποβλήτου από τους οργανικούς ρύπους που περιέχει.

Η αποτελεσματικότητα ενός βιολογικού φίλτρου εξαρτάται από τον βαθμό βιοχημικής οξείδωσης του οργανικού υποστρώματος, το οποίο, βάσει του ισοζυγίου μάζας και ενέργειας, μετατρέπεται σε βιομάζα, δηλαδή σε νέους μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται, και σε ενέργεια που απελευθερώνεται ως θερμότητα στο μέσο. Επίσης, ένα ποσοστό της εισερχόμενης οργανικής μάζας, 5 έως 15%, παραμένει στο απόβλητο και εξέρχεται από το βιολογικό φίλτρο σε διαλυτή μορφή, ή ως αιωρούμενα σωματίδια.

Στην βιβλιογραφία υπάρχει ένα πλήθος εμπειρικών εξισώσεων που έχουν αναπτυχθεί από διάφορους ερευνητές και που προβλέπουν την απόδοση ενός βιολογικού φίλτρου, αλλά και συσχετίζουν τις βασικές παραμέτρους σχεδιασμού. Στην παρούσα εργασία επιχειρούμε να κάνουμε μια σύγκριση των εξισώσεων αυτών με βάση τον υπολογισμό της απόδοσης σε συστήματα βιολογικών φίλτρων για την επεξεργασία αστικών αποβλήτων. Η σύγκριση αυτή επιτυγχάνεται με προσομοίωση της επεξεργασίας βάσει λογισμικών που έχουν αναπτυχθεί σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran, από τα οποία προκύπτουν σειρές αποτελεσμάτων που αντιστοιχούν σε καθεμία από τις εμπειρικές

εξισώσεις που μελετάμε. Από τα αποτελέσματα αυτά μπορούμε να εξαγάγουμε συμπεράσματα για την αριστοποίηση των παραμέτρων σχεδιασμού ενός συστήματος βιολογικών φίλτρων, να συγκρίνουμε τις τιμές της απόδοσης επεξεργασίας που προκύπτουν από τις εμπειρικές εξισώσεις και να ελέγξουμε την αξιοπιστία τους, και γενικά να μελετήσουμε την συμπεριφορά των βιολογικών φίλτρων υπό το πρίσμα των εξισώσεων αυτών.

Η μελέτη των βιολογικών φίλτρων μπορεί να έχει επιστημονικό και τεχνοοικονομικό ενδιαφέρον και σήμερα, παρόλο που οι πρώτες εξισώσεις αναπτύχθηκαν στην δεκαετία του 1940. Πράγματι, η εξέλιξη της σχετικής τεχνογνωσίας και τεχνολογίας έχει επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις στην ποιότητα του επεξεργασμένου αποβλήτου, με αποτέλεσμα οι διεργασίες βιολογικών φίλτρων να μπορούν σήμερα να χρησιμοποιηθούν και ως προχωρημένες μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (AWT). Βασικό ρόλο στην επίτευξη της βέλτιστης επεξεργασίας έχει η αριστοποίηση του σχεδιασμού, στον οποίο μπορεί να συμβάλλει ουσιαστικά η χρήση των εμπειρικών εξισώσεων που θα μελετήσουμε.

## **A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

## 1. ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Τα βιολογικά φίλτρα (trickling filters) είναι μία από τις παλαιότερες μεθόδους βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, και χρησιμοποιούνται εδώ και εκατό χρόνια περίπου, τόσο για τα αστικά, όσο και για τα βιομηχανικά απόβλητα. Σαν ορισμό, θα μπορούσαμε να πούμε ότι το βιολογικό φίλτρο είναι ένας βιολογικός αντιδραστήρας μη βεβυθισμένης σταθεράς κλίνης με πληρωτικό υλικό από πέτρα ή πλαστικό, πάνω από το οποίο διοχετεύεται συνεχώς το προς επεξεργασία απόβλητο.

Η αρχή λειτουργίας ενός βιολογικού φίλτρου είναι η εξής: πάνω στην επιφάνεια του πληρωτικού υλικού αναπτύσσεται ένα βιολογικό στρώμα ιλύος, το οποίο περιέχει πολλά είδη μικροοργανισμών, όπως αερόβια και αναερόβια βακτήρια, μύκητες, άλγη και πρωτόζωα, αλλά και ανώτερους οργανισμούς, όπως σκουλήκια, νύμφες εντόμων και σαλιγκάρια. Το υπόστρωμα των ρύπων που περιέχεται στο απόβλητο υφίσταται βιολογική διάσπαση από τους μικροοργανισμούς του βιολογικού στρώματος, οπότε μειώνεται αισθητά το BOD του αποβλήτου. Η διάσπαση του οργανικού υποστρώματος γίνεται με προσρόφηση του οργανικού υλικού του αποβλήτου στο στρώμα της ιλύος, όπου και υφίσταται βιολογική αποδόμηση.

Εκτός από το πληρωτικό υλικό, που αποτελεί την καρδιά του βιολογικού φίλτρου, άλλα στοιχεία που το απαρτίζουν είναι μία δοσομετρική διάταξη εφαρμογής του αποβλήτου στο φίλτρο, το σύστημα αποστράγγισης του εξερχόμενου υγρού και η διάταξη που περιέχει το πληρωτικό υλικό.

Η διάταξη εφαρμογής του αποβλήτου, συνήθως είναι ένα υδραυλικό ή ηλεκτρικό σύστημα με περιστροφικούς βραχίονες που διαθέτουν ανοίγματα τοποθετημένα έτσι ώστε η παροχή του αποβλήτου ανά μονάδα επιφάνειας του φίλτρου να είναι ομοιόμορφη. Η εφαρμογή του αποβλήτου γίνεται συνήθως στην κορυφή του βιολογικού φίλτρου, ενώ η περιστροφή των βραχιόνων γίνεται είτε λόγω της ροής του αποβλήτου είτε με ηλεκτρικό σύστημα ελέγχου, οπότε γίνεται καλύτερος σχεδιασμός της ταχύτητας περιστροφής.

Το σύστημα αποστράγγισης έχει πορώδη δομή και είναι κατασκευασμένο από υαλοποιημένη άργιλο ή fiberglass. Μέσα από την πορώδη δομή του απομακρύνεται το επεξεργασμένο υγρό απόβλητο, αλλά και διευκολύνεται η κυκλοφορία του αέρα μέσα από την μάζα του πληρωτικού υλικού, έτσι ώστε να παρέχεται οξυγόνο στους μικροοργανισμούς για την διάσπαση του οργανικού φορτίου.



Ο πύργος που περιέχει το πληρωτικό υλικό, μπορεί να έχει διατομή κυκλική, τετραγωνική ή άλλου σχήματος, ενώ το ύψος του όταν το πληρωτικό υλικό είναι από πέτρα, κυμαίνεται από 0.9 έως 2.5m, με μέσο όρο 1.8m. Το ύψος των πύργων με πλαστικό πληρωτικό υλικό είναι από 4 έως 12m. Στο παρελθόν, ως πληρωτικό υλικό χρησιμοποιούνταν οι κροκάλες, σήμερα όμως στα περισσότερα φίλτρα έχουν αντικατασταθεί από πλαστικό, ενώ πρακτικά σε όλα τα βιολογικά φίλτρα που κατασκευάζονται σήμερα χρησιμοποιείται πλαστικό πληρωτικό υλικό.

Πριν από την είσοδό του στο βιολογικό φίλτρο, το απόβλητο εισάγεται σε δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης, όπου μειώνεται σημαντικά η συγκέντρωση των οργανικών ρύπων (BOD) και τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS), αλλά και απομακρύνονται τυχόν μεγαλύτερα σωματίδια που μπορεί να οδηγήσουν στο φράξιμο του βιολογικού φίλτρου. Η δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης χρησιμοποιείται πάντα όταν το πληρωτικό υλικό είναι από πέτρα, και τις περισσότερες φορές όταν χρησιμοποιείται πλαστικό πληρωτικό υλικό. Στην δεύτερη περίπτωση, αντί της πρωτοβάθμιας δεξαμενής μπορεί να τοποθετηθεί ένα φίλτρο συγκράτησης των ογκωδών σωματιδίων, και κυρίως των ελαφρών σωματιδίων από πλαστικό ή ελαστικό.

Μετά την έξοδό του από το βιολογικό φίλτρο, το απόβλητο οδηγείται μέσω του συστήματος αποστράγγισης σε δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, όπου γίνεται διαχωρισμός των στερεών από το υγρό. Συνήθως, ένα ποσοστό του υγρού αποβλήτου που εξέρχεται από το βιολογικό φίλτρο ή από την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, ανακυκλώνεται και οδηγείται για περαιτέρω επεξεργασία είτε στην είσοδο του βιολογικού φίλτρου είτε στην πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης. Αυτό γίνεται για την μείωση του φορτίου BOD του εισερχόμενου αποβλήτου, αλλά και για να παρέχεται στο φίλτρο η υγρασία που απαιτείται ώστε να διατηρείται υγρός ο βιολογικός υμένας. Η υγρασία είναι απαραίτητη για την φυσιολογική ανάπτυξη των βακτηριδίων του βιολογικού υμένα, ενώ σε αντίθετη περίπτωση εμφανίζεται πτώση στην απόδοση του φίλτρου.

### **1.1 Σύσταση του αποβλήτου**

Ο όρος BOD του αποβλήτου εκφράζει το βιοχημικώς απαιτούμενο οξυγόνο για την κατανάλωση του οργανικού υποστρώματος που περιέχεται σε

ένα απόβλητο, και μετράται σε mg/L, δηλαδή σε mg οξυγόνου ανά λίτρο υγρού αποβλήτου. Προκειμένου για τα αστικά απόβλητα, με τα οποία ασχολούμαστε στην παρούσα εργασία, αλλά και γενικά για τα υγρά απόβλητα, όταν αναφερόμαστε στο BOD εννοούμε το BOD<sub>5</sub>, δηλαδή το οξυγόνο που απαιτείται για την βιοχημική οξείδωση των ρύπων σε διάστημα πέντε ημερών. Στο εξής όταν αναφερόμαστε στο όρο BOD θα εννοούμε το BOD<sub>5</sub>.

Ο όρος BOD μπορεί να αναφέρεται στο ολικό BOD (ή απλά BOD), στα ολικά αιωρούμενα σωματίδια (TSS BOD), ή στο BOD που βρίσκεται σε διαλυτή μορφή (SBOD). Επίσης, αναφέρεται και το CBOD που οφείλεται στο περιεχόμενο του αποβλήτου σε άνθρακα. Το ολικό BOD ενός αποβλήτου είναι το άθροισμα του διαλυτού BOD και του BOD των αιωρούμενων σωματιδίων:

$$\text{BOD} = \text{SBOD} + \text{TSS BOD} \quad (1.1)$$

Ο όρος SBOD εκφράζει το οργανικό υπόστρωμα του αποβλήτου που απομένει μετά από διήθηση σε φίλτρο διαμέτρου πόρων 1.2 ή 1.5 μm, αλλά αυτό πρέπει να καθορίζεται, γιατί διαφορετικά ο όρος SBOD μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά.

Το BOD, διαλυτό BOD και TSS ενός αποβλήτου προσδιορίζει τόσο την ισχύ του αποβλήτου που τροφοδοτεί ένα σύστημα επεξεργασίας, όσο και την ποιότητα του επεξεργασμένου αποβλήτου που εξέρχεται από αυτό. Σε ένα σύστημα επεξεργασίας αστικών αποβλήτων με βιολογικά φίλτρα, οι παράμετροι αυτές συνήθως μεταβάλλονται κατά την διάρκεια του εικοσιτετραώρου, καθώς επίσης και η παροχή του αποβλήτου, που κατά την διάρκεια της νύχτας μειώνεται σημαντικά. Ένα βασικό πλεονέκτημα των βιολογικών φίλτρων είναι η σχετικά καλή ικανότητα απορρόφησης των «κραδασμών», δηλαδή των διαταραχών που προκαλούν στην ομαλή λειτουργία τους αυτού του είδους οι διακυμάνσεις. Συνήθως, προκειμένου να γίνει ο σχεδιασμός ενός βιολογικού φίλτρου, χρησιμοποιείται μια μέση τιμή για την παροχή και την ισχύ του αποβλήτου σε ημερήσια βάση.

Μεγάλη σημασία για το πόσο εύκολα επεξεργάσιμο είναι ένα απόβλητο έχει και η σύσταση των ρύπων που περιέχει. Ειδικά για τα βιολογικά φίλτρα, αυτό εξαρτάται από τον λόγο της συγκέντρωσης των κολλοειδών και αιωρούμενων σωματιδίων προς την συγκέντρωση των διαλυτών ρύπων. Πράγματι, τα κολλοειδή και αιωρούμενα συστατικά του αποβλήτου απομακρύνονται πολύ πιο εύκολα σε ένα βιολογικό φίλτρο με διάφορες ταυτόχρονες διεργασίες όπως βιολογική κροκίδωση, προσρόφηση και ενζυμική

συμπλοκοποίηση, σε συνδυασμό με την βιολογική οξείδωση και την κατανάλωση από τους μικροοργανισμούς για την σύνθεση νέων κυττάρων. Όσον αφορά στους διαλυτούς ρύπους, τα πιο μικρά και απλά μόρια, όπως τα απλά σάκχαρα, τα οργανικά οξέα, οι αλκοόλες κλπ., απομακρύνονται επίσης σχετικά εύκολα από ένα βιολογικό φίλτρο. Αντίθετα, τα σύνθετα και ανθεκτικά μόρια καθώς και τα μη κροκιδούμενα διαλυμένα σωματίδια, επειδή απαιτούν μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας από τον σύντομο χρόνο παραμονής ενός βιολογικού φίλτρου, δεν απομακρύνονται ικανοποιητικά.

Η επεξεργασιμότητα ενός ρύπου εκφράζεται μέσω μιας σταθεράς ρυθμού, που είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο πιο απλός και εύκολα διασπάσιμος είναι ένας ρύπος. Τα απλά οργανικά μόρια έχουν μεγάλες σταθερές ρυθμού, ενώ οι σύνθετες ενώσεις έχουν μικρότερες σταθερές. Η επεξεργασιμότητα ενός αποβλήτου συνολικά επηρεάζεται από τις σταθερές ρυθμού των ρύπων που περιέχει, και συνήθως μειώνεται όταν έχει αυξημένο ποσοστό βιομηχανικών ρύπων.

## **1.2 Ταξινόμηση Βιολογικών Φίλτρων**

Τα βιολογικά φίλτρα μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το μέγεθος της επιφανειακής ή της οργανικής φόρτισης που δέχονται, καθώς και ανάλογα με το είδος του πληρωτικού υλικού, που μπορεί να είναι από πέτρα ή από πλαστικό. Η επιφανειακή φόρτιση ορίζεται ως ο ολικός όγκος υγρού αποβλήτου που διέρχεται μέσα από το φίλτρο ανά μονάδα επιφάνειας της κάθετης διατομής του και ανά μονάδα χρόνου. Στο διεθνές σύστημα μετράται συνήθως σε  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , ή σε  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , ενώ στο αμερικάνικο μετρικό σύστημα οι μονάδες μέτρησης είναι το  $\text{mgd}/\text{ac}$  (εκατομμύρια γαλόνια ανά ημέρα και ανά ακρ), το  $\text{gpm}/\text{sq ft}$  (γαλόνια ανά λεπτό και ανά τετραγωνικό πόδι), ή το  $\text{m}^3/(\text{ha} \cdot \text{d})$  (κυβικό μέτρο ανά εκτάριο και ανά ημέρα). Η οργανική φόρτιση ενός φίλτρου ορίζεται ως η μάζα του BOD του αποβλήτου που εφαρμόζεται σε αυτό ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα χρόνου, και μετράται σε  $\text{kg BOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  ή  $\text{lb}/(1000 \text{ cu ft} \cdot \text{d})$  (λίβρες ανά χίλια κυβικά πόδια και ανά ημέρα). Επίσης μπορεί να οριστεί και ως μάζα του BOD ανά μονάδα επιφάνειας της κάθετης διατομής και ανά μονάδα χρόνου, οπότε μετράται σε  $\text{kg BOD}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , και αναφέρεται ως επιφανειακή οργανική φόρτιση.

Όταν υπάρχει ανακύκλωση αποβλήτου στο βιολογικό φίλτρο, ο υπολογισμός της επιφανειακής και της οργανικής φόρτισης γίνεται πιο σύνθετος. Ορισμένες εμπειρικές εξισώσεις υπολογισμού της απόδοσης συνυπολογίζουν και την ανακύκλωση και χρησιμοποιούν την ολική επιφανειακή φόρτιση, ενώ άλλες όχι. Ο υπολογισμός της οργανικής φόρτισης είναι πιο πολύπλοκος γιατί το απόβλητο που εισέρχεται στο φίλτρο υφίσταται αραίωση λόγω της ανακύκλωσης. Η αραίωση αυτή πρέπει να υπολογιστεί ξεχωριστά ανάλογα με την συγκεκριμένη διάταξη ανακύκλωσης που χρησιμοποιείται σε κάθε εγκατάσταση, οπότε συχνά αγνοείται η επίδρασή της στην οργανική φόρτιση, και χρησιμοποιείται κάποιος παράγοντας αύξησης της απόδοσης λόγω της ανακύκλωσης..

Υπάρχει μια ιστορική ταξινόμηση των φίλτρων με πληρωτικό υλικό από πέτρα σε χαμηλής φόρτισης, μέσης φόρτισης και μεγάλης φόρτισης, ενώ τα φίλτρα με πλαστικό πληρωτικό υλικό αναφέρονται συνήθως ως μεγάλης φόρτισης ή «ταχείας επεξεργασίας». Για την παραπάνω ταξινόμηση λαμβάνεται υπόψη και ο χρησιμοποιούμενος λόγος αναρροής, ενώ εκτιμάται και το αναμενόμενο εύρος τιμών της απόδοσης απομάκρυνσης BOD. Τα παραπάνω συνοψίζονται στον Πίνακα 1.

**Πίνακας 1:** Ιστορική ταξινόμηση των βιολογικών φίλτρων βάσει της επιφανειακής και της οργανικής φόρτισης

Χαρακτ/κά Σχεδιασμού	Χαμηλής Φόρτισης	Μέσης Φόρτισης	Μεγάλης Φόρτισης	Μεγάλης Φόρτισης	Ταχείας Επεξεργασίας
<b>Πληρωτικό υλικό</b>	Πέτρα	Πέτρα	Πέτρα	Πλαστικό	Πέτρα ή Πλαστικό
<b>Επιφανειακή φόρτιση (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>*d)</b>	1 – 4 <sup>α</sup>	4 – 10	10 – 40	10 – 75	40 – 200
	1.0 – 3.6 <sup>β</sup>	3.6 – 9.4	9.4 – 36	14.2 – 86.4	57.6 – 170.4
	0.9 – 3.7 <sup>γ</sup>	3.7 – 9.3	9.3 – 37.2	13.9 – 83.6	55.7 – 167.2
<b>Οργανική φόρτιση (kg BOD /m<sup>3</sup>*d)</b>	0.07 – 0.22 <sup>α</sup>	0.24 – 0.48	0.4 – 2.4	0.6 – 3.2	> 1.5
	0.07 – 0.22 <sup>β1</sup>	0.26 – 0.51	0.4 – 1.8	–	–
	0.08 – 0.24 <sup>β2</sup>	0.24 – 0.50	0.5 – 2.4	≤ 5	> 1.6
	0.07 – 0.22 <sup>γ1</sup>	0.26 – 0.51	0.37 – 1.83	–	–
	0.08 – 0.24 <sup>γ2</sup>	0.24 – 0.48	0.48 – 2.4	≤ 4.8	> 1.6
<b>Λόγος αναρροής (R)</b>	0	0 - 1	1 - 2	1 - 2	0 - 2
<b>Ύψος πληρ. υλικού (m)</b>	1.8 – 2.4	1.8 – 2.4	1.8 – 2.4	3.0 – 12.2	0.9 – 6.0
<b>Απόδοση απομάκρ/σης BOD</b>	0.8 – 0.9	0.5 – 0.8	0.5 – 0.9	0.6 – 0.9	0.4 – 0.7

\* Οι δείκτες α, β, γ, α1, β1, γ1 που αναγράφονται στην δεύτερη στήλη του πίνακα ισχύουν ομοίως και για όλες τις επόμενες στήλες

α) Metcalf & Eddy (2003) (Revised by G. Tchobanoglous, F.L. Burton and H. D. Stensel) “Wastewater Engineering – Treatment and Reuse”

β) WEF (2003) Aerobic Fixed-Growth Reactors

β1) Συνυπολογίζοντας την ανακύκλωση

β2) Χωρίς την ανακύκλωση

γ) WEF (1998) Design of Municipal Wastewater Treatment Plants, Volume 2

γ1) Συνυπολογίζοντας την ανακύκλωση

γ2) Χωρίς την ανακύκλωση

Τα φίλτρα χαμηλής φόρτισης συνήθως έχουν κυκλική ή ορθογώνια διατομή, και μπορούν να παράσχουν σταθερή ποιότητα εξερχόμενου αποβλήτου για εισερχόμενο απόβλητο μεταβαλλόμενης ισχύος. Πολλές φορές απαιτείται ανακύκλωση μέρους του αποβλήτου, ιδιαίτερα στις μικρές εγκαταστάσεις, για να μην δημιουργούνται ανωμαλίες στην τροφοδοσία λόγω των μικρών παροχών κατά την διάρκεια της νύχτας. Οι διακοπές στην παροχή αποβλήτου, όταν διαρκούν περισσότερο από μία ή δύο ώρες μειώνουν την απόδοση επεξεργασίας, γιατί μεταβάλλεται η σύσταση του βιολογικού υμένα του φίλτρου λόγω έλλειψης υγρασίας. Στα φίλτρα χαμηλής φόρτισης, ο βιολογικός υμένας αναπτύσσεται μόνο στο ανώτερο στρώμα του πληρωτικού υλικού, σε βάθος 0.6 έως 1.2 m, ενώ σε μεγαλύτερο βάθος αναπτύσσονται περισσότερο αυτότροφα βακτήρια που επιτελούν νιτροποίηση της αμμωνίας.

Τα φίλτρα μέσης ή μεγάλης φόρτισης είναι συνήθως κυκλικής διατομής, η ροή του αποβλήτου σε αυτά είναι συνεχής και χρησιμοποιείται ανακύκλωση μέρους του αποβλήτου που εξέρχεται είτε από το βιολογικό φίλτρο, είτε από την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης. Η ανακύκλωση παρέχει στο σύστημα μεγαλύτερη οργανική φόρτιση, και μεγαλύτερη επιφανειακή φόρτιση, που επιτρέπει την καλύτερη κατανομή του αποβλήτου σε όλη τη μάζα του πληρωτικού υλικού, καλύτερη ρύθμιση του πάχους του βιολογικού υμένα και μεγαλύτερη παροχή οξυγόνου. Επίσης προφυλάσσει από την έμφραξη του πληρωτικού υλικού. Για το σκοπό αυτό, στα φίλτρα με πληρωτικό υλικό από πέτρα, το εύρος της οργανικής φόρτισης που χρησιμοποιείται συνήθως κυμαίνεται από 0.3 έως 1.0 kg/(m<sup>3</sup>\*d). Στα συστήματα μέσης ή μεγάλης φόρτισης, αλλά και σε όλα τα συστήματα βιολογικών φίλτρων, μπορεί να χρησιμοποιηθούν δύο φίλτρα σε σειρά, τα οποία πρακτικά συμπεριφέρονται σαν ένα φίλτρο του ίδιου συνολικού ύψους.

Τα βιολογικά φίλτρα «ταχείας επεξεργασίας» χρησιμοποιούνται περισσότερο πριν από δευτεροβάθμια επεξεργασία, γιατί σε αυτά γίνεται μόνο μερική απομάκρυνση του BOD. Το πλεονέκτημά τους είναι η δυνατότητα επεξεργασίας πολύ ισχυρών αποβλήτων με σχετικά μικρή κατανάλωση ενέργειας, χωρίς όμως να επιτυγχάνονται αξιόλογες αποδόσεις (40 – 70%).

Σήμερα η ταξινόμηση των βιολογικών φίλτρων γίνεται περισσότερο βάσει του βαθμού επεξεργασίας που επιτυγχάνεται, και όχι βάσει της επιφανειακής ή της οργανικής φόρτισης. Ως εκ τούτου, ο διαχωρισμός σε φίλτρα χαμηλής, μέσης και μεγάλης φόρτισης είναι περισσότερο ιστορικής σημασίας. Έτσι, σήμερα τα βιολογικά φίλτρα διαχωρίζονται σε ταχείας επεξεργασίας, που όπως

αναφέραμε ακολουθούνται από δεύτερο στάδιο επεξεργασίας και απομακρύνουν το διαλυτό BOD (SBOD) σε ποσοστό 50 έως 75%, και οξειδώνουν το ολικό BOD σε ποσοστό 30 έως 45%, και σε φίλτρα πλήρους επεξεργασίας από τα οποία μετά την καθίζηση στερεών το απόβλητο εξέρχεται έχοντας τις απαιτούμενες τιμές BOD και TSS (ολικά αιωρούμενα στερεά), που μπορεί να είναι αρκετά χαμηλές. Επίσης, υπάρχουν φίλτρα ταυτόχρονης οξείδωσης BOD και νιτροποίησης, που προσδίδουν στο απόβλητο τις απαιτούμενες τιμές BOD, TSS και αμμωνιακού αζώτου. Τέλος τα βιολογικά φίλτρα νιτροποίησης ανήκουν στην τριτοβάθμια επεξεργασία και προσδίδουν στο απόβλητο την επιθυμητή τιμή αμμωνιακού αζώτου, αφού έχει περάσει από δευτεροβάθμια επεξεργασία και καθίζηση. Στην παρούσα εργασία, θα ασχοληθούμε με τα βιολογικά φίλτρα πλήρους επεξεργασίας ως προς το περιεχόμενο BOD και TSS του αποβλήτου.

### **1.3 Εφαρμογές**

Τα βιολογικά φίλτρα θεωρούνταν ανέκαθεν ως μια ικανοποιητική μέθοδος δευτεροβάθμιας επεξεργασίας των αποβλήτων που μπορούν να οξειδωθούν με βιολογικό τρόπο, κυρίως δηλαδή των αστικών αποβλήτων, στις περιπτώσεις που οι προδιαγραφές του εξερχόμενου αποβλήτου ήταν 20 – 45 mg/L BOD και TSS. Ως μειονέκτημά τους θεωρείτο πάντα η ευαισθησία τους στις καιρικές μεταβολές, λόγω της έκθεσης του αποβλήτου στον ατμοσφαιρικό αέρα στο στάδιο της τροφοδοσίας. Στην πράξη, η πτώση της θερμοκρασίας του αποβλήτου μπορεί να μειωθεί σε λιγότερο από 1.5° C με κατάλληλο σχεδιασμό του φίλτρου, βελτίωση της μεθόδου τροφοδοσίας και μείωση του λόγου αναρροής. Στο παρελθόν είχαν παρατηρηθεί μειωμένες αποδόσεις κατά την διάρκεια του χειμώνα, που οφείλονταν όμως σε ακατάλληλο σχεδιασμό, όπως μικρό βάθος πύργου, μεγάλη επιφάνεια επαφής με τον ατμοσφαιρικό αέρα, αυξημένο λόγο αναρροής, μικρής απόδοσης δεξαμενές καθίζησης και μη αποδοτικό σύστημα τροφοδοσίας.

Σήμερα, με την βελτίωση στον σχεδιασμό των βιολογικών φίλτρων και την αυξημένη τεχνογνωσία, δεν θεωρούνται πλέον ως μέθοδος μόνο δευτεροβάθμιας επεξεργασίας, αλλά ως μία από τις προχωρημένες μεθόδους επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, και μπορούν να επιτύχουν πολύ μικρές τιμές BOD, TSS και αμμωνιακού αζώτου στο επεξεργασμένο απόβλητο. Για την

αύξηση της απόδοσης των ήδη εγκατεστημένων βιολογικών φίλτρων μπορούν να γίνουν βελτιώσεις όπως αντικατάσταση του πληρωτικού υλικού από πέτρα με πλαστικό, προσθήκη συστήματος μηχανικού αερισμού, βελτίωση της δευτεροβάθμιας καθίζησης κλπ. Πράγματι, η βελτίωση των ήδη υπαρχόντων εγκαταστάσεων και η λειτουργία νέων σύγχρονων μονάδων μπορούν να αντεπεξέλθουν ακόμη και σε αυστηρά πρότυπα συγκεντρώσεων του επεξεργασμένου αποβλήτου και σε συνδυασμό με την απλότητα της εγκατάστασης και την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας καθιστούν τα βιολογικά φίλτρα μια πολύ διαδεδομένη μέθοδο επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Επίσης, ο περιορισμένος διαθέσιμος χώρος για την εγκατάσταση ενός βιολογικού φίλτρου δεν αποτελεί πλέον εμπόδιο, εφόσον ο όγκος του πληρωτικού υλικού μπορεί να αυξηθεί με αύξηση του ύψους του πύργου μέχρι και 12m.



## **2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ**

### **2.1 Προεπεξεργασία – Πρωτοβάθμια Επεξεργασία**

Ένα σύστημα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με βιολογικά φίλτρα συνήθως περιλαμβάνει επεξεργασία του αποβλήτου σε πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης, και στην συνέχεια το απόβλητο οδηγείται στο βιολογικό φίλτρο. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ανάλογα με το είδος και την σύσταση του αποβλήτου, μπορεί να απαιτείται προεπεξεργασία πριν οδηγηθεί στην πρωτοβάθμια καθίζηση.

Ένα αστικό, βιομηχανικό ή μικτό υγρό απόβλητο μπορεί να περιέχει μεγάλα τεμάχια από διάφορα αντικείμενα, όπως ξύλα, άμμο, πέτρες, πλαστικό, ελαστικό και λοιπά απορρίμματα, τα οποία δημιουργούν προβλήματα στην μετέπειτα επεξεργασία του αποβλήτου. Τα στερεά αυτά απομακρύνονται κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας, που μπορεί να περιλαμβάνει εξάμμωση, εσχάρωση ή λιποσυλλογή, καθώς και πέρασμα από φίλτρο συγκράτησης των ογκωδών σωματιδίων. Η προεπεξεργασία μπορεί επίσης να περιλαμβάνει αερισμό ή χημική επεξεργασία, όπως εξουδετέρωση ή χλωρίωση, κυρίως για τα βιομηχανικά απόβλητα, αλλά και εξισορρόπηση της παροχής για να μην διαταράσσεται η ομαλή επεξεργασία του αποβλήτου λόγω των μεταβολών στην παροχή.

Στην περίπτωση των αστικών αποβλήτων, συνήθως δεν εφαρμόζεται προεπεξεργασία αλλά πρωτοβάθμια επεξεργασία, δηλαδή παραμονή του αποβλήτου σε πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης, όπου απομακρύνεται μέρος των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) και του οργανικού φορτίου (BOD). Η πρωτοβάθμια καθίζηση του αποβλήτου είναι απαραίτητη όταν χρησιμοποιείται πληρωτικό υλικό από πέτρα, ενώ όταν το πληρωτικό υλικό είναι πλαστικό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά φίλτρο διήθησης με μικρά ανοίγματα που συγκρατεί κυρίως τα μικρά τεμάχια πλαστικού και ελαστικού, που παρουσιάζονται εντονότερα τα τελευταία χρόνια. Τα ανοίγματα των φίλτρων αυτών έχουν διάμετρο μικρότερη των 3mm, και απομακρύνουν τα αιωρούμενα στερεά σε ποσοστό 15 – 20%, και το BOD σε ποσοστό 0 – 5%. Τα φίλτρα διήθησης εμποδίζουν το φαινόμενο του αφρισμού, και συντελούν στην παραγωγή πιο καθαρών και πιο εύκολα διαθέσιμων στερεών που θα προκύψουν από την συνολική επεξεργασία των λυμάτων. Βέβαια, όταν εφαρμόζεται μόνο αρχική διήθηση με φίλτρα και όχι πρωτοβάθμια καθίζηση,

πρέπει οι διαστάσεις του βιολογικού φίλτρου που ακολουθεί να είναι αυξημένες ώστε να απομακρύνεται το επιπλέον BOD που δεν απομακρύνθηκε στην πρωτοβάθμια δεξαμενή, αλλά και περιοδικά να εφαρμόζεται πλημμυρισμός του φίλτρου (flushing) για να αποφεύγεται η συσσώρευση στερεών στο πληρωτικό υλικό.

## **2.2 Ο βιολογικός υμένας**

Όπως αναφέραμε, το βιολογικό φίλτρο είναι μία κλίνη από ένα μέσο διήθησης πάνω στο οποίο αναπτύσσεται ένα στρώμα βλέννας που περιέχει τους μικροοργανισμούς που καταναλώνουν το οργανικό υπόστρωμα, ο «βιολογικός υμένας». Καθώς το υγρό απόβλητο κυλάει πάνω από το βιολογικό υμένα, οι οργανικές ουσίες που περιέχει απομακρύνονται μέσω της προσρόφησης. Στα βιολογικά φίλτρα μεγάλης φόρτισης ο χρόνος παραμονής του αποβλήτου μέσα στο φίλτρο είναι σχετικά μικρός, και μέσα στο χρόνο αυτό πρέπει να γίνει η προσρόφηση του οργανικού υποστρώματος από τον βιολογικό υμένα.

Η ανάπτυξη του βιολογικού υμένα εξαρτάται πρωτίστως από την διαθεσιμότητα θρεπτικού υλικού, και συνεχίζεται με την αύξηση του οργανικού φορτίου, μέχρις ότου επιτευχθεί ένα μέγιστο πάχος. Το πάχος αυτό εξαρτάται από διάφορους φυσικούς παράγοντες όπως η επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου, το είδος του πληρωτικού υλικού, το είδος του οργανικού υποστρώματος και η φύση των μικροοργανισμών που απαρτίζουν το βιολογικό στρώμα.

Ο ρυθμός απομάκρυνσης του BOD είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης BOD του αποβλήτου, καθώς και της προσροφητικής ικανότητας του βιολογικού στρώματος. Αυτό προσροφά ταυτόχρονα το οργανικό υπόστρωμα του αποβλήτου που διέρχεται, αλλά και σταθεροποιεί τις οργανικές ουσίες που είχε απορροφήσει προηγουμένως. Ο ρυθμός σταθεροποίησης των προσροφημένων οργανικών ουσιών καθορίζει και την προσροφητική ικανότητα του βιολογικού υμένα. Ο χρόνος παραμονής του αποβλήτου στο βιολογικό φίλτρο είναι μια έμμεση παράμετρος καθορισμού της απόδοσης: δεν επηρεάζει τον ρυθμό κατανάλωσης του υποστρώματος, προσδιορίζει όμως τον βαθμό ολοκλήρωσης της αντίδρασης αυτής μέσα στον διαθέσιμο χρόνο επαφής του υγρού αποβλήτου με το πληρωτικό υλικό.

Μέσα στα όρια της συνήθους οργανικής φόρτισης ενός φίλτρου που επεξεργάζεται αστικά απόβλητα, η ανάπτυξη του βιολογικού στρώματος είναι ανάλογη με την τροφοδοσία του οργανικού υποστρώματος. Επομένως, το ποσοστό απομάκρυνσης του BOD αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης BOD του εισερχόμενου αποβλήτου. Πάντως, υπάρχουν κάποια μέγιστα όρια στο ποσοστό του BOD που είναι δυνατό να απομακρυνθεί από ένα βιολογικό φίλτρο. Στην περίπτωση των βιομηχανικών αποβλήτων που έχουν αυξημένο BOD, η ικανότητα προσρόφησης του βιολογικού στρώματος φθάνει σε ένα μέγιστο, πέραν του οποίου το ποσοστό απομάκρυνσης του BOD δεν μεταβάλλεται. Πάντως, στην πράξη έχουν επιτευχθεί ρυθμοί απομάκρυνσης BOD της τάξης του  $8 \text{ kg/m}^3\cdot\text{d}$ , χωρίς να κορεστεί η προσροφητική ικανότητα του βιολογικού στρώματος.

Ο ρυθμός απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων από τα απόβλητα είναι πολύ μεγαλύτερος από τον ρυθμό απομάκρυνσης των διαλυμένων συστατικών. Πιθανώς αυτό οφείλεται στο ότι ένα μέρος αυτών απομακρύνεται με βιολογική κροκίδωση, και όχι με οξείδωση και παράλληλο σχηματισμό νέων κυττάρων μικροοργανισμών. Η υψηλή περιεκτικότητα των αστικών αποβλήτων σε κολλοειδή, καθιστά τα βιολογικά φίλτρα μια αποτελεσματική μέθοδο για την επεξεργασία τους.

Μια κοινή παρατήρηση σε όλα τα βιολογικά φίλτρα είναι ότι μειώνουν το οργανικό υπόστρωμα ενός αποβλήτου μέχρι ένα ορισμένο ποσοστό, και στην συνέχεια η απομάκρυνση του υπόλοιπου κλάσματος γίνεται με μεγάλη δυσκολία. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία (Germain, 1966), όταν η απομάκρυνση του BOD φθάσει το 90%, τότε ο ρυθμός κατανάλωσης του υποστρώματος μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο ότι πέρα από το σημείο αυτό οι μικροοργανισμοί του βιολογικού στρώματος φθάνουν στην φάση της αυτοοξείδωσης, της οποίας τα παραπροϊόντα απομακρύνονται μαζί με το επεξεργασμένο υγρό απόβλητο. Έτσι, όταν η αντίδραση κατανάλωσης του οργανικού υποστρώματος τείνει να ολοκληρωθεί, ένα μεγάλο μέρος του BOD του επεξεργασμένου αποβλήτου οφείλεται στα παραπροϊόντα της αυτοοξείδωσης των μικροοργανισμών. Πέρα από το σημείο αυτό, στο φίλτρο δεν γίνεται πλέον επεξεργασία του υγρού αποβλήτου, αλλά κώνευση λάσπης.

## 2.3 Αποκόλληση του Βιολογικού Υμένα

Το πάχος του βιολογικού υμένα μπορεί να φθάσει μέχρι και τα 10mm, εκ των οποίων στο εξωτερικό τμήμα (0.1 έως 2 mm) επικρατούν αερόβιες συνθήκες διάσπασης, ενώ στο εσωτερικό του αναερόβιες συνθήκες, εφόσον το οξυγόνο καταναλώνεται στην επιφάνεια του βιολογικού υμένα και δεν αρκεί για να φθάσει και στο εσωτερικό του. Καθώς τα βακτήρια πολλαπλασιάζονται με την κατανάλωση του οργανικού υποστρώματος, το πάχος του βιολογικού υμένα αυξάνεται, οπότε το υπόστρωμα καταναλώνεται χωρίς να προλαβαίνει να προσροφηθεί σε όλο το βάθος του βιολογικού υμένα. Έτσι, τα βακτήρια στην επιφάνεια του πληρωτικού υλικού εισέρχονται στην φάση της ενδογενούς αναπνοής και χάνουν την ικανότητα να προσκολλώνται σε αυτό, οπότε παρατηρείται το φαινόμενο της περιοδικής αποκόλλησης του βιολογικού υμένα.

Η αποκόλληση του βιολογικού υμένα εξαρτάται τόσο από την επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου, από την οποία εξαρτάται η ταχύτητα αποκόλλησης του υμένα, όσο και από το οργανικό φορτίο (BOD) του αποβλήτου, που καθορίζει την ταχύτητα κατανάλωσης του υποστρώματος. Ο μηχανισμός αποκόλλησης εξαρτάται και από το είδος του πληρωτικού υλικού: Στα φίλτρα με πλαστικό πληρωτικό υλικό, η αποκόλληση είναι συνεχής και μικρής κλίμακας, και οφείλεται στις ταχύτητες αποκόλλησης που προσδίδονται στο υγρό απόβλητο, λόγω της μεγάλης επιφανειακής φόρτισης. Στα φίλτρα με πληρωτικό υλικό από πέτρα, η αποκόλληση είναι μεγάλης κλίμακας, συμβαίνει κυρίως την άνοιξη στις εύκρατες ζώνες, και οφείλεται στις νύμφες των εντόμων που δραστηριοποιούνται στις υψηλές θερμοκρασίες. Οι νύμφες καταναλώνουν το οργανικό υπόστρωμα του αποβλήτου, οπότε γίνεται μηχανική αποκόλληση του βιολογικού υμένα που έχει συσσωρευτεί κατά την διάρκεια του χειμώνα και έχει σημαντικό πάχος. Όταν παρατηρείται το φαινόμενο αυτό, το απόβλητο στην έξοδο του βιολογικού φίλτρου εμφανίζει παροδικά φορτίο BOD και TSS μεγαλύτερο από αυτό του εισερχόμενου αποβλήτου.

Πάντως, η συσσώρευση πρόσθετης βιομάζας όπου δεν επικρατούν αερόβιες συνθήκες ελαττώνει την απόδοση. Επομένως, η συνεχής και ομοιόμορφη αποκόλληση μέρους του βιολογικού υμένα είναι ένδειξη ομαλής λειτουργίας ενός βιολογικού φίλτρου.

## 2.4 Απομάκρυνση του BOD

Σε κάθε βιολογικό σύστημα, ο ρυθμός απομάκρυνσης BOD του οργανικού υποστρώματος είναι ανάλογος με το ποσοστό του BOD που απομένει στο σύστημα. Η παρατήρηση αυτή εκφράζεται μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$\frac{S_e}{S_0} = e^{-kt} \quad (2.1)$$

όπου:

$S_e$ : συγκέντρωση BOD του εξερχόμενου από το σύστημα αποβλήτου

$S_0$ : συγκέντρωση BOD του εισερχόμενου στο σύστημα αποβλήτου

$k$ : σταθερά

$t$ : ο χρόνος παραμονής

Η παραπάνω εξίσωση εφαρμόστηκε αρχικά σε συστήματα υπολογισμού του BOD σε φιάλες, καθώς και για τον υπολογισμό της κινητικής σε συστήματα ενεργού ιλύος, διαλείποντος έργου. Στα βιολογικά φίλτρα, ο χρόνος επαφής του υγρού αποβλήτου με τους μικροοργανισμούς του βιολογικού υμένα, είναι ανάλογος του βάθους του πληρωτικού υλικού και αντιστρόφως ανάλογος με κάποιο παράγοντα που περιέχει την επιφανειακή φόρτιση. Ο χρόνος επαφής υπολογίστηκε από τον Howland, βάσει της σχέσης (Howland et al., 1960):

$$t = \frac{C \cdot D}{q^n} \quad (2.2)$$

όπου:

$t$ : ο χρόνος επαφής του υγρού με το πληρωτικό υλικό, min

$C$ : σταθερά που εξαρτάται από το πληρωτικό υλικό

$D$ : βάθος του πληρωτικού υλικού, m

$q$ : επιφανειακή φόρτιση,  $L/(m^2 \cdot \text{min})$

$n$ : σταθερά που εξαρτάται από το πληρωτικό υλικό, αδιάστατη

Ο χρόνος παραμονής του αποβλήτου μέσα στο βιολογικό φίλτρο είναι μικρός (1 έως 20 λεπτά, ανάλογα με την επιφανειακή φόρτιση), και μέσα στο χρόνο αυτό πρέπει η βιομάζα να απομακρύνει το οργανικό υπόστρωμα με απορρόφηση ή με βιολογική οξειδωση. Επομένως, πρέπει η κατανομή της παροχής του αποβλήτου και η επαφή με την βιομάζα να είναι αποτελεσματική για να υπάρχει μέγιστη απόδοση.

Από το BOD ενός αποβλήτου που εφαρμόζεται σε μια βιολογική κλίνη, υπάρχει ένα κλάσμα που δεν μπορεί να απομακρυνθεί, ακόμη και με επαναλαμβανόμενες διελεύσεις μέσα από την κλίνη, ή και αν εφαρμοστεί σε μια κλίνη πολύ μεγάλου βάθους. Το βιοδιασπώμενο κλάσμα του BOD ενός αποβλήτου που μπορεί να απομακρυνθεί με βιολογική επεξεργασία είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων. Το πιο δύσκολο να απομακρυνθεί είναι το διαλυτό κλάσμα, που απαιτεί παρατεταμένη επαφή με τον βιολογικό υμένα για να οξειδωθεί. Επομένως, το βιοδιασπώμενο κλάσμα του BOD εξαρτάται από το ποσοστό του οργανικού υλικού που βρίσκεται σε αιώρηση ή σε κολλοειδή μορφή, και το οποίο απομακρύνεται πιο εύκολα. Η μάζα του βιολογικού υμένα, ο ρυθμός αποκόλλησης από την βιολογική κλίνη και ο χρόνος επαφής με το απόβλητο, είναι συνάρτηση της επιφανειακής φόρτισης, δηλαδή της παροχής του αποβλήτου στην κλίνη ανά μονάδα επιφάνειας (διατομής). Επομένως, το κλάσμα του BOD που μπορεί να απομακρυνθεί από ένα απόβλητο μειώνεται με την αύξηση της επιφανειακής φόρτισης (Velz, 1948).

Η ποσότητα του BOD που μπορεί να απομακρυνθεί από τους μικροοργανισμούς μιας βιολογικής κλίνης είναι πεπερασμένη, και είναι συνάρτηση του ρυθμού βιολογικής οξείδωσης του οργανικού υποστρώματος και της αποθηκευτικής ικανότητας της κλίνης. Αν ο ρυθμός συσσώρευσης του οργανικού υλικού υπερβαίνει τον ρυθμό αφομοίωσής του μέσω της βιολογικής οξείδωσης, τότε κάποια στιγμή υπερβαίνεται η ικανότητα συσσώρευσης που έχει ο βιολογικός υμένας, οπότε το επιπλέον κλάσμα του BOD περνάει από την κλίνη χωρίς να υποστεί καμία επεξεργασία, δηλαδή «ξεπλένεται». Η βιολογική οξείδωση είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, επομένως όταν ο καιρός είναι ψυχρός μειώνεται το κλάσμα του BOD που μπορεί να επεξεργαστεί μια κλίνη.

Κατά την λειτουργία μιας βιολογικής κλίνης, στην ισορροπία, υπάρχει ένας ρυθμός συσσώρευσης του BOD στην κλίνη που εξαρτάται από την ημερήσια απορρόφηση της κλίνης και από τον ρυθμό βιολογικής οξείδωσης σε αυτήν. Μια μεταβλητή που επηρεάζει τον ρυθμό συσσώρευσης είναι ο χρόνος. Παρόλα αυτά, οι μικρές διακυμάνσεις στην οργανική φόρτιση της κλίνης σε ωριαία ή ημερήσια βάση, όταν γίνονται για σύντομα χρονικά διαστήματα είναι ανεκτές. Επομένως, μικρή υπέρβαση της μέγιστης οργανικής φόρτισης δεν επηρεάζει σημαντικά τον ρυθμό συσσώρευσης της κλίνης άρα δεν μειώνει αισθητά την απόδοση. Η ικανότητα συσσώρευσης οργανικού φορτίου στην βιολογική κλίνη λειτουργεί ως αποσβεστήρας στις απότομες αλλαγές του

φορτίου, και είναι ένα χαρακτηριστικό που καθιστά τα βιολογικά φίλτρα πολύ αποτελεσματικά.

## 2.5 Πληρωτικό Υλικό

Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν τα βιολογικά φίλτρα με πληρωτικό υλικό από πέτρα ή χαλίκι, τα οποία παρουσιάζουν το πλεονέκτημα του χαμηλού κόστους και της απλότητας στην όλη εγκατάσταση και λειτουργία του συστήματος. Το είδος της πέτρας που χρησιμοποιείτο συνήθως είναι οι κροκάλες, δηλαδή οι ποταμίσιες πέτρες. Στα μέσα της δεκαετίας του 1950 εμφανίστηκε στην αγορά ένα νέο πληρωτικό υλικό, αποτελούμενο από ανάγλυφα πλαστικά φύλλα, συνενωμένα μεταξύ τους σε δέσμες. Το υλικό αυτό χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την επεξεργασία των βιομηχανικών λυμάτων, και περίπου μετά από μία δεκαετία άρχισε να χρησιμοποιείται συστηματικά και για τα αστικά απόβλητα.

Η σταδιακή αντικατάσταση του πληρωτικού υλικού από πέτρα (κροκάλες) που χρησιμοποιείτο αρχικά στα βιολογικά φίλτρα, ή και από ξύλο που χρησιμοποιήθηκε σε μικρότερη κλίμακα, από συνθετικό υλικό, έχει επεκτείνει σημαντικά τις δυνατότητες των βιολογικών φίλτρων, και επιτρέπει την επεξεργασία αποβλήτων με μεγαλύτερη επιφανειακή και οργανική φόρτιση.

Οι πιο σημαντικές παράμετροι που καθορίζουν τις ιδιότητες του πλαστικού πληρωτικού υλικού, είναι η ειδική επιφάνειά του, το πορώδες και το είδος του ανάγλυφου και του προσανατολισμού της επιφάνειας των πλαστικών φύλλων. Η ειδική επιφάνεια ορίζεται ως επιφάνεια ανά μονάδα όγκου ( $m^2/m^3$ ), ενώ το πορώδες  $\varepsilon$ , είναι το ποσοστό κενού χώρου του συνολικού όγκου ή ο όγκος του κενού χώρου προς τον συνολικό όγκο του πληρωτικού υλικού (αδιάστατο μέγεθος,  $0 < \varepsilon < 1$ ). Η αυξημένη ειδική επιφάνεια επιτρέπει την ανάπτυξη μεγαλύτερης μάζας βιολογικού υμένα ανά μονάδα όγκου πληρωτικού υλικού, ενώ το αυξημένο πορώδες επιτρέπει την διέλευση μεγαλύτερης ποσότητας υγρού και επομένως την επεξεργασία αποβλήτου με εφαρμογή μεγαλύτερης επιφανειακής φόρτισης στο φίλτρο. Πάντως, η απεριόριστη αύξηση της ειδικής επιφάνειας του πληρωτικού υλικού δεν είναι επιθυμητή, και έχει βρεθεί ότι το βέλτιστο εύρος τιμών της κυμαίνεται από 88 έως  $105 m^2/m^3$ .

Οι παλαιότερες εγκαταστάσεις που ήδη χρησιμοποιούν τις κροκάλες ως πληρωτικό υλικό, μπορούν να βελτιωθούν με κάποιες τροποποιήσεις, όπως στο

σύστημα διανομής του αποβλήτου, με προσθήκη συστήματος τεχνητού αερισμού αν δεν υπάρχει στην μονάδα, και γενικά με αριστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας. Σε περίπτωση που το πληρωτικό υλικό είναι κακής ποιότητας με περιορισμένο κενό χώρο ανάμεσα στις κροκάλες, μπορεί να γίνει εξ ολοκλήρου αντικατάστασή του με συνθετικό πληρωτικό υλικό από πλαστικό, πράγμα που επιτρέπει και την αύξηση του βάθους του βιολογικού φίλτρου.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι πληρωτικού υλικού που μπορούν να τοποθετηθούν στα βιολογικά φίλτρα, εκτός από την πέτρα (κροκάλες) και το ξύλο (μικρά τεμάχια ξύλου). Τα πιο συνηθισμένα είδη πληρωτικού υλικού από πλαστικό είναι τα πλαστικά τεμάχια τυχαίας διευθέτησης, οι πλήρως ανάγλυφες κάθετες δέσμες, οι ημιανάγλυφες κάθετες δέσμες, και οι δέσμες κάθετης ροής. Τα φύλλα του πλαστικού που απαρτίζουν τις δέσμες μπορεί να είναι ανάγλυφα ή μη και τοποθετούνται παράλληλα με κατάλληλο προσανατολισμό ώστε να ρυθμίζουν την ροή του αποβλήτου μέσα από αυτά. Οι ημιανάγλυφες δέσμες σχηματίζονται με τοποθέτηση ανάγλυφων και επίπεδων φύλλων εναλλάξ.

Οι ημιανάγλυφες δέσμες έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στα βιολογικά φίλτρα, ενώ από τα τέλη της δεκαετίας του '50 μέχρι τις αρχές του '80 χρησιμοποιούνταν περισσότερο οι πλήρως ανάγλυφες δέσμες κάθετης ροής. Από τότε, στις περισσότερες εφαρμογές τοποθετούνται δέσμες κάθετης ροής, ενώ οι πλήρως ανάγλυφες κάθετες δέσμες χρησιμοποιούνται περισσότερο για πιο ισχυρά απόβλητα. Υποστηρίζεται ότι οι δέσμες κάθετης ροής εμφανίζουν μεγαλύτερη απόδοση σε μικρότερες τιμές BOD, και μικρότερη απόδοση όταν το BOD είναι αυξημένο, όπως στα βιομηχανικά απόβλητα. Πάντως, έχει αποδειχθεί ότι η απόδοση ενός τύπου πληρωτικού υλικού εξαρτάται και από το ρυθμό της δοσομετρικής παροχής του αποβλήτου που εφαρμόζεται στο βιολογικό φίλτρο.

## **2.6 Ανεπιθύμητες οσμές και ανάπτυξη οργανισμών**

Σε ορισμένες περιπτώσεις τα βιολογικά φίλτρα χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία αερίων ρευμάτων ώστε να απομακρύνουν τις οσμές, στην περίπτωση όμως της επεξεργασίας αστικών αποβλήτων το πρόβλημα της ύπαρξης οσμών από την αποσύνθεση των ρύπων είναι αρκετά σημαντικό. Η δημιουργία οσμών μπορεί να οφείλεται στην διάχυση των πτητικών ενώσεων του εισερχόμενου αποβλήτου στον αέρα του περιβάλλοντος χώρου, ή να γίνεται



μέσα στο πληρωτικό υλικό λόγω ανεπαρκούς αερισμού ή υπερβολικής ανάπτυξης της βιομάζας στην επιφάνειά του. Η υπερβολική ανάπτυξη βιομάζας μέρος της οποίας υφίσταται σήψη, αναδύει δυσάρεστες οσμές ακόμη και όταν ο αερισμός του φίλτρου είναι επαρκής.

Η πρόληψη της δημιουργίας οσμών μπορεί να γίνει με τον κατάλληλο σχεδιασμό, που θα περιλαμβάνει παροχή επαρκούς επιφανειακής φόρτισης στο πληρωτικό υλικό ώστε να αποφεύγεται η ανάπτυξη υπερβολικά μεγάλου πάχους του βιολογικού υμένα, περιοδικό πλημμυρισμό του φίλτρου, επαρκή και συνεχή αερισμό. Επομένως, η παροχή αποβλήτου και αέρα στο φίλτρο πρέπει να γίνεται με την βοήθεια ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Επίσης, ο αέρας μπορεί να διοχετεύεται στο φίλτρο καθ' ομορροή με το απόβλητο, έτσι ώστε οι οσμηρές ουσίες του αέρα να οξειδώνονται από τους μικροοργανισμούς του βιολογικού υμένα προς λιγότερο δύσσομες ενώσεις. Σε περίπτωση που ο αερισμός γίνεται κατ' αντιρροή σε σχέση με το απόβλητο, δηλαδή ο αέρας έχει φορά προς τα πάνω, τα φίλτρα πρέπει να είναι καλυμμένα στην κορυφή τους.

Η ανάπτυξη ορισμένων οργανισμών όπως οι μύγες, οι διάφορες νύμφες εντόμων, τα σαλιγκάρια και τα σκουλήκια αποτελούν πρόβλημα για την λειτουργία των βιολογικών φίλτρων. Οι μύγες είναι περισσότερο αισθητικό πρόβλημα, οι νύμφες των εντόμων όμως μπορούν να μειώσουν την απόδοση. Οι μύγες, όταν βρίσκονται στο στάδιο των νυμφών αντιμετωπίζονται με εφαρμογή κατάλληλου δοσομετρικού ρυθμού τροφοδοσίας ώστε να γίνεται πλημμυρισμός του φίλτρου. Τα σαλιγκάρια επίσης μειώνουν την απόδοση γιατί καταναλώνουν μέρος της βιομάζας που οξειδώνει το οργανικό υπόστρωμα του αποβλήτου, αλλά και μπορούν να φράξουν το φίλτρο, να εμποδίσουν την απαγωγή του αποβλήτου από το σύστημα απορροής και να προκαλέσουν βλάβες στις αντλίες του συστήματος. Από τις μεθόδους που έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση των σαλιγκαριών, αναφέρουμε την χρήση θαλασσινού νερού, την ρύθμιση του pH, την χλωρίωση και την προσθήκη θειϊκού χαλκού. Από τα παραπάνω, πιθανώς η καλύτερη μέθοδος είναι η ρύθμιση του pH στην τιμή 10, οπότε η παρουσία αμμωνιακού αζώτου οδηγεί στην έκλυση αμμωνίας που είναι τοξική για τα σαλιγκάρια. Η μέθοδος αυτή θεωρείται απλή και μη τοξική για τον άνθρωπο.

### **3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ**

#### **3.1 Ανακύκλωση**

Στα περισσότερα φίλτρα, η ανακύκλωση εφαρμόζεται με επιστροφή ενός μέρους του επεξεργασμένου αποβλήτου από την έξοδο του βιολογικού φίλτρου στην είσοδό του, πριν περάσει από την δευτεροβάθμια καθίζηση, υπάρχουν όμως και άλλες διατάξεις που μπορεί να εφαρμοστεί. Σε πολλές περιπτώσεις, η ανακύκλωση γίνεται μετά την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, οπότε ανακυκλώνεται το απόβλητο μετά την κατακάθιση των στερεών. Ο λόγος αναρροής  $R$  ορίζεται ως το πηλίκο της παροχής του ανακυκλωμένου αποβλήτου, προς την παροχή του αποβλήτου στο σύστημα.

Η ανακύκλωση του επεξεργασμένου αποβλήτου στο βιολογικό φίλτρο καταρχάς δεν είναι απαραίτητη, εφόσον η βιομάζα είναι προσκολλημένη στο πληρωτικό υλικό και δεν απαιτείται ο συνεχής εμπλουτισμός του εισερχόμενου αποβλήτου με μικροοργανισμούς, όπως συμβαίνει στην διεργασία της ενεργού ιλύος. Πάντως, η ανακύκλωση του αποβλήτου εμπλουτίζει το φίλτρο με μεγαλύτερη ποσότητα και ποικιλία μικροοργανισμών. Η ανακύκλωση έχει χρησιμοποιηθεί σε πολυάριθμες εφαρμογές βιολογικών φίλτρων ως ένα μέσο αύξησης της απόδοσης. Έχει παρατηρηθεί ότι στα φίλτρα με πληρωτικό υλικό από πέτρα, η χρήση ανακύκλωσης αυξάνει την απόδοση του συστήματος, ενώ σε αυτά με πλαστικό πληρωτικό υλικό, η ανακύκλωση διασφαλίζει την ικανοποιητική διαβροχή σε όλη τον όγκο του φίλτρου. Όσον αφορά στα φίλτρα με κροκάλες, η ανακύκλωση ποσότητας του αποβλήτου στο φίλτρο μπορεί να αυξήσει την απόδοση σε φίλτρα μικρού βάθους (1m), ενώ η ανακύκλωση σε φίλτρα μεγαλύτερου βάθους (2 – 2.6m) έχει περισσότερο οικονομικά οφέλη, παρά αυξάνει την απόδοση (Velz, 1948).

Με την ανακύκλωση αυξάνεται η ολική επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου, δηλαδή η συνολική παροχή αποβλήτου ανά μονάδα επιφάνειας της κάθετης διατομής του φίλτρου και ανά μονάδα χρόνου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη κατανομή του αποβλήτου σε όλη την μάζα του πληρωτικού υλικού, αυξάνει την μεταφορά οξυγόνου που είναι απαραίτητο για την οξείδωση του οργανικού υποστρώματος, και μειώνει την πιθανότητα ύπαρξης κάποιων περιοχών της επιφάνειας του πληρωτικού υλικού που παραμένουν ξηρές ή διαβρέχονται μόνο μερικώς από το απόβλητο.

Η μεγαλύτερη παροχή αποβλήτου που επιτυγχάνεται με την ανακύκλωση δημιουργεί δυνάμεις που παρασύρουν την επιπλέον ανάπτυξη του

βιολογικού υμένα, και έτσι αποφεύγεται η έμφραξη του φίλτρου από την υπερβολική συσσώρευση στερεών. Βέβαια, η παροχή δεν πρέπει να είναι τόσο μεγάλη ώστε να παρασύρει όλη την μάζα του βιολογικού υμένα, οπότε στην περίπτωση αυτή δεν γίνεται καμία επεξεργασία του αποβλήτου.

Η πιθανότητα να υπάρχει ένα μέρος του οργανικού υποστρώματος που δεν ήλθε σε επαφή με την μάζα των μικροοργανισμών κατά την πρώτη διέλευση από το φίλτρο, υπερβαίνεται με την δεύτερη διέλευσή του μέσα από αυτό. Πάντως, όταν έχει γίνει σωστός σχεδιασμός της τροφοδοσίας του φίλτρου με απόβλητο και όταν όλο το πληρωτικό υλικό διαβρέχεται πλήρως από το απόβλητο, ο παράγοντας αυτός δεν είναι τόσο σημαντικός.

Όταν το απόβλητο ανακυκλώνεται μετά την διέλευσή του από κάποια δεξαμενή καθίζησης, συνήθως από την δευτεροβάθμια δεξαμενή που ακολουθεί το βιολογικό φίλτρο, η ανακύκλωση συμβάλλει στην εξάλειψη των διακυμάνσεων στην παροχή του αποβλήτου κατά την διάρκεια του εικοσιτετραώρου. Στην πράξη το ανακυκλούμενο απόβλητο αραιώνει το εισερχόμενο όταν έχει αυξημένο φορτίο BOD, ενώ όταν είναι πολύ αραιό το εμπλουτίζει. Έτσι, η λειτουργία του φίλτρου είναι πιο ομαλή και αυξάνεται η απόδοση επεξεργασίας, η οποία επηρεάζεται αρνητικά από τις μεγάλες διακυμάνσεις στο BOD του εισερχόμενου λύματος.

Όταν το ανακυκλούμενο απόβλητο περνάει μέσα από την δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης, ανανεώνει το λιμνάζον απόβλητο και έτσι μειώνεται το φαινόμενο του αφρισμού. Όμως, συχνά η ανακύκλωση δημιουργεί υπερβολική επιφανειακή φόρτιση στην πρωτοβάθμια δεξαμενή. Η συνεχής επιστροφή αποβλήτου από την δευτεροβάθμια στην πρωτοβάθμια δεξαμενή μεταφέρει και μέρος της λάσπης και βοηθά στην καλύτερη μεταφορά οξυγόνου.

Η ανακύκλωση αυξάνει την απόδοση διαβροχής του πληρωτικού υλικού, και αποφεύγεται το πέρασμα μέρους του αποβλήτου μέσα από το φίλτρο χωρίς να υποστεί επεξεργασία. Επίσης, είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος αντιμετώπισης των εντόμων που αναπτύσσονται μέσα σε ένα βιολογικό φίλτρο, όπως οι μύγες, και γενικά είναι ένας απλός τρόπος αύξησης του βαθμού απόδοσης, χωρίς ιδιαίτερη αύξηση του λειτουργικού κόστους της εγκατάστασης.

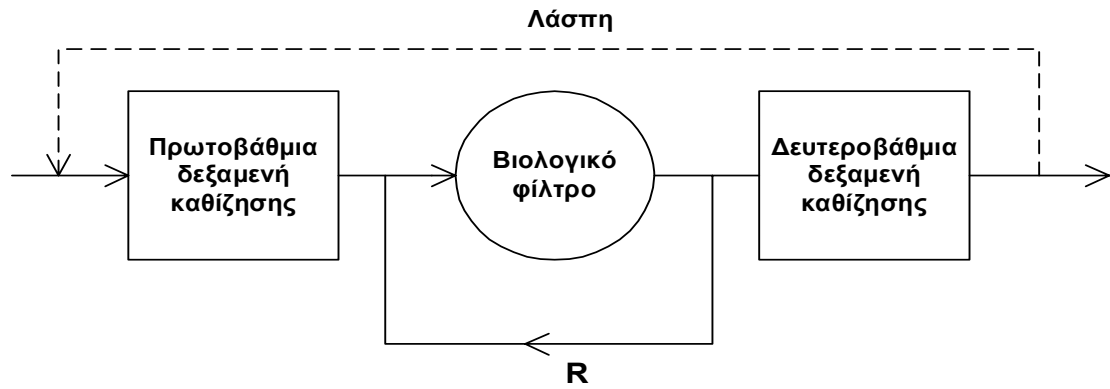
Με την ανακύκλωση γίνεται αύξηση της επιφανειακής φόρτισης του φίλτρου, όπως αναφέραμε. Προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη απόδοση, η επιφανειακή φόρτιση και επομένως η απόδοση διαβροχής πρέπει να υπερβαίνει μια ελάχιστη τιμή, που σύμφωνα με ορισμένους ερευνητές, πρέπει να είναι τουλάχιστον  $0.5 \text{ L}/(\text{m}^2.\text{s})$  (Dow Chemical Company, 1964). Τα πρώτα

χρόνια που χρησιμοποιήθηκε το πλαστικό πληρωτικό υλικό, συνήθως το βάθος των βιολογικών φίλτρων ξεπερνούσε τα 6m και η ελάχιστη επιφανειακή φόρτιση υπερβαινόταν χωρίς να απαιτείται ανακύκλωση, σε αντίθεση με πύργους μικρότερου βάθους όπου η ανακύκλωση ήταν επιβεβλημένη. Αργότερα χρησιμοποιήθηκαν και πύργοι μικρού βάθους με πλαστικό πληρωτικό υλικό και μικρότερη επιφανειακή φόρτιση ( $0.11 - 0.30 \text{ L}/(\text{m}^2.\text{s})$ ), με μικρότερη απόδοση απομάκρυνσης BOD. Όταν η οργανική φόρτιση ενός φίλτρου είναι τουλάχιστον  $0.5 \text{ kg BOD}/\text{m}^3.\text{d}$ , τότε η ανακύκλωση δεν είναι απαραίτητη κατά την διάρκεια ενός ημέρας, βοηθά όμως στην διατήρηση της απαραίτητης υγρασίας στο πληρωτικό υλικό κατά την διάρκεια της νύχτας που η φόρτιση είναι πολύ μικρότερη.

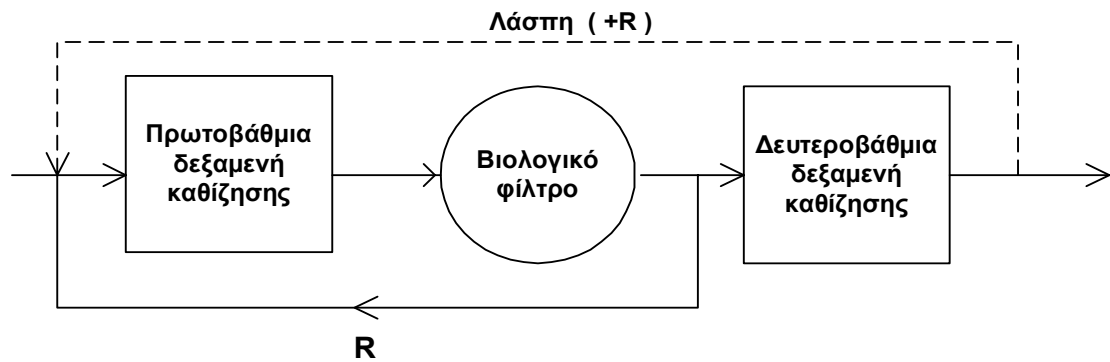
Η επιλογή του λόγου αναρροής  $R$  που θα χρησιμοποιηθεί σε μια εγκατάσταση εξαρτάται από την επίδραση που έχει στην απόδοση του φίλτρου, αλλά και από το λειτουργικό κόστος, καθώς αυτό αυξάνεται με την αύξηση του  $R$ . Συνήθως, ο λόγος αναρροής κυμαίνεται από 0.5 έως 4, και σε ορισμένες περιπτώσεις που αφορούν ισχυρά βιομηχανικά απόβλητα μπορεί να φθάνει και το 10. Πάντως, όσον αφορά στα βιολογικά φίλτρα με κροκάλες, η αύξηση του  $R$  περισσότερο από την τιμή 4 πρακτικά δεν αυξάνει την απόδοση και είναι απαγορευτική από άποψη κόστους.

### **3.2 Διάταξη Ανακύκλωσης**

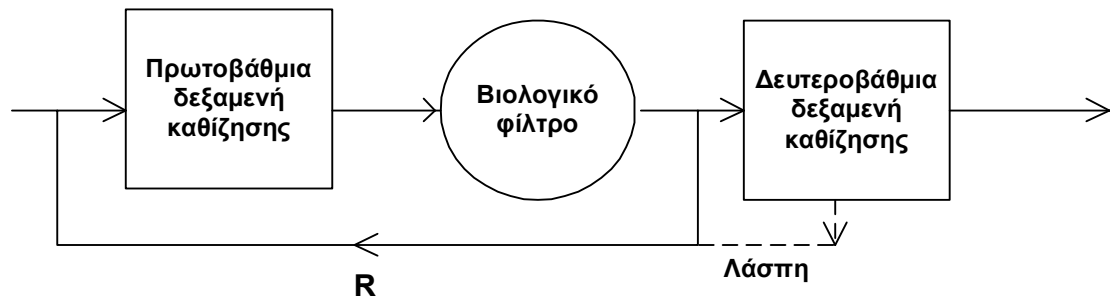
Στις διάφορες εγκαταστάσεις βιολογικών φίλτρων, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες μορφές διάταξης της γραμμής ανακύκλωσης του αποβλήτου, το οποίο μπορεί να έχει περάσει ή όχι από δευτεροβάθμια καθίζηση και να επιστρέφει στο βιολογικό φίλτρο, ή και στην πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης. Επίσης, το ρεύμα ανακύκλωσης που επιστρέφει στην πρωτοβάθμια δεξαμενή, είναι δυνατόν να περιέχει και μέρος από τα στερεά που προκύπτουν από την δευτεροβάθμια δεξαμενή. Ανάλογα με το σθένος (BOD) του αποβλήτου αλλά και το μέγεθος της παροχής, μια εγκατάσταση μπορεί να χρησιμοποιεί ένα ή περισσότερα βιολογικά φίλτρα σε σειρά, συνήθως όμως οι εφαρμογές περιλαμβάνουν ένα ή δύο φίλτρα. Οι πιο συνηθισμένες διατάξεις φαίνονται στα Σχήματα 3.1 και 3.2.



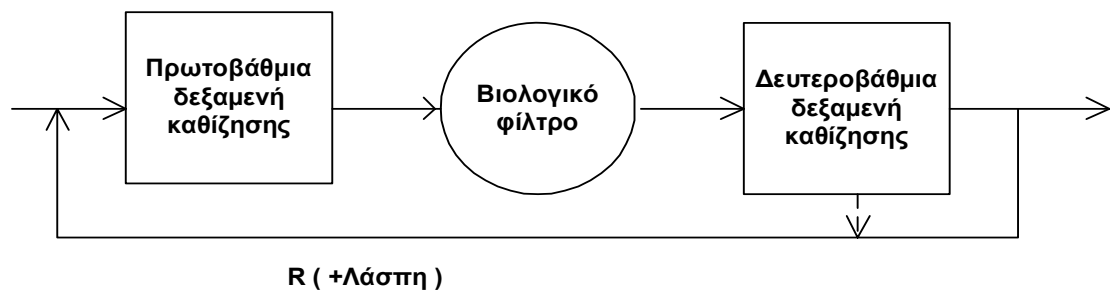
α.



β.



γ.

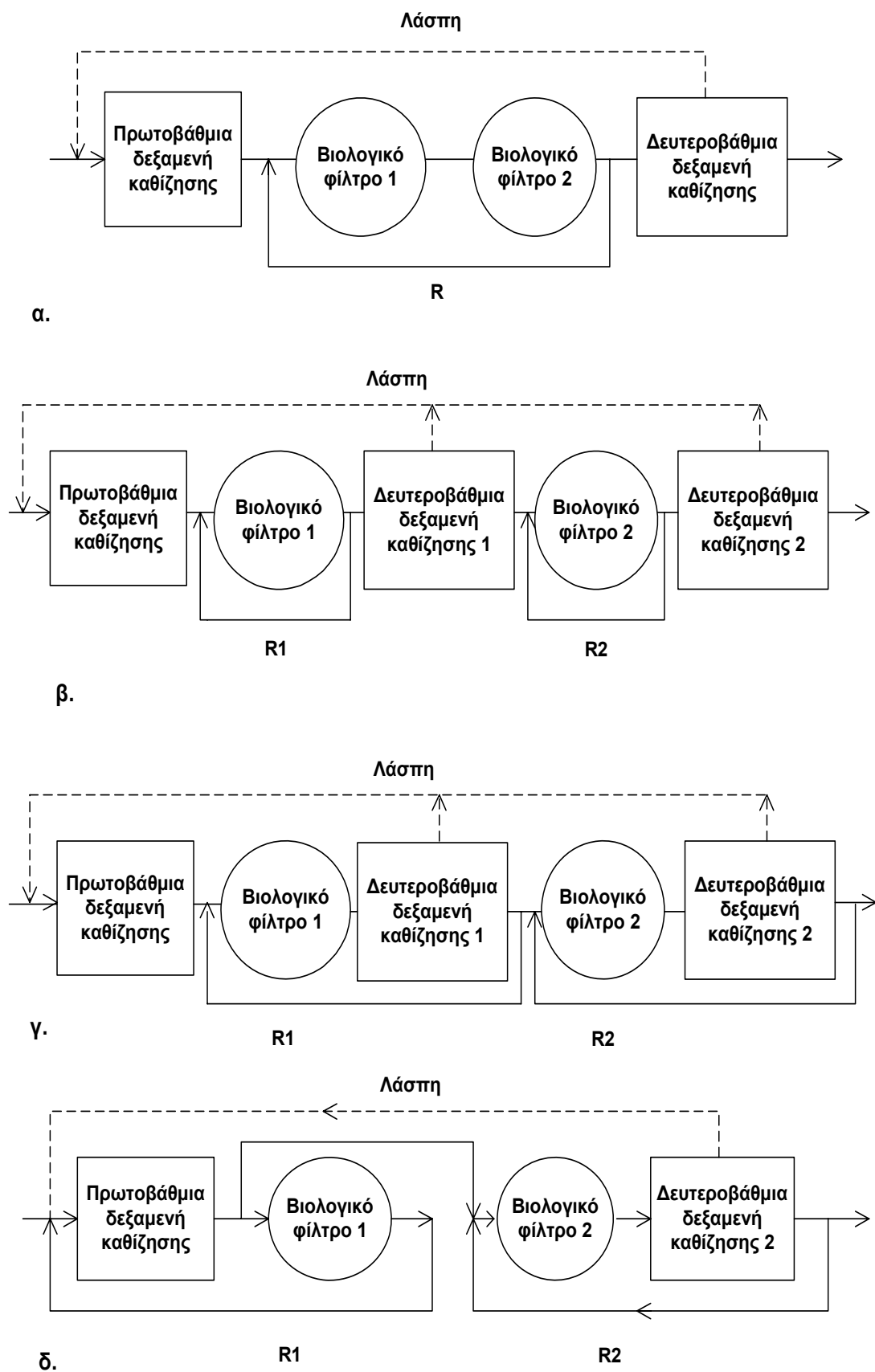


δ.

**Σχήμα 3.1:** Πιθανές διατάξεις ανακύκλωσης σε συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με ένα βιολογικό φίλτρο.

Σε πολλές περιπτώσεις προτιμάται η ανακύκλωση του αποβλήτου αφού έχει περάσει και από την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, γιατί έχει βρεθεί ότι έτσι αυξάνεται η απόδοση του συστήματος. Αυτό όμως προϋποθέτει ότι έχει γίνει προσεκτικός σχεδιασμός της δευτεροβάθμιας δεξαμενής καθίζησης, έτσι ώστε να μην δέχεται επιφανειακή φόρτιση μεγαλύτερη από τις προδιαγραφές της, ιδιαίτερα στις ώρες αιχμής που η παροχή είναι μεγαλύτερη, γιατί διαφορετικά η απόδοση μειώνεται αντί να αυξάνεται. Το ίδιο ισχύει και για την πρωτοβάθμια δεξαμενή σε περίπτωση που το ανακυκλούμενο απόβλητο επιστρέφει σε αυτήν.

Προκειμένου να αποφεύγεται ο κίνδυνος υπερβολικής φόρτισης των δεξαμενών καθίζησης, σε πολλές περιπτώσεις προτιμάται η ανακύκλωση του αποβλήτου απευθείας μετά την έξοδό του από το βιολογικό φίλτρο, και μπορεί να επιστρέφει πάλι στην είσοδο του φίλτρου ή στην πρωτοβάθμια δεξαμενή. Ορισμένοι ερευνητές μάλιστα έχουν βρει ότι η απόδοση των συστημάτων που εφαρμόζουν ανακύκλωση του αποβλήτου μετά την δευτεροβάθμια καθίζηση, δεν διαφέρει σημαντικά από εκείνη των συστημάτων που ανακυκλώνουν το απόβλητο αμέσως μετά την έξοδό του από το βιολογικό φίλτρο. Τέλος, υποστηρίζεται ότι για τα φίλτρα με κροκάλες, ο παράγοντας που επηρεάζει τελικά την απόδοση δεν είναι η διάταξη της ανακύκλωσης αλλά ο λόγος αναρροής  $R$ , δηλαδή το ποσό του ανακυκλούμενου αποβλήτου.



**Σχήμα 3.2:** Πιθανές διατάξεις εφαρμογής ανακύκλωσης σε συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με δύο βιολογικά φίλτρα.

Όταν χρησιμοποιούνται δύο βιολογικά φίλτρα σε σειρά, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση ή να γίνει επεξεργασία αποβλήτων με αυξημένο BOD, τότε μετά το πρώτο φίλτρο μπορεί να υπάρχει μια πρώτη δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης (ενδιάμεση), και μετά το δεύτερο βιολογικό φίλτρο να υπάρχει επίσης δευτεροβάθμια δεξαμενή. Η ύπαρξη όμως της πρώτης δευτεροβάθμιας δεξαμενής δεν είναι απαραίτητη, εκτός και αν το απόβλητο που εξέρχεται από το πρώτο φίλτρο περιέχει πολλά στερεά.

Ο ρυθμός άντλησης που χρησιμοποιείται για την ανακύκλωση του αποβλήτου έχει επίσης μεγάλη σημασία για την βέλτιστη λειτουργία του φίλτρου. Συνήθως το σύστημα άντλησης αποτελείται από δύο ή περισσότερες αντλίες με σύστημα ελέγχου που ρυθμίζεται αυτόματα ή χειρωνακτικά. Ο ρυθμός άντλησης ρυθμίζεται ανάλογα, και μπορεί α) η άντληση να γίνεται μόνο κατά τα χρονικά διαστήματα που η παροχή αποβλήτου είναι μειωμένη, β) να υπάρχει σταθερός ρυθμός άντλησης, γ) ο ρυθμός άντλησης του ανακυκλούμενου αποβλήτου να είναι αντιστρόφως ανάλογος της παροχής του φρέσκου αποβλήτου, δ) να υπάρχουν δύο ή περισσότεροι καθορισμένοι ρυθμοί άντλησης που επιλέγονται με αυτόματο σύστημα ελέγχου ή χειρωνακτικά. Η διάταξη ενός συστήματος βιολογικών φίλτρων που θα χρησιμοποιηθεί τελικά, μπορεί να επιλέγεται με κριτήρια την ευκολία σχεδιασμού και εγκατάστασης και την ελαχιστοποίηση του πάγιου και του λειτουργικού κόστους, εφόσον διασφαλίζεται ο ικανοποιητικός ρυθμός διαβροχής του βιολογικού υμένα, καθώς και η μέγιστη απόδοση επεξεργασίας του αποβλήτου.

### **3.3 Δοσομετρικός Ρυθμός Τροφοδοσίας**

Ο δοσομετρικός ρυθμός τροφοδοσίας ενός βιολογικού φίλτρου ορίζεται ως το ύψος της στήλης του υγρού που διοχετεύεται στην κορυφή του πληρωτικού υλικού σε κάθε πλήρη περιστροφή του συστήματος τροφοδοσίας. Το σύστημα τροφοδοσίας αποτελείται συνήθως από δύο ή περισσότερους διάτρητους βραχίονες που περιστρέφονται πάνω από την κορυφή του πληρωτικού υλικού διοχετεύοντας έτσι το υγρό απόβλητο πάνω σε αυτό. Η κίνηση των βραχιόνων μπορεί να γίνεται υδραυλικά, βάσει της κίνησης του αποβλήτου είτε με ηλεκτρικό σύστημα, οπότε η τροφοδοσία μπορεί να ρυθμιστεί πιο αποτελεσματικά.



Αρχικά, η ταχύτητα περιστροφής που χρησιμοποιήθηκε ήταν από 0.5 έως 2 λεπτά ανά περιστροφή, που για δύο ή τέσσερις βραχίονες αντιστοιχεί σε τροφοδοσία του φίλτρου με αποβλήτο κάθε 10 έως 60 δευτερόλεπτα. Οι μελέτες που έχουν κάνει διάφοροι ερευνητές έδειξαν ότι η μείωση της ταχύτητας περιστροφής αυξάνει την απόδοση του φίλτρου. Αναφέρεται μάλιστα ότι η απόδοση των φίλτρων με ταχύτητα περιστροφής 30 έως 55 λεπτά ανά περιστροφή υπερβαίνει την απόδοση των φίλτρων με ταχύτητα 1 έως 5 λεπτά ανά περιστροφή.

Η χαμηλή ταχύτητα περιστροφής του συστήματος τροφοδοσίας του αποβλήτου, αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο δοσομετρικό ρυθμό παροχής για ορισμένη επιφανειακή φόρτιση, επομένως σε κάθε περιστροφή διοχετεύεται μεγαλύτερος όγκος αποβλήτου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη ανάδευση του αποβλήτου μέσα στο φίλτρο που προκαλεί και την παράσυρση του περιττού πάχους του βιολογικού υμένα. Το μικρό πάχος του υμένα δεν επιτρέπει να αναπτυχθούν τα αυγά των μυγών, βοηθά στην αύξηση της επιφάνειάς του και στην επικράτηση αερόβιων συνθηκών. Οι αερόβιες συνθήκες περιορίζουν και το πρόβλημα της δυσσομίας που συχνά εμφανίζεται στα βιολογικά φίλτρα. Επίσης, εξαλείφονται οι μεγάλοι κύκλοι αποκόλλησης στερεών που αντιστοιχούν σε αποκόλληση μεγάλου ποσοστού του βιολογικού υμένα, και αντικαθίστανται από μικρούς κύκλους αποκόλλησης μικρότερης ποσότητας στερεών, αυξάνοντας την απόδοση του φίλτρου.

Το πλεονέκτημα που έχει η ρύθμιση του δοσομετρικού ρυθμού παροχής είναι η αύξηση της απόδοσης διαβροχής του βιολογικού υμένα του πληρωτικού υλικού, δηλαδή του λόγου της υγρής επιφάνειας του πληρωτικού υλικού ( $A_w$ ), προς την συνολική του επιφάνεια ( $A_s$ ). Η αύξηση της απόδοσης διαβροχής αυξάνει και την απόδοση απομάκρυνσης BOD ενός βιολογικού φίλτρου, και είναι ένας από τους σημαντικότερους λόγους για τους οποίους εφαρμόζεται η ανακύκλωση. Αν ο σχεδιασμός του φίλτρου γίνει σωστά και ο δοσομετρικός ρυθμός παροχής του αποβλήτου είναι τέτοιος ώστε να διασφαλίζεται η μέγιστη απόδοση διαβροχής, τότε πιθανώς να μην είναι απαραίτητη και η χρήση της ανακύκλωσης, πράγμα που μειώνει σημαντικά το λειτουργικό κόστος. Η χρήση μικρής ταχύτητας του συστήματος τροφοδοσίας ευνοεί την απόδοση των φίλτρων με μεγάλη ή μικρή παροχή αποβλήτου και οργανική φόρτιση.

Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται παρατεταμένα μεγάλος δοσομετρικός ρυθμός παροχής προκειμένου να ελέγχεται το πάχος του βιολογικού υμένα, μπορεί να μειωθεί η απόδοση του φίλτρου γιατί μειώνεται πολύ ο χρόνος

επαφής του αποβλήτου με αυτό. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται ημερησίως και για ορισμένο χρονικό διάστημα (5 έως 10% του λειτουργικού χρόνου) αυξημένος ρυθμός παροχής που ονομάζεται δοσομετρικός ρυθμός πλημμυρισμού, προκειμένου όπως είπαμε να απομακρυνθεί το περιττό πάχος του υμένα και τα συσσωρευμένα στερεά. Το υπόλοιπο χρονικό διάστημα εφαρμόζεται ένας χαμηλότερος δοσομετρικός ρυθμός (δοσομετρικός ρυθμός λειτουργίας), προκειμένου να λειτουργεί κανονικά το φίλτρο.

Η βέλτιστες τιμές δοσομετρικού ρυθμού λειτουργίας και πλημμυρισμού εξαρτώνται από το BOD του προς επεξεργασία αποβλήτου, και στην βιβλιογραφία προτείνεται ένας πίνακας (Πίνακας 2), με τις τιμές αυτές βάσει την οργανικής φόρτισης (WEF, 2000). Συνήθως ο ρυθμός πλημμυρισμού είναι από 6 έως 15 φορές μεγαλύτερος από τον ρυθμό λειτουργίας. Πάντως, οι τιμές του πίνακα είναι περισσότερο βοηθητικές για τον καθορισμό του δοσομετρικού ρυθμού τροφοδοσίας, και προκειμένου να γίνει αριστοποίηση του συστήματος είναι καλύτερο οι τιμές αυτές να καθορίζονται βάσει μετρήσεων στο συγκεκριμένο σύστημα επεξεργασίας. Μία συνήθης τακτική είναι η σταδιακή αύξηση του δοσομετρικού ρυθμού μέχρι να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση. Ο σχεδιασμός του δοσομετρικού συστήματος πρέπει να έχει γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει δυνατότητα επιλογής του επιθυμητού ρυθμού παροχής.

**Πίνακας 2:** Δοσομετρικός ρυθμός τροφοδοσίας για την κανονική λειτουργία και για τον πλημμυρισμό του φίλτρου βάσει της οργανικής φόρτισης

<b>Οργανική Φόρτιση (kg BOD/m<sup>3</sup>.d)</b>	<b>Ρυθμός Λειτουργίας (mm/πέρασμα)*</b>	<b>Ρυθμός Πλημμυρισμού (mm/πέρασμα)*</b>
0.25	10 – 30	≥ 200
0.50	15 – 45	≥ 200
1.00	30 – 90	≥ 300
2.00	40 – 120	≥ 400
3.00	60 – 180	≥ 600
4.00	80 – 240	≥ 800

\* Οι τιμές αναφέρονται στην ποσότητα του υγρού που εφαρμόζεται σε κάθε περιστροφή από κάθε βραχίονα του συστήματος τροφοδοσίας.

Η απόδοση ενός βιολογικού φίλτρου εξαρτάται σημαντικά και από την μεταφορά οξυγόνου, και η εφαρμογή μεταβλητού δοσομετρικού ρυθμού φαίνεται ότι βοηθά στην αύξηση του ρυθμού μεταφοράς του. Στην βιβλιογραφία (Suschka, 1987) αναφέρεται ότι η μεταφορά οξυγόνου επιβραδύνεται λόγω της ύπαρξης ενός σχετικά στάσιμου στρώματος υγρού που βρίσκεται ανάμεσα στην επιφάνεια του βιολογικού υμένα και στην επιφάνεια του ρέοντος υγρού αποβλήτου. Το στάσιμο στρώμα υγρού εμποδίζει την άμεση επαφή του φρέσκου αποβλήτου με τον βιολογικό υμένα, άρα και την μεταφορά οξυγόνου. Η περιοδική εφαρμογή του δοσομετρικού ρυθμού πλημμυρισμού μειώνει το πάχος του βιολογικού υμένα, άρα και το πάχος του στάσιμου στρώματος, επομένως βοηθά στην καλύτερη μεταφορά οξυγόνου.

Όπως αναφέραμε παραπάνω, η απόδοση ενός βιολογικού φίλτρου εξαρτάται και από την απόδοση διαβροχής του βιολογικού υμένα, δηλαδή το ποσοστό της συνολικής επιφάνειας που υγραίνεται από το απόβλητο. Το ποσοστό αυτό δύσκολα προσδιορίζεται, και εξαρτάται από το είδος του πληρωτικού υλικού. Οι έρευνα έχει δείξει ότι το πληρωτικό υλικό τυχαίου προσανατολισμού συνήθως εμφανίζει μικρό ποσοστό διαβροχής σε σχέση με τους άλλους τύπους συνθετικού πληρωτικού υλικού, το οποίο όμως αυξάνεται ασυμπτωτικά με την αύξηση του επιφανειακού ρυθμού παροχής. Άρα, η εφαρμογή αυξημένου δοσομετρικού ρυθμού παροχής αυξάνει το ποσοστό διαβροχής και επομένως την απόδοση.

Βάσει του δοσομετρικού ρυθμού τροφοδοσίας που επιλέγεται τελικά, καθορίζεται η ταχύτητα περιστροφής του συστήματος τροφοδοσίας, ανάλογα με τον αριθμό των βραχιόνων που διαθέτει, την επιφανειακή φόρτιση του εισερχόμενου αποβλήτου και τον λόγο αναρροής. Η ταχύτητα περιστροφής δίνεται από την εξής σχέση (Albertson, 1989):

$$n = \frac{(1 + R) \cdot q \cdot 10^3 \text{ mm} / \text{m}}{A \cdot DR \cdot 60 \text{ min} / \text{h}} \quad (3.1)$$

n: Ταχύτητα περιστροφής, στροφές/min

q: Επιφανειακή φόρτιση εισερχόμενου αποβλήτου, m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h

R: Λόγος αναρροής αποβλήτου

A: Αριθμός βραχιόνων του περιστροφικού συστήματος τροφοδοσίας

DR: δοσομετρικός ρυθμός τροφοδοσίας, mm υγρού ανά περιστροφή και ανά βραχίονα

Ο δοσομετρικός ρυθμός τροφοδοσίας DR (dosing rate), αναφέρεται συχνά και ως SK (spüllkraft), όρος που έχει προκύψει από την γερμανική ορολογία.

### **3.4 Ύψος βιολογικού φίλτρου**

Στις εφαρμογές που έχουν γίνει στην Αμερική, το ύψος των βιολογικών φίλτρων με πληρωτικό υλικό από πέτρα κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1 και 2m, και πάντως δεν ξεπερνά τα 2.4m. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν εφαρμόζεται φυσικός αερισμός, η μεγαλύτερη αύξηση του βάθους του φίλτρου εμποδίζει την ικανοποιητική μεταφορά οξυγόνου που απαιτείται για την αερόβια μικροβιακή διάσπαση των ρύπων. Αντίθετα, στην Ευρώπη χρησιμοποιούνται συνήθως φίλτρα με πληρωτικό υλικό από πέτρα μεγαλύτερου βάθους που φθάνει μέχρι και τα 4.9m, στα οποία όμως εφαρμόζεται μηχανικό σύστημα παροχής αέρα για τον επαρκή αερισμό όλης της μάζας του βιολογικού υμένα.

Στα φίλτρα με πλαστικό πληρωτικό υλικό το ύψος του πύργου είναι αρκετά μεγαλύτερο, συνήθως μεταξύ 5 και 8m, ενώ μπορεί να φθάσει και τα 12.8m. Ο περιορισμός για την περαιτέρω αύξηση του ύψους δεν σχετίζεται τόσο με την απόδοση της βιολογικής οξειδωσης, αλλά περισσότερο με αισθητικούς λόγους, με την δυσκολία συντήρησης που θα είχε ένα πολύ ψηλό φίλτρο, τις μεγάλες απαιτήσεις ισχύος του συστήματος άντλησης του αποβλήτου, καθώς και τις δυσκολίες στο σχεδιασμό και την κατασκευή.

Ένα πλεονέκτημα της αύξησης του βάθους ενός βιολογικού φίλτρου, είναι ότι μειώνεται η ελάχιστη παροχή αποβλήτου που απαιτείται για να έχουμε την επιθυμητή απόδοση διαβροχής του βιολογικού υμένα (πηλίκο της υγρής επιφάνειας του πληρωτικού υλικού  $A_w$ , προς την συνολική επιφάνειά του,  $A_s$ ). Το κλάσμα  $A_w/A_s$  αυτό είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστεί, και επιπλέον η τιμή του υφίσταται διακυμάνσεις. Η απόδοση διαβροχής πρέπει να υπερβαίνει μια ελάχιστη τιμή που απαιτείται για να έχουμε την επιθυμητή απόδοση του φίλτρου.

Η αύξηση του βάθους μειώνει το λειτουργικό κόστος, καθώς απαιτείται μικρότερο ποσοστό ανακύκλωσης του αποβλήτου για να έχουμε την επιθυμητή απόδοση διαβροχής. Όμως, στα φίλτρα μεγάλου βάθους που δέχονται απόβλητα με μεγάλο οργανικό φορτίο, η έλλειψη οξυγόνου ιδιαίτερα στα ανώτερα στρώματα μπορεί να προκαλέσει έντονο πρόβλημα δυσοσμίας. Για την

αποφυγή τους, απαιτείται επαρκής μηχανικός αερισμός, αλλά και περιοδική εφαρμογή πλημμυρισμού του φίλτρου που εμποδίζει τα στερεά να συγκρατούνται στο πληρωτικό υλικό φράσσοντάς το.

Σύμφωνα με αρκετούς ερευνητές, το βάθος του πληρωτικού υλικού δεν επηρεάζει την απόδοση του φίλτρου, η οποία εξαρτάται από τον συνολικό όγκο του. Υπάρχουν όμως και άλλοι που υποστηρίζουν ότι για δεδομένο όγκο πληρωτικού υλικού, η απόδοση αυξάνεται αυξανόμενου του βάθους του πύργου. Σύμφωνα με νεότερες μελέτες, η αύξηση του βάθους σε φίλτρα με ορισμένο όγκο προκαλεί μικρή μόνο αύξηση της απόδοσης.

Η αύξηση του βάθους του πληρωτικού υλικού προκαλεί οπωσδήποτε αύξηση του υδραυλικού φορτίου που δέχεται το φίλτρο, οπότε αυξάνεται η απόδοση διαβροχής του βιολογικού υμένα και βελτιώνεται η κατανομή του αποβλήτου σε όλη την μάζα του πληρωτικού υλικού, και πιθανώς αυτός είναι ο λόγος που η απόδοση φαίνεται να αυξάνεται με την αύξηση του βάθους. Στην βιβλιογραφία αναφέρεται ότι για να επιτυγχάνεται μέγιστη απόδοση, πρέπει η ελάχιστη επιφανειακή φόρτιση να είναι  $0.5 \text{ L/m}^2.\text{s}$  (Dow Chemical Company, 1964 και 1967).

### **3.5 Αερισμός Βιολογικού Φίλτρου**

Ο επαρκής αερισμός ενός βιολογικού φίλτρου, δηλαδή η διέλευση αέρα μέσα από την μάζα του πληρωτικού υλικού, είναι βασικός παράγοντας για την αποδοτική λειτουργία του, καθώς το οξυγόνο είναι απαραίτητο για την επικράτηση αερόβιων συνθηκών στον βιολογικό υμένα όπου καταναλώνεται το οργανικό υπόστρωμα. Όταν το φίλτρο είναι κατάλληλα σχεδιασμένο ώστε να υπάρχουν αρκετές δίοδοι που επιτρέπουν την μεταφορά του αέρα μέσα σε αυτό, τότε γίνεται μια διαδικασία φυσικού αερισμού, που οφείλεται στην διαφορά υγρασίας μεταξύ του αέρα του περιβάλλοντος και του αέρα μέσα στο φίλτρο, αλλά και στην θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του αέρα και του υγρού αποβλήτου. Τα φαινόμενα μεταφοράς είναι λιγότερο έντονα κατά την διάρκεια της άνοιξης και του φθινοπώρου που οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ αποβλήτου και περιβάλλοντος είναι μικρότερες, καθώς επίσης και στις περιοχές με εύκρατο κλίμα. Τότε, ο φυσικός αερισμός δεν επαρκεί για την σωστή λειτουργία του φίλτρου. Ο φυσικός αερισμός των βιολογικών φίλτρων είναι η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την παροχή του απαραίτητου

οξυγόνου στα φίλτρα, όμως η εφαρμογή εξαναγκασμένου αερισμού με ανεμιστήρες χαμηλής πίεσης είναι μια πιο αξιόπιστη μέθοδος παροχής αέρα, που είναι ελεγχόμενη και επιτρέπει στο φίλτρο να λειτουργεί σε σταθερές και επιθυμητές συνθήκες. Στα φίλτρα με κροκάλες, όταν η θερμοκρασία του αέρα και του υγρού είναι περίπου η ίδια, τότε το απόβλητο δεν αερίζεται επαρκώς και η απόδοση μειώνεται. Αυτό συμβαίνει κυρίως στα ανώτερα στρώματα του φίλτρου όπου το οργανικό φορτίο είναι μεγαλύτερο.

Στην βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η φυσική ροή αέρα στο φίλτρο ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ), που οφείλεται στο διαφορικό της πίεσης μεταξύ ατμόσφαιρας και φίλτρου είναι πολύ μικρή, και όταν η θερμοκρασιακή διαφορά δεν υπερβαίνει τους  $2.8^\circ\text{C}$ , τότε το απόβλητο μέσα στο φίλτρο μπορεί εύκολα να γίνει στάσιμο λόγω έλλειψης οξυγόνου. Ροή αέρα μπορεί να παρατηρηθεί και λόγω διαφοράς στην υγρασία μεταξύ του ατμοσφαιρικού αέρα και του αέρα μέσα στο φίλτρο, όμως ο σχεδιασμός του φίλτρου δεν μπορεί να βασιστεί σε αυτή την παράμετρο γιατί είναι πολύ ευμετάβλητη και μη προβλέψιμη.

Όπως αναφέραμε, η βασική αιτία του φυσικού αερισμού είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ατμοσφαιρικού αέρα και του αέρα που συγκρατείται μέσα στους πόρους του φίλτρου. Όταν το απόβλητο είναι πιο ψυχρό από τον εξωτερικό αέρα, ο αέρας μέσα στο φίλτρο θα είναι επίσης ψυχρότερος και, δεδομένου ότι η πάνω επιφάνεια του φίλτρου είναι ανοιχτή στον ατμοσφαιρικό αέρα, η φορά ροής του αέρα θα είναι προς τα κάτω, από τις θερμότερες μάζες προς τις ψυχρότερες. Αντίθετα, όταν το απόβλητο είναι θερμότερο από τον ατμοσφαιρικό αέρα, η κίνηση του αέρα θα είναι προς τα πάνω, πράγμα λιγότερο επιθυμητό, καθώς η εισαγωγή φρέσκου αέρα θα γίνεται από το κατώτερο μέρος του φίλτρου όπου το οργανικό φορτίο είναι ήδη μειωμένο και οι ανάγκες σε οξυγόνο είναι μικρότερες.

Το ρεύμα του αέρα που προκαλείται από το διαφορικό της πίεσης λόγω των θερμοκρασιακών διαφορών, υπολογίζεται από την εξής σχέση (Schroeder and Tchobanoglous, 1976):

$$D_{air} = 353 \cdot \left( \frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_h} \right) \cdot Z \quad (3.2)$$

όπου:

$D_{air}$ : ρεύμα αέρα λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ αέρα και αποβλήτου, mm στήλης νερού

$T_C$ : θερμοκρασία ψυχρού μέσου, που μπορεί να είναι το απόβλητο ή ο αέρας, K

$T_h$ : θερμοκρασία θερμού μέσου, που μπορεί να είναι το απόβλητο ή ο αέρας, K

$Z$ : ύψος πύργου, m

Το ρεύμα αέρα που απαιτείται για τον αερισμό του φίλτρου μπορεί να υπολογιστεί θεωρώντας ότι η απαιτούμενη πτώση πίεσης ισούται με την συνολική πτώση πίεσης που συμβαίνει κατά την διέλευση του αέρα μέσα από το φίλτρο και από το σύστημα των σωλήνων απαγωγής του αποβλήτου.

Υπάρχουν κάποιες σχεδιαστικές τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την βελτίωση του αερισμού, όπως η χρήση σωλήνων μεγαλύτερης διαμέτρου στο σύστημα απαγωγής του αποβλήτου έτσι ώστε να μην γεμίζουν πάνω από το μισό και να επιτρέπουν την διέλευση αέρα, και η τοποθέτηση αγωγών στην περιφέρεια του φίλτρου και στα πλευρικά τοιχώματα του κοντά στο σύστημα απαγωγής αέρα. Επίσης, μπορεί να γίνει επέκταση των σωλήνων απαγωγής του αποβλήτου μέχρι τα πλευρικά τοιχώματα του φίλτρου, να τοποθετηθούν θύρες αερισμού με εσοχαρωτά καλύμματα στα άκρα του κεντρικού καναλιού συλλογής του αποβλήτου, και η μεταφορά του αποβλήτου στην δεξαμενή καθίζησης να γίνεται μέσα από ένα ανοικτό κανάλι. Οι τεχνικές αυτές βελτιώνουν την απόδοση του αερισμού, όμως δεν επαρκούν όταν απαιτείται υψηλή απόδοση επεξεργασίας, ή όταν οι συνθήκες δεν ευνοούν τον φυσικό αερισμό.

Οι κατασκευαστές συνθετικού πληρωτικού υλικού συνιστούν να γίνεται κατασκευή του φίλτρου έτσι ώστε να υπάρχει  $0.1\text{m}^2$  επιφάνειας αερισμού για κάθε 3 έως  $4.6\text{m}$  περιφέρειας του φίλτρου για την επεξεργασία αστικών αποβλήτων και  $1$  έως  $2\text{m}^2$  επιφάνειας αερισμού για κάθε  $1000\text{m}^3$  πληρωτικού υλικού. Επίσης, στην βιβλιογραφία αναφέρεται ότι για τα φίλτρα με κροκάλες, οι σωλήνες του συστήματος απαγωγής πρέπει να έχουν μη βεβυθισμένη επιφάνεια ίση με το 15% της επιφάνειας του φίλτρου, καθώς και ότι το 50% της συνολικής επιφάνειας όλων των σωληνώσεων και αγωγών μέσα στο φίλτρο πρέπει να μην βυθίζεται κατά την λειτουργία του φίλτρου, προκειμένου να επιτρέπεται η διέλευση του αέρα.

Κάποιοι σχεδιαστές υποστηρίζουν ότι η χρήση ηλεκτρικού συστήματος αερισμού δεν είναι απαραίτητη, όμως ένα τέτοιο σύστημα επιτρέπει την βέλτιστη λειτουργία του φίλτρου ώστε η απόδοση επεξεργασίας να είναι μέγιστη. Σε περίπτωση που δεν χρησιμοποιηθεί, κατά τις πιο ζεστές ώρες της ημέρας

που η θερμοκρασιακή διαφορά του αέρα και του αποβλήτου μειώνεται, πρακτικά παύει ο αερισμός του φίλτρου, οπότε εκτός από την μείωση της απόδοσης υπάρχει και εμφάνιση οσμών. Επίσης, ένας άλλος σημαντικός λόγος χρήσης ηλεκτρικού συστήματος αερισμού είναι ότι κατά την περίοδο του χειμώνα αποφεύγονται οι σημαντικές απώλειες θερμότητας από το απόβλητο προς το περιβάλλον, λόγω της μεταφοράς του αέρα που έχει πολύ χαμηλή θερμοκρασία.

Όταν χρησιμοποιείται ηλεκτρικό σύστημα, το φίλτρο είναι κλειστό και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία οσμηρών υγρών αποβλήτων χωρίς να δημιουργηθούν προβλήματα οσμών, αλλά και σε άλλες εφαρμογές όπως απόσμιση απαερίων από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων κομποστοποίησης ή αντλιοστάσια λυμάτων. Στα κλειστά φίλτρα αποφεύγεται η υπερβολική μεταφορά αέρα κατά την διάρκεια του χειμώνα, λόγω της μεγάλης θερμοκρασιακής διαφοράς του αποβλήτου και του ατμοσφαιρικού αέρα.

Όσον αφορά στο κόστος ενός συστήματος εξαναγκασμένου αερισμού, αυτό είναι μικρό σε σχέση με τα οφέλη που αποφέρει. Για την επεξεργασία αποβλήτου παροχής  $3800\text{m}^3/\text{d}$  έχει υπολογιστεί ότι η απαιτούμενη ισχύς είναι μόλις  $0.15\text{ KW}$  (WEF, 2000), ενώ η απαιτούμενη παροχή αέρα ανά μονάδα επιφάνειας διατομής του φίλτρου είναι κατά προσέγγιση  $0.3\text{m}^3/\text{m}^2.\text{min}$ . Η παροχή του αέρα μπορεί να έχει φορά προς τα πάνω ή προς τα κάτω, όμως, όπως αναφέρθηκε, είναι προτιμότερο να έχει φορά προς τα κάτω έτσι ώστε το οξυγόνο να αξιοποιείται και για την οξείδωση των ρύπων που προκαλούν προβλήματα οσμών στην επιφάνεια του φίλτρου, αλλά και για την μείωση της οργανικής φόρτισης που στην επιφάνεια του φίλτρου όπου εισάγεται το φρέσκο απόβλητο είναι μεγαλύτερη. Κατά τον σχεδιασμό πρέπει να γίνει τοποθέτηση ανεμιστήρων κατά μήκος της περιφέρειας του φίλτρου, αλλά και συστήματος προώθησης του αέρα κάτω από το πληρωτικό υλικό γιατί η πτώση πίεσης κατά μήκος του φίλτρου είναι μικρή και δεν επαρκεί για την προώθηση του αέρα. Τέλος, σε πολύ ψυχρά κλίματα ή κατά την διάρκεια του χειμώνα μπορεί να χρειάζεται περιορισμός της ροής του εξωτερικού αέρα μέσα από το φίλτρο προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία πάγου.

Όταν εφαρμόζεται εξαναγκασμένος αερισμός του φίλτρου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ροή του αέρα προς τα κάτω ώστε να μειωθούν οι οσμές, σε συνδυασμό με την περιοδική εφαρμογή πλημμυρισμού του φίλτρου που επίσης περιορίζει τις οσμές. Η ελάχιστη παροχή του αέρα που πρέπει να προσδοθεί



από το σύστημα αερισμού για να μεγιστοποιηθεί ο ρυθμός κατανάλωσης του υποστρώματος και η απόδοση, εξαρτάται πιθανώς από την παροχή που απαιτείται για να υπάρχει επαρκής κατανομή του αέρα σε όλη την μάζα του πληρωτικού υλικού.

Ο απαιτούμενος ρυθμός ροής αέρα ενός βιολογικού φίλτρου υπολογίζεται βάσει του ολικού BOD του εισερχόμενου αποβλήτου και του διαλυτού BOD (SBOD) του εξερχόμενου αποβλήτου. Για τα φίλτρα που αποσκοπούν στην μείωση του BOD μόνο, θεωρείται ότι ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου είναι 5% (20kg οξυγόνου/kg BOD). Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου ρυθμού τροφοδοσίας οξυγόνου είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται το χημικώς απαιτούμενο οξυγόνο του αποβλήτου (COD), αλλά επειδή αυτό είναι δύσκολο υπολογίζεται βάσει του BOD του αποβλήτου. Βάσει της παραδοχής ότι η απόδοση μεταφοράς οξυγόνου είναι 5% εκφράστηκε μια ποσοτική σχέση υπολογισμού της απαιτούμενης παροχής οξυγόνου (Dow Chemical Company, 1964). Η σχέση βασίστηκε σε υπολογισμούς σε φίλτρα με πλαστικό πληρωτικό υλικό και είναι η εξής:

$$R_0 = (20 \text{ kg} / \text{kg}) \cdot [0.80 \cdot e^{-9L_B} + 1.2 \cdot e^{-0.17L_B}] \cdot (PF) \quad (3.3)$$

$R_0$ : παροχή οξυγόνου, kg  $O_2$ /kg BOD αποβλήτου

$L_B$ : οργανική φόρτιση του φίλτρου, kg BOD/m<sup>3</sup>.d

PF: δείκτης φόρτισης, αποκτά μέγιστη τιμή όταν η φόρτιση του φίλτρου είναι μέτρια

### 3.6 Επίδραση Θερμοκρασίας

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, η επίδραση της θερμοκρασίας στα φίλτρα με κροκάλες είναι εντονότερη. Αναφέρεται γενικά ότι η απόδοση κατά την χειμερινή περίοδο είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της θερινής περιόδου, καθώς και ότι κατά την διάρκεια του χειμώνα η ανακύκλωση του αποβλήτου μπορεί να μειώσει την απόδοση γιατί αυξάνει τις θερμικές απώλειες. Τα φίλτρα με κροκάλες είναι στην συντριπτική πλειοψηφία τους μικρού βάθους και έχουν μεγάλη αναλογία επιφάνειας προς όγκο, επομένως όταν η επιφανειακή φόρτιση είναι μικρή υπάρχουν μεγάλες απώλειες θερμότητας από την ελεύθερη επιφάνεια του πληρωτικού υλικού. Για να αποφευχθούν αυτού

του είδους οι απώλειες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα πρόσθετο ύψος του πύργου 1 έως 2m πάνω από την επιφάνεια του πληρωτικού υλικού, όμως στα περισσότερα φίλτρα με κροκάλες δεν έχει γίνει αυτή η εφαρμογή. Επίσης, επειδή στα φίλτρα με κροκάλες χρησιμοποιείται συνήθως μεγαλύτερος λόγος αναρροής αποβλήτου, είναι πιο ευαίσθητα στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Βέβαια, σε πολλές περιπτώσεις οι μικρές αποδόσεις που αναφέρονται στην βιβλιογραφία μπορεί να οφείλονται σε κακό σχεδιασμό των δεξαμενών καθίζησης, αλλά και σε υπερεκτίμηση του BOD του εξερχόμενου αποβλήτου από παλαιότερες μετρήσεις που υπολόγιζαν και την νιτροποίηση και όχι μόνο την οξείδωση των ενώσεων του άνθρακα.

Τα περισσότερα φίλτρα με κροκάλες δεν διαθέτουν σύστημα εξαναγκασμένου αερισμού, και παρόλο που μια θερμοκρασιακή διαφορά της τάξης των 3 με 5°C μεταξύ αποβλήτου και ατμοσφαιρικού αέρα είναι αρκετή για τον φυσικό αερισμό, τον χειμώνα οι διαφορές μπορεί να είναι της τάξης των 20 με 40°C, οπότε η απόδοση μειώνεται αισθητά. Η χαμηλή θερμοκρασία μπορεί να μειώσει την απόδοση και λόγω της ελάττωσης του ρυθμού βιολογικής κροκίδωσης στις δεξαμενές καθίζησης πριν και μετά το φίλτρο.

Η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο την απόδοση είναι η θερμοκρασία του αποβλήτου και λιγότερο η θερμοκρασία του αέρα. Συνήθως, όταν ένα φίλτρο είναι προφυλαγμένο από το να γίνεται αποδέκτης των ομβρίων υδάτων και των υδάτων από την τήξη του χιονιού, δεν εμφανίζει θερμοκρασιακές διαφορές μεγαλύτερες από 3°C ημερησίως και 5 έως 7°C ετησίως. Η θερμοκρασία του αποβλήτου σε ένα φίλτρο σε ψυχρά κλίματα κυμαίνεται από 5 έως 24°C, ενώ σε θερμά κλίματα από 15 έως 30°C. Η επίδραση της θερμοκρασίας του αποβλήτου στην απόδοση ενός βιολογικού φίλτρου έχει εκφραστεί ποσοτικά βάσει της εξής σχέσης (Onda et al., 1968):

$$E_t = E_{20} \cdot \theta^{t-20} \quad (3.4)$$

όπου:

$\theta$ : σταθερά που συνήθως θεωρείται ίση με 1.035 και κυμαίνεται από 1.015 έως 1.045

$E_t$ : απόδοση φίλτρου σε θερμοκρασία  $t$

$E_{20}$ : απόδοση φίλτρου σε θερμοκρασία 20°C

$t$ : θερμοκρασία αποβλήτου, °C

## **Β. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

#### 4. ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

Για τον υπολογισμό της απόδοσης απομάκρυνσης BOD των βιολογικών φίλτρων, έχουν αναπτυχθεί αρκετές εμπειρικές εξισώσεις, κυρίως στα μέσα του προηγούμενου αιώνα, οι οποίες έχουν εξαχθεί μετά από επεξεργασία σειράς πειραματικών δεδομένων που έχουν προκύψει από την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, αστικών κυρίως αλλά και βιομηχανικών, με διάφορα συστήματα βιολογικών φίλτρων. Οι εξισώσεις αυτές συσχετίζουν την απόδοση με διάφορες άλλες παραμέτρους σχεδιασμού των βιολογικών φίλτρων, όπως η παροχή και το BOD του εισερχόμενου αποβλήτου, ο όγκος του φίλτρου και ο λόγος αναρροής, το είδος του πληρωτικού υλικού, το ύψος του πύργου, η θερμοκρασία κ.α.

Οι εμπειρικές εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της επεξεργασίας αστικών αποβλήτων με διάφορα συστήματα βιολογικών φίλτρων και τον υπολογισμό της απόδοσης απομάκρυνσης BOD συναρτήσει των μεταβλητών εισόδου του προβλήματος. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει μελέτη σχεδιασμού ενός βιολογικού φίλτρου με αριστοποίηση των τιμών των σχετικών παραμέτρων έτσι ώστε να έχουμε αύξηση της απόδοσης επεξεργασίας, αλλά και σύγκριση των διαφόρων εμπειρικών εξισώσεων που υπάρχουν στην βιβλιογραφία. Τα δύο παραπάνω προβλήματα αποτελούν και το θέμα της παρούσας διατριβής.

Υπάρχουν δύο βασικές ομάδες στις οποίες θα μπορούσαμε να ταξινομήσουμε τις εμπειρικές εξισώσεις. Η πρώτη θεωρεί ως βασική παράμετρο υπολογισμού της απόδοσης την οργανική φόρτιση, με πιο γνωστές τις εξισώσεις NRC (1946), και Galler and Gotaas (1964). Αυτές βασίστηκαν σε ένα πλήθος πειραματικών δεδομένων από διάφορες εγκαταστάσεις βιολογικών φίλτρων με κροκάλες. Η δεύτερη ομάδα εξισώσεων βασίζεται στην επιφανειακή φόρτιση ως κύρια παράμετρο υπολογισμού της απόδοσης. Οι πιο γνωστές είναι οι εξισώσεις Velz (1948), Schulze (1960), Eckenfelder (1963), Germain (1966), και British Manual (1988). Οι εξισώσεις αυτές είναι ημιεμπειρικές, δηλαδή βασίζονται στην γενική θεωρία που ισχύει σε μια βιολογική κλίνη, η τελική όμως μορφή της εξίσωσης καθώς και οι τιμές των σταθερών που καθορίζουν την απόδοση βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα.

Οι ερευνητές, στην προσπάθειά τους να εξηγήσουν την αρχή λειτουργίας των βιολογικών φίλτρων από φυσικοχημική και μηχανική άποψη, διατύπωσαν την θεωρία ότι η απομάκρυνση του οργανικού υποστρώματος είναι αντίδραση πρώτης τάξης, ανάλογη του βάθους του πληρωτικού υλικού και αντιστρόφως

ανάλογη μιας εκθετικής συνάρτησης της επιφανειακής φόρτισης, συμπεριλαμβανομένης ή όχι της ανακύκλωσης. Στην συνέχεια υποστηρίχθηκε ότι στην περίπτωση των φίλτρων με πλαστικό πληρωτικό υλικό, η ανακύκλωση δεν αυξάνει την απόδοση, συνεισφέρει όμως στην αύξηση της απόδοσης διαβροχής. Μια άλλη ομάδα ερευνητών υποστηρίζει ότι η βασική παράμετρος καθορισμού της απόδοσης είναι η οργανική φόρτιση ( $\text{kg BOD}/\text{m}^3.\text{d}$ ), και επομένως η επιφανειακή φόρτιση επιδρά λίγο ή καθόλου στην απόδοση. Πάντως, οι εμπειρικές εξισώσεις που βασίζονται στην άποψη ότι η απόδοση εξαρτάται από την επιφανειακή φόρτιση και το βάθος του πληρωτικού υλικού μπορούν να είναι ρεαλιστικές εάν οι τιμές των συντελεστών που χρησιμοποιούνται σε αυτές τροποποιηθούν ανάλογα με το βάθος του πληρωτικού υλικού. Πιθανώς η αύξηση της απόδοσης με το βάθος του φίλτρου να οφείλεται στην αύξηση της απόδοσης διαβροχής, οπότε το ίδιο αποτέλεσμα θα μπορούσε να επιτευχθεί με χρήση κατάλληλου δοσομετρικού ρυθμού παροχής ώστε να μεγιστοποιείται το ποσοστό της επιφάνειας που διαβρέχεται.

#### **4.1 Λογισμικό προσομοίωσης**

Για την προσομοίωση της επεξεργασίας αστικών αποβλήτων με βιολογικά φίλτρα, κατασκευάστηκε λογισμικό σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran. Το λογισμικό αυτό έχει δομηθεί βάσει ενός κυρίως προγράμματος, το οποίο καλεί υποπρογράμματα που αντιστοιχούν σε προβλήματα συσχετισμού ορισμένων από τις παραμέτρους σχεδιασμού ενός συστήματος με βιολογικά φίλτρα, βάσει μιας ορισμένης εμπειρικής εξίσωσης. Κάθε υποπρόγραμμα υπολογίζει την σχέση δύο ή περισσότερων από τις παραμέτρους σχεδιασμού, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι δεν μεταβάλλονται. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από κάθε υποπρόγραμμα καταγράφονται σε ξεχωριστά αρχεία και στην συνέχεια κατασκευάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα, οπότε μελετάται ο συσχετισμός των παραμέτρων σχεδιασμού μέσω της εμπειρικής εξίσωσης που μελετάμε κάθε φορά.

Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε κυρίως με δύο προβλήματα συσχέτισης μεταβλητών σχεδιασμού, δηλαδή με την επίδραση του λόγου αναρροής στην απόδοση βιολογικών φίλτρων ορισμένου όγκου, και την επίδραση του λόγου αναρροής στον συνολικό όγκο του πληρωτικού υλικού για ορισμένη απόδοση.

#### 4.1.1 Λογισμικό συσχέτισης όγκου – λόγου αναρροής

Το λογισμικό συσχέτισης όγκου – λόγου αναρροής που κατασκευάσαμε αφορά αποκλειστικά στην μελέτη της εμπειρικής εξίσωσης NRC. Υπολογίζει τον ολικό όγκο πληρωτικού υλικού που απαιτείται για την επεξεργασία αστικού αποβλήτου με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, με ορισμένη διάταξη βιολογικών φίλτρων που περιλαμβάνει ένα ή δύο φίλτρα. Η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι ο λόγος αναρροής  $R$  που μεταβάλλεται (αυξάνεται) σταδιακά μέσω επαναληπτικής διαδικασίας, και εξαρτημένη μεταβλητή είναι ο συνολικός όγκος του πληρωτικού υλικού. Ως παράμετροι εισόδου, που έχουν καθορισμένες τιμές, λαμβάνονται η παροχή  $Q$  του αποβλήτου, το βάθος  $D$  του πληρωτικού υλικού, το BOD εισόδου του αποβλήτου στο φίλτρο, η θερμοκρασία του αποβλήτου, και το BOD εξόδου από την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, δηλαδή από το σύστημα επεξεργασίας.

Επίσης, υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί που λαμβάνονται υπόψη, σχετικά με το επιτρεπτό εύρος τιμών της επιφανειακής φόρτισης και της οργανικής φόρτισης, που πρέπει να βρίσκονται μέσα στα όρια του Πίνακα 1 και αντιστοιχούν σε φίλτρα με κροκάλες, φόρτισης χαμηλής έως και υψηλής. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούμε τα όρια που αναφέρονται στην πηγή (α) (Metcalf & Eddy, 2003). Όσον αφορά στην επιφανειακή φόρτιση, για να δούμε αν βρίσκεται μέσα στο επιτρεπτό εύρος τιμών υπολογίζουμε πάντα την συνολική τιμή της, λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση του λόγου αναρροής. Στην περίπτωση της οργανικής φόρτισης, δεν λαμβάνουμε υπόψη την επίδραση της ανακύκλωσης, γιατί στην εξίσωση NRC δεν υπολογίζεται η ανακύκλωση στην τιμή του BOD του αποβλήτου που εισέρχεται στο φίλτρο. Άλλωστε, τα όρια της οργανικής φόρτισης που αναφέρονται στην πηγή που χρησιμοποιήσαμε είναι γενικά, δηλαδή δεν γίνεται διαχωρισμός σχετικά με το αν λαμβάνεται υπόψη ή όχι η επίδραση της ανακύκλωσης. Στις άλλες δύο πηγές που αναφέρονται στον Πίνακα 1 (WEF, 2003 και WEF, 1998) γίνεται διαχωρισμός του επιτρεπτού εύρους τιμών της οργανικής φόρτισης ανάλογα με το αν λαμβάνεται υπόψη ο λόγος αναρροής, αλλά και στην περίπτωση αυτή η διαφορές είναι μικρές.

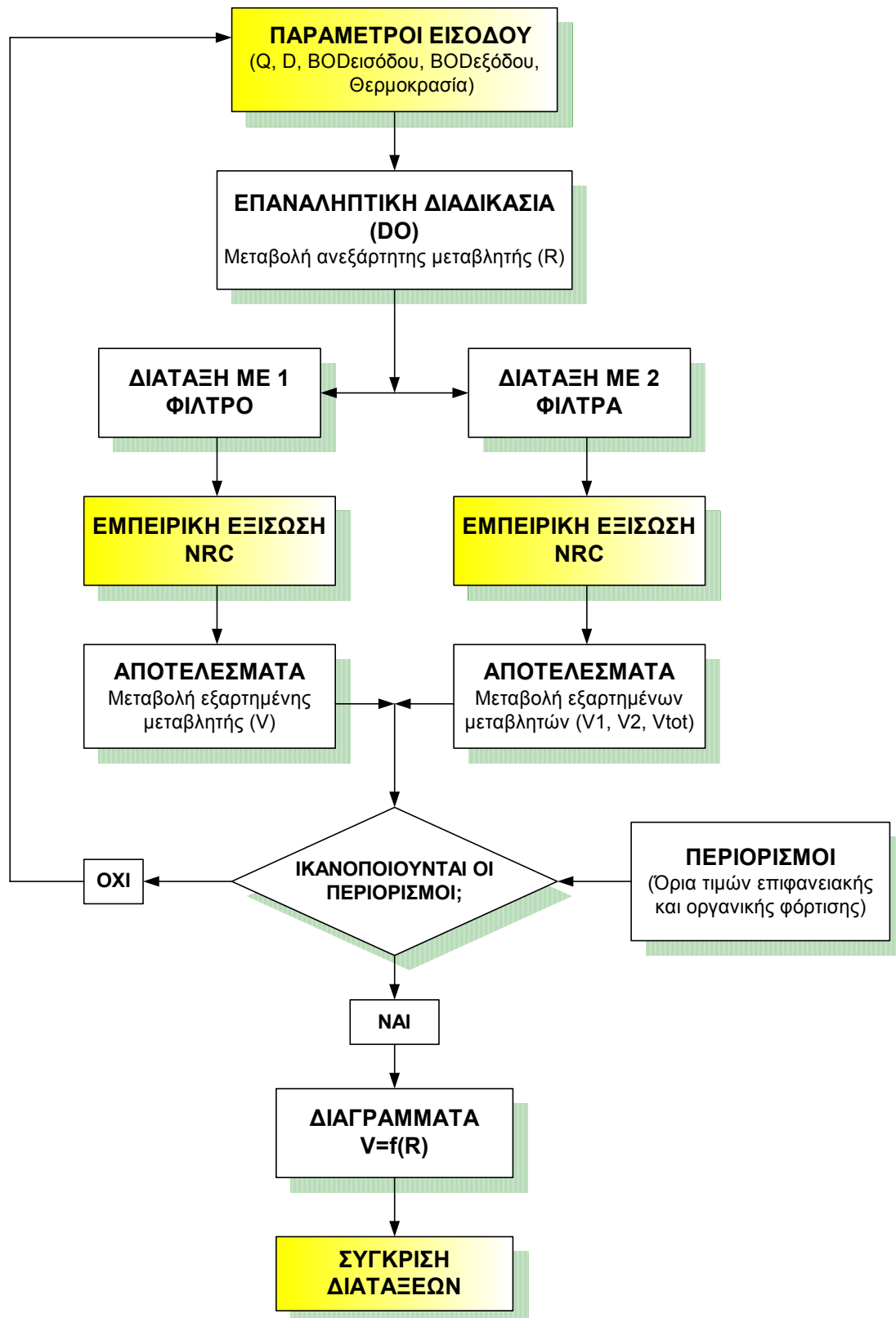
Αφού καθορίσουμε τα δεδομένα εισόδου όπως αναφέραμε, μέσω επαναληπτικής διαδικασίας γίνεται σταδιακή αύξηση του λόγου αναρροής με καθορισμένο βήμα, και μέσω της εμπειρικής εξίσωσης NRC προκύπτει ο συνολικός όγκος του πληρωτικού υλικού για διάταξη με ένα ή δύο βιολογικά φίλτρα. Από τα αποτελέσματα  $V=f(R)$  (όπου  $V$  ο όγκος του πληρωτικού υλικού

και  $R$  ο λόγος αναρροής) κατασκευάζονται διαγράμματα, βάσει των οποίων γίνεται σύγκριση του όγκου που απαιτείται, ανάλογα με το αν η χρησιμοποιούμενη διάταξη περιλαμβάνει ένα ή δύο φίλτρα.

Η λεπτομερής περιγραφή του λογισμικού για την διάταξη με ένα βιολογικό φίλτρο και οι αντίστοιχες εξισώσεις που χρησιμοποιούνται, αναφέρεται στην παράγραφο 5.2.1. Τα δεδομένα εισόδου, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση καθώς και η διαγραμματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για το ένα φίλτρο, αναφέρονται στην παράγραφο 5.2.1.1. Το λογισμικό που χρησιμοποιούμε για την προσομοίωση της επεξεργασίας με διάταξη που περιλαμβάνει δύο φίλτρα περιγράφεται στην παράγραφο 5.2.2, ενώ τα δεδομένα εισόδου και τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων αναφέρονται στην παράγραφο 5.2.2.1.

Ένα λογικό διάγραμμα της διαδικασίας που ακολουθούμε για την προσομοίωση της επεξεργασίας αστικών αποβλήτων και την μελέτη της επίδρασης του λόγου αναρροής  $R$  στον απαιτούμενο ολικό όγκο του πληρωτικού υλικού βάσει της εξίσωσης NRC, απεικονίζεται στο Διάγραμμα 4.1.

**Διάγραμμα 4.1:** Διάγραμμα ροής λογισμικού συσχέτισης όγκου πληρωτικού υλικού – λόγου αναρροής βάσει της εξίσωσης NRC.





#### 4.1.2 Λογισμικό συσχέτισης απόδοσης – λόγου αναρροής

Το λογισμικό συσχέτισης απόδοσης των βιολογικών φίλτρων με τον λόγο αναρροής  $R$  αναφέρεται σε προσομοίωση επεξεργασίας αστικού αποβλήτου με διάταξη η οποία περιλαμβάνει ένα βιολογικό φίλτρο που ακολουθείται από δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης. Θεωρούμε δηλαδή ότι το απόβλητο έχει ήδη περάσει από πρωτοβάθμια καθίζηση. Η προσομοίωση γίνεται για όλες τις εμπειρικές εξισώσεις που μελετάμε στην παρούσα εργασία, και η γενική διαδικασία που ακολουθούμε είναι η εξής: Καθορίζουμε τα δεδομένα εισόδου του λογισμικού, που είναι οι παράμετροι εισόδου, η ανεξάρτητη μεταβλητή, δηλαδή ο λόγος αναρροής  $R$  και οι περιορισμοί του προβλήματος. Τα δεδομένα εισόδου εισάγονται στην εκάστοτε εξεταζόμενη εμπειρική εξίσωση, οπότε προκύπτουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

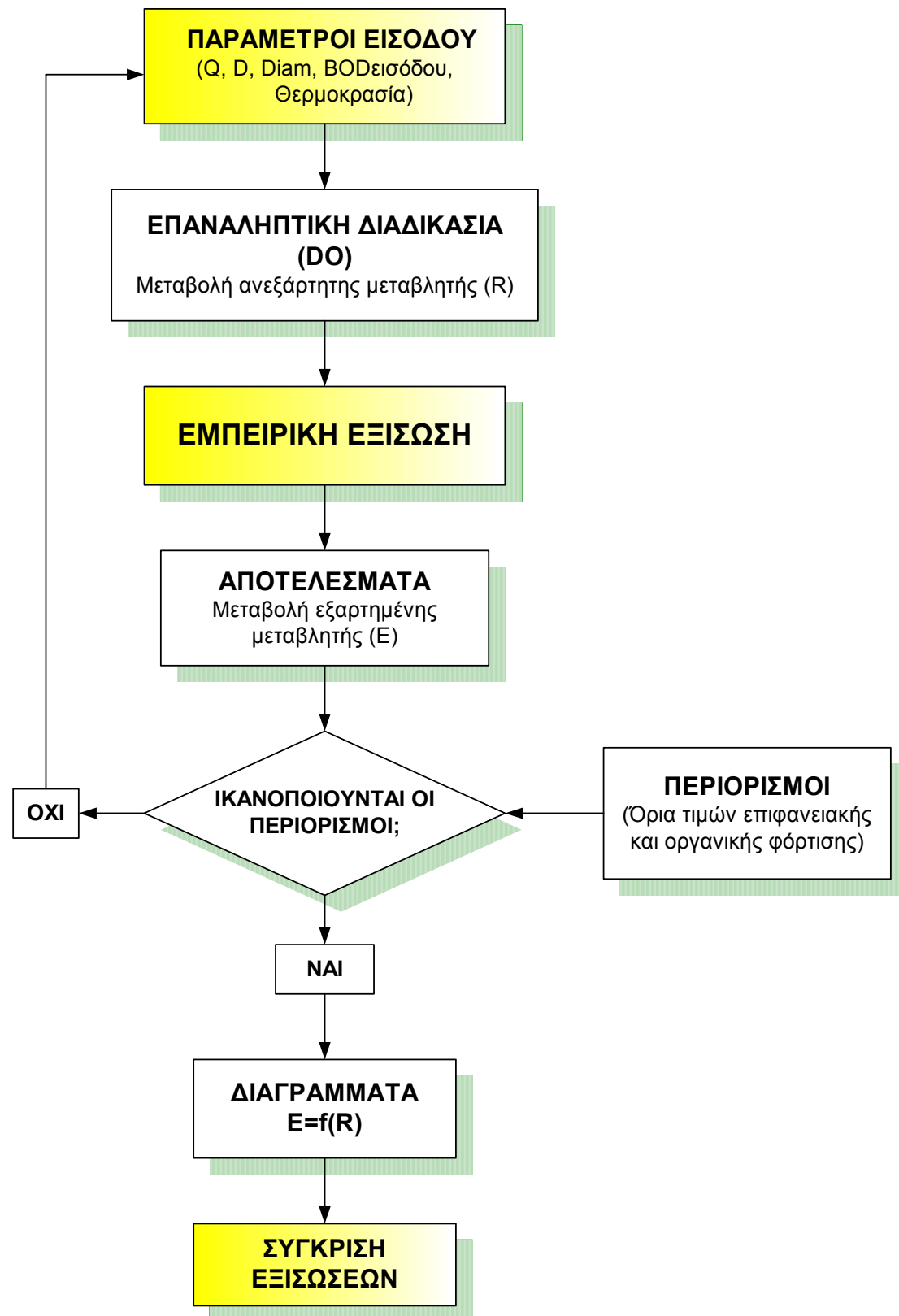
Οι παράμετροι εισόδου είναι για το πρόβλημα  $E=f(R)$  η παροχή του αποβλήτου  $Q$ , το βάθος του πληρωτικού υλικού  $D$  και η διάμετρος του φίλτρου  $Diam$ , το BOD εισόδου του αποβλήτου στο φίλτρο και η θερμοκρασία του. Οι περιορισμοί αφορούν στο εύρος τιμών της οργανικής και της επιφανειακής φόρτισης, που λαμβάνονται από τον Πίνακα 1, πηγή (α) (Metcalf & Eddy, 2003). Για την επίδραση της ανακύκλωσης στις τιμές της επιφανειακής και της οργανικής φόρτισης καθώς και στα αντίστοιχα όρια του εύρους τιμών τους, ισχύουν οι παρατηρήσεις που αναφέραμε στην παράγραφο 4.1.1. Το εύρος τιμών της φόρτισης μεταβάλλεται ανάλογα με το είδος του πληρωτικού υλικού (πέτρα ή πλαστικό) που χρησιμοποιείται σε κάθε εμπειρική εξίσωση.

Το λογισμικό μεταβάλλει την ανεξάρτητη μεταβλητή  $R$  με ορισμένο βήμα μέσω επαναληπτικής διαδικασίας. Η μεταβλητή  $R$  εισάγεται στην εμπειρική εξίσωση μαζί με τα υπόλοιπα δεδομένα εισόδου για τον υπολογισμό της εξαρτημένης μεταβλητής, που είναι η απόδοση  $E$  του φίλτρου μαζί με την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης απεικονίζονται σε διαγράμματα της μορφής  $E=f(R)$  για κάθε εμπειρική εξίσωση. Βάσει των διαγραμμάτων γίνεται σύγκριση των εξισώσεων ως προς την υπολογιζόμενη απόδοση και τις τιμές BOD του επεξεργασμένου αποβλήτου.

Η περιγραφή του λογισμικού και των δεδομένων εισόδου για κάθε εμπειρική εξίσωση γίνεται στις παραγράφους 5.3 (εξίσωση NRC), 6.1 (εξίσωση Galler και Gotaas), 7.3 (εξίσωση Velz), 8.1 (εξίσωση Schulze), 9.1 (εξίσωση Eckenfelder), 10.1 (εξίσωση Germain) και 11.1 (Βρετανικό Μοντέλο). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τα διαγράμματα απόδοσης – λόγου

αναρροής αναφέρονται στις παραγράφους 5.3.1 (εξίσωση NRC), 6.1.1 (εξίσωση Galler και Gotaas), 7.3.1 (εξίσωση Velz), 8.1.1 (εξίσωση Schulze), 9.1.1 (εξίσωση Eckenfelder), 10.1.1 (εξίσωση Germain) και 11.1.1 (Βρετανικό Μοντέλο). Η σύγκριση των εξισώσεων βάσει των διαγραμμάτων απόδοσης και BOD επεξεργασμένου αποβλήτου γίνεται στην παράγραφο 12.1 για φίλτρα με κροκάλες, και στην παράγραφο 12.2 για φίλτρα με πλαστικό. Ένα γενικό διάγραμμα της όλης πορείας που ακολουθείται για την μελέτη της επίδρασης του λόγου αναρροής στην απόδοση των βιολογικών φίλτρων με βάση τις διάφορες εμπειρικές εξισώσεις φαίνεται στο Διάγραμμα 4.2.

**Διάγραμμα 4.2:** Διάγραμμα ροής λογισμικού συσχέτισης απόδοσης – λόγου αναρροής βάσει εμπειρικών εξισώσεων.



## 5. Η ΕΞΙΣΩΣΗ NRC

Η εξίσωση NRC (Mohlman et al., 1946), ήταν η πρώτη εμπειρική εξίσωση που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό της απόδοσης των βιολογικών φίλτρων ως προς την απομάκρυνση BOD, συσχετίζοντας παραμέτρους όπως ο όγκος των φίλτρων, ο λόγος αναρρόης, η παροχή του αποβλήτου και το φορτίο BOD του αποβλήτου. Για την ανάπτυξη της εξίσωσης NRC, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από μετρήσεις σε τριάντα τέσσερις (34) εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών αποβλήτων σε στρατιωτικές μονάδες των Η.Π.Α. Οι εγκαταστάσεις αυτές περιελάμβαναν πρωτοβάθμιες δεξαμενές καθίζησης, βιολογικά φίλτρα και δευτεροβάθμιες δεξαμενές καθίζησης σε διάφορες διατάξεις, με ή χωρίς ανακύκλωση του επεξεργασμένου αποβλήτου.

Το πληρωτικό υλικό που χρησιμοποιούσαν στα βιολογικά φίλτρα την εποχή εκείνη ήταν κροκάλες, δηλαδή πορώδεις πέτρες ορισμένων διαστάσεων, επομένως η εξίσωση NRC αναφέρεται σε επεξεργασία με κροκάλες και όχι με πλαστικό πληρωτικό υλικό, όπως χρησιμοποιείται σήμερα. Σημαντικό είναι ότι λόγω του μεγάλου ειδικού βάρους που έχει η πέτρα σαν υλικό, τα βιολογικά φίλτρα εκείνης της εποχής δεν είχαν μεγάλα κενά ανάμεσα στις δομικές μονάδες του πληρωτικού υλικού, γεγονός που δυσκόλευε τον επαρκή αερισμό του βιολογικού υμένα που αναπτυσσόταν στην επιφάνειά του. Επομένως το ύψος των φίλτρων που χρησιμοποιούσαν κροκάλες δεν μπορούσε να είναι πολύ μεγάλο, και κυμαινόταν από 0.9 έως 2.5m.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, αξιολογώντας σήμερα την εξίσωση NRC, θα λέγαμε ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί περισσότερο για μια εκτίμηση της απόδοσης ενός βιολογικού φίλτρου βάσει των παραμέτρων εισόδου, και όχι για ακριβή υπολογισμό. Αυτό συμβαίνει γιατί για την εξαγωγή της εξίσωσης χρησιμοποιήθηκε σχετικά μικρή βάση δεδομένων, αλλά και γιατί οι τιμές BOD του εισερχόμενου αποβλήτου που χρησιμοποιήθηκε στις στρατιωτικές εγκαταστάσεις είναι σχετικά υψηλές σε σχέση με τα συνήθη αστικά απόβλητα. Χαρακτηριστικό της εξίσωσης είναι ότι συνυπολογίζει και την επίδραση της δευτεροβάθμιας δεξαμενής καθίζησης στον υπολογισμό της απόδοσης του βιολογικού φίλτρου.

Η εξίσωση NRC έχει την εξής μορφή:

$$E_1 = \frac{1}{1 + 0.4432 \sqrt{\frac{W_1}{V_1 F}}} \quad (5.1)$$

και

$$E_2 = \frac{1}{1 + \frac{0.4432}{1 - E_1} \sqrt{\frac{W_2}{V_2 F}}} \quad (5.2)$$

όπου:

$E_1, E_2$  : οι αποδόσεις απομάκρυνσης BOD του πρώτου και του δεύτερου βιολογικού φίλτρου αντίστοιχα, σε θερμοκρασία 20°C, λαμβάνοντας υπόψη και τον λόγο αναρροής,  $0 < E_1, E_2 < 1$

$W_1, W_2$  : το φορτίο BOD του πρώτου και του δεύτερου φίλτρου αντίστοιχα, kg/d

$V_1, V_2$  : ο όγκος του πληρωτικού υλικού του πρώτου και του δεύτερου φίλτρου αντίστοιχα, m<sup>3</sup>

$F$  : συντελεστής λόγου αναρροής

Ο συντελεστής λόγου αναρροής υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$F = \frac{1 + R}{(1 + R/10)^2} \quad (5.3)$$

όπου:

$R$  : λόγος αναρροής

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση των βιολογικών φίλτρων σύμφωνα με την εξίσωση NRC υπολογίζεται από την σχέση:

$$E_T = E_{20} (1.035)^{T-20} \quad (5.4)$$

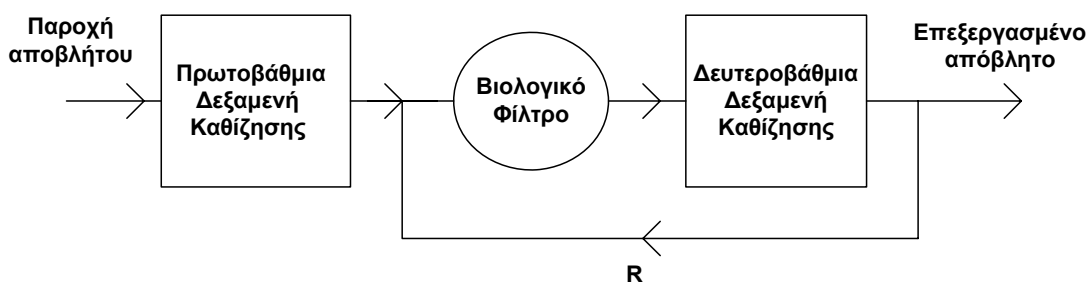
όπου:

$E_T$  : Η απόδοση απομάκρυνσης BOD σε θερμοκρασία T° C,  $0 < E_T < 1$

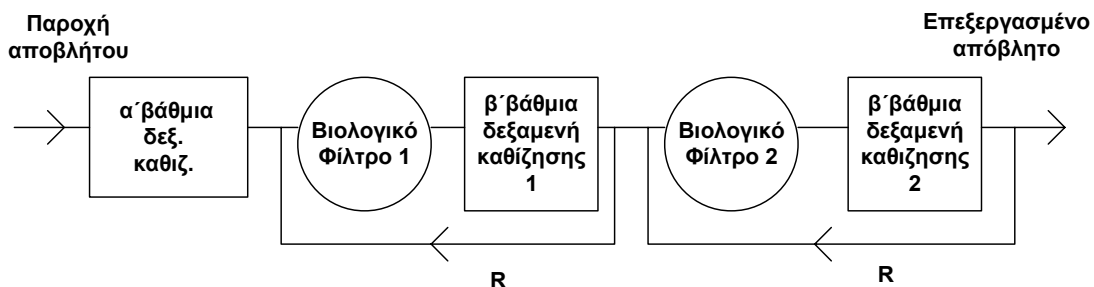
$E_{20}$  : Η απόδοση απομάκρυνσης BOD σε θερμοκρασία 20° C,  $0 < E_{20} < 1$

## 5.1 Διάταξη

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η εξίσωση NRC συνυπολογίζει την επίδραση της δευτεροβάθμιας καθίζησης στον υπολογισμό της απόδοσης κάθε φίλτρου, καθώς επίσης και τον λόγο αναρροής, μέσω του αντίστοιχου συντελεστή λόγου αναρροής  $F$ . Στην περίπτωση που δεν υπάρχει ανακύκλωση, ο συντελεστής του λόγου αναρροής ισούται με την μονάδα. Η εξίσωση NRC χρησιμοποιεί ξεχωριστές εξισώσεις στην περίπτωση που το σύστημα περιλαμβάνει ένα ή δύο βιολογικά φίλτρα, καθένα από τα οποία ακολουθείται από δευτεροβάθμια δεξαμενή. Στην περίπτωση που έχουμε και ανακύκλωση, μέρος του αποβλήτου που εξέρχεται από την δευτεροβάθμια δεξαμενή επιστρέφει στην είσοδο του αντίστοιχου βιολογικού φίλτρου όπου υφίσταται και πάλι επεξεργασία. Επομένως, οι διατάξεις του συστήματος επεξεργασίας αστικών αποβλήτων που προσομοιώνονται μέσω της εξίσωσης NRC είναι αυτές που εικονίζονται στα δύο παρακάτω σχήματα, όπου ο λόγος αναρροής  $R$  μπορεί να είναι ίσος ή μεγαλύτερος του μηδενός,



**Σχήμα 5.1:** Διάταξη επεξεργασίας υγρού αποβλήτου με ένα βιολογικό φίλτρο βάσει της εξίσωσης NRC.



**Σχήμα 5.2:** Διάταξη επεξεργασίας υγρού αποβλήτου με δύο βιολογικά φίλτρα βάσει της εξίσωσης NRC.

## 5.2 Λογισμικό συσχέτισης όγκου – λόγου αναρροής

Κατασκευάστηκε υποπρόγραμμα συσχετισμού του συνολικού όγκου του πληρωτικού υλικού των βιολογικών φίλτρων με τον λόγο αναρροής. Η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι ο λόγος αναρροής, η εξαρτημένη μεταβλητή ο συνολικός όγκος και τα υπόλοιπα μεγέθη, όπως η απόδοση του φίλτρου και της πρωτοβάθμιας δεξαμενής καθίζησης, το ύψος του φίλτρου και της πρωτοβάθμιας δεξαμενής, η παροχή και το BOD του αποβλήτου που τροφοδοτεί το βιολογικό φίλτρο, καθώς και το BOD του αποβλήτου που εξέρχεται από το σύστημα μετά την επεξεργασία, θεωρούνται παράμετροι του προβλήματος, δηλαδή έχουν καθορισμένες τιμές.

### 5.2.1 Διάταξη 1

Κατασκευάστηκε λογισμικό που προσομοιώνει την επεξεργασία αστικών αποβλήτων με σύστημα όμοιο με αυτό του Σχήματος 5.1, βάσει της εξίσωσης NRC. Επομένως, το σύστημα αποτελείται από μία πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης, ένα βιολογικό φίλτρο και μία δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης. Μέρος του αποβλήτου που εξέρχεται από την τελευταία, ανακυκλώνεται στο βιολογικό φίλτρο.

Βάσει της απόδοσης της πρωτοβάθμιας δεξαμενής καθίζησης, το λογισμικό υπολογίζει τον χρόνο παραμονής του αποβλήτου σε αυτήν, βάσει της επόμενης εμπειρικής εξίσωσης (Crites and Tchobanoglous, 1998):

$$100E_{PC} = \frac{t_{PC}}{a + bt_{PC}} \quad (5.5)$$

Η εξίσωση επιλύεται ως προς τον χρόνο παραμονής και προκύπτει:

$$t_{PC} = \frac{a(100E_{PC})}{1 - b(100E_{PC})} \quad (5.6)$$

όπου:

$t_{PC}$  : χρόνος παραμονής του αποβλήτου στην πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης, h

$E_{PC}$  : η απόδοση απομάκρυνσης BOD της πρωτοβάθμιας δεξαμενής,  $0 < E_{PC} < 1$

a, b: εμπειρικές σταθερές απόδοσης απομάκρυνσης BOD, με  $a = 0.018$  και  $b = 0.020$

Η απόδοση απομάκρυνσης BOD της πρωτοβάθμιας δεξαμενής αποτελεί μία από τις παραμέτρους εισόδου. Μέσω του χρόνου παραμονής υπολογίζεται ο όγκος της δεξαμενής:

$$V_{PC} = t_{PC} Flow \quad (5.7)$$

όπου:

$V_{PC}$  : ο όγκος της πρωτοβάθμιας δεξαμενής,  $m^3$

Flow: η παροχή του αποβλήτου στο σύστημα,  $m^3/d$

Το ύψος της δεξαμενής λαμβάνεται ως ίσο με το ύψος των φίλτρων, και για πληρωτικό υλικό από πέτρα λαμβάνει ορισμένη τιμή (2.4m), όπως αναφέρεται στον Πίνακα 3α της επόμενης παραγράφου. Από τον όγκο και το ύψος της δεξαμενής, υπολογίζονται η επιφάνεια και η διάμετρός της, βάσει των σχέσεων:

$$A_{PC} = \frac{V_{PC}}{D_{PC}} \quad (5.8)$$

και

$$Diam_{PC} = \sqrt{\frac{4A_{PC}}{\pi}} \quad (5.9)$$

όπου:

$D_{PC}$  : το βάθος της πρωτοβάθμιας δεξαμενής, m

$Diam_{PC}$  : η διάμετρος της πρωτοβάθμιας δεξαμενής, m

$A_{PC}$  : η διατομή της πρωτοβάθμιας δεξαμενής,  $m^2$

Από την τιμή του BOD του αποβλήτου που τροφοδοτεί το βιολογικό φίλτρο, υπολογίζεται το BOD του αποβλήτου που εισέρχεται στο σύστημα,



δηλαδή στην πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης, χωρίς να λάβουμε υπόψη την επίδραση της ανακύκλωσης, εφόσον αυτή συνυπολογίζεται στην εξίσωση NRC:

$$BOD_{PC} = \frac{BOD_{TF}}{(1 - E_{PC})} \quad (5.10)$$

όπου:

$BOD_{TF}$  : το BOD του αποβλήτου που τροφοδοτεί το φίλτρο, mg/L (g/m<sup>3</sup>)

$BOD_{PC}$  : το BOD του αποβλήτου που τροφοδοτεί το σύστημα, mg/L (g/m<sup>3</sup>)

$E_{PC}$  : Η απόδοση απομάκρυνσης BOD στην πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης,

$0 < E_T < 1$

Από τις τιμές BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο και εξόδου από το σύστημα, δηλαδή από την δευτεροβάθμια δεξαμενή, που αποτελούν παραμέτρους εισόδου του προβλήματος, υπολογίζουμε την απόδοση του βιολογικού φίλτρου, στην οποία συμπεριλαμβάνεται και η επίδραση της δευτεροβάθμιας δεξαμενής:

$$E = \frac{BOD_{TF} - BOD_{OUT}}{BOD_{TF}} \quad (5.11)$$

όπου:

$E$ : Η απόδοση απομάκρυνσης BOD του βιολογικού φίλτρου (μαζί με την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης),  $0 < E < 1$

$BOD_{OUT}$  : το BOD του αποβλήτου που εξέρχεται από το σύστημα (από την δευτεροβάθμια δεξαμενή), mg/L (g/m<sup>3</sup>)

Από το  $BOD_{TF}$  υπολογίζεται το οργανικό φορτίο (BOD) του φίλτρου, μέσω της σχέσης:

$$W = 10^{-3} \cdot BOD_{TF} \cdot Flow \quad (5.12)$$

όπου:

$W$  : το οργανικό φορτίο (BOD) του φίλτρου, kg/d

$BOD_{TF}$  : το BOD του αποβλήτου που τροφοδοτεί το φίλτρο χωρίς την ανακύκλωση, mg/L (g/m<sup>3</sup>)

$Flow$  : η παροχή του αποβλήτου στο σύστημα, m<sup>3</sup>/d

Η εξάρτηση του όγκου του βιολογικού φίλτρου από την τιμή του λόγου αναρροής R, μελετάται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας που μεταβάλλει την τιμή του R με ορισμένο βήμα, από μια ελάχιστη τιμή σε μια μέγιστη. Για κάθε τιμή του R υπολογίζεται ο συντελεστής λόγου αναρροής F μέσω της σχέσης (1.3), και εν συνεχεία ο όγκος του πληρωτικού υλικού του φίλτρου, όπως προκύπτει από την επίλυση της εξίσωσης NRC ως προς τον όγκο:

$$V = \frac{W}{\left[ \frac{1}{0.4432 \left( \frac{1}{E} - 1 \right)} \right]^2 F} \quad (5.13)$$

όπου:

V: ο όγκος του πληρωτικού υλικού του φίλτρου (m<sup>3</sup>)

Ακολουθεί ο υπολογισμός της οργανικής φόρτισης του φίλτρου, που εξαρτάται άμεσα από τον όγκο του πληρωτικού υλικού και πρέπει να κυμαίνεται μέσα σε ένα καθορισμένο εύρος τιμών, προκειμένου να είναι αποδοτική η διεργασία:

$$OrgLo_{TF} = \frac{W}{V} \quad (5.14)$$

όπου:

OrgLo<sub>TF</sub> : η οργανική φόρτιση του φίλτρου χωρίς την ανακύκλωση, kg BOD/(m<sup>3</sup>\*d)

Από τον όγκο του φίλτρου υπολογίζεται η επιφάνεια του φίλτρου, εφόσον η τιμή του ύψους είναι δοσμένη, μέσω της σχέσης:

$$A = \frac{V}{D} \quad (5.15)$$

όπου:

A: η επιφάνεια (κάθετη διατομή) του φίλτρου, m<sup>2</sup>

D: το ύψος του πληρωτικού υλικού, m

Εν συνεχεία, υπολογίζεται η διάμετρος του φίλτρου:

$$Diam = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (5.16)$$

όπου:

Diam: η διάμετρος του βιολογικού φίλτρου, m

Βάσει της παροχής του αποβλήτου και της διατομής του φίλτρου υπολογίζεται η επιφανειακή φόρτιση, η οποία, όπως και η οργανική φόρτιση, αποτελεί παράμετρο ταξινόμησης της διεργασίας, και καθορίζει τα όρια μέσα στα οποία μπορεί να είναι εφικτή και αποδοτική:

$$q = \frac{Flow}{A} \quad (5.17)$$

όπου:

q: επιφανειακή φόρτιση χωρίς την ανακύκλωση, m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*d)

Flow: παροχή του αποβλήτου στο σύστημα, m<sup>3</sup>/d

Η συνολική επιφανειακή φόρτιση (συμπεριλαμβανομένης και της ανακύκλωσης), υπολογίζεται από την σχέση:

$$qtot = q(1 + R) \quad (5.18)$$

όπου:

qtot: συνολική επιφανειακή φόρτιση με την ανακύκλωση, m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>.d)

R: λόγος αναρροής του αποβλήτου, αδιάστατο μέγεθος

Η συνολική απόδοση της διάταξης, δηλαδή της δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης και του βιολογικού φίλτρου (μαζί με την δευτεροβάθμια δεξαμενή), υπολογίζεται από την σχέση:

$$E_{tot} = E_{PC} + E \cdot (1 - E_{PC}) \quad (5.19)$$

όπου:

E<sub>tot</sub>: Η συνολική απόδοση απομάκρυνσης BOD του συστήματος, 0 < E<sub>tot</sub> < 1

E<sub>PC</sub>: Η απόδοση απομάκρυνσης BOD της πρωτοβάθμιας δεξαμενής καθίζησης, 0 < E<sub>PC</sub> < 1

E: Η απόδοση απομάκρυνσης BOD του βιολογικού φίλτρου (μαζί με την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης), 0 < E < 1

Η παραπάνω σχέση προκύπτει από το γεγονός ότι η συνολική απόδοση του συστήματος ισούται με την απόδοση της πρωτοβάθμιας καθίζησης,

προσθέτοντας σε αυτήν την απόδοση του βιολογικού φίλτρου (και της δευτεροβάθμιας καθίζησης) όσον αφορά στην απομάκρυνση του φορτίου που απομένει στο απόβλητο μετά την πρωτοβάθμια επεξεργασία. Η σχέση (5.19) αποδεικνύεται ως εξής:

Εξ ορισμού ισχύει ότι:

$$E_{tot} = \frac{BOD_{PC} - BOD_{OUT}}{BOD_{PC}} \Leftrightarrow E_{tot} = \frac{BOD_{PC} + BOD_{TF} - BOD_{TF} - BOD_{OUT}}{BOD_{PC}}$$

$$E_{tot} = \frac{BOD_{PC} - BOD_{TF}}{BOD_{PC}} + \frac{BOD_{TF} - BOD_{OUT}}{BOD_{PC}} \cdot \frac{BOD_{TF}}{BOD_{TF}}$$

$$E_{tot} = E_{PC} + E \cdot \frac{BOD_{TF}}{BOD_{PC}} \Leftrightarrow E_{tot} = E_{PC} + E \cdot \frac{BOD_{PC} - BOD_{PC} + BOD_{TF}}{BOD_{PC}}$$

$$E_{tot} = E_{PC} + E \cdot \left( 1 - \frac{BOD_{PC} - BOD_{TF}}{BOD_{PC}} \right) \Leftrightarrow E_{tot} = E_{PC} + E \cdot (1 - E_{PC}) \text{ ο.ε.δ.}$$

όπου:

$BOD_{PC}$  : το BOD του αποβλήτου που τροφοδοτεί το σύστημα (την πρωτοβάθμια δεξαμενή), mg/L (g/m<sup>3</sup>)

$BOD_{TF}$  : το BOD του αποβλήτου που τροφοδοτεί το φίλτρο, mg/L (g/m<sup>3</sup>)

$BOD_{OUT}$  : το BOD του αποβλήτου που εξέρχεται από το σύστημα, mg/L (g/m<sup>3</sup>)

#### 5.2.1.1 Παράμετροι εισόδου – Αποτελέσματα Διάταξης 1

Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν στο λογισμικό συσχετισμού όγκου – λόγου αναρροής βρίσκονται κοντά στις συνήθεις τιμές που χρησιμοποιούνται σε παρόμοιες εφαρμογές. Η ανεξάρτητη τιμή του προβλήματος είναι ο λόγος αναρροής, και η εξαρτημένη μεταβλητή ο όγκος του φίλτρου. Η επαναληπτική διαδικασία πραγματοποιήθηκε για διάφορες τιμές BOD του αποβλήτου που εξέρχεται από το σύστημα και αντίστοιχης απόδοσης του βιολογικού φίλτρου, κρατώντας σταθερή την τιμή του BOD του αποβλήτου που εισέρχεται στο βιολογικό φίλτρο στα 240 mg/L. Το BOD του εισερχόμενου στο σύστημα (στην πρωτοβάθμια δεξαμενή) αποβλήτου υπολογίστηκε σε 369.23 mg/L, μέσω της σχέσης (5.10), εφόσον έχουμε θεωρήσει σταθερή απόδοση της πρωτοβάθμιας δεξαμενής καθίζησης (35%) και μέσω της (5.6) έχουμε εκτιμήσει

τον χρόνο παραμονής σε αυτήν σε 2.1 h. Ο λόγος αναρροής του αποβλήτου από την δευτεροβάθμια δεξαμενή στην είσοδο του βιολογικού φίλτρου μεταβάλλεται από 0 έως 2, με βήμα 0.05. Ο υπολογισμός των παραμέτρων σχεδιασμού της πρωτοβάθμιας δεξαμενής καθίζησης εξαρτάται μόνο από την απόδοσή της (σχέσεις (5.6) έως (5.9)), επομένως σε όλες τις περιπτώσεις η διάμετρος της δεξαμενής και ο χρόνος παραμονής σε αυτήν δεν μεταβάλλονται για τα δεδομένα του προβλήματος. Τα δεδομένα εισόδου του συστήματος και τα αποτελέσματα που αφορούν στην πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης και στο βιολογικό φίλτρο φαίνονται στον Πίνακα 3:

**Πίνακας 3α:** Δεδομένα εισόδου λογισμικού  $V = f(R)$  βάσει της εξίσωσης NRC.

Δεδομένα Εισόδου λογισμικού $V=f(R)$	
Παροχή αποβλήτου ( $m^3/d$ )	8,000
Ύψος φίλτρου (m)	2.4
Θερμοκρασία αποβλήτου ( $^{\circ}C$ )	20
Εύρος επιφανειακής φόρτισης ( $m^3/m^2*d$ ) *	1 – 40
Εύρος οργανικής φόρτισης ( $kg\ BOD/m^3*d$ ) *	0.07 – 2.40

\* Το εύρος τιμών φόρτισης έχει ληφθεί από τον Πίνακα 1 (Metcalf & Eddy, 2003) της Παραγράφου 1.2, αναφέρεται σε φίλτρα με πληρωτικό υλικό από πέτρα χαμηλής έως και υψηλής φόρτισης, και είναι γενικό, δηλαδή ισχύει και όταν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της ανακύκλωσης στις τιμές της φόρτισης και όταν δεν λαμβάνεται. Άλλωστε οι διαφορές στο εύρος τιμών που αναφέρονται σε άλλες πηγές (WEF, 2003 και WEF, 1998), και όπου διαχωρίζονται οι περιπτώσεις (συνυπολογίζοντας ή όχι την ανακύκλωση) είναι μικρές (βλέπε Πίνακα 1).

**Πίνακας 3β:** Αποτελέσματα υπολογισμού πρωτοβάθμιας δεξαμενής καθίζησης για τα δεδομένα εισόδου του λογισμικού  $V=f(R)$

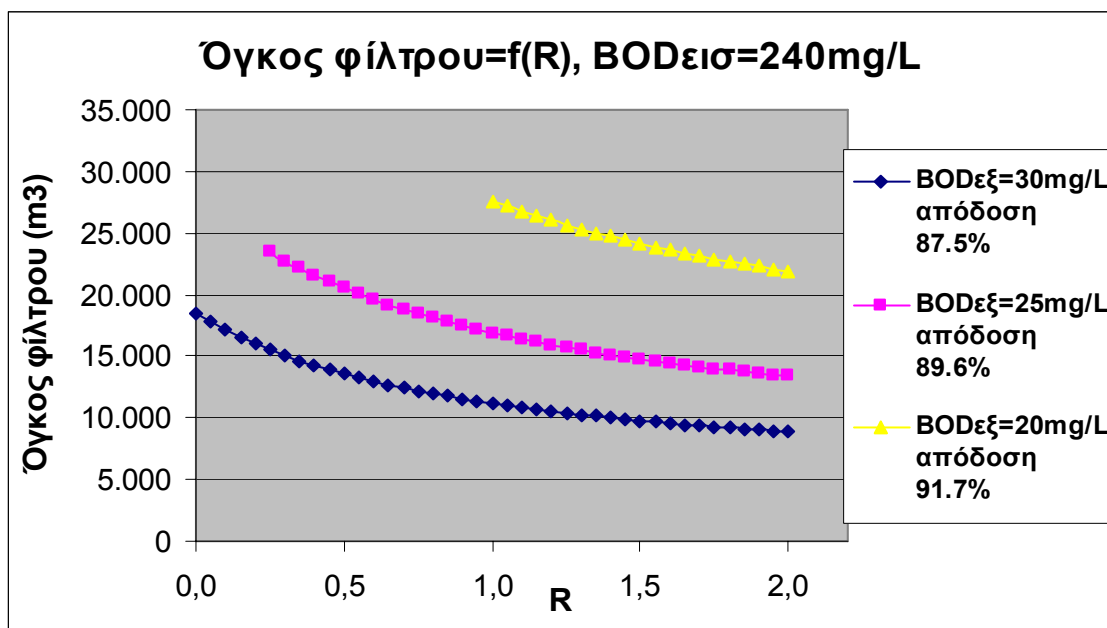
Υπολογισμός πρωτοβάθμιας δεξαμενής καθίζησης (μία πρωτοβάθμια δεξαμενή)	
Διάμετρος (m)	19.27
Χρόνος παραμονής (h)	2.1
Απόδοση πρωτοβάθμιας δεξαμενής ( $E_{PC}$ )	0.35

**Πίνακας 3γ:** Παράμετροι εισόδου – εξόδου του βιολογικού φίλτρου για το λογισμικό V=f(R)

<b>BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο (mg/L)</b>	240		
<b>BOD εξόδου από το σύστημα (mg/L)</b>	30	25	20
<b>Απόδοση βιολογικού φίλτρου (%)</b>	87.5	89.6	91.7

Βάσει του Πίνακα 1, για να είναι αποδεκτή η προσομοίωση της διεργασίας επεξεργασίας αστικού αποβλήτου, πρέπει η φόρτιση του φίλτρου να βρίσκεται μέσα σε ένα ορισμένο εύρος τιμών, έτσι ώστε να γίνεται αποτελεσματική διαβροχή του βιολογικού στρώματος χωρίς αυτό να παρασύρεται. Η ολική επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου πρέπει να είναι μεταξύ 1 και 40  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , και η οργανική φόρτιση μεταξύ 0.07 και 2.4  $\text{kg BOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  (για τον καθορισμό του εύρους τιμών φόρτισης ισχύει η υποσημείωση του Πίνακα 3α). Για το λόγο αυτό, ένα ορισμένο τμήμα των αποτελεσμάτων απορρίπτεται, όταν οι αντίστοιχες τιμές οργανικής και ολικής επιφανειακής φόρτισης βρίσκονται έξω από τα αναφερθέντα όρια. Αυτό φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα, στα οποία οι καμπύλες δεν καλύπτουν όλο το εύρος τιμών του λόγου αναρροής, αλλά μπορεί να διακόπτονται.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τον υπολογισμό του όγκου του πληρωτικού υλικού από την εφαρμογή του λογισμικού με τα παραπάνω δεδομένα εισόδου και για σταθερό BOD του εισερχόμενου αποβλήτου φαίνονται στο Σχήμα 5.3:



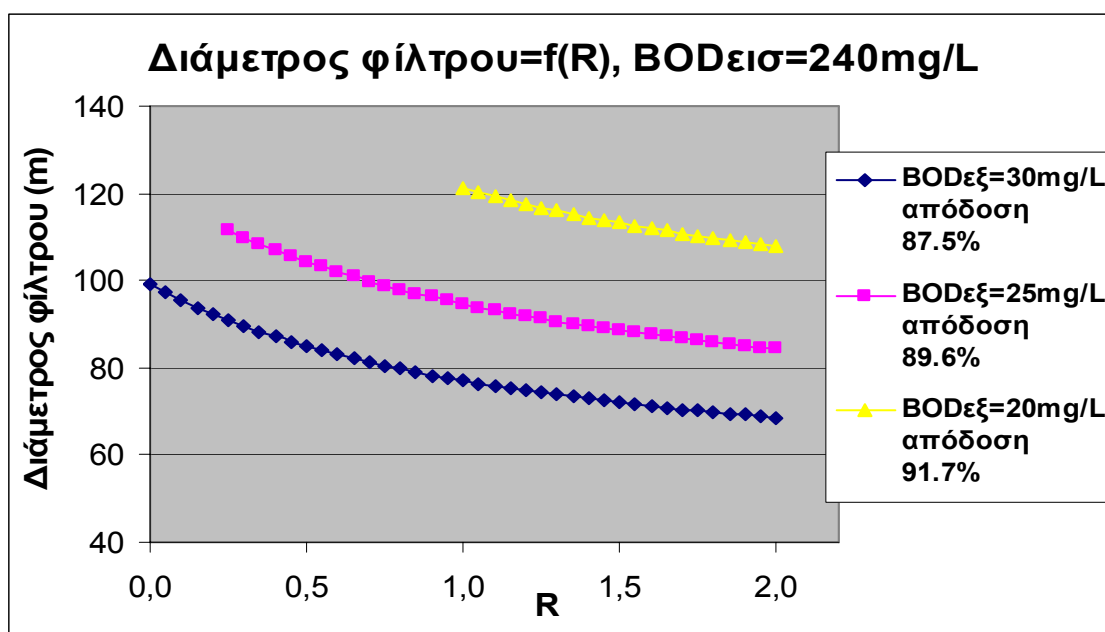
**Σχήμα 5.3:** Μεταβολή συνολικού όγκου βιολογικών φίλτρων συναρτήσει του λόγου αναρροής του αποβλήτου για σταθερό BOD εισόδου στο φίλτρο.

Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 5.3, με την αύξηση του λόγου αναρροής του αποβλήτου μειώνεται ο συνολικός όγκος του φίλτρου που απαιτείται για την επίτευξη συγκεκριμένης απόδοσης. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η ανακύκλωση αυξάνει πρακτικά την παροχή του αποβλήτου στο φίλτρο, οπότε αυξάνεται η επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου, δηλαδή η απόδοση διαβροχής. Αυτό επιτρέπει την διατήρηση της υγρασίας του βιολογικού υμένα σε σταθερά επίπεδα, οπότε ευνοείται η ανάπτυξη των βακτηριδίων, άρα και η ταχύτερη κατανάλωση του οργανικού υποστρώματος από αυτά. Επίσης, η ανακύκλωση μέρους του αποβλήτου εξισορροπεί το οργανικό φορτίο του εισερχόμενου αποβλήτου, μειώνοντας το BOD στις χρονικές περιόδους που το απόβλητο είναι πιο ισχυρό, και αυξάνοντας το BOD όταν το απόβλητο είναι πιο αδύνατο. Αυτό εξομαλύνει το ρυθμό επεξεργασίας του αποβλήτου, αυξάνοντας την συνολική απόδοση για δεδομένο όγκο πληρωτικού υλικού, ή αλλιώς μειώνοντας τον απαιτούμενο όγκο για δεδομένη απόδοση.

Για δεδομένη τιμή του λόγου αναρροής, ο απαιτούμενος όγκος του πληρωτικού υλικού αυξάνεται όσο μειώνεται το απαιτούμενο BOD του αποβλήτου που εξέρχεται από το σύστημα, δηλαδή με την αύξηση της απόδοσης απομάκρυνσης BOD, και μάλιστα με αυξανόμενο ρυθμό όσο η τιμή της απόδοσης πλησιάζει στην μονάδα. Αυτό φαίνεται από την εξίσωση (5.13), της οποίας ο παρονομαστής πλησιάζει στο μηδέν όσο η απόδοση προσεγγίζει

την μονάδα, και εκφράζει το γεγονός ότι για να επιτύχουμε πολύ υψηλές αποδόσεις επεξεργασίας ενός αποβλήτου, πρέπει να αυξήσουμε δυσανάλογα τον όγκο του φίλτρου.

Η μείωση του όγκου με την αύξηση του λόγου αναρροής του αποβλήτου, εφόσον το ύψος του πύργου θεωρείται σταθερό, μειώνει αντίστοιχα και την απαιτούμενη διάμετρο του βιολογικού φίλτρου, βάσει των σχέσεων (5.15) και (5.16). Επίσης, η αύξηση του όγκου του πληρωτικού υλικού σε πολύ μεγάλες τιμές της απόδοσης αντικατοπτρίζεται και στην διάμετρο του φίλτρου, που όμως παρουσιάζει δυσανάλογη αύξηση. Η μείωση της διαμέτρου συναρτήσει του λόγου αναρροής απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4:



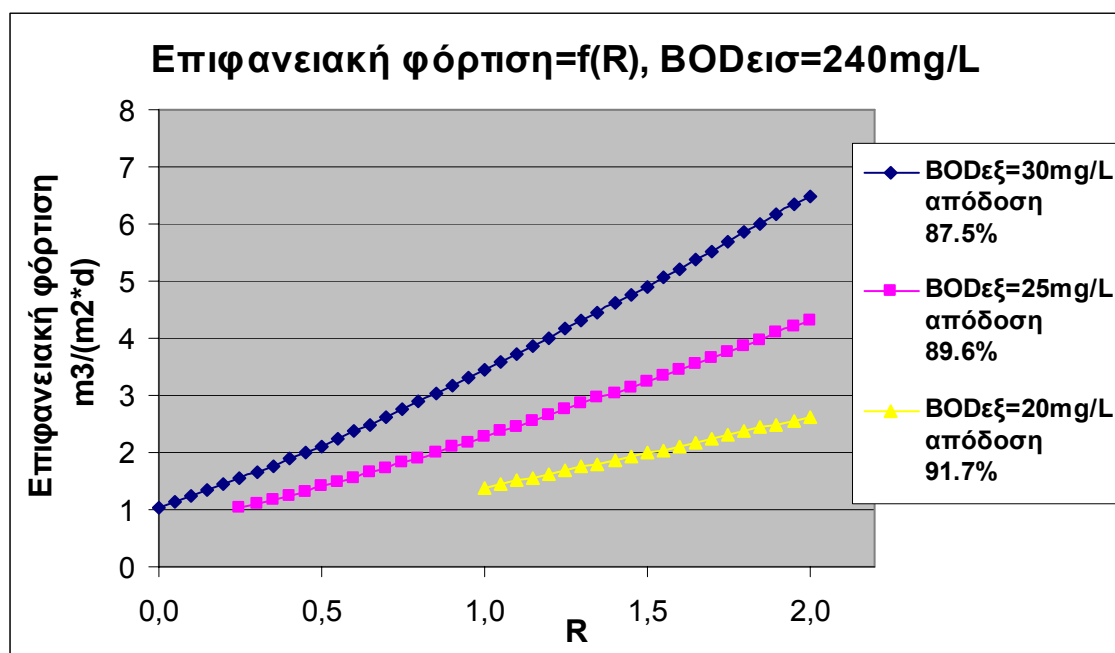
**Σχήμα 5.4:** Μεταβολή διαμέτρου των βιολογικών φίλτρων συναρτήσει του λόγου αναρροής του αποβλήτου για σταθερό BOD εισόδου στο φίλτρο.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, βάσει των βιβλιογραφικών δεδομένων του Πίνακα 1, για την σωστή λειτουργία ενός βιολογικού φίλτρου, πρέπει η οργανική φόρτιση και η επιφανειακή φόρτιση να βρίσκονται μέσα σε ένα ορισμένο εύρος τιμών. Συνδυάζοντας ενός σχέσεις (5.12), (5.13), (5.15), (5.17) και (5.18) προκύπτει:

$$q_{tot} = \frac{D \cdot \left[ \frac{1}{0.4432 \left( \frac{1}{E_1} - 1 \right)} \right]^2 F}{10^{-3} \cdot BOD_{TF}} \cdot (1 + R) \quad (5.20)$$



Επομένως, η ολική επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου, σύμφωνα με την εξίσωση NRC, είναι ανάλογη του ύψους του πληρωτικού υλικού, ανάλογη του λόγου αναρροής  $R$ , και αντιστρόφως ανάλογη της απόδοσης και του BOD του αποβλήτου. Σκοπός όμως εδώ είναι να μειώσουμε την επιφανειακή φόρτιση, γιατί η αύξησή της πάνω από το ανώτερο όριο των  $40 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$  που αντιστοιχεί σε φίλτρο μεγάλης φόρτισης, δεν επιτρέπει την ανάπτυξη του βιολογικού υμένα και την ομαλή λειτουργία του φίλτρου. Επειδή θεωρήσαμε το ύψος ως παράμετρο, για την μείωση της επιφανειακής φόρτισης μπορούμε να μειώσουμε τον λόγο αναρροής, ή να αυξήσουμε την απόδοση ή το BOD του αποβλήτου που εισέρχεται στο φίλτρο, και κατ' επέκταση στο σύστημα. Παρατηρούμε ότι για απόβλητο με BOD  $240 \text{ mg/L}$  κατά την είσοδο στο φίλτρο, που αντιστοιχεί σε BOD  $369.23 \text{ mg/L}$  κατά την είσοδο στην πρωτοβάθμια δεξαμενή, ο ελάχιστος λόγος αναρροής για να προσεγγίζεται το κατώτερο όριο επιφανειακής φόρτισης είναι 0.25 για απόδοση 89.6%, και 0.65 για απόδοση 91.7%. Στην περίπτωση αυτή, η καμπύλη ξεκινά από  $R=1$  λόγω του περιορισμού και της οργανικής φόρτισης. Η μεταβολή της ολικής επιφανειακής φόρτισης συναρτηθεί του λόγου αναρροής εικονίζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 5.5.



**Σχήμα 5.5:** Μεταβολή της ολικής επιφανειακής φόρτισης συναρτηθεί του λόγου αναρροής του αποβλήτου.

Η μείωση της επιφανειακής φόρτισης με αύξηση της απόδοσης του βιολογικού φίλτρου και της τιμής BOD του εισερχόμενου αποβλήτου, εξηγείται από το ότι απαιτείται μεγαλύτερος όγκος πληρωτικού υλικού, επομένως μεγαλύτερη επιφάνεια του φίλτρου, οπότε για δεδομένη παροχή αποβλήτου μειώνεται η επιφανειακή φόρτιση. Επίσης, με την μείωση του λόγου αναρροής μειώνεται και η ολική επιφανειακή φόρτιση, η οποία άλλωστε μας ενδιαφέρει, βάσει της σχέσης (5.18).

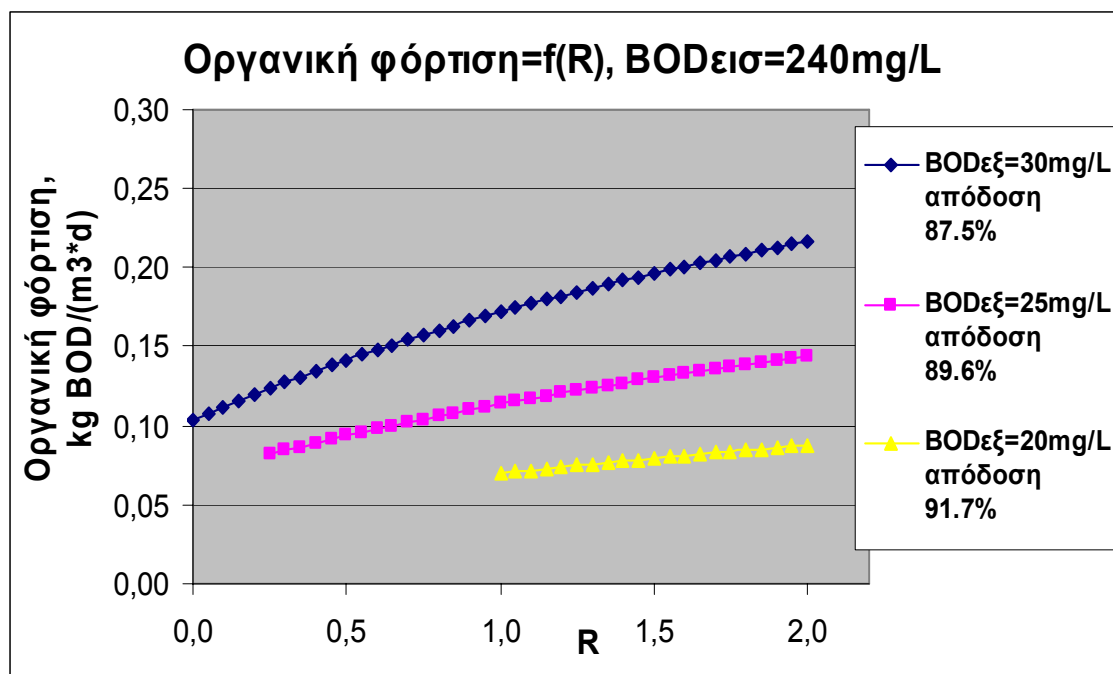
Αντίστοιχα συμπεράσματα ισχύουν και για την οργανική φόρτιση του φίλτρου, που πρέπει επίσης να βρίσκεται μέσα σε ορισμένο εύρος τιμών βάσει του Πίνακα 1, δηλαδή από 0.07 έως 2.4 kg BOD/m<sup>3</sup>\*d, για φόρτιση που αντιστοιχεί σε φίλτρα χαμηλής, μέσης και μεγάλης φόρτισης. Συνδυάζοντας τις σχέσεις (5.13) και (5.14) προκύπτουν τα εξής:

$$OrgLo_{TF} = \left[ \frac{1}{0.4432 \left( \frac{1}{E_1} - 1 \right)} \right]^2 F \quad (5.21)$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει βάσει της εξίσωσης NRC στην οποία δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της ανακύκλωσης στο BOD εισόδου του αποβλήτου στο φίλτρο, εφόσον υπάρχει ο παράγοντας ανακύκλωσης  $F$  μέσα στην εξίσωση. Επομένως ούτε η υπολογιζόμενη οργανική φόρτιση επηρεάζεται από την ανακύκλωση. Τα όρια οργανικής φόρτισης που χρησιμοποιούμε και αναφέρονται στον Πίνακα 1 είναι γενικά όπως αναφέραμε, και ισχύουν συνυπολογιζόμενης ή όχι της ανακύκλωσης (Metcalf & Eddy, 2003).

Επομένως για την μείωση της οργανικής φόρτισης του φίλτρου μπορούμε να μειώσουμε την τιμή του λόγου αναρροής, ή να αυξήσουμε την απόδοση. Πράγματι, μειώνοντας την τιμή του λόγου αναρροής, αυξάνεται ο απαιτούμενος όγκος πληρωτικού υλικού, οπότε μειώνεται η οργανική φόρτιση, βάσει της σχέσης (5.14). Επίσης, αυξάνοντας την απόδοση, αυξάνουμε τον απαιτούμενο όγκο του φίλτρου, οπότε ομοίως μειώνεται η οργανική φόρτιση. Για τα δεδομένα του Πίνακα 3, η ελάχιστη επιτρεπτή τιμή του λόγου αναρροής είναι 0.05 για απόδοση 89.6%, αυξάνεται όμως στην τιμή 0.25 λόγω του περιορισμού της επιφανειακής φόρτισης, ενώ για απόδοση 91.7% είναι 1.00. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η απόδοση του βιολογικού φίλτρου, τόσο μικρότερη επίδραση έχει ο λόγος αναρροής στην αύξηση της οργανικής φόρτισης. Πράγματι, από την σχέση (5.21), βλέπουμε ότι με την αύξηση της

απόδοσης ο όρος  $(1/E_1 - 1)$  προσεγγίζει το μηδέν, με αποτέλεσμα ο συντελεστής λόγου αναρροής  $F$  να ασκεί μικρότερη επίδραση. Η μεταβολή της οργανικής φόρτισης συναρτήσει του λόγου αναρροής για τα δεδομένα του Πίνακα 3, φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 5.6:



**Σχήμα 5.6:** Μεταβολή της οργανικής φόρτισης συναρτήσει του λόγου αναρροής του αποβλήτου, για BOD εισερχόμενου στο φίλτρο αποβλήτου 240 mg/L.

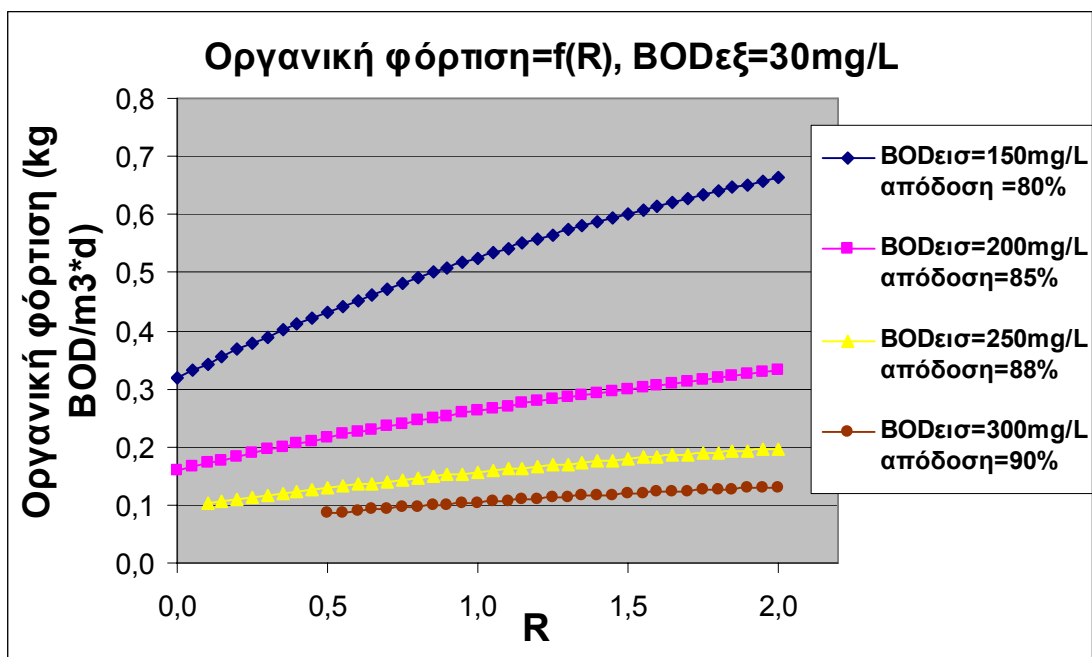
Στην συνέχεια η επαναληπτική διαδικασία πραγματοποιείται για σταθερό BOD εξόδου του αποβλήτου από το σύστημα στην τιμή 30mg/L, ενώ το BOD του εισερχόμενου στο βιολογικό φίλτρο αποβλήτου λαμβάνει διαδοχικά τις τιμές 150, 200, 250 και 300mg/L. Οι υπόλοιπες παράμετροι εισόδου του προβλήματος είναι αυτές που αναφέρονται στους Πίνακες 3α και 3β. Από τις σχέσεις (5.10) και (5.11) υπολογίζονται οι εκάστοτε τιμές απόδοσης του φίλτρου και του BOD εισόδου στο σύστημα, και καταγράφονται στον Πίνακα 4:

**Πίνακας 4:** BOD αστικού αποβλήτου και τιμές απόδοσης βιολογικού φίλτρου

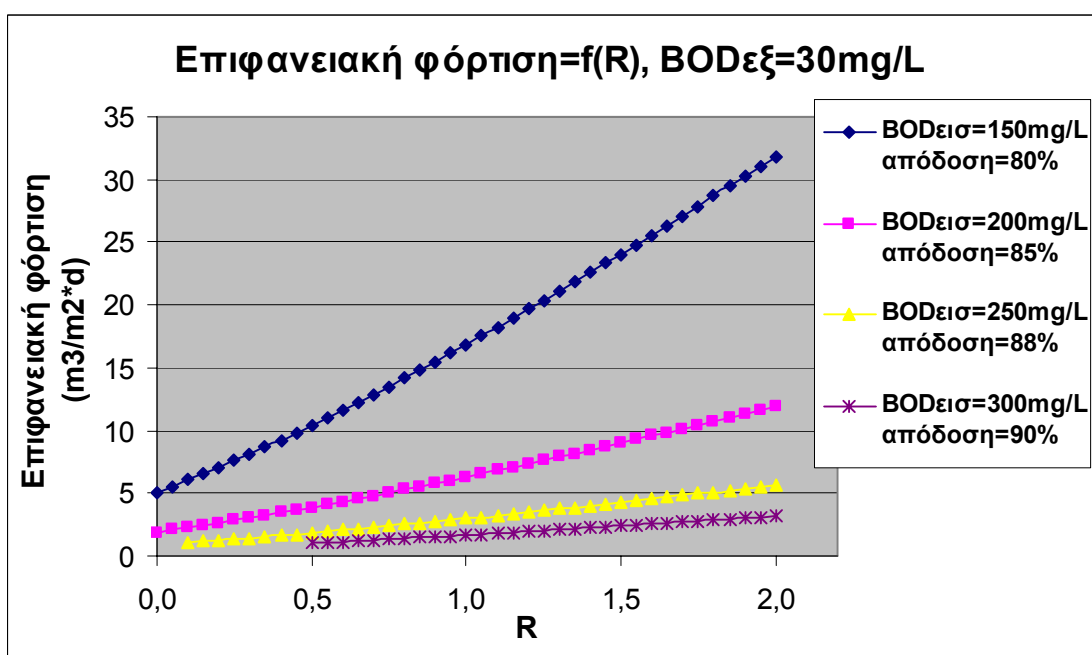
<b>Απόδοση πρωτοβάθμιας δεξαμενής καθίζησης = 0.35 (35%), BOD εξερχόμενου από το σύστημα αποβλήτου = 30mg/L</b>				
<b>BOD αποβλήτου εισερχόμενου στο βιολογικό φίλτρο (mg/L)</b>	150	200	250	300
<b>BOD αποβλήτου εισερχόμενου στο σύστημα (mg/L)</b>	230.8	307.7	384.6	461.5
<b>Απόδοση βιολογικού φίλτρου (%)</b>	80	85	88	90

Και σε αυτή την περίπτωση πρέπει η οργανική φόρτιση και η επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου να βρίσκονται μέσα στα επιτρεπόμενα όρια, τα οποία αναφέρονται στον Πίνακα 1. Από την σχέση (5.21) προκύπτει ότι η οργανική φόρτιση δεν εξαρτάται από το BOD του εισερχόμενου αποβλήτου, αλλά από την απόδοση και τον λόγο αναρροής. Όσο αυξάνεται η τιμή του BOD εισόδου του αποβλήτου στο φίλτρο, θεωρώντας σταθερή την τιμή εξόδου, αυξάνεται η απόδοση του φίλτρου και επομένως η οργανική του φόρτιση μειώνεται. Παρατηρούμε ότι για τιμές της απόδοσης μεγαλύτερες του 85%, ο λόγος αναρροής πρέπει να έχει μια ελάχιστη τιμή προκειμένου η μεταβολή της οργανικής φόρτισης να είναι μέσα στα αποδεκτά όρια. Οι καμπύλες μεταβολής της οργανικής φόρτισης συναρτήσει του R εικονίζονται στο Σχήμα 5.7.

Επίσης, όπως αναφέραμε παραπάνω και βάσει της σχέσης (5.20), η επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου μειώνεται με την αύξηση του BOD, και αυξάνεται με την αύξηση του λόγου αναρροής. Παρατηρούμε όμως ότι για απόδοση μεγαλύτερη του 85% απαιτείται μια ελάχιστη τιμή του λόγου αναρροής έτσι ώστε η ολική επιφανειακή φόρτιση να είναι μεγαλύτερη ή ίση από το κατώτερο όριο ( $1\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ ). Η μεταβολή της επιφανειακής φόρτισης εικονίζεται στο Σχήμα 5.8.

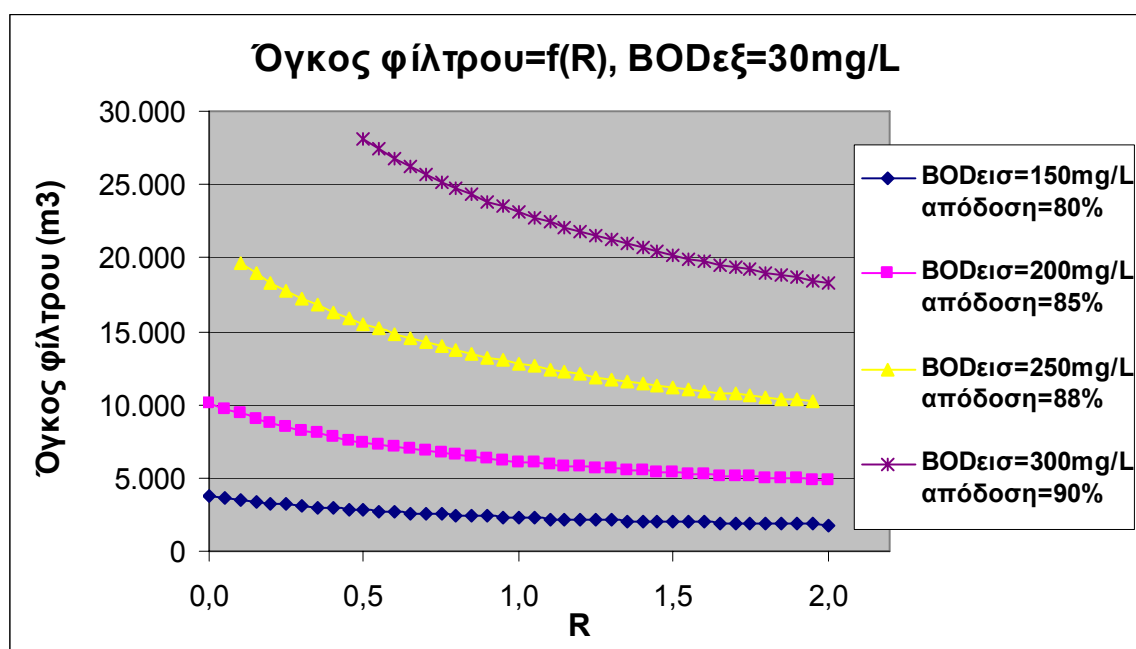


**Σχήμα 5.7:** Μεταβολή της οργανικής φόρτισης του φίλτρου συναρτήσει του λόγου αναρροής του αποβλήτου, για σταθερή τιμή BOD εξόδου από το φίλτρο.

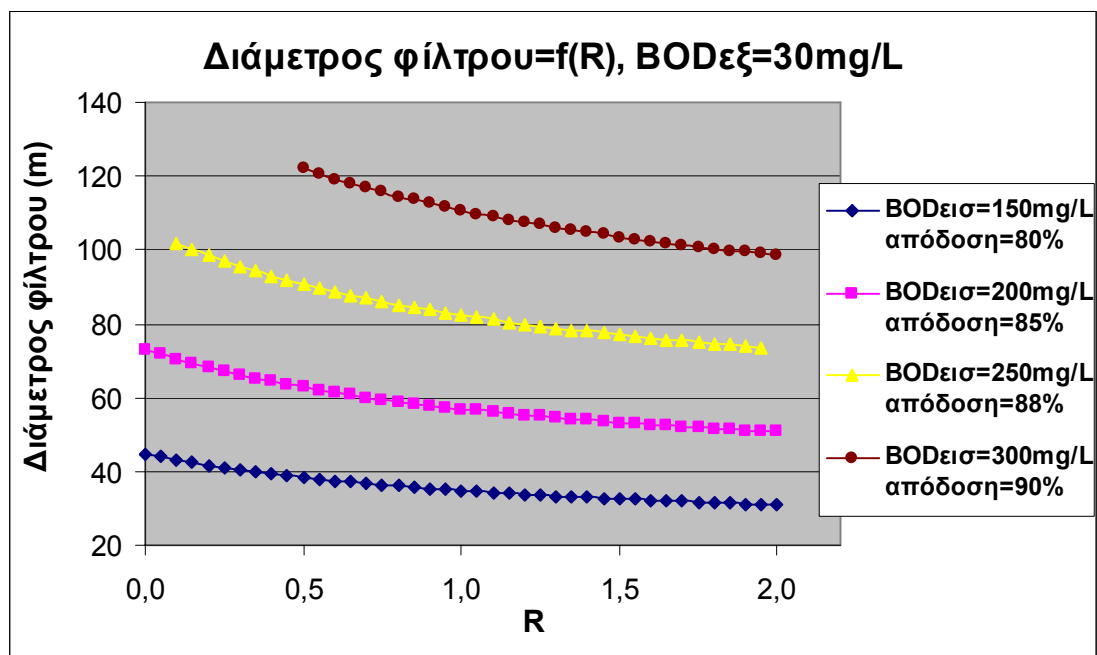


**Σχήμα 5.8:** Μεταβολή της ολικής επιφανειακής φόρτισης του φίλτρου συναρτήσει του λόγου αναρροής του αποβλήτου, για σταθερή τιμή BOD εξόδου από το φίλτρο.

Η μεταβολή του όγκου του πληρωτικού υλικού συναρτίζεται του λόγου αναρροής και αντίστοιχα της διαμέτρου του βιολογικού φίλτρου, φαίνεται στα Σχήματα 5.9 και 5.10. Η διάμετρος του φίλτρου μεταβάλλεται ανάλογα με τον όγκο, βάσει των σχέσεων (5.15) και (5.16). Παρατηρούμε μείωση του όγκου του πληρωτικού υλικού με την αύξηση του λόγου αναρροής, που γίνεται λιγότερο έντονη όσο περισσότερο αυξάνεται ο λόγος αναρροής. Πράγματι, η απεριόριστη αύξηση της ανακύκλωσης, δεν μειώνει τόσο αισθητά τον όγκο του πληρωτικού υλικού και την διάμετρο, έχει όμως τον κίνδυνο υπέρβασης των μέγιστων ορίων οργανικής και επιφανειακής φόρτισης. Η αύξηση της απόδοσης σε τιμές μεγαλύτερες του 85% αυξάνει υπερβολικά τον απαιτούμενο όγκο του πληρωτικού υλικού και αντίστοιχα την διάμετρο του φίλτρου, με αποτέλεσμα το σύστημα να γίνεται οικονομικά και τεχνικά ασύμφορο. Πράγματι, για  $R=1$ , ο όγκος του φίλτρου που απαιτείται για απόδοση 90% είναι περίπου τετραπλάσιος από αυτόν που απαιτείται για απόδοση 85%.



**Σχήμα 5.9:** Μεταβολή του όγκου του πληρωτικού υλικού συναρτίζεται του λόγου αναρροής του αποβλήτου, για σταθερή τιμή BOD εξόδου από το φίλτρο.



**Σχήμα 5.10:** Μεταβολή της διαμέτρου του βιολογικού φίλτρου συναρτήσει του λόγου αναρροής του αποβλήτου, για σταθερή τιμή BOD εξόδου από το φίλτρο.

### 5.2.2 Διάταξη 2

Κατασκευάστηκε λογισμικό προσομοίωσης της επεξεργασίας αστικών αποβλήτων με σύστημα δύο βιολογικών φίλτρων σύμφωνα με την διάταξη του Σχήματος 5.2 και βάσει της εξίσωσης NRC. Επομένως, το σύστημα αποτελείται από μία πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης και δύο βιολογικά φίλτρα, καθένα από τα οποία ακολουθείται από την αντίστοιχη δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης. Το απόβλητο που εξέρχεται από καθεμία από τις δευτεροβάθμιες δεξαμενές, ανακυκλώνεται σε ένα ποσοστό στο αντίστοιχο βιολογικό φίλτρο.

Στην προκειμένη περίπτωση, ως παράμετροι εισόδου θεωρούνται το BOD εισόδου στο πρώτο βιολογικό φίλτρο και το BOD εξόδου από το σύστημα, ο λόγος αναρροής του αποβλήτου που λαμβάνεται ίσος και για τα δύο φίλτρα, το βάθος του πληρωτικού υλικού, η παροχή του αποβλήτου και η απόδοση απομάκρυνσης της πρωτοβάθμιας δεξαμενής καθίζησης. Ανάλογα με την τιμή του BOD εισόδου στο πρώτο φίλτρο υπολογίζεται από την σχέση (5.10) η τιμή του BOD εισόδου στο σύστημα, ενώ από την τιμή του BOD εξόδου από το σύστημα υπολογίζεται μέσω της παρακάτω σχέσης η συνολική απόδοση των δύο βιολογικών φίλτρων, χωρίς να υπολογίζεται η πρωτοβάθμια καθίζηση.

$$E = \frac{BOD_{TF,1} - BOD_{OUT}}{BOD_{TF,1}} \quad (5.22)$$

όπου:

$BOD_{TF,1}$ : το BOD του αποβλήτου που τροφοδοτεί το πρώτο φίλτρο, χωρίς την ανακύκλωση, mg/L (g/m<sup>3</sup>)

$BOD_{PC}$  : το BOD του αποβλήτου που τροφοδοτεί το σύστημα, mg/L (g/m<sup>3</sup>)

$BOD_{OUT}$  : το BOD του αποβλήτου που εξέρχεται από το σύστημα, mg/L (g/m<sup>3</sup>)

E: η συνολική απόδοση των δύο βιολογικών φίλτρων (με τις δευτεροβάθμιες δεξαμενές καθίζησης),  $0 < E < 1$

$E_{PC}$  : Η απόδοση απομάκρυνσης BOD στην πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης,  $0 < E_{PC} < 1$

Οι μεταβλητές που αφορούν στην πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης υπολογίζονται όπως και στην παράγραφο 5.3.1, στην διάταξη με ένα βιολογικό φίλτρο. Από την απόδοση της δεξαμενής και την σχέση (5.6) υπολογίζεται ο χρόνος παραμονής του αποβλήτου σε αυτήν, ενώ από τις σχέσεις (5.7), (5.8) και (5.9) υπολογίζονται αντίστοιχα ο όγκος, η διατομή και η διάμετρος της δεξαμενής.

Το φορτίο BOD του πρώτου φίλτρου (kg/d), υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$W_1 = 10^{-3} \cdot BOD_{TF,1} \cdot Flow \quad (5.23)$$

όπου:

$W_1$  : το οργανικό φορτίο (BOD) του πρώτου φίλτρου, kg/d

$BOD_{TF}$  : το BOD του αποβλήτου που τροφοδοτεί το πρώτο φίλτρο χωρίς την ανακύκλωση, mg/L (g/m<sup>3</sup>)

Flow : η παροχή του αποβλήτου στο σύστημα, m<sup>3</sup>/d

Στην συνέχεια μέσω επαναληπτικής διαδικασίας αυξάνεται σταδιακά η τιμή της απόδοσης του πρώτου φίλτρου, ξεκινώντας από την τιμή μηδέν μέχρι την ολική απόδοση των δύο φίλτρων. Η απόδοση κάθε βιολογικού φίλτρου ξεχωριστά υπολογίζεται από τις επόμενες σχέσεις:

$$E_1 = \frac{BOD_{TF,1} - BOD_{TF,2}}{BOD_{TF,1}} \quad (5.24a)$$



$$E_2 = \frac{BOD_{TF,2} - BOD_{OUT}}{BOD_{TF,2}} \quad (5.24\beta)$$

όπου:

$E_{1,2}$ : οι αποδόσεις του πρώτου και του δεύτερου βιολογικού φίλτρου αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψη και την δευτεροβάθμια καθίζηση,  $0 < E_{1,2} < 1$

$BOD_{TF,1}$ : το BOD του αποβλήτου που τροφοδοτεί το πρώτο φίλτρο, χωρίς την ανακύκλωση, mg/L (g/m<sup>3</sup>)

$BOD_{TF,2}$ : το BOD του αποβλήτου που τροφοδοτεί το δεύτερο βιολογικό φίλτρο, και ταυτίζεται με το BOD του αποβλήτου που εξέρχεται από το πρώτο φίλτρο (μαζί με την δευτεροβάθμια δεξαμενή), mg/L (g/m<sup>3</sup>)

$BOD_{OUT}$ : το BOD του αποβλήτου που εξέρχεται από το σύστημα, mg/L (g/m<sup>3</sup>)

Η απόδοση  $E$  είναι η συνολική απόδοση και των δύο βιολογικών φίλτρων (συμπεριλαμβανομένων και των αντίστοιχων δευτεροβάθμιων δεξαμενών) και υπολογίζεται ως εξής:

$$E = E_1 + E_2 \cdot (1 - E_1) \quad (5.25)$$

$E$ : Η απόδοση απομάκρυνσης BOD των βιολογικών φίλτρων (μαζί με τις δευτεροβάθμιες δεξαμενές καθίζησης),  $0 < E < 1$

Η σχέση (5.25) βασίζεται, όπως και η σχέση (5.19), στην λογική ότι η συνολική απόδοση των φίλτρων ισούται με την απόδοση του πρώτου φίλτρου συν την απόδοση του δεύτερου επί του υπολοίπου BOD του αποβλήτου μετά την έξοδό του από το πρώτο φίλτρο (συμπεριλαμβάνονται πάντα και οι δευτεροβάθμιες δεξαμενές). Η σχέση έχει προκύψει με αντίστοιχο τρόπο με την σχέση (5.19).

Η απόδοση του δεύτερου φίλτρου υπολογίζεται μέσω της σχέσης (5.25), που επιλύεται ως εξής:

$$E_2 = \frac{E - E_1}{1 - E_1} \quad (5.26)$$

Για κάθε ζεύγος τιμών απόδοσης  $E_1, E_2$  υπολογίζονται ο όγκος, η διατομή και η διάμετρος του πρώτου φίλτρου από τις παρακάτω σχέσεις:

$$V_1 = \frac{W_1}{\left[ \frac{1}{0.4432} \cdot \left( \frac{1}{E_1} - 1 \right) \right]^2 F} \quad (5.27)$$

$$A_1 = \frac{V_1}{D} \quad (5.28)$$

$$Diam1 = \sqrt{\frac{4 \cdot A_1}{\pi}} \quad (5.29)$$

όπου:

$V_1, A_1, Diam1$ : ο όγκος ( $m^3$ ), η διατομή ( $m^2$ ), και η διάμετρος ( $m$ ) του πρώτου βιολογικού φίλτρου

$D$ : το βάθος του πληρωτικού υλικού,  $m$

Επίσης, εκτιμάται το φορτίο BOD του δεύτερου φίλτρου μέσω της σχέσης:

$$W_2 = W_1 \cdot (1 - E_1) \quad (5.30)$$

όπου:

$W_1, W_2$  : το φορτίο BOD του πρώτου και του δεύτερου φίλτρου αντίστοιχα,  $kg/d$ :

Από την επίλυση της σχέσης NRC για δύο φίλτρα (5.2), υπολογίζεται για κάθε ζεύγος τιμών απόδοσης ο όγκος του δεύτερου φίλτρου:

$$V_2 = \frac{W_2}{\left[ \frac{1 - E_1}{0.4432} \left( \frac{1}{E_2} - 1 \right) \right]^2 F} \quad (5.31)$$

Αντικαθιστώντας το  $E_2$  από την (5.26) προκύπτει:

$$V_2 = \frac{W_2}{\left[ \frac{1 - E_1}{0.4432} \cdot \left( \frac{1 - E}{E - E_1} \right) \right]^2} F \quad (5.32)$$

Έτσι, εκτιμάται το  $V_2$  ως συνάρτηση της απόδοσης μόνο του πρώτου φίλτρου και της ολικής. Η διατομή και η διάμετρος του δεύτερου φίλτρου υπολογίζονται από τις σχέσεις (5.28), (5.29), θέτοντας στις αντίστοιχες μεταβλητές τις τιμές που αναφέρονται στο δεύτερο φίλτρο. Ο συνολικός όγκος είναι το άθροισμα των δύο επιμέρους όγκων. Άλλωστε ο στόχος του λογισμικού είναι η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων εισόδου που ελαχιστοποιούν το συνολικό όγκο των δύο φίλτρων.

$$V = V_1 + V_2 \quad (5.33)$$

V: ο συνολικός όγκος των δύο φίλτρων ( $m^3$ )

Θέτοντας στην σχέση (5.17) τις τιμές της διατομής κάθε φίλτρου υπολογίζουμε την οργανική φόρτιση για καθένα από αυτά, και από την (5.18) την ολική επιφανειακή φόρτιση κάθε φίλτρου, ώστε να ελέγχεται κάθε φορά αν το σύστημα βρίσκεται μέσα στο αποδεκτό εύρος τιμών, όπως αναφέρεται στον Πίνακα 1. Τέλος, από την σχέση (5.14) υπολογίζεται η οργανική φόρτιση του πρώτου και του δεύτερου φίλτρου, θέτοντας σε αυτήν τις τιμές του φορτίου BOD ( $W_{1,2}$ ) και του όγκου του πρώτου και του δεύτερου φίλτρου αντίστοιχα. Έτσι ελέγχεται και πάλι αν τηρούνται τα όρια οργανικής φόρτισης που αναφέρονται στον Πίνακα 1.

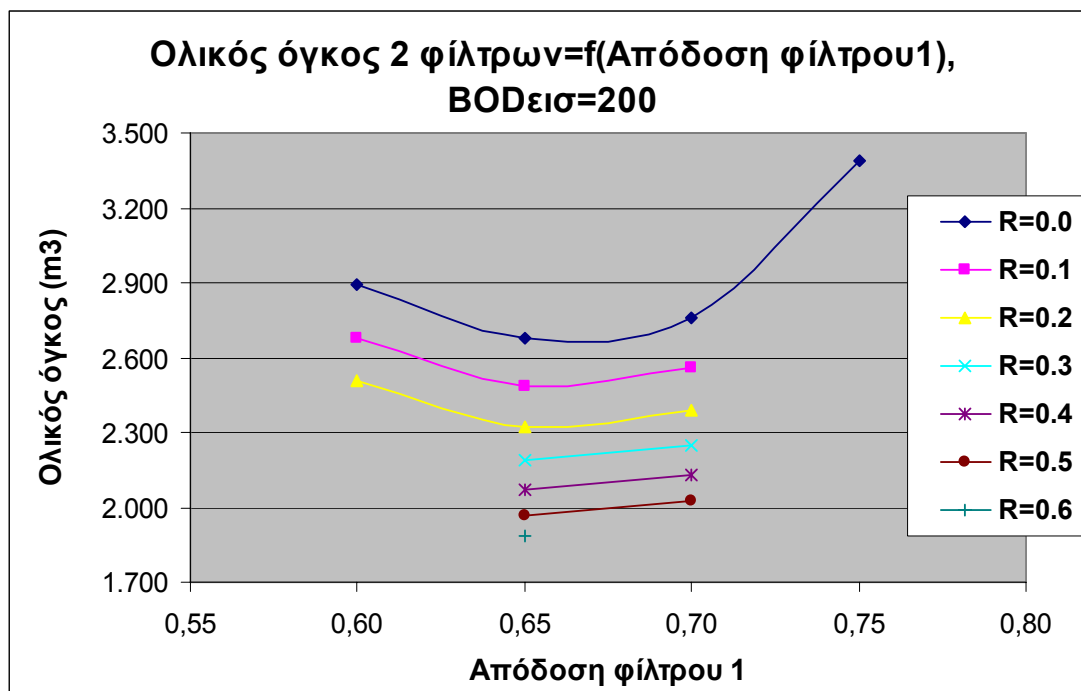
#### 5.2.2.1 Παράμετροι εισόδου – Αποτελέσματα Διάταξης 2

Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση της επεξεργασίας αστικού αποβλήτου με την Διάταξη 2 (Σχήμα 5.2) είναι όμοια με αυτά της Διάταξης 1 και αναφέρονται στους Πίνακες 3α και 3β. Η επιθυμητή συγκέντρωση του εξερχόμενου από το σύστημα αποβλήτου θεωρήθηκε σταθερή στην τιμή  $BOD=30mg/L$ , ενώ εξετάστηκαν διάφορες τιμές BOD του εισερχόμενου στο πρώτο βιολογικό φίλτρο αποβλήτου. Ανάλογα υπολογίστηκε η συνολική απόδοση των δύο βιολογικών φίλτρων (σχέση (5.22)), καθώς και η τιμή BOD του εισερχόμενου στο σύστημα αποβλήτου, βάσει της απόδοσης της

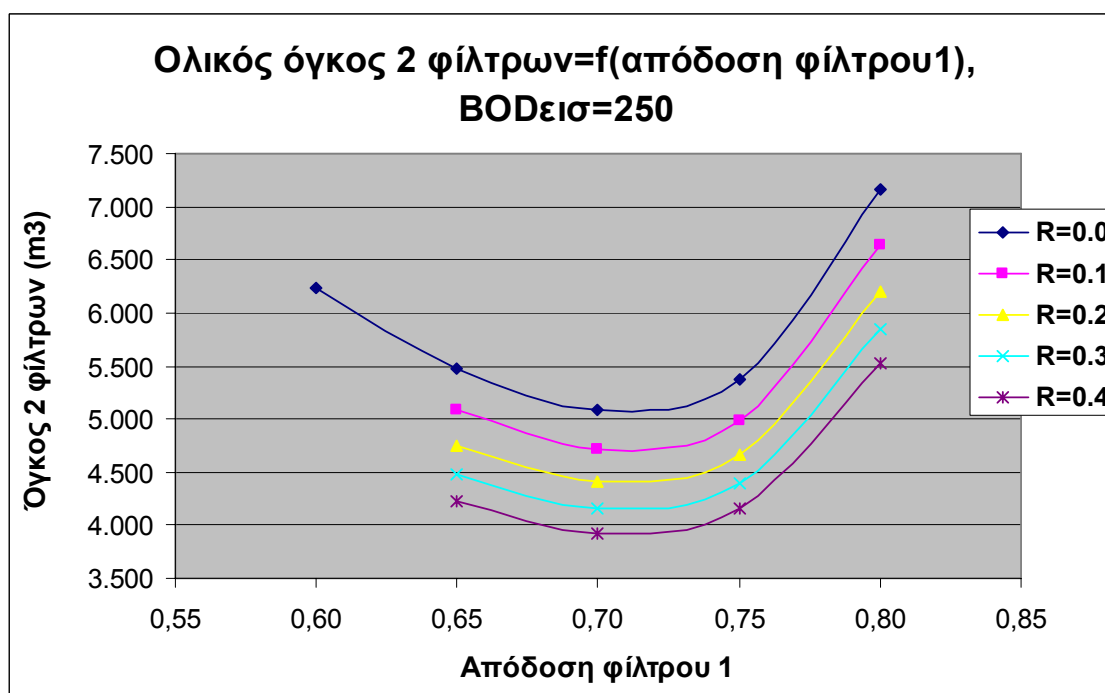
πρωτοβάθμιας δεξαμενής (σχέση (5.10)). Οι διάφορες τιμές που προκύπτουν για κάθε τιμή BOD αποβλήτου φαίνονται στον Πίνακα 4.

Όπως αναφέρθηκε, το λογισμικό μεταβάλλει σταδιακά την απόδοση του πρώτου βιολογικού φίλτρου (μέσω της σχέσης (5.25) προκύπτει η αντίστοιχη απόδοση του δεύτερου φίλτρου), για διάφορες τιμές του λόγου αναρροής και του BOD του εισερχόμενου στο φίλτρο αποβλήτου, οπότε γίνεται αριστοποίηση προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο συνολικός όγκος του πληρωτικού υλικού των δύο φίλτρων. Σε κάθε τιμή BOD αντιστοιχεί μία τιμή απόδοσης του πρώτου φίλτρου που ελαχιστοποιεί τον συνολικό όγκο, ανεξάρτητα από την τιμή του λόγου αναρροής. Επίσης, η αύξηση του λόγου αναρροής μειώνει τον όγκο που απαιτείται για την επίτευξη ορισμένης συνολικής απόδοσης των δύο φίλτρων. Βέβαια, αυξάνοντας την τιμή του λόγου αναρροής αυξάνονται αντίστοιχα και οι τιμές της ολικής επιφανειακής φόρτισης και της οργανικής φόρτισης του κάθε φίλτρου, επομένως η αύξηση αυτή δεν μπορεί να γίνει απεριόριστα, αλλά πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην υπερβαίνονται τα όρια του Πίνακα 1.

Πράγματι, όπως παρατηρούμε από το παρακάτω Σχήμα 5.11, αυξάνοντας τον λόγο αναρροής, περιορίζεται η δυνατότητα μεταβολής του ζεύγους τιμών των αποδόσεων των δύο φίλτρων, προκειμένου να μην υπερβαίνονται οι τιμές της επιφανειακής και της οργανικής φόρτισης. Πάντως αυξάνοντας το BOD εισόδου στο φίλτρο και βάσει της σχέσης (5.20) μειώνεται η ολική επιφανειακή φόρτιση κάθε φίλτρου, επομένως υπάρχει δυνατότητα περαιτέρω αύξησης του λόγου αναρροής. Στο Σχήμα 5.12 φαίνεται ότι η επιτρεπόμενη μεταβολή της απόδοσης του πρώτου φίλτρου για ορισμένη τιμή του R έχει μεγαλύτερο εύρος σε σύγκριση με το Σχήμα 5.11, ακριβώς λόγω της αύξησης του BOD εισόδου.

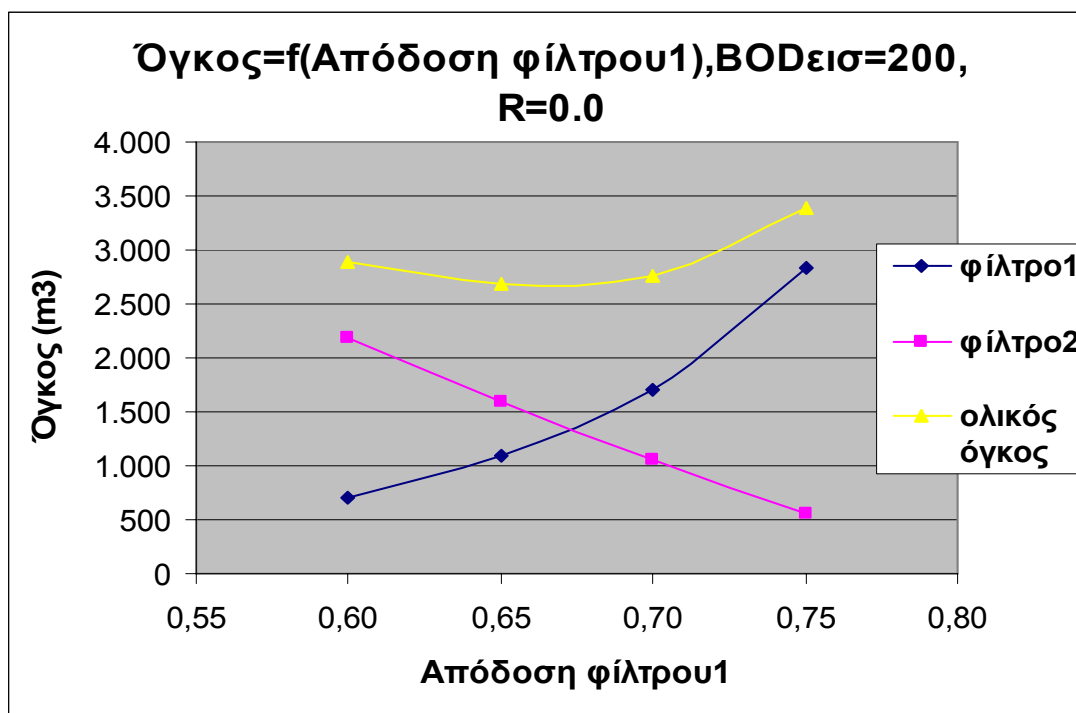


**Σχήμα 5.11:** Μεταβολή συνολικού όγκου δύο βιολογικών φίλτρων συναρτήσει της απόδοσης του πρώτου φίλτρου, για διάφορες τιμές του λόγου αναρροής και για BOD εισόδου του αποβλήτου στο πρώτο φίλτρο 200 mg/L.

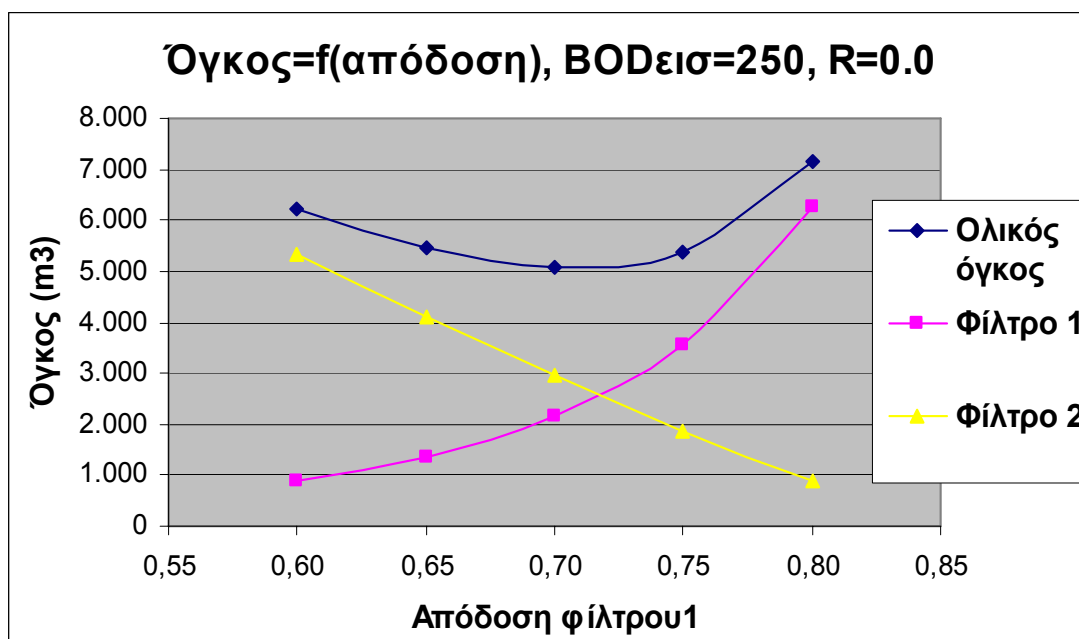


**Σχήμα 5.12:** Μεταβολή συνολικού όγκου δύο βιολογικών φίλτρων συναρτήσει ενός απόδοσης του πρώτου φίλτρου, για διάφορες τιμές του λόγου αναρροής και για BOD εισόδου του αποβλήτου στο πρώτο φίλτρο 250 mg/L.

Στα δύο παρακάτω σχήματα (5.13 και 5.14) φαίνεται πώς επηρεάζεται ο όγκος καθενός από τα δύο βιολογικά φίλτρα και του συνολικού όγκου με την μεταβολή της απόδοσης του πρώτου βιολογικού φίλτρου, οπότε αντίστοιχα μεταβάλλεται και η απόδοση του δεύτερου φίλτρου. Αυξάνοντας την τιμή του  $E_1$  αυξάνεται ο όγκος του πρώτου φίλτρου και μειώνεται ο όγκος του δεύτερου, ενώ η αριστοποίηση γίνεται σε ορισμένη τιμή του  $E_1$ , ανάλογα με το BOD του εισερχόμενου αποβλήτου.



**Σχήμα 5.13:** Μεταβολή όγκου των δύο βιολογικών φίλτρων και του συνολικού, συναρτήσει της απόδοσης του πρώτου φίλτρου, BOD εισόδου στο πρώτο φίλτρο 200 mg/L, BOD εξόδου από το σύστημα 30 mg/L,  $R=0$ .



**Σχήμα 5.14:** Μεταβολή όγκου των δύο βιολογικών φίλτρων και του συνολικού, συναρτήσει της απόδοσης του πρώτου φίλτρου, BOD εισόδου στο πρώτο φίλτρο 250 mg/L, BOD εξόδου από το σύστημα 30 mg/L, R=0.

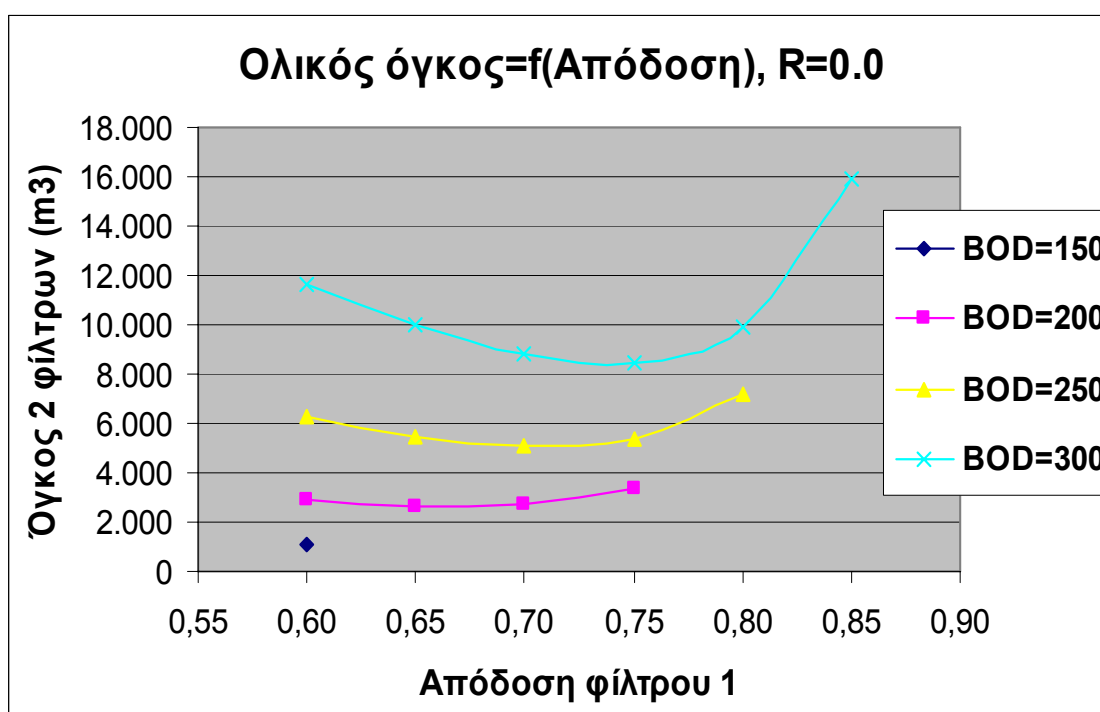
Από τα Σχήματα 5.11 και 5.12 παρατηρούμε ότι η βέλτιστη απόδοση για το πρώτο φίλτρο που ελαχιστοποιεί τον ολικό όγκο των δύο φίλτρων είναι ανεξάρτητη από την τιμή του λόγου αναρρόφης, αλλά εξαρτάται από το BOD εισόδου, και μάλιστα η τιμή της αυξάνεται με την αύξηση του BOD. Σε κάθε τιμή της βέλτιστης απόδοσης του πρώτου φίλτρου αντιστοιχεί μία βέλτιστη απόδοση για το δεύτερο φίλτρο (σχέση (5.25)), οπότε προκύπτει ένα ζεύγος τιμών που ελαχιστοποιεί τον ολικό όγκο του πληρωτικού υλικού για κάθε BOD του εισερχόμενου αποβλήτου. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στον Πίνακα 5:

**Πίνακας 5:** Βέλτιστες τιμές απόδοσης δύο βιολογικών φίλτρων που ελαχιστοποιούν τον συνολικό όγκο για BOD εξόδου 30 mg/L.

BOD εισόδου στο πρώτο φίλτρο (mg/L)	Ολική απόδοση δύο φίλτρων	Απόδοση πρώτου φίλτρου	Απόδοση δεύτερου φίλτρου
150	0.80	0.60	0.50
200	0.85	0.65	0.57
250	0.88	0.70	0.60
300	0.90	0.75	0.60

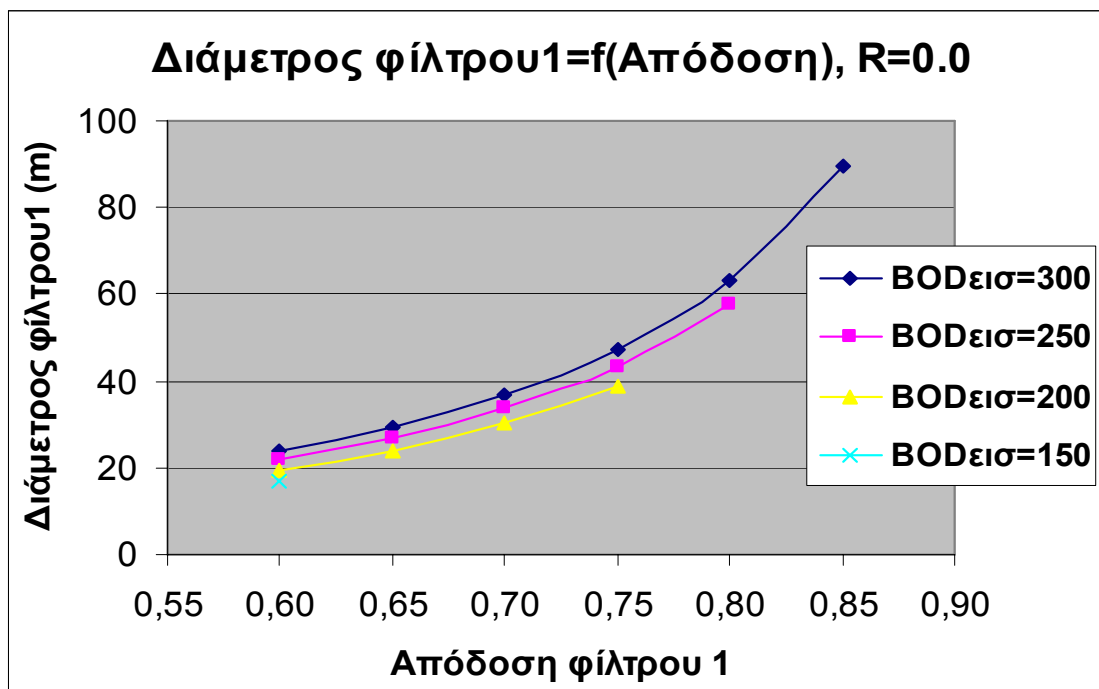
Η ελαχιστοποίηση του ολικού όγκου βάσει της απόδοσης του πρώτου φίλτρου φαίνεται στο Σχήμα 5.15, όπου παριστάνονται τα αποτελέσματα του Πίνακα 5, δηλαδή η βέλτιστη τιμή απόδοσης για κάθε BOD. Επίσης παρατηρούμε ότι αυξάνοντας το BOD αυξάνεται και η δυνατότητα μεταβολής του εύρους τιμών απόδοσης, λόγω της μείωσης της επιφανειακής φόρτισης.

Αυξάνοντας την απόδοση του πρώτου φίλτρου αυξάνεται η απαιτούμενη διάμετρός του, ενώ μειώνεται αντίστοιχα η διάμετρος του δεύτερου φίλτρου, όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.16 και 5.17. Αυξάνοντας το BOD του αποβλήτου αυξάνεται και η απαιτούμενη διάμετρος των φίλτρων, ενώ επίσης αυξάνεται το επιτρεπτό εύρος τιμών απόδοσης.

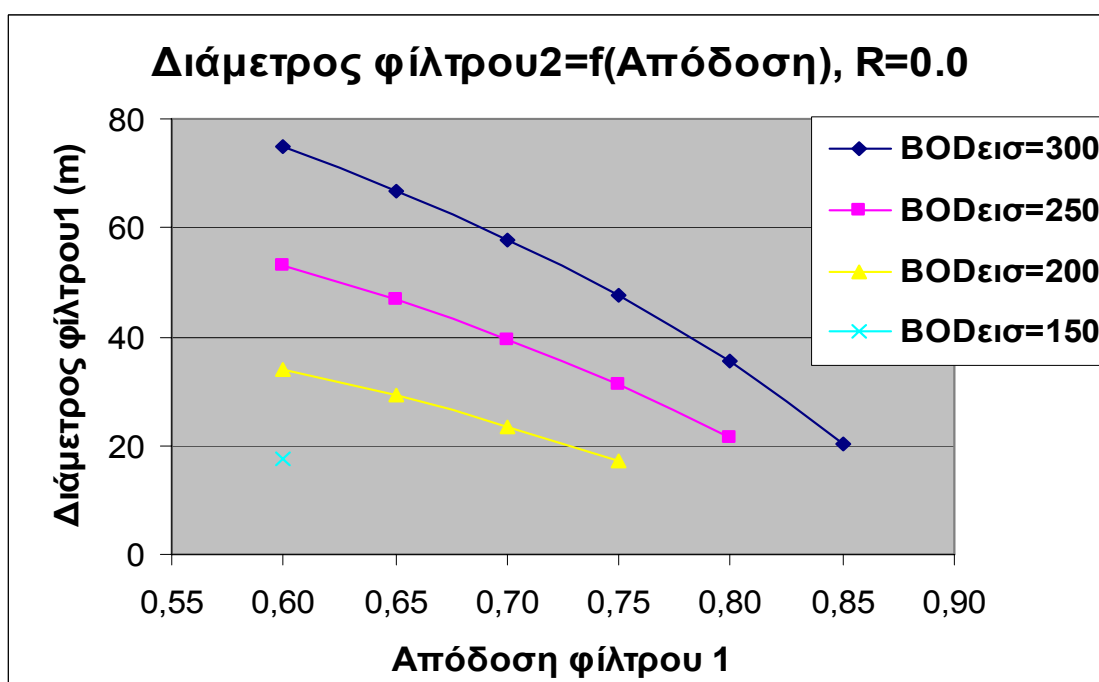


**Σχήμα 5.15:** Μεταβολή συνολικού όγκου δύο φίλτρων συναρτήσει της απόδοσης του πρώτου φίλτρου για διάφορες τιμές BOD εισόδου στο πρώτο φίλτρο και R=0.

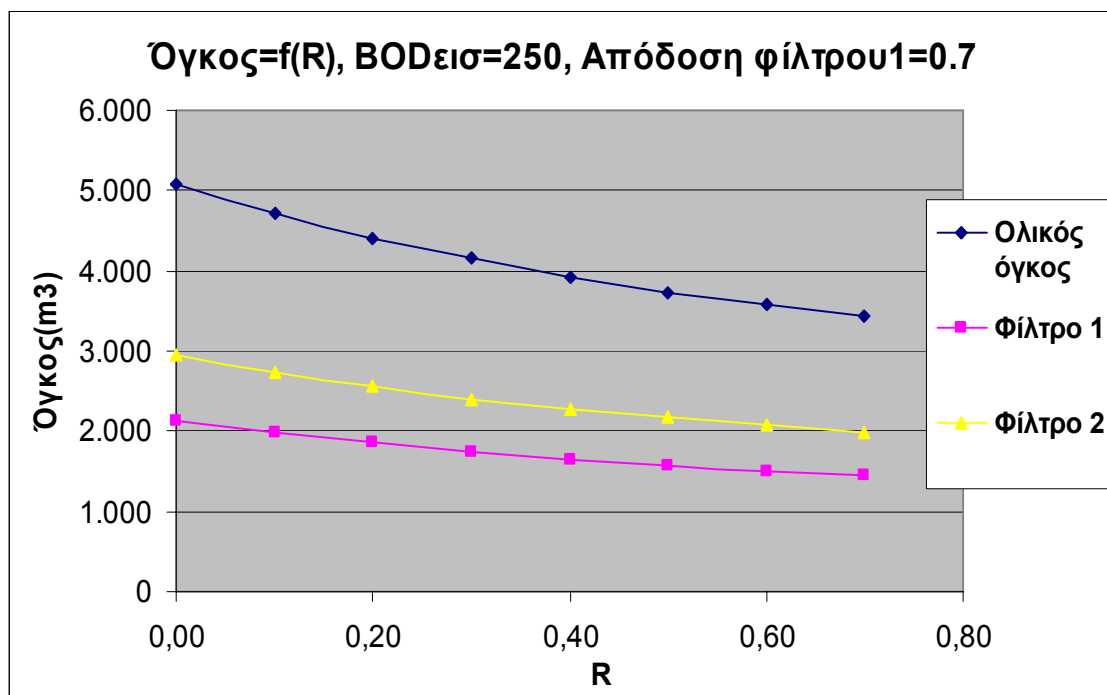




**Σχήμα 5.16:** Μεταβολή διαμέτρου του πρώτου βιολογικού φίλτρου συναρτήσει της απόδοσης για διάφορες τιμές BOD εισόδου και R=0.



**Σχήμα 5.17:** Μεταβολή διαμέτρου του δεύτερου βιολογικού φίλτρου συναρτήσει της απόδοσης για διάφορες τιμές BOD εισόδου και R=0.



**Σχήμα 5.18:** Μεταβολή όγκου των βιολογικών φίλτρων συναρτήσει του λόγου αναρροής για BOD εισόδου 250 mg/L και την βέλτιστη απόδοση του πρώτου φίλτρου ( $E_1=0.7$ ).

Τέλος, από το Σχήμα 5.18 παρατηρούμε την μείωση του όγκου των δύο βιολογικών φίλτρων και του συνολικού αντίστοιχα, που προκύπτει με την αύξηση του λόγου αναρροής του αποβλήτου. Το σχήμα αναφέρεται στην βέλτιστη τιμή απόδοσης του πρώτου φίλτρου που ελαχιστοποιεί τον ολικό όγκο, για την συγκεκριμένη τιμή BOD εισόδου. Η τιμή του λόγου αναρροής μπορεί να αυξάνεται εφόσον εξυπηρετεί την μείωση του συνολικού όγκου, εφόσον δεν υπερβαίνονται τα προβλεπόμενα όρια τιμών της επιφανειακής και οργανικής φόρτισης των φίλτρων.

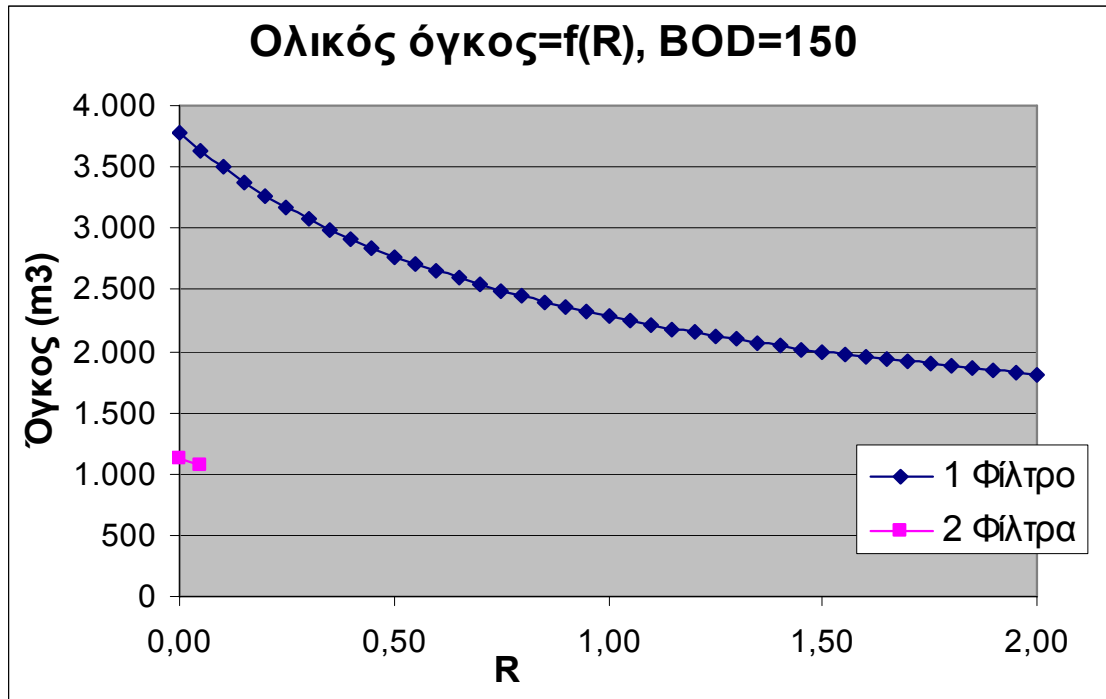
### 5.2.3 Σύγκριση διατάξεων 1 και 2

Μετά την εύρεση της βέλτιστης απόδοσης κάθε φίλτρου σε σύστημα επεξεργασίας με δύο βιολογικά φίλτρα έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται ο συνολικός όγκος του πληρωτικού υλικού με βάση τα δεδομένα εισόδου του Πίνακα 4, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η βέλτιστη αυτή τιμή (Πίνακας 5) για την σύγκριση των Διατάξεων 1 και 2. Οι δύο διατάξεις εικονίζονται στα Σχήματα 5.1 και 5.2 αντίστοιχα. Συγκρίνουμε δηλαδή δύο συστήματα επεξεργασίας αστικού αποβλήτου συγκεκριμένης παροχής, συγκεκριμένου BOD εισόδου και εξόδου

από το σύστημα, με δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης συγκεκριμένης απόδοσης. Τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου που εισέρχεται στο σύστημα των βιολογικών φίλτρων είναι αυτά που αναφέρονται στον Πίνακα 3α.

Όπως αναφέραμε, το ζεύγος τιμών απόδοσης των δύο φίλτρων ( $E_1$  και  $E_2$ ) που ελαχιστοποιεί τον συνολικό απαιτούμενο όγκο του πληρωτικού υλικού δεν εξαρτάται από την τιμή του λόγου αναρροής, αλλά είναι ορισμένο για δεδομένη τιμή του BOD εισόδου στο πρώτο βιολογικό φίλτρο. Επομένως, λαμβάνοντας το ζεύγος τιμών ( $E_1$  και  $E_2$ ) που έχουμε υπολογίσει για κάθε BOD εισόδου ως παράμετρο του προβλήματος, μελετάμε την επίδραση του λόγου αναρροής του αποβλήτου στην τιμή του συνολικού όγκου του πληρωτικού υλικού και στα άλλα σχεδιαστικά μεγέθη. Ο λόγος αναρροής  $R$  μεταβάλλεται από 0 έως 2 με βήμα 0.05, και η αναρροή του αποβλήτου γίνεται μετά την έξοδο από την δευτεροβάθμια δεξαμενή που ακολουθεί κάθε φίλτρο, στην είσοδο του αντίστοιχου φίλτρου. Οι τιμές του  $R$  μεταβάλλονται πάντα έτσι ώστε να τηρούνται τα επιτρεπτά όρια επιφανειακής και οργανικής φόρτισης.

Το πρώτο σύστημα διαθέτει ένα βιολογικό φίλτρο με την αντίστοιχη δευτεροβάθμια δεξαμενή, ενώ το δεύτερο χρησιμοποιεί δύο φίλτρα, με τις αντίστοιχες δευτεροβάθμιες δεξαμενές. Η σύγκριση αφορά κυρίως στον ολικό όγκο πληρωτικού υλικού που απαιτείται για διάφορες τιμές του BOD εισόδου στο πρώτο φίλτρο, με μεταβαλλόμενο λόγο αναρροής. Συγκρίνονται επίσης και άλλες παράμετροι όπως η απαιτούμενη διάμετρος κάθε φίλτρου, η ολική επιφανειακή φόρτιση και η οργανική φόρτιση κάθε φίλτρου. Η σύγκριση γίνεται για τιμές BOD εισόδου του αποβλήτου στο πρώτο βιολογικό φίλτρο 150, 200, 250 και 300 mg/L.



**Σχήμα 5.19:** Σύγκριση όγκου πληρωτικού υλικού για επεξεργασία αποβλήτου με BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο 150mg/L, με σύστημα ενός και δύο βιολογικών φίλτρων.

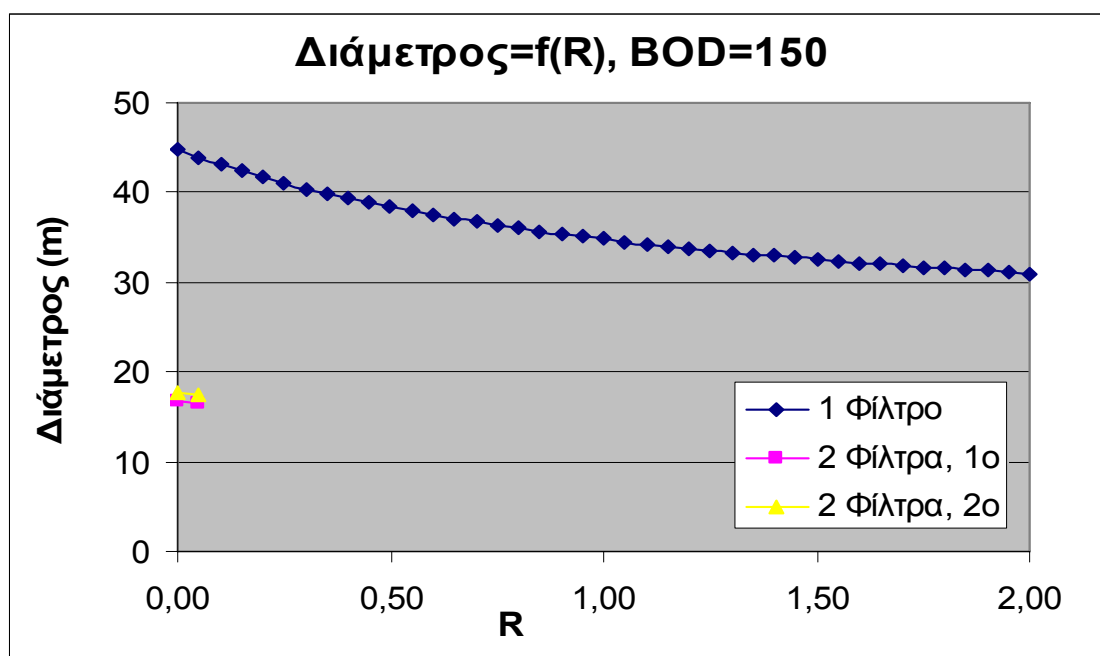
Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 5.19, για BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο 150 mg/L, ο απαιτούμενος όγκος πληρωτικού υλικού για το σύστημα του ενός φίλτρου είναι περίπου τριπλάσιος σε σχέση με τον όγκο που απαιτείται όταν έχουμε δύο φίλτρα. Βέβαια, στην περίπτωση του δεύτερου συστήματος, λόγω της αύξησης της ολικής επιφανειακής φόρτισης και της οργανικής φόρτισης πάνω από τα αποδεκτά όρια, ο μέγιστος λόγος αναρροής είναι 0.05. Εφαρμόζοντας τις σχέσεις (5.20) και (5.21) για το δεύτερο βιολογικό φίλτρο στο σύστημα των δύο φίλτρων και βάσει της εξίσωσης NRC (σχέσεις (5.1) και (5.2)), προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

$$q_{tot} = \frac{D \cdot \left[ \frac{1 - E_1}{0.4432} \left( \frac{1}{E_2} - 1 \right) \right]^2 F}{10^{-3} \cdot BOD_{TF,2}} \cdot (1 + R) \quad (5.34)$$

$$OrgLo_{TF} = \left[ \frac{1 - E_1}{0.4432} \left( \frac{1}{E_2} - 1 \right) \right]^2 F \quad (5.35)$$

Από τις σχέσεις (5.21) και (5.35) παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυτή η οργανική φόρτιση είναι μεγάλη λόγω των μικρών τιμών των βέλτιστων σχετικών αποδόσεων που αντιστοιχούν στα δύο φίλτρα ( $E_1=0.6$ ,  $E_2=0.5$ ), γι' αυτό και δεν μπορούμε να αυξήσουμε τον παράγοντα  $F$ , που εξαρτάται από την αύξηση του λόγου αναρρόης. Το ίδιο ισχύει και για την ολική επιφανειακή φόρτιση (σχέσεις (5.20) και (5.34)), μόνο που στην περίπτωση αυτή η αυξημένη τιμή τους οφείλεται στις μικρές τιμές του BOD εισόδου στα βιολογικά φίλτρα.

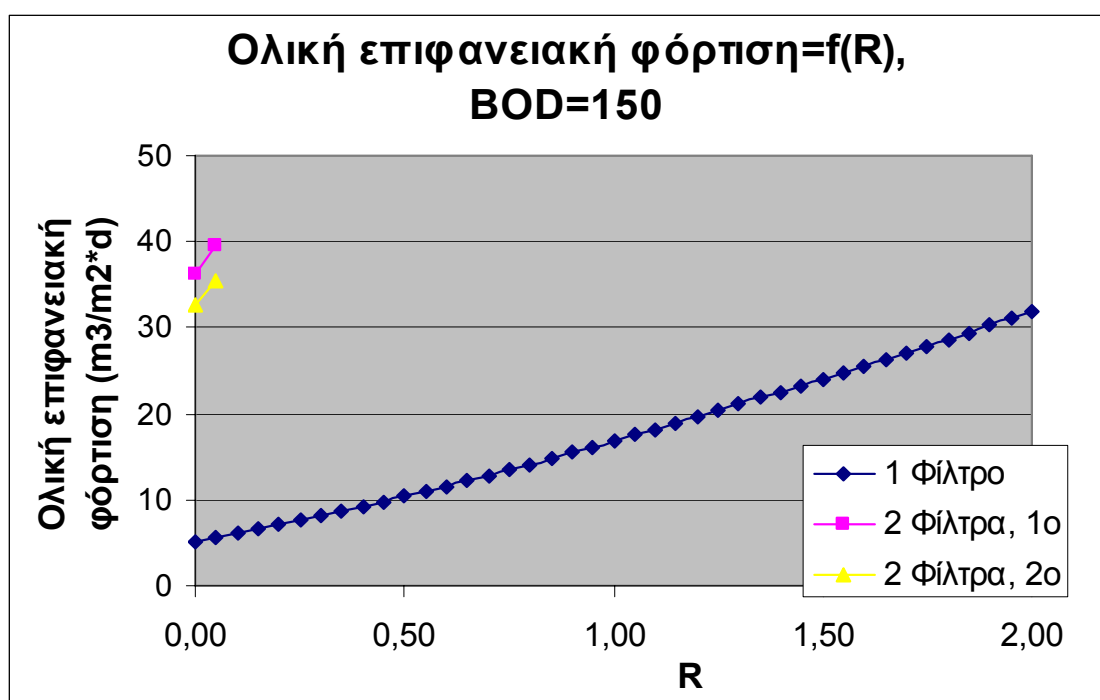
Η μεγάλη διαφορά στον απαιτούμενο όγκο πληρωτικού υλικού, μπορεί να τεκμηριωθεί μαθηματικά από τις σχέσεις (5.27) και (5.31), όπου φαίνεται ότι λόγω των μικρότερων τιμών των σχετικών αποδόσεων κάθε φίλτρου, μειώνεται σημαντικά ο προκύπτων όγκος πληρωτικού υλικού. Επίσης, μπορεί να τεκμηριωθεί φυσικά βάσει της αυξημένης τιμής της ολικής επιφανειακής φόρτισης και της οργανικής φόρτισης, που οδηγεί στην εντονότερη και ταχύτερη επεξεργασία του αποβλήτου. Βέβαια, η αύξηση των δύο παραμέτρων αυτών δεν μπορεί να είναι απεριόριστη, γιατί αν αυξηθούν πάνω από τα όρια που αναφέρονται στον Πίνακα 1, υπάρχει κίνδυνος το απόβλητο να συμπαρασύρει τον βιολογικό υμένα όπου αναπτύσσονται τα βακτήρια, οπότε θα υπάρξει απότομη μείωση της απόδοσης επεξεργασίας.



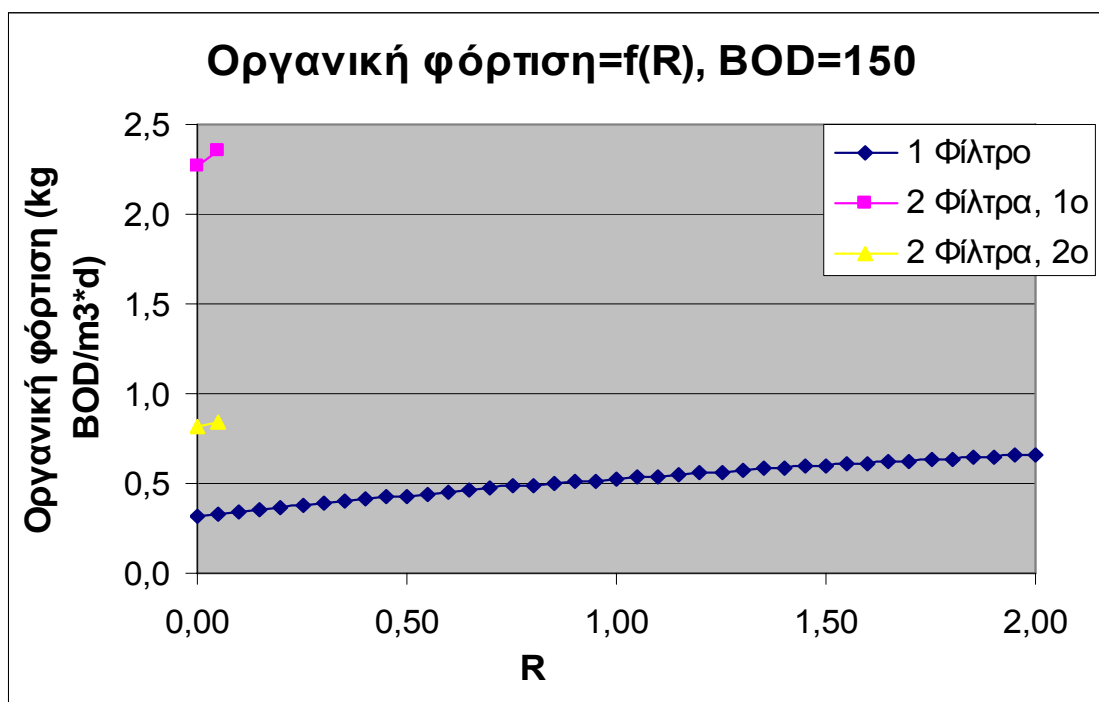
**Σχήμα 5.20:** Σύγκριση διαμέτρου βιολογικών φίλτρων για επεξεργασία αποβλήτου με BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο 150mg/L, με σύστημα ενός και δύο βιολογικών φίλτρων.

Αντίστοιχες παρατηρήσεις ισχύουν και για την διάμετρο βιολογικού φίλτρου που απαιτείται σε κάθε περίπτωση, για χρήση συστήματος με ένα ή δύο φίλτρα αντίστοιχα. Η διάμετρος εξαρτάται άμεσα από τον όγκο του πληρωτικού υλικού, βάσει των σχέσεων (5.28) και (5.29). Παρατηρούμε ότι για το σύστημα του ενός φίλτρου η απαιτούμενη διάμετρος είναι περίπου 2.5 φορές μεγαλύτερη από τη διάμετρο κάθε πύργου για την διάταξη των δύο φίλτρων.

Στα Σχήματα 5.21 και 5.22 παρατηρούμε ότι για το σύστημα των δύο φίλτρων οι τιμές της ολικής επιφανειακής φόρτισης και της οργανικής φόρτισης είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τις τιμές που αντιστοιχούν στο σύστημα του ενός φίλτρου. Αυτό εξηγείται μαθηματικά από τις μικρότερες τιμές των σχετικών αποδόσεων, αλλά και φυσικά από το ότι η ίδια παροχή αποβλήτου διέρχεται από φίλτρο σημαντικά μικρότερης διαμέτρου.

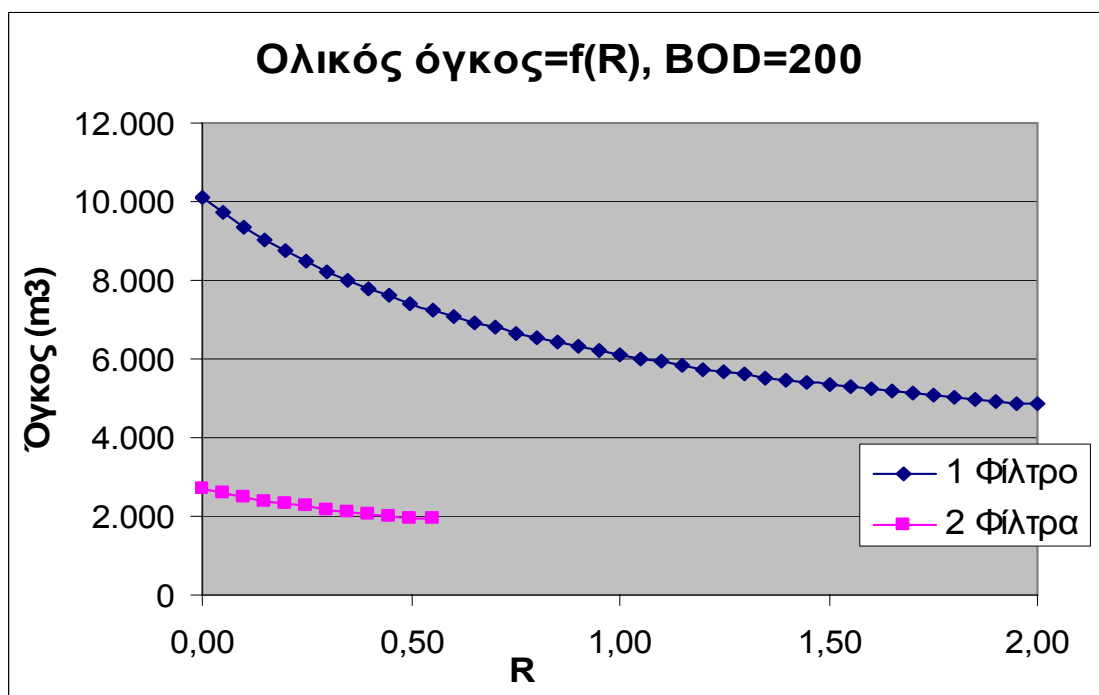


**Σχήμα 5.21:** Σύγκριση ολικής επιφανειακής φόρτισης βιολογικών φίλτρων για επεξεργασία αποβλήτου με BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο 150mg/L, με σύστημα ενός και δύο βιολογικών φίλτρων.

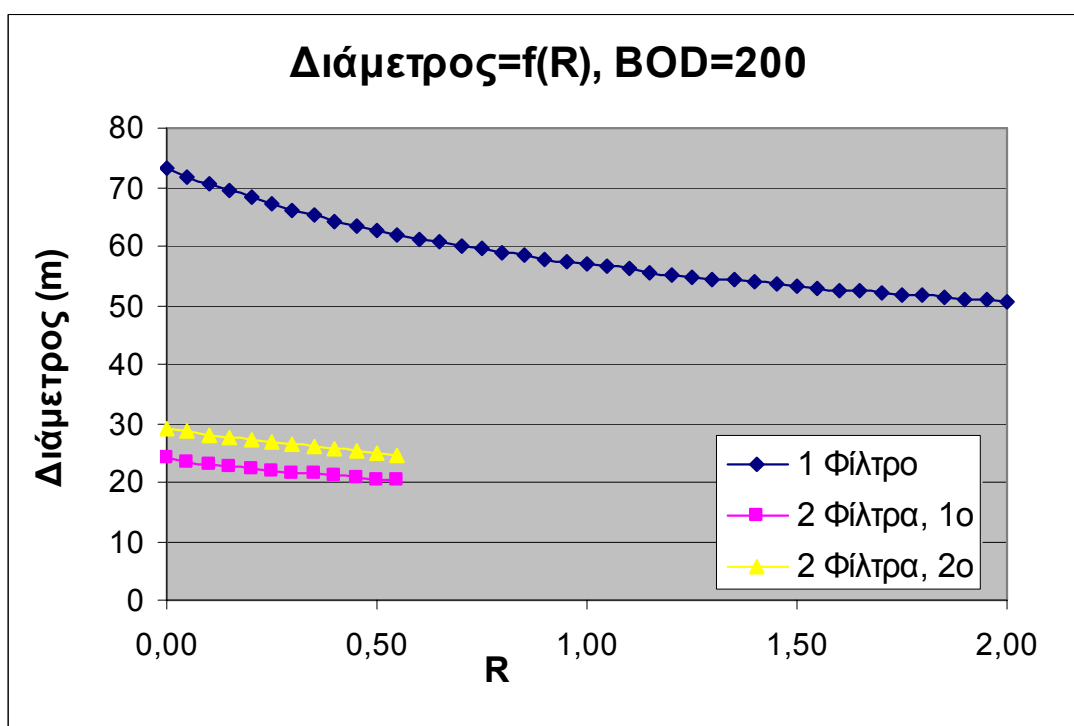


**Σχήμα 5.22:** Σύγκριση οργανικής φόρτισης βιολογικών φίλτρων για επεξεργασία αποβλήτου με BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο 150mg/L, με σύστημα ενός και δύο βιολογικών φίλτρων.

Στην περίπτωση που το BOD εισόδου στο πρώτο βιολογικό φίλτρο είναι 200 mg/L (Σχήματα 5.23 – 5.26), παρατηρούμε ότι αυξάνεται ακόμη περισσότερο η διαφορά στον απαιτούμενο όγκο πληρωτικού υλικού. Πράγματι, ο όγκος που απαιτείται για το σύστημα του ενός φίλτρου είναι σχεδόν τετραπλάσιος από τον συνολικό όγκο των δύο φίλτρων. Αντίστοιχα περίπου ισχύουν και για τις διαμέτρους των φίλτρων, ενώ για την ολική επιφανειακή φόρτιση και την οργανική φόρτιση λόγω της αύξησης των μερικών αποδόσεων των φίλτρων ( $E_1=0.65$ ,  $E_2=0.57$ ) αλλά και του BOD, παρατηρούμε μείωση των τιμών τους. Έτσι, στην περίπτωση των δύο φίλτρων επιτρέπεται μεγαλύτερη αύξηση του λόγου αναρροής, μέχρι και την τιμή 0.55.

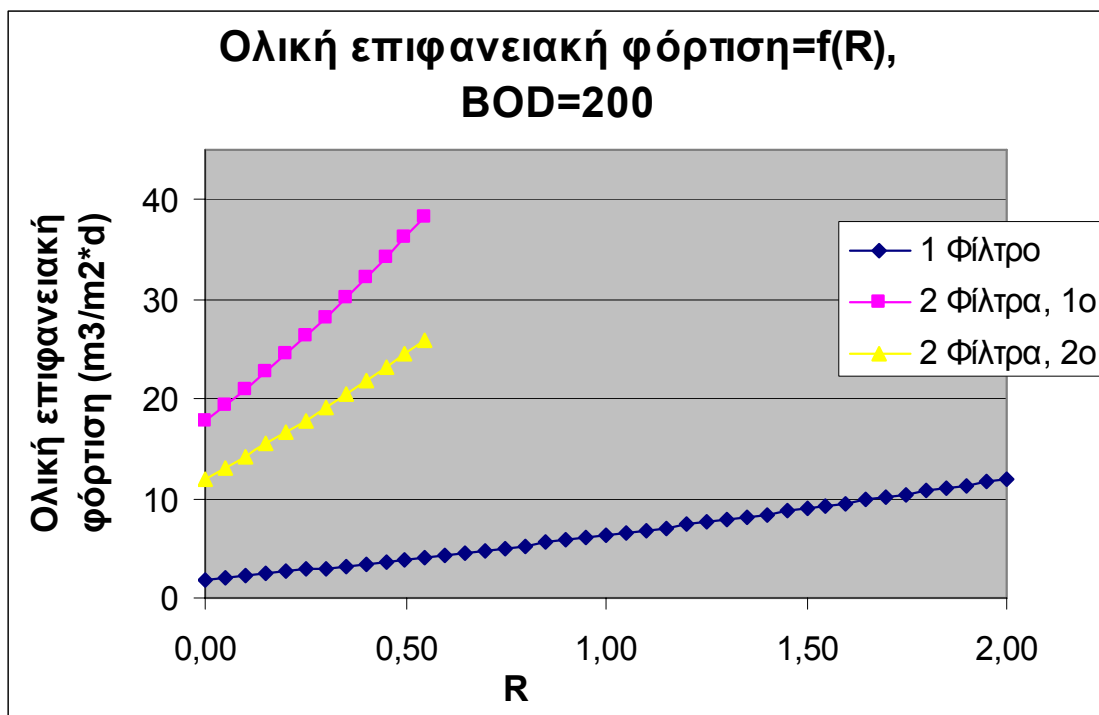


**Σχήμα 5.23:** Σύγκριση όγκου πληρωτικού υλικού για επεξεργασία αποβλήτου με BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο 200mg/L, με σύστημα ενός και δύο βιολογικών φίλτρων.

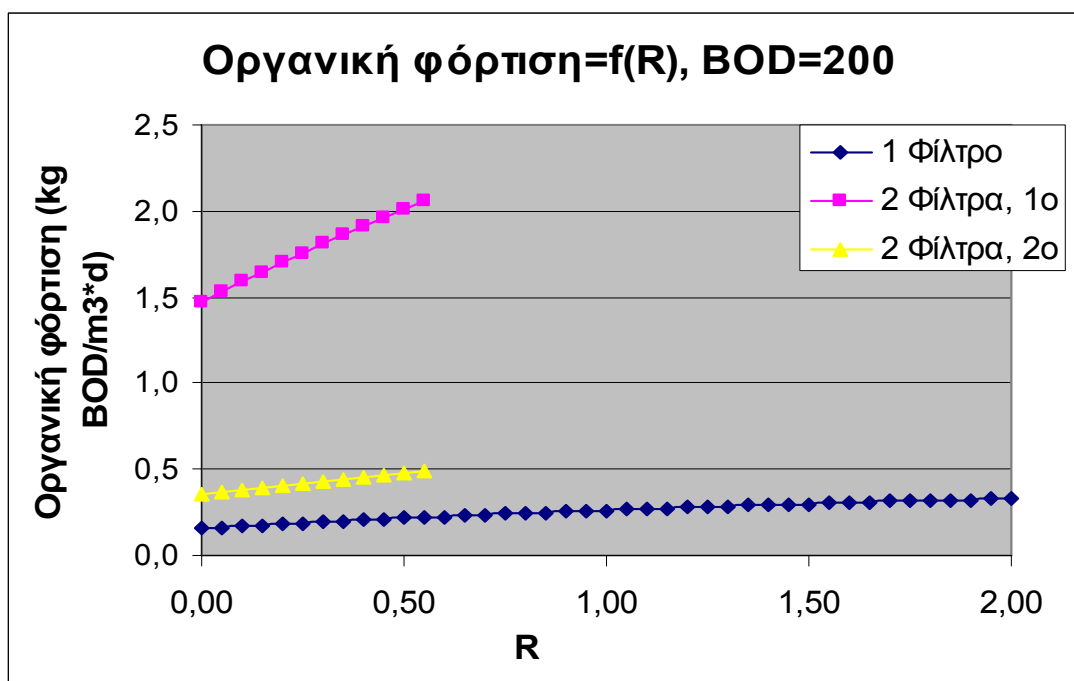


**Σχήμα 5.24:** Σύγκριση διαμέτρου βιολογικών φίλτρων για επεξεργασία αποβλήτου με BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο 200mg/L, με σύστημα ενός και δύο βιολογικών φίλτρων.



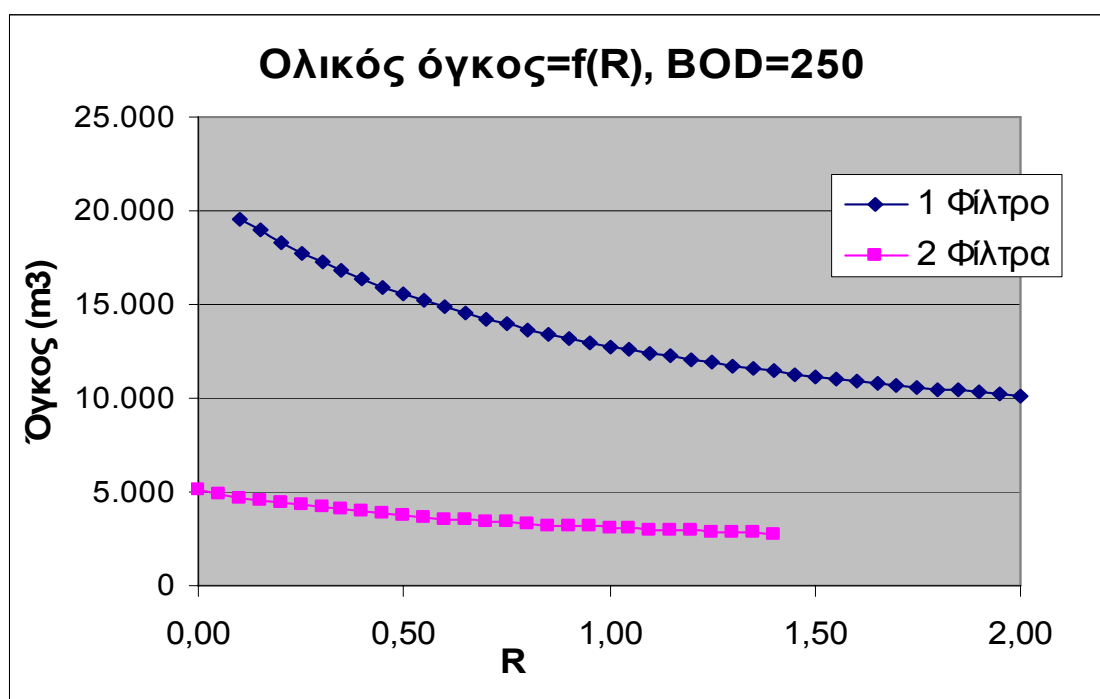


**Σχήμα 5.25:** Σύγκριση ολικής επιφανειακής φόρτισης βιολογικών φίλτρων για επεξεργασία αποβλήτου με BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο 200mg/L, με σύστημα ενός και δύο βιολογικών φίλτρων.

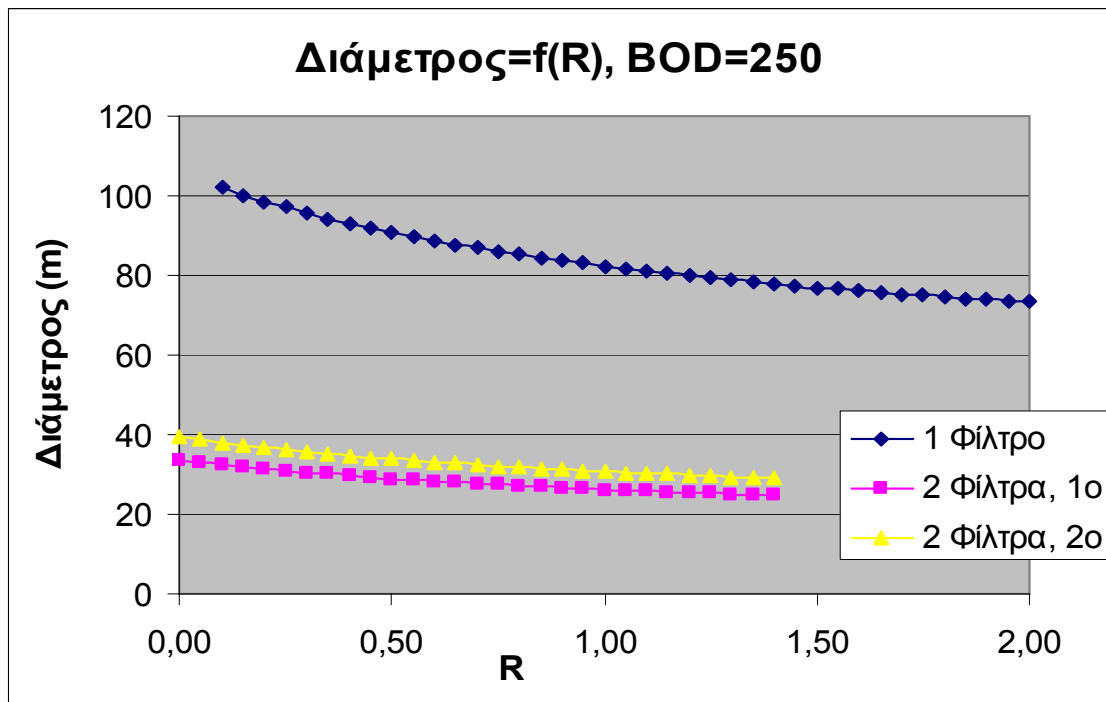


**Σχήμα 5.26:** Σύγκριση οργανικής φόρτισης βιολογικών φίλτρων για επεξεργασία αποβλήτου με BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο 200mg/L, με σύστημα ενός και δύο βιολογικών φίλτρων.

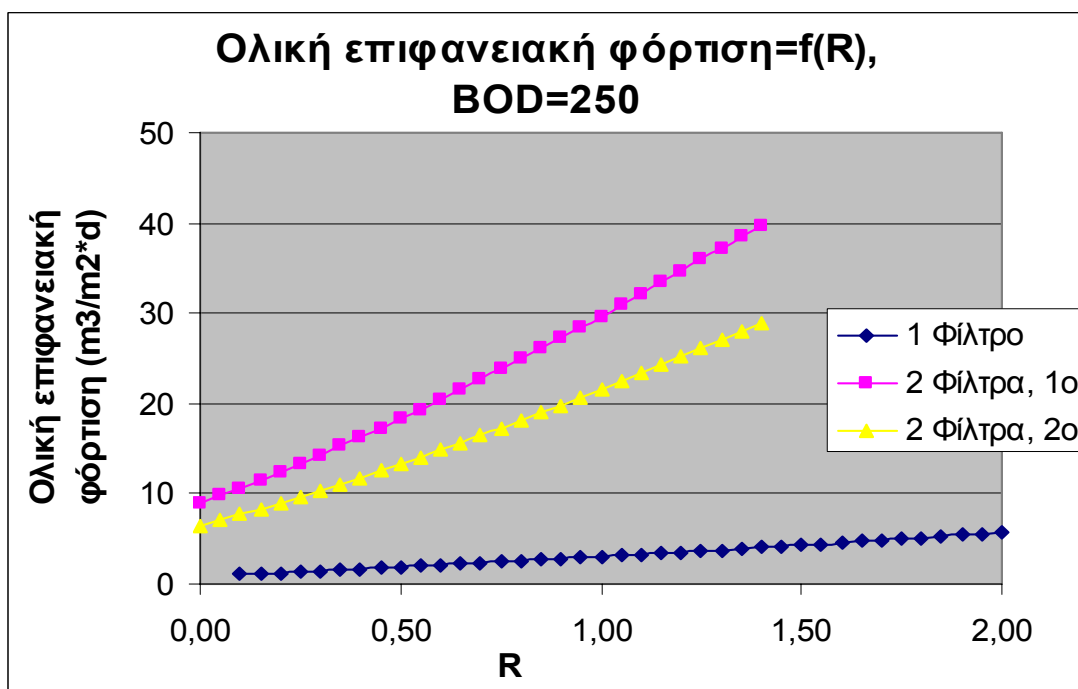
Αντίστοιχες παρατηρήσεις ισχύουν και όταν το BOD του εισερχόμενου στο φίλτρο αποβλήτου είναι 250 mg/L (Σχήματα 5.27 – 5.30). Ο απαιτούμενος ολικός όγκος του ενός φίλτρου είναι πάλι περίπου τετραπλάσιος του αντίστοιχου συνολικού όγκου του συστήματος δύο φίλτρων. Στην περίπτωση αυτή λόγω της αυξημένης τιμής του BOD χρειάζεται η τιμή του λόγου αναρροής να είναι τουλάχιστον 0.1 για να υπερβαίνονται τα κατώτερα όρια φόρτισης του συστήματος του ενός φίλτρου. Το ζεύγος τιμών των σχετικών αποδόσεων στο σύστημα των δύο φίλτρων είναι  $E_1=0.7$  και  $E_2=0.6$ , γι' αυτό και οι τιμές φόρτισης, επιφανειακής και οργανικής, είναι μεγαλύτερες στο πρώτο φίλτρο (Σχήματα 5.29, 5.30)



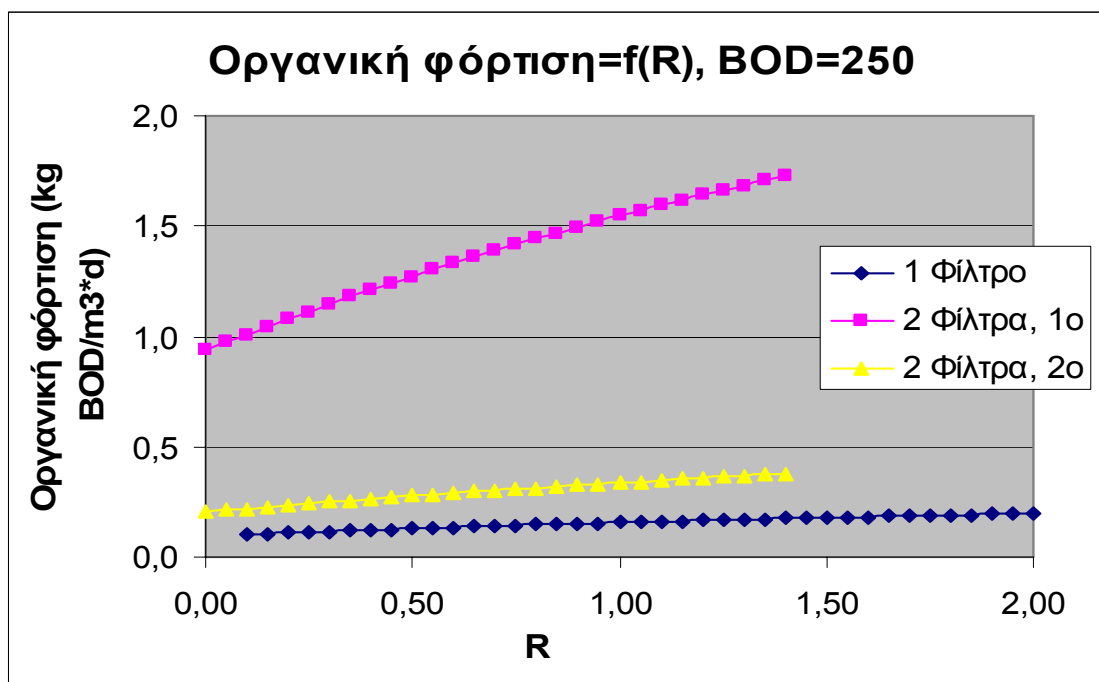
**Σχήμα 5.27:** Σύγκριση όγκου πληρωτικού υλικού για επεξεργασία αποβλήτου με BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο 250mg/L, με σύστημα ενός και δύο βιολογικών φίλτρων.



**Σχήμα 5.28:** Σύγκριση διαμέτρου βιολογικών φίλτρων για επεξεργασία αποβλήτου με BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο 250mg/L, με σύστημα ενός και δύο βιολογικών φίλτρων.

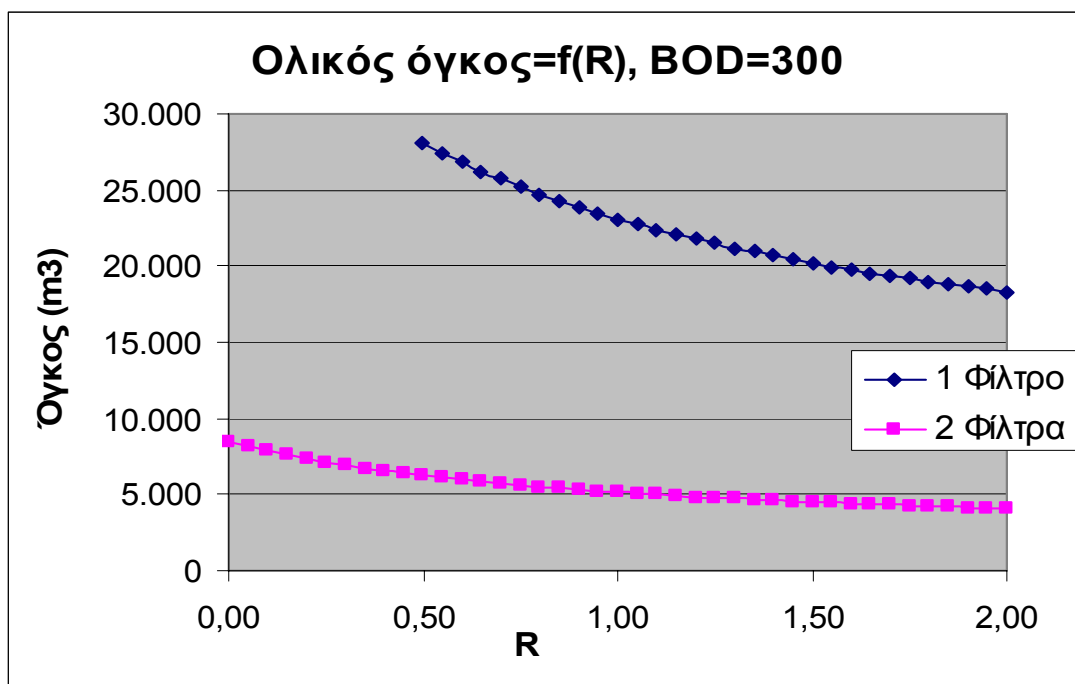


**Σχήμα 5.29:** Σύγκριση ολικής επιφανειακής φόρτισης βιολογικών φίλτρων για επεξεργασία αποβλήτου με BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο 250mg/L, με σύστημα ενός και δύο βιολογικών φίλτρων.

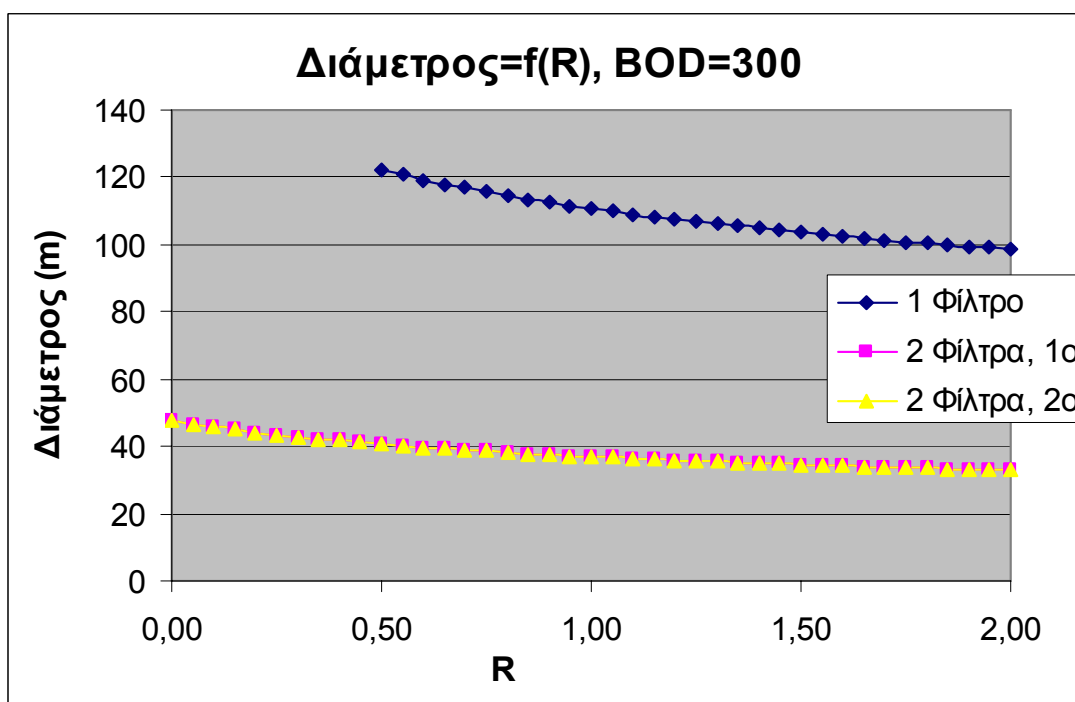


**Σχήμα 5.30:** Σύγκριση οργανικής φόρτισης βιολογικών φίλτρων για επεξεργασία αποβλήτου με BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο 250mg/L, με σύστημα ενός και δύο βιολογικών φίλτρων.

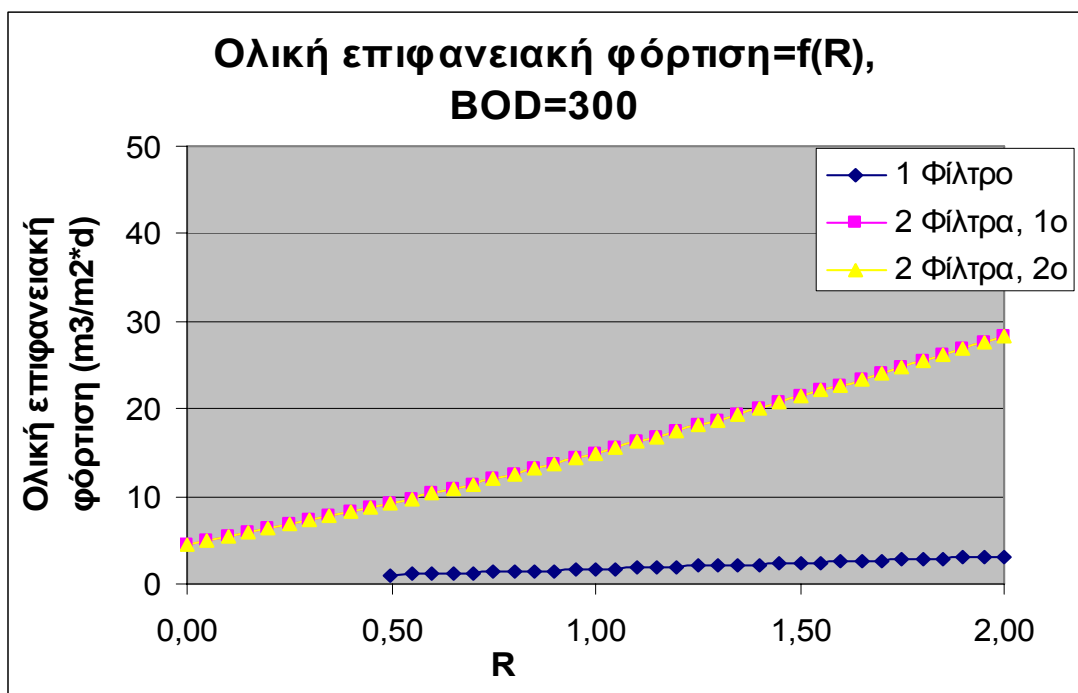
Τέλος, για BOD εισόδου 300 mg/L (Σχήματα 5.31 – 5.34) ο ολικός όγκος πληρωτικού υλικού της διάταξης 1 (ένα φίλτρο), είναι περίπου 4,5 φορές μεγαλύτερος από τον ολικό όγκο της διάταξης 2 (δύο φίλτρα). Παρατηρούμε λοιπόν ότι το πλεονέκτημα της χρήσης δύο φίλτρων ως προς τον απαιτούμενο όγκο και επομένως και ως προς το κόστος, αυξάνεται με την αύξηση του BOD του προς επεξεργασία αποβλήτου. Για BOD 300 mg/L, λόγω της πολύ μεγάλης αύξησης της διαμέτρου του ενός φίλτρου μειώνονται οι πολύ οι τιμές φόρτισης, και ο ελάχιστος λόγος αναρροής του αποβλήτου για την σωστή λειτουργία της διάταξης είναι 0.5. Στην περίπτωση αυτή, οι τιμές των σχετικών αποδόσεων στο σύστημα των δύο φίλτρων προκειμένου να έχουμε ελαχιστοποίηση του συνολικού όγκου είναι τέτοιες ( $E_1=0.75$  και  $E_2=0.6$ ) που οι αντίστοιχες τιμές όγκου, διαμέτρου και ολικής επιφανειακής φόρτισης συμπίπτουν για τα δύο φίλτρα (Σχήματα 5.32, 5.33). Αυτό δεν ισχύει και για την οργανική φόρτιση που εξαρτάται μόνο από τις σχετικές αποδόσεις και όχι από το BOD.



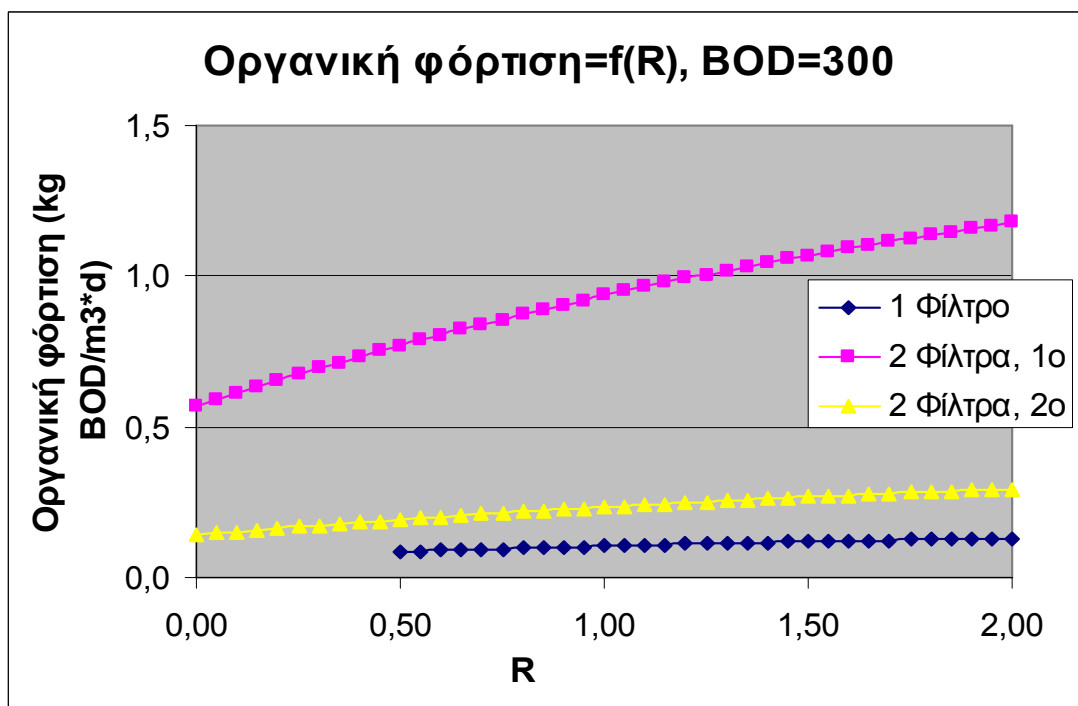
**Σχήμα 5.31:** Σύγκριση όγκου πληρωτικού υλικού για επεξεργασία αποβλήτου με BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο 300mg/L, με σύστημα ενός και δύο βιολογικών φίλτρων.



**Σχήμα 5.32:** Σύγκριση διαμέτρου βιολογικών φίλτρων για επεξεργασία αποβλήτου με BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο 300mg/L, με σύστημα ενός και δύο βιολογικών φίλτρων.



**Σχήμα 5.33:** Σύγκριση ολικής επιφανειακής φόρτισης βιολογικών φίλτρων για επεξεργασία αποβλήτου με BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο 300mg/L, με σύστημα ενός και δύο βιολογικών φίλτρων.



**Σχήμα 5.34:** Σύγκριση οργανικής φόρτισης βιολογικών φίλτρων για επεξεργασία αποβλήτου με BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο 300mg/L, με σύστημα ενός και δύο βιολογικών φίλτρων.

### 5.3 Λογισμικό συσχέτισης απόδοσης – λόγου αναρροής

Για την μελέτη της επίδρασης του λόγου αναρροής του αποβλήτου στο βιολογικό φίλτρο βάσει της εξίσωσης NRC, κατασκευάστηκε λογισμικό που προσομοιώνει την επεξεργασία αστικών αποβλήτων με διάταξη βιολογικού φίλτρου όπως αυτή του Σχήματος 5.1, που περιλαμβάνει βιολογικό φίλτρο με δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, μετά από την οποία μέρος του εξερχόμενου αποβλήτου ανακυκλώνεται στο φίλτρο. Η πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης στην διάταξη του σχήματος δεν λαμβάνεται υπόψη στο λογισμικό, αλλά θεωρούμε ότι το BOD του αποβλήτου που εισέρχεται στο βιολογικό φίλτρο έχει καθορισμένη τιμή. Από τις ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδιασμού του φίλτρου για τον υπολογισμό της απόδοσης, λαμβάνουμε ορισμένες ως παραμέτρους εισόδου του προβλήματος, οι οποίες έχουν καθορισμένη τιμή. Αυτές είναι η παροχή του αποβλήτου, το BOD εισόδου του αποβλήτου στο φίλτρο (χωρίς την επίδραση της ανακύκλωσης), η διάμετρος και το βάθος του πύργου. Οι παράμετροι εισόδου που τροφοδοτούν το λογισμικό ώστε να υπολογιστεί η απόδοση του βιολογικού φίλτρου αναφέρονται στον Πίνακα 6 που ακολουθεί:

**Πίνακας 6:** Δεδομένα εισόδου λογισμικού  $E = f(R)$  για φίλτρο με πληρωτικό υλικό από πέτρα.

Δεδομένα Εισόδου λογισμικού $E=f(R)$	
Παροχή αποβλήτου ( $m^3/d$ )	8,000
BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο (mg/L)	200
Ύψος φίλτρου (m)	2.4
Διάμετρος φίλτρου (m)	60
Θερμοκρασία αποβλήτου ( $^{\circ}C$ )	20
Εύρος επιφανειακής φόρτισης ( $m^3/m^2*d$ )	1 – 40
Εύρος οργανικής φόρτισης ( $kg\ BOD/m^3*d$ )	0.07 – 2.40

Από την διάμετρο του φίλτρου μέσω της σχέσης (5.16) υπολογίζουμε την κάθετη διατομή, ενώ από την (5.17) υπολογίζουμε την επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου. Ο όγκος του πληρωτικού υλικού, το οργανικό φορτίο (BOD) και η

οργανική φόρτιση του φίλτρου υπολογίζονται αντίστοιχα μέσω των σχέσεων (5.15), (5.12) και (5.14).

Το λογισμικό χρησιμοποιεί επαναληπτική διαδικασία σταδιακής αύξησης του λόγου αναρροής  $R$  του αποβλήτου στο φίλτρο, από την τιμή 0 έως την τιμή 2 με βήμα 0.1. Σε κάθε βήμα της επανάληψης υπολογίζεται ο συντελεστής λόγου αναρροής  $F$  μέσω της σχέσης (5.3), και στην συνέχεια από την (5.1), δηλαδή από την εξίσωση NRC, προκύπτει η υπολογιζόμενη απόδοση του βιολογικού φίλτρου, μαζί με την δευτεροβάθμια καθίζηση. Τέλος, μέσω της σχέσης (5.11) υπολογίζουμε το BOD του επεξεργασμένου αποβλήτου που εξέρχεται από την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης. Από την (5.18) προκύπτει η συνολική επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου σε κάθε βήμα της επανάληψης, έτσι ώστε να ελέγχεται ότι βρίσκεται μέσα στο επιτρεπόμενο εύρος τιμών του Πίνακα 1.

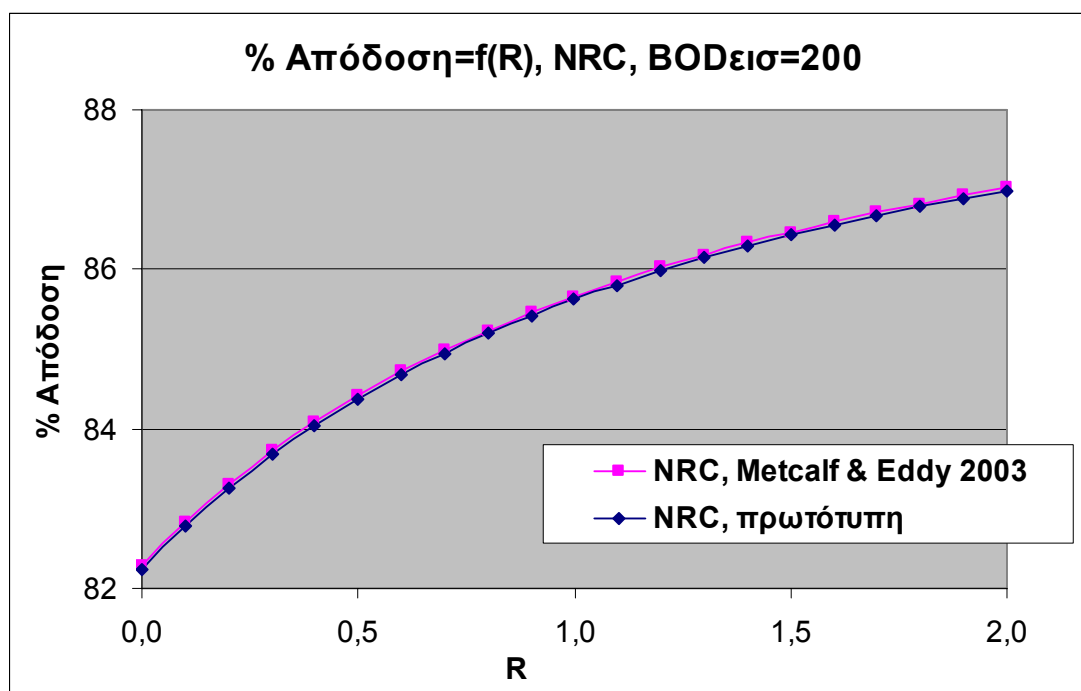
#### 5.3.1. Αποτελέσματα λογισμικού

Τα αποτελέσματα για την απόδοση του φίλτρου συναρτήσει του λόγου αναρροής  $R$  βάσει της εξίσωσης NRC και για τα δεδομένα εισόδου του Πίνακα 6, απεικονίζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 5.35. Στις παραγράφους που προηγήθηκαν όπου περιγράφεται η επίδραση του λόγου αναρροής και του είδους της χρησιμοποιούμενης διάταξης στον ολικό όγκο του πληρωτικού υλικού και γενικότερα στην όλη περιγραφή της εξίσωσης NRC, χρησιμοποιήσαμε την μορφή της εξίσωσης που αναφέρεται στην βιβλιογραφία (Metcalf & Eddy, 2003). Βάσει του λογισμικού που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο, μελετήσαμε την επίδραση του λόγου αναρροής στην απόδοση επεξεργασίας αστικού αποβλήτου με την διάταξη που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1, που περιλαμβάνει ένα βιολογικό φίλτρο και δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης. Στην προκειμένη περίπτωση δεν λάβαμε υπόψη την πρωτοβάθμια δεξαμενή, αλλά ως BOD εισόδου θεωρήσαμε το BOD του αποβλήτου που εισέρχεται στο βιολογικό φίλτρο. Το λογισμικό εφαρμόστηκε σε δύο μορφές της εξίσωσης NRC, σε αυτήν που αναφέραμε παραπάνω ως βιβλιογραφική παραπομπή, και στην μορφή που υπάρχει στην πρωτότυπη δημοσίευση (Mohlman et al., 1946). Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 5.35 που ακολουθεί, οι διαφορές ανάμεσα στα αποτελέσματα των δύο εξισώσεων είναι αμελητέες και κυμαίνονται από 0.03 έως 0.05% για τα δεδομένα εισόδου που

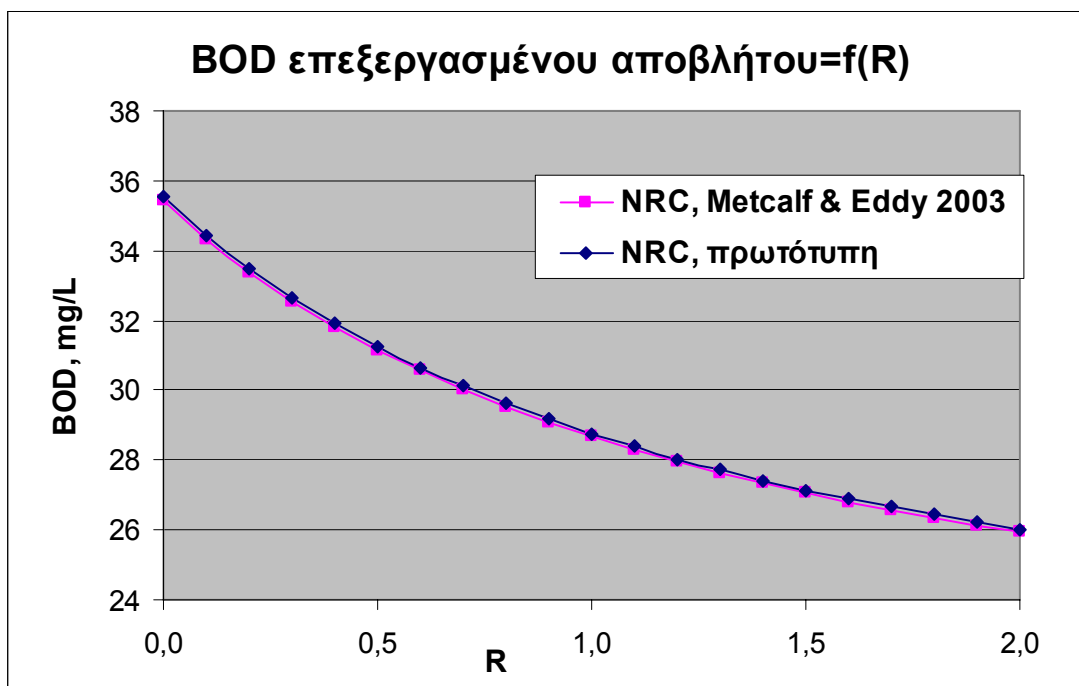


χρησιμοποιήσαμε (Πίνακας 6). Άρα, η μορφή που παρατίθεται στην συγκεκριμένη βιβλιογραφική πηγή είναι αξιόπιστη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί της πρωτότυπης, εφόσον οι μονάδες που χρησιμοποιούνται σε αυτήν είναι στο Διεθνές Σύστημα και επομένως είναι περισσότερο εύχρηστες.

Παρόμοιες παρατηρήσεις ισχύουν και για το BOD του επεξεργασμένου αποβλήτου (Σχήμα 5.36), το οποίο σαφώς μειώνεται με την αύξηση του λόγου αναρροής του αποβλήτου εφόσον αυξάνεται η απόδοση επεξεργασίας. Οι τιμές του BOD που προκύπτει από τις δύο μορφές της εξίσωσης NRC διαφέρουν από 0.08 έως 0.10 mg/L, ποσότητες που μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες για τον σχεδιασμό ενός βιολογικού φίλτρου.



**Σχήμα 5.35:** Απόδοση βιολογικού φίλτρου (με δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης ) συναρτήσει του λόγου αναρροής βάσει της εξίσωσης NRC.



**Σχήμα 5.36:** Συγκέντρωση BOD επεξεργασμένου αποβλήτου με σύστημα βιολογικού φίλτρου (με δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης ) συναρτήσει του λόγου αναρροής βάσει της εξίσωσης NRC.

## 6. Η ΕΞΙΣΩΣΗ GALLER ΚΑΙ GOTAAS

Οι W. S. Galler και H. B. Gotaas ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της απόδοσης των βιολογικών φίλτρων με πληρωτικό υλικό από πέτρα, βασιζόμενοι σε πλήθος πειραματικών δεδομένων από εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με βιολογικά φίλτρα (W. S. Galler, H. G. Gotaas, 1964). Χρησιμοποίησαν την μέθοδο της πολλαπλής παλινδρόμησης, εξετάζοντας την επίδραση που έχουν στην απόδοση παράμετροι όπως η ανακύκλωση, η θερμοκρασία, η επιφανειακή φόρτιση, το βάθος του φίλτρου και η οργανική φόρτιση, και εξήγαγαν την αντίστοιχη σχέση με υψηλό συντελεστή συσχέτισης.

Ένα βασικό συμπέρασμά τους είναι ότι η επιφανειακή φόρτιση δεν επιδρά σημαντικά στην απομάκρυνση BOD του επεξεργαζόμενου αποβλήτου. Αυτό βασίζεται στην παρατήρηση των W. A. Moore et al. (1950), ότι η αύξηση στην απόδοση απομάκρυνσης BOD λόγω της ανακύκλωσης μέρους του αποβλήτου είναι μεγαλύτερη όταν η λάσπη από την δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης ανακυκλώνεται στην πρωτοβάθμια δεξαμενή. Σύμφωνα με τους Moore et al., όταν ανακυκλώνεται μόνο το απόβλητο μετά την καθίζηση ενώ η λάσπη απορρίπτεται για χώνευση, δεν παρατηρείται αύξηση της απόδοσης με την ανακύκλωση. Επομένως, η αξία της ανακύκλωσης βασίζεται στον εμπλουτισμό του αποβλήτου με μικροοργανισμούς, οπότε ο χρόνος επαφής του αποβλήτου με το φίλτρο δεν έχει πλέον τόσο μεγάλη σημασία, δηλαδή η επιφανειακή φόρτιση δεν επιδρά σημαντικά στην απόδοση.

Το βάθος του φίλτρου επηρεάζει τον χρόνο επαφής μεταξύ του αποβλήτου και των μικροοργανισμών, επομένως το ποσοστό του βιολογικού υμένα που αποκολλάται και αποβάλλεται στο απόβλητο εξαρτάται από το βάθος. Συνεπώς, το βάθος είναι παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση, καθώς επίσης και η θερμοκρασία, η οποία περιλαμβάνεται στην εξίσωση των Galler και Gotaas.

Για την ανάλυση με πολλαπλή παλινδρόμηση χρησιμοποιήθηκαν 322 σειρές μετρήσεων των μεταβλητών βάθους, θερμοκρασίας, επιφανειακής φόρτισης, ανακύκλωσης και οργανικής φόρτισης, που ελήφθησαν από την βιβλιογραφία και από μη δημοσιευμένες πηγές. Ο συντελεστής συσχέτισης που προέκυψε από την πολλαπλή παλινδρόμηση των δεδομένων είναι 0.974. Η εξίσωση υπολογισμού της απόδοσης βιολογικών φίλτρων με πληρωτικό υλικό από πέτρα είναι η εξής (Πηγή: WEF, 2000)

$$S_e = \frac{K \cdot (Q \cdot S_o + R \cdot Q \cdot S_e)^{1.19}}{[Q \cdot (1 + R)]^{0.78} \cdot (1 + D)^{0.67} \cdot a^{0.25}} \quad (6.1)$$

όπου:

$$K = \frac{0.464 \cdot \left( \frac{43560}{\pi} \right)^{0.13}}{Q^{0.28} \cdot T^{0.15}} \quad (6.2)$$

K: σταθερά που εξαρτάται από την θερμοκρασία και την παροχή του αποβλήτου

$S_e$ : BOD αποβλήτου μετά την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, mg/L

$S_0$ : BOD αποβλήτου που εισέρχεται στο βιολογικό φίλτρο, mg/L

D: βάθος φίλτρου, ft

Q: παροχή αποβλήτου, mgd ( $10^6$  γαλόνια ανά ημέρα)

R: λόγος αναρροής του αποβλήτου, αδιάστατο μέγεθος

a: ακτίνα του φίλτρου, ft

T: θερμοκρασία αποβλήτου, °C

Παρόλο που οι Galler και Gotaas θεωρούν ότι η επιφανειακή φόρτιση δεν επηρεάζει την απόδοση, εντούτοις την χρησιμοποιούν ως μεταβλητή αριστοποίησης του σχεδιασμού γιατί σχετίζεται άμεσα με την ακτίνα του φίλτρου, και επομένως επηρεάζει το κόστος κατασκευής. Ο ισχυρισμός ότι η επιφανειακή φόρτιση δεν επιδρά στην απόδοση δεν συμφωνεί με τα συμπεράσματα άλλων ερευνητών, εκτός του W. T. Ingram (1959) που υποστηρίζει ότι η απομάκρυνση του BOD σχετίζεται περισσότερο με το BOD του εισερχόμενου αποβλήτου, παρά με την επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου. Στις περισσότερες περιπτώσεις πάντως, οι μεγάλες τιμές επιφανειακής φόρτισης αντιστοιχούν και σε υψηλές τιμές οργανικής φόρτισης.

Δεχόμενοι ότι η επιφανειακή φόρτιση είναι δευτερεύουσας σημασίας για την απομάκρυνση του BOD, οι Galler και Gotaas καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι και ο χρόνος επαφής του αποβλήτου με την ενεργή επιφάνεια του φίλτρου είναι επίσης δευτερεύουσας σημασίας. Αυτό φαίνεται παράλογο, γιατί στην ουσία απαιτείται ένας ορισμένος χρόνος επαφής των μικροοργανισμών με το απόβλητο για την κατανάλωση του υποστρώματος. Οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι, στα μεγάλης φόρτισης βιολογικά φίλτρα, η αποκόλληση ενός μέρους του

βιολογικού υμένα από το πληρωτικό υλικό είναι συνεχής, δηλαδή ένα τμήμα των μικροοργανισμών είναι σε συνεχή επαφή με το απόβλητο μέχρι την τελική καθίζηση στην δευτεροβάθμια δεξαμενή. Επομένως, λαμβάνει χώρα μια διεργασία αντίστοιχη με εκείνη της ενεργού ιλύος και ο χρόνος επαφής είναι στην πραγματικότητα μεγαλύτερος από αυτόν που απαιτείται για την διέλευση του αποβλήτου μέσα από το φίλτρο.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι σύμφωνα με τους Galler και Gotaas, ο λόγος αναρροής επιδρά σημαντικά στην απόδοση, εφόσον μαζί με το υγρό απόβλητο ανακυκλώνεται και η λάσπη από την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης και επιστρέφει στην πρωτοβάθμια δεξαμενή, ώστε να αυξάνεται περαιτέρω ο χρόνος επαφής του αποβλήτου με τους μικροοργανισμούς. Πάντως η αύξηση του λόγου αναρροής  $R$  πάνω από την τιμή 4:1, δεν επιφέρει περαιτέρω αύξηση της απόδοσης, ενώ η οικονομικά βέλτιστη τιμή του λόγου αναρροής είναι αρκετά μικρότερη. Τα συμπεράσματα αυτά μάλιστα, είναι σε συμφωνία με τα αντίστοιχα της μελέτης του NRC (Mohlman et al., 1946). Σύμφωνα με τους ερευνητές, η σημαντικότερη επίδραση της ανακύκλωσης του αποβλήτου είναι η τροφοδοσία του νέου αποβλήτου με μικροοργανισμούς κατανάλωσης του υποστρώματος από την λάσπη της δευτεροβάθμιας δεξαμενής, και όχι η αραιώση του εισερχόμενου αποβλήτου ή η αύξηση της επιφανειακής φόρτισης του φίλτρου όπως υποστηρίζεται σε άλλες δημοσιεύσεις.

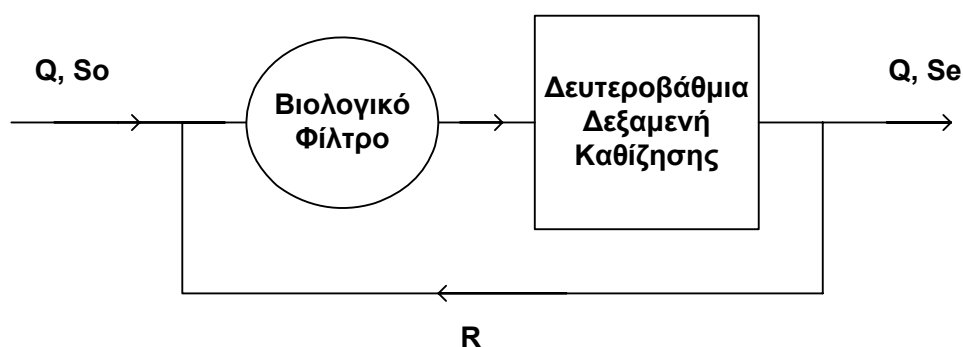
Το βάθος του φίλτρου επίσης επιδρά σημαντικά στην απόδοση του φίλτρου, ενώ ο εκθέτης 0.67 στην εξίσωση Galler και Gotaas, εκφράζει το γεγονός ότι το ποσοστό απομάκρυνσης του BOD δεν είναι σταθερό συναρτήσει του βάθους, αλλά μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος. Η παρατήρηση συμφωνεί και με τα συμπεράσματα του Eckenfelder, και εξηγείται από το ότι οι ουσίες του αποβλήτου που βιοδιασπώνται πιο εύκολα καταναλώνονται σε μικρότερο βάθος του φίλτρου, ενώ οι ρύποι που διασπώνται πιο δύσκολα είναι εκείνοι που φθάνουν σε μεγαλύτερο βάθος του φίλτρου.

Η θερμοκρασία επίσης θεωρείται σημαντικός παράγοντας στην απομάκρυνση του BOD. Η δραστηριότητα των μικροοργανισμών κατανάλωσης του υποστρώματος αυξάνεται μέχρι ενός ορίου με την αύξηση της θερμοκρασίας και μειώνεται με την πτώση της. Οι Galler και Gotaas περιέλαβαν την θερμοκρασία στην εξίσωσή τους ως παράμετρο σχεδιασμού, έτσι ώστε να αυξήσουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Τέλος, η σημαντικότερη παράμετρος που επηρεάζει το BOD εξόδου του αποβλήτου, θεωρείται από τους Galler και Gotaas το BOD εισόδου στο σύστημα.

### 6.1 Λογισμικό συσχέτισης απόδοσης – λόγου αναρροής

Προκειμένου να μελετήσουμε την επίδραση του λόγου αναρροής στην απόδοση ενός βιολογικού φίλτρου βάσει της εξίσωσης Galler και Gotaas, κατασκευάστηκε ένα λογισμικό σε γλώσσα Fortran το οποίο, βάσει επαναληπτικής διαδικασίας και με δεδομένες τιμές των παραμέτρων εισόδου, υπολογίζει την μεταβολή της απόδοσης ως συνάρτηση του λόγου αναρροής  $R$ . Η διάταξη του συστήματος στο οποίο βασίζεται το λογισμικό είναι πολύ απλή και εικονίζεται στο Σχήμα 6.1. Αποτελείται από ένα βιολογικό φίλτρο που ακολουθείται από δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, μετά την οποία μέρος του επεξεργασμένου αποβλήτου ανακυκλώνεται στο βιολογικό φίλτρο. Επειδή μας ενδιαφέρει η εκτίμηση της απόδοσης του βιολογικού φίλτρου και όχι του συνολικού συστήματος επεξεργασίας, θεωρούμε ότι το απόβλητο έχει ήδη περάσει από πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης και δεν την λαμβάνουμε υπόψη στο συγκεκριμένο πρόβλημα.



**Σχήμα 6.1:** Διάταξη επεξεργασίας αστικού αποβλήτου με ένα βιολογικό φίλτρο.

Ως παράμετροι εισόδου του προβλήματος (σχεδιαστικές παράμετροι) θεωρούνται η παροχή του αποβλήτου, το BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο (χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ανακύκλωση), η διάμετρος και το βάθος του

πύργου με το πληρωτικό υλικό, και η θερμοκρασία του αποβλήτου. Επίσης, λαμβάνουμε υπόψη τα όρια της επιφανειακής και της οργανικής φόρτισης, ώστε να συμβαδίζουν με τους περιορισμούς του Πίνακα 1. Οι τιμές των παραμέτρων εισόδου αναφέρονται στον Πίνακα 6.

Από την διάμετρο του φίλτρου υπολογίζεται η διατομή του μέσω της σχέσης:

$$A = \frac{\pi \cdot Diam^2}{4} \quad (6.3)$$

A: η επιφάνεια (κάθετη διατομή) του φίλτρου, m<sup>2</sup>

Diam: η διάμετρος του βιολογικού φίλτρου, m

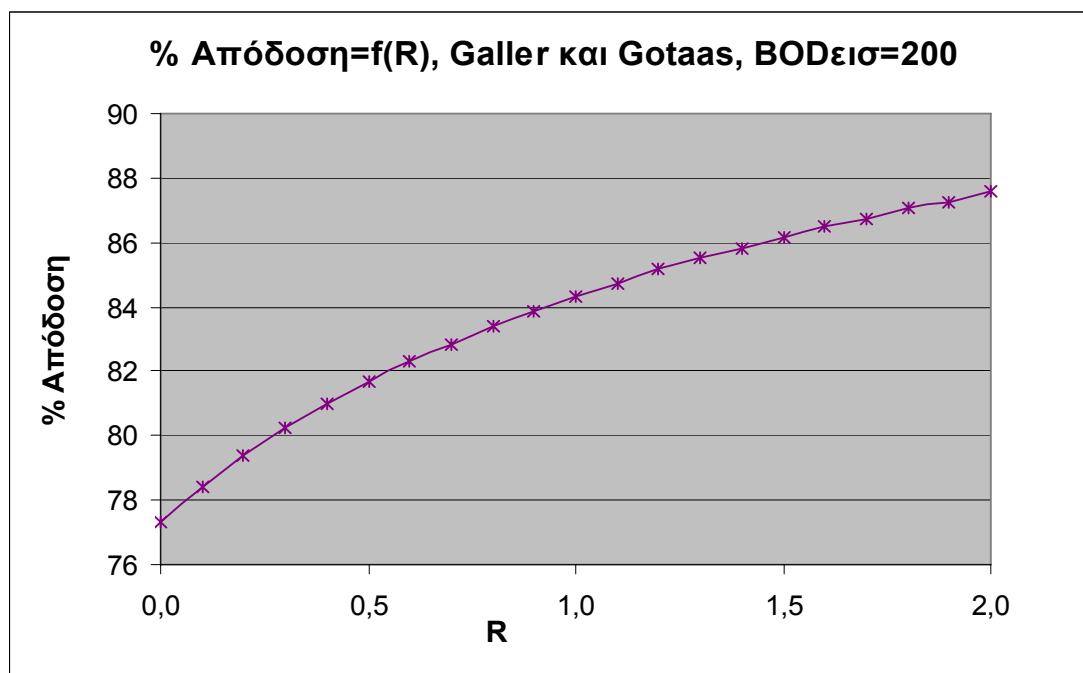
Η επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου προκύπτει από την σχέση (5.17), εφόσον γνωρίζουμε την διατομή του και την παροχή του αποβλήτου, ενώ από την σχέση (5.15) υπολογίζουμε το όγκο του πληρωτικού υλικού. Το φορτίο BOD του φίλτρου υπολογίζεται από την σχέση (5.12), και η οργανική φόρτιση μέσω της σχέσης (5.14). Το φορτίο BOD του φίλτρου υπολογίζεται προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της οργανικής φόρτισης, για την οποία, όπως αναφέραμε, δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της ανακύκλωσης. Άλλωστε, τα όρια μέσα στα οποία λαμβάνει τιμές η οργανική φόρτιση που αναφέρονται στον Πίνακα 1 από την πηγή (α) (Metcalf & Eddy, 2003) είναι γενικά, δηλαδή ισχύουν ανεξαρτήτως από το αν λαμβάνεται υπόψη ή όχι η ανακύκλωση. Αυτό δικαιολογείται από το ότι εφόσον διαχωρίσουμε τις περιπτώσεις όπου λαμβάνεται υπόψη η ανακύκλωση και όπου δεν λαμβάνεται, τα όρια τιμών που προκύπτουν στις δύο περιπτώσεις δεν έχουν μεγάλες διαφορές (βλέπε Πίνακα 1, πηγές (β) και (γ)). Όπως αναφέραμε, ο συνυπολογισμός της ανακύκλωσης στην τιμή του BOD του αποβλήτου που εισέρχεται στο βιολογικό φίλτρο και συνεπώς στην οργανική φόρτιση, αυξάνει αρκετά την πολυπλοκότητα του προβλήματος, γι' αυτό στις περισσότερες περιπτώσεις δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδρασή της. Αντ' αυτού, πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν στις εμπειρικές εξισώσεις κάποιον παράγοντα ανακύκλωσης. Στην προκειμένη περίπτωση, στην εξίσωση Galler και Gotaas συμπεριλαμβάνεται ο λόγος αναρροής R, επομένως για τις υπόλοιπες μεταβλητές εισόδου της εξίσωσης χρησιμοποιούνται τιμές που δεν λαμβάνουν υπόψη την ανακύκλωση.

Η σταθερά  $K$  της εξίσωσης Galler και Gotaas υπολογίζεται μέσω της σχέσης (6.2), εφόσον γνωρίζουμε την παροχή και την θερμοκρασία του αποβλήτου (η παροχή πρέπει να μετατραπεί σε μονάδες  $\text{mgd}$  πριν εισαχθεί στην εξίσωση 6.2). Στην συνέχεια, μέσω μια επαναληπτικής διαδικασίας γίνεται σταδιακή αύξηση του λόγου αναρροής  $R$  από την τιμή 0 έως 2, με βήμα 0.1, και για κάθε τιμή του  $R$  υπολογίζεται το BOD του επεξεργασμένου αποβλήτου μέσω της εξίσωσης (6.1). Όλα τα χρησιμοποιούμενα μεγέθη, επειδή τα δεδομένα των παραμέτρων εισόδου είναι στο Διεθνές Σύστημα μονάδων, πρέπει να μετατραπούν στις αντίστοιχες μονάδες της εξίσωσης (6.1) πριν εισαχθούν σε αυτήν. Πράγματι, επειδή οι μονάδες της εξίσωσης Galler και Gotaas είναι στο Αμερικάνικο Μετρικό Σύστημα, μέσα στο τμήμα του λογισμικού προσομοίωσης που αντιστοιχεί στην εξίσωση (6.1) συμπεριλαμβάνονται οι κατάλληλες σταθερές που μετατρέπουν τις τιμές των εισερχόμενων μεταβλητών από το Διεθνές Σύστημα στο Αμερικάνικο Μετρικό προκειμένου να γίνουν σωστά οι υπολογισμοί. Η τιμή της απόδοσης του φίλτρου υπολογίζεται από την σχέση (5.11), ενώ για κάθε τιμή του λόγου αναρροής εκτιμάται και η συνολική επιφανειακή φόρτιση (σχέση (5.18)), έτσι ώστε να διαπιστωθεί αν βρίσκεται μέσα στα αποδεκτά όρια.



### 6.1.1 Αποτελέσματα λογισμικού

Τα αποτελέσματα υπολογισμού της απόδοσης του βιολογικού φίλτρου της διάταξης του Σχήματος 6.1 όπως υπολογίζονται από το εν λόγω λογισμικό, απεικονίζονται στο Σχήμα 6.2.



**Σχήμα 6.2:** Υπολογισμός απόδοσης βιολογικού φίλτρου (με δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης), βάσει της εξίσωσης Galler και Gotaas.

## 7. Η ΕΞΙΣΩΣΗ VELZ

Η γενική θεωρία πάνω στην οποία βασίστηκε ο Velz (1948), για να περιγράψει την λειτουργία μιας βιολογικής κλίνης όπως είναι τα βιολογικά φίλτρα είναι ότι ο ρυθμός κατανάλωσης του οργανικού υλικού ανά μονάδα βάθους της κλίνης, είναι ανάλογος του εναπομένοντος κλάσματος και εξαρτάται από την ικανότητα απομάκρυνσης της κλίνης.

Η εξίσωση που περιγράφει την ανωτέρω θεωρία διατυπώθηκε από τον Velz (C. J. Velz, 1948) και είναι η εξής:

$$\frac{S_D}{S} = 10^{-kD} \quad (7.1)$$

όπου:

S: το συνολικό προς απομάκρυνση BOD, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ανακύκλωση, mg/L

S<sub>D</sub> : το BOD που εξέρχεται από βιολογικό φίλτρο βάθους D, mg/L

D: το βάθος της κλίνης, ft

k: σταθερά

Σύμφωνα με τον Velz, η μάζα του βιολογικού υμένα που αναπτύσσεται, ο ρυθμός αποκόλλησής της και ο χρόνος επαφής του αποβλήτου με τον βιολογικό υμένα εξαρτάται από την επιφανειακή φόρτιση. Ο Velz υποστηρίζει ότι το κλάσμα του BOD που μπορεί να επεξεργαστεί βιολογικά μειώνεται με την αύξηση της επιφανειακής φόρτισης.

Η εργασία του Velz αφορά στον προσδιορισμό της σταθεράς k, βάσει σειράς πειραματικών δεδομένων που αφορούν στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων με βιολογικά φίλτρα. Η σταθερά k προσδιορίστηκε στην τιμή 0.1505 για φίλτρα μεγάλης φόρτισης (βλ. Πίνακα 1), και στην τιμή 0.175 για φίλτρα χαμηλής φόρτισης. Επομένως, δεν δίνεται μια ενιαία τιμή της σταθεράς k για όλα τα βιολογικά φίλτρα, αλλά χρησιμοποιείται ο ξεπερασμένος σήμερα διαχωρισμός σε φίλτρα χαμηλής και μεγάλης φόρτισης.

## 7.1 Τροποποιημένη εξίσωση Velz

Η εργασία των Gromiec και Malina (1970) βασίστηκε σε παλαιότερες προσπάθειες (Eckenfelder and Barnhart, 1963), συσχετισμού της απόδοσης των βιολογικών φίλτρων με την ειδική επιφάνεια του πληρωτικού υλικού, δηλαδή την επιφάνεια ανά μονάδα όγκου ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ). Η εξίσωση που διατύπωσαν λαμβάνοντας υπόψη και την ανακύκλωση του αποβλήτου στο φίλτρο, εκφρασμένη στην παρακάτω μορφή, είναι γνωστή ως τροποποιημένη εξίσωση Velz (Πηγή: WEF, 2000):

$$S_e = \frac{S_0}{(R+1) \cdot \exp\left(\frac{k_{20} \cdot A_s \cdot D \cdot \theta^{T-20}}{[q \cdot (R+1)]^n}\right)} - R \quad (7.2)$$

όπου:

$S_e$ : BOD εξερχόμενου αποβλήτου,  $\text{mg/L}$

$S_0$ : BOD εισερχόμενου αποβλήτου χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ανακύκλωση,  $\text{mg/L}$

$R$ : λόγος αναρροής αποβλήτου

$k_{20}$ : σταθερά ικανότητας επεξεργασίας του φίλτρου στους  $20^\circ\text{C}$ ,  $(\text{L/s})^{0.5}/\text{m}^2$  (βάσει της παραδοχής ότι  $n=0.5$ )

$A_s$ : ειδική επιφάνεια του πληρωτικού υλικού,  $\text{m}^2/\text{m}^3$

$D$ : βάθος πληρωτικού υλικού,  $\text{m}$

$\theta$ : συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας, 1.035

$q$ : επιφανειακή φόρτιση φίλτρου,  $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$

$n$ : χαρακτηριστική σταθερά του πληρωτικού υλικού (συνήθως λαμβάνεται ίση με 0.5)

Επειδή στην εξίσωση (7.2) χρησιμοποιείται η ειδική επιφάνεια του πληρωτικού υλικού, δηλαδή η επιφάνεια ανά μονάδα όγκου του ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ), πρέπει να προσδιορίσουμε το είδος του πληρωτικού υλικού που χρησιμοποιείται στην εγκατάσταση επεξεργασίας που μελετάμε, οπότε καθορίζεται ανάλογα και η τιμή της ειδικής επιφάνειας. Στοιχεία για την ειδική επιφάνεια και άλλες βασικές παραμέτρους ορισμένων ειδών πληρωτικού υλικού που είναι κατάλληλα για την απομάκρυνση του BOD, με την οποία ασχολούμαστε στην παρούσα εργασία, αναφέρονται στον Πίνακα 7 (Πηγή: Metcalf & Eddy, 2003). Τα είδη πληρωτικού υλικού που αναφέρονται στον

πίνακα είναι κατάλληλα για την απομάκρυνση BOD, για νιτροποίηση ή για συνδυασμό των δύο μορφών επεξεργασίας. Υπάρχουν και άλλα είδη που χρησιμοποιούνται μόνο σε εφαρμογές τριτογενούς νιτροποίησης.

**Πίνακας 7:** Φυσικές ιδιότητες πληρωτικού υλικού βιολογικών φίλτρων

Πληρωτικό Υλικό	Ονομαστικό Μέγεθος (cm)	Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	Ειδική Επιφάνεια (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
Ποταμίσιες πέτρες (μεγάλες)	10 – 13	800 – 1,000	45
Πλαστικό καθορισμένης δομής (συμβατικό)	61 x 61 x 122	30 – 80	90
Πλαστικό τυχαίας διάταξης (συμβατικό)	Ποικίλλει	30 – 60	98

## 7.2 Διόρθωση συντελεστή k

Επειδή η απομάκρυνση του BOD στην τροποποιημένη εξίσωση Velz καθορίζεται ως συνάρτηση της επιφανειακής φόρτισης, η εφαρμογή της χωρίς να ληφθεί υπόψη η επίδραση της οργανικής φόρτισης μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένους υπολογισμούς. Με αύξηση του βάθους του πληρωτικού υλικού πάνω από 6.1m, ο όγκος του υπολογιζόμενου πληρωτικού υλικού είναι μικρότερος αυτού που απαιτείται στην πραγματικότητα. Αυτό γίνεται γιατί καθώς μειώνεται ο όγκος, αυξάνεται η οργανική φόρτιση και η απόδοση επεξεργασίας μειώνεται. Υποθέτοντας ότι η απόδοση είναι σταθερή για σταθερή οργανική φόρτιση, μπορεί να γίνει προσαρμογή της τιμής του k ανάλογα με το βάθος του φίλτρου και την συγκέντρωση BOD εισόδου του αποβλήτου, σύμφωνα με την εξής σχέση (WEF, 2000):

$$k_2 = k_1 \cdot \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{0.5} \cdot \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^{0.5} \quad (7.3)$$

όπου:

$k_2$ : κανονικοποιημένη τιμή του συντελεστή  $k$  για ορισμένο βάθος πληρωτικού υλικού και ορισμένη συγκέντρωση BOD εισόδου

$k_1$ : τιμή του συντελεστή  $k$  για βάθος πληρωτικού υλικού 6.1m και συγκέντρωση BOD εισόδου 150mg/L

$S_1$ : 150mg BOD/L

$S_2$ : συγκέντρωση BOD του αποβλήτου σε ορισμένο βάθος πληρωτικού υλικού, mg/L

$D_1$ : βάθος πληρωτικού υλικού 6.1m

$D_2$ : βάθος πληρωτικού υλικού σε ορισμένο σημείο, m

Για τον προσδιορισμό των κανονικοποιημένων τιμών του  $k_1$  στους 20°C, έγινε μια σειρά πειραμάτων σε εγκαταστάσεις της Dow Chemical Company (WEF, 2000), οπότε προέκυψαν διαφορετικές τιμές για κάθε είδος αποβλήτου. Για τα αστικά απόβλητα, η τιμή που προέκυψε για το  $k$  είναι  $0.210 \text{ (L/s)}^{0.5}/\text{m}^2$ , βάσει της παραδοχής ότι για την σταθερά  $n$  ισχύει  $n=0.5$ , για θερμοκρασία αποβλήτου 20°C. Προκειμένου να αντιπροσωπεύει το συγκεκριμένο φίλτρο που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση επεξεργασίας αστικού αποβλήτου με σύστημα βιολογικών φίλτρων, η σταθερά  $k_{20}$  κανονικοποιείται βάσει της εξίσωσης (7.3) για το BOD εισόδου και το ύψος πύργου που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση.

### **7.3 Λογισμικό συσχέτισης απόδοσης – λόγου αναρροής**

Για την μελέτη της επίδρασης του λόγου αναρροής στην απόδοση ενός βιολογικού φίλτρου βάσει της εξίσωσης Velz, κατασκευάστηκε λογισμικό σε γλώσσα Fortran. Οι υπόλοιπες μεταβλητές της εξίσωσης (7.1) θεωρούνται ως παράμετροι και έχουν καθορισμένες τιμές. Όπως αναφέραμε, ο Velz ορίζει διαφορετικές τιμές για την σταθερά  $k$  ανάλογα με το αν η φόρτιση του φίλτρου είναι χαμηλή ή υψηλή. Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήσαμε στο λογισμικό σε καθεμία από τις δύο περιπτώσεις καταγράφονται στους δύο πίνακες που ακολουθούν.

**Πίνακας 8:** Δεδομένα εισόδου λογισμικού  $E = f(R)$  βάσει της εξίσωσης Velz, για φίλτρο χαμηλής φόρτισης με πληρωτικό υλικό από πέτρα.

Δεδομένα Εισόδου λογισμικού $E=f(R)$	
Σταθερά $k$	0.175
Παροχή αποβλήτου ( $m^3/d$ )	7,000
BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο (mg/L)	200
Ύψος φίλτρου (m)	2.4
Διάμετρος φίλτρου (m)	60
Θερμοκρασία αποβλήτου ( $^{\circ}C$ )	20
Εύρος επιφανειακής φόρτισης ( $m^3/m^2 \cdot d$ )	1 – 4*
Εύρος οργανικής φόρτισης ( $kg\ BOD/m^3 \cdot d$ )	0.07 – 0.22*

\* Τα όρια τιμών επιφανειακής και οργανικής φόρτισης έχουν ληφθεί από τον Πίνακα 1, πηγή (α) (Metcalf & Eddy, 2003)

**Πίνακας 9:** Δεδομένα εισόδου λογισμικού  $E = f(R)$  βάσει της εξίσωσης Velz, για φίλτρο υψηλής φόρτισης με πληρωτικό υλικό από πέτρα.

Δεδομένα Εισόδου λογισμικού $E=f(R)$	
Σταθερά $k$	0.1505
Παροχή αποβλήτου ( $m^3/d$ )	15,000
BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο (mg/L)	200
Ύψος φίλτρου (m)	2.4
Διάμετρος φίλτρου (m)	60
Θερμοκρασία αποβλήτου ( $^{\circ}C$ )	20
Εύρος επιφανειακής φόρτισης ( $m^3/m^2 \cdot d$ )	10 – 40
Εύρος οργανικής φόρτισης ( $kg\ BOD/m^3 \cdot d$ )	0.4 – 2.4

\* Τα όρια τιμών επιφανειακής και οργανικής φόρτισης έχουν ληφθεί από τον Πίνακα 1, πηγή (α) (Metcalf & Eddy, 2003)

Η διάταξη επεξεργασίας υγρού αστικού αποβλήτου που προσομοιώνει το λογισμικό είναι αυτή του Σχήματος 6.1, δηλαδή περιλαμβάνει βιολογικό φίλτρο με δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, μετά την οποία μέρος του αποβλήτου ανακυκλώνεται στο φίλτρο.

Από τα δεδομένα των Πινάκων 8 και 9 υπολογίζουμε και τις υπόλοιπες μεταβλητές του φίλτρου. Από την διάμετρο υπολογίζουμε την διατομή βάσει της σχέσης (6.3), και εν συνεχεία υπολογίζουμε τον όγκο του πληρωτικού υλικού από την (5.15). Από την παροχή του αποβλήτου προκύπτει η επιφανειακή φόρτιση μέσω της (5.17), και το φορτίο BOD (kg/d) του φίλτρου μέσω της (5.12) και του BOD εισόδου του αποβλήτου στο φίλτρο, χωρίς να υπολογίζεται η επίδραση της ανακύκλωσης στην τιμή του. Τέλος, από τον όγκο του πληρωτικού υλικού και την (5.14) προκύπτει η οργανική φόρτιση του φίλτρου.

Η επαναληπτική διαδικασία του λογισμικού αυξάνει τον λόγο αναρροής R από 0 έως 2, με βήμα 0.1. Για κάθε τιμή του R υπολογίζεται η ολική επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου από την σχέση (5.18). Ανάλογα με την τιμή της ολικής επιφανειακής φόρτισης που προκύπτει και για την οργανική φόρτιση που έχουμε υπολογίσει, χρησιμοποιούμε την αντίστοιχη τιμή της σταθεράς k στην εξίσωση (7.1), από την οποία προκύπτει το BOD εξόδου από το σύστημα σε καθεμία από τις δύο περιπτώσεις. Το ύψος του φίλτρου προκειμένου να χρησιμοποιηθεί στην εξίσωση (7.1) μετατρέπεται σε μονάδες ft. Τέλος, από την (5.11) εκτιμάται η απόδοση του φίλτρου με κροκάλες χαμηλής και υψηλής φόρτισης, βάσει της εξίσωσης Velz, για τα δεδομένα εισόδου των Πινάκων 8 και 9.

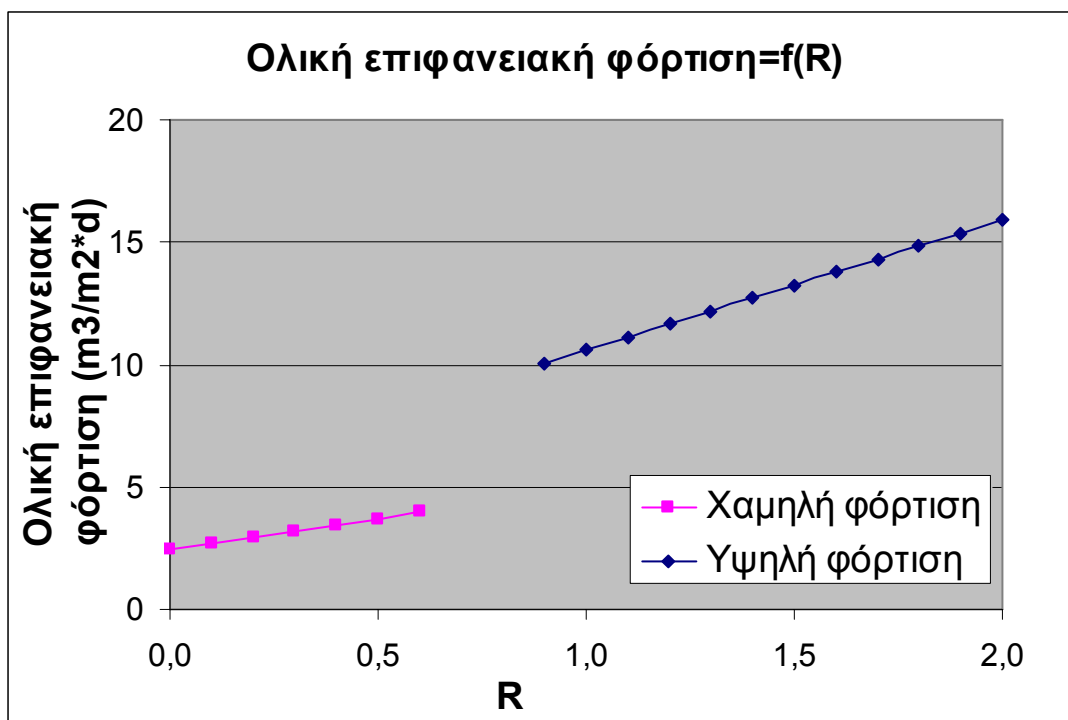
### 7.3.1 Αποτελέσματα λογισμικού

Βάσει του λογισμικού που περιγράψαμε, έγινε προσομοίωση επεξεργασίας αστικού αποβλήτου με την διάταξη του Σχήματος 6.1 για φίλτρο με κροκάλες. Για φίλτρο χαμηλής φόρτισης χρησιμοποιήσαμε τα δεδομένα εισόδου του Πίνακα 8, οπότε προκύπτουν τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την οργανική και την επιφανειακή φόρτιση, το BOD του επεξεργασμένου αποβλήτου και την απόδοση του φίλτρου. Η εξίσωση του Velz περιγράφει τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε μια βιολογική κλίνη, επομένως το BOD εξόδου δεν συνυπολογίζει την δευτεροβάθμια καθίζηση. Η τιμή της οργανικής φόρτισης υπολογίστηκε  $0.206 \text{ kg/m}^3\cdot\text{d}$  (εντός των ορίων της χαμηλής

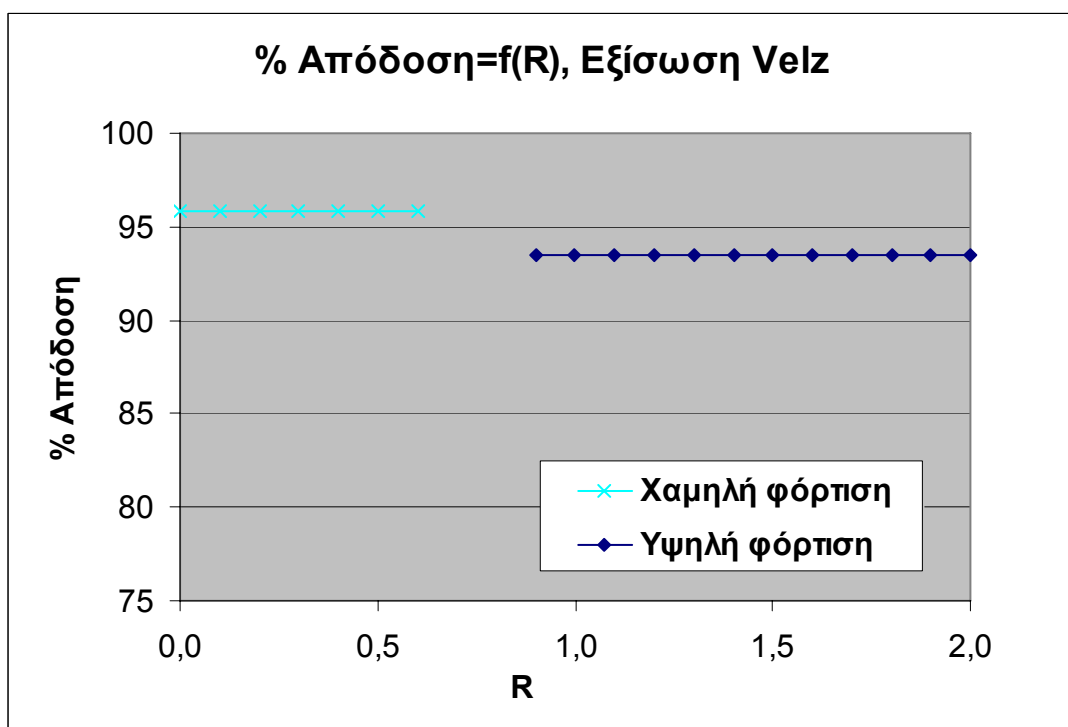
φόρτισης), και έχει σταθερή τιμή γιατί δεν λαμβάνουμε υπόψη την επίδραση της ανακύκλωσης σε αυτήν. Η τιμή της ολικής επιφανειακής φόρτισης αυξάνεται με την αύξηση του λόγου αναρροής  $R$ , και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που αντιστοιχούν σε τιμές μεγαλύτερες από  $4 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$  απορρίπτονται (Βλέπε όρια επιφανειακής φόρτισης Πίνακα 8). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το λογισμικό αφορούν στην μεταβολή της απόδοσης και του BOD του επεξεργασμένου αποβλήτου συναρτήσει του λόγου αναρροής. Παρατηρούμε ότι τα μεγέθη αυτά δεν μεταβάλλονται με την αύξηση του  $R$ , αλλά η μόνη επίδραση αφορά στην ολική επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου, δηλαδή στην κατάταξή του σε χαμηλής ή υψηλής φόρτισης, αλλά και στην τιμή της σταθεράς  $k$  που χρησιμοποιείται.

Αντίστοιχα, για φίλτρο υψηλής φόρτισης χρησιμοποιούμε τα δεδομένα εισόδου του Πίνακα 9, και επαναλαμβάνουμε τα βήματα που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Η τιμή της οργανικής φόρτισης προκύπτει  $0.442 \text{ kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$  (εντός των ορίων της υψηλής φόρτισης). Τα αποτελέσματα που αφορούν στην απόδοση του φίλτρου και στο BOD εξόδου από το βιολογικό φίλτρο και αντιστοιχούν σε ολική επιφανειακή φόρτιση μικρότερη από  $10 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$  απορρίπτονται γιατί δεν αντιστοιχούν σε φίλτρο υψηλής φόρτισης (Πίνακας 9). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επεξεργασίας αστικού αποβλήτου με φίλτρο με κροκάλες χαμηλής και υψηλής φόρτισης βάσει της εξίσωσης Velz απεικονίζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν. Τα αποτελέσματα αφορούν στην ολική επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου (Σχήμα 71.), στην απόδοση του φίλτρου χωρίς να συνυπολογίζεται η επίδραση της δευτεροβάθμιας δεξαμενής (Σχήμα 7.2), και στο BOD εξόδου του επεξεργασμένου αποβλήτου από το βιολογικό φίλτρο (Σχήμα 7.3).

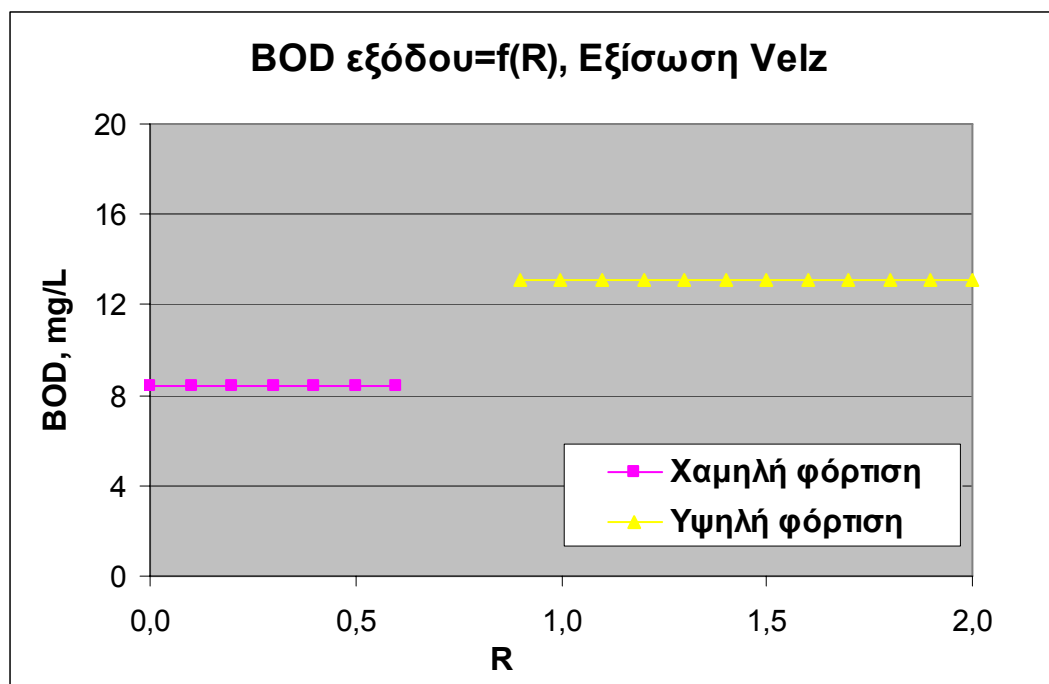




Σχήμα 7.1: Ολική επιφανειακή φόρτιση για βιολογικό φίλτρο με κροκάλες, χαμηλής και υψηλής φόρτισης, βάσει της εξίσωσης Velz.



Σχήμα 7.2: Απόδοση βιολογικού φίλτρου με κροκάλες, χαμηλής και υψηλής φόρτισης, βάσει της εξίσωσης Velz.

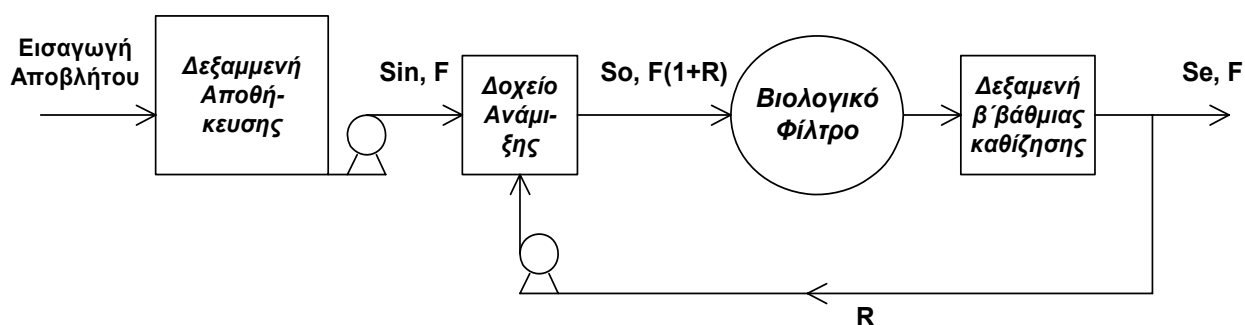


Σχήμα 7.3: BOD εξόδου αστικού αποβλήτου για επεξεργασία με βιολογικό φίλτρο με κροκάλες, χαμηλής και υψηλής φόρτισης, βάσει της εξίσωσης Velz.

Από τα Σχήματα 7.2 και 7.3 προκύπτει ότι η απόδοση που υπολογίζει η εξίσωση Velz για την επεξεργασία αστικού αποβλήτου με βιολογικό φίλτρο με κροκάλες είναι εξαιρετικά υψηλή. Για το φίλτρο χαμηλής φόρτισης προκύπτει απόδοση περίπου 96% για τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήσαμε, ενώ για το φίλτρο υψηλής φόρτισης προκύπτει περίπου 93,5%. Αντίστοιχα, οι τιμές που υπολογίζονται για το BOD του επεξεργασμένου αποβλήτου είναι πολύ χαμηλές, 8.4 (χαμηλής φόρτισης) και 13mg/L (υψηλής φόρτισης), δεδομένου μάλιστα ότι δεν συνυπολογίζεται η επίδραση της δευτεροβάθμιας δεξαμενής καθίζησης. Η εξίσωση Velz δεν είναι άμεσα συγκρίσιμη με τις υπόλοιπες εμπειρικές εξισώσεις με τον τρόπο που περιγράφεται στο κεφάλαιο 12. Αυτό οφείλεται στο ότι χρησιμοποιεί διαφορετικές τιμές για την σταθερά  $k$  για φίλτρα υψηλής και χαμηλής φόρτισης και επομένως τα δεδομένα εισόδου είναι διαφορετικά στις δύο περιπτώσεις προκειμένου η επιφανειακή και οργανική φόρτιση να βρίσκονται εντός των αντίστοιχων ορίων κατάταξης. Επίσης, δεν συνυπολογίζει την επίδραση της δευτεροβάθμιας δεξαμενής καθίζησης. Πάντως, από τα αποτελέσματα των άλλων εμπειρικών εξισώσεων όπως καταγράφονται στο κεφάλαιο 12, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι τιμές της απόδοσης που υπολογίζονται βάσει της εξίσωσης Velz είναι μάλλον υπερβολικά υψηλά.

## 8. Η ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΟΥ SCHULZE

Η διάταξη στην οποία βασίστηκε ο Schulze (1960), για να εξαγάγει την εξίσωσή του αποτελείται από ένα πύργο στον οποίο ως πληρωτικό υλικό χρησιμοποιούνται κάθετα αιωρούμενα συρμάτινα πλέγματα, τοποθετημένα παράλληλα μεταξύ τους, μία δεξαμενή τροφοδοσίας του φίλτρου με απόβλητο, δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης που ακολουθεί το φίλτρο, καθώς και αντλία ανακυκλοφορίας μέρους του αποβλήτου που έχει καθιζήσει στην δευτεροβάθμια δεξαμενή. Στόχος της επεξεργασίας των πειραματικών δεδομένων της παραπάνω διάταξης είναι η μελέτη της σχέσης που έχουν τόσο η επιφανειακή όσο και η οργανική φόρτιση του φίλτρου με την απόδοση απομάκρυνσης του BOD. Το διάγραμμα του συστήματος που χρησιμοποίησε ο Schulze φαίνεται στο Σχήμα 8.1.



**Σχήμα 8.1:** Σχεδιάγραμμα της διάταξης που χρησιμοποίησε ο Schulze για τα πειράματά του. Η παροχή του αποβλήτου στο σύστημα είναι  $F$  και η αρχική συγκέντρωση BOD είναι  $S_0$ .

Η συμπεριφορά των αποβλήτων που μελετήθηκε αντιστοιχεί σε αστικά και σε βιομηχανικά απόβλητα, γιατί το εύρος του εισερχόμενου BOD κυμαίνεται από 100 έως 2,000 mg/L. Το πάχος του βιολογικού υμένα που αναπτύσσεται πάνω στο πλέγμα, όταν το εισερχόμενο BOD είναι από 200 έως 2,000 mg/L, φθάνει τα 6 έως 8mm σε κάθε πλευρά, ενώ όταν η τιμή του εισερχόμενου BOD είναι γύρω στα 100 mg/L, φθάνει μέχρι 1 έως 2mm αντίστοιχα. Δεν υπάρχει ειδική διάταξη αερισμού του συστήματος, επομένως η μεταφορά του οξυγόνου στο βιολογικό στρώμα γίνεται με διάχυση· αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση που το πάχος του στρώματος είναι μεγάλο, υπάρχουν περιοχές αερόβιας και αναερόβιας επεξεργασίας του οργανικού υποστρώματος.

Οι διαστάσεις καθενός από τα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι 0.9m x 1.83m, ενώ ο συνολικός όγκος που καταλαμβάνουν είναι 0.51m<sup>3</sup>, επομένως η όλη διάταξη αντιστοιχεί σε εργαστηριακή κλίμακα. Η ελάχιστη επιφανειακή φόρτιση που χρησιμοποιήθηκε είναι 4.09 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*d).

Μελετώντας την επίδραση της οργανικής φόρτισης στην απόδοση, ο Schulze πραγματοποίησε μία σειρά πειραμάτων με σταθερή επιφανειακή φόρτιση 5.11m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*d), μεταβάλλοντας σταδιακά το BOD του εισερχόμενου αποβλήτου έτσι ώστε η οργανική φόρτιση να κυμαίνεται από 0.28 έως 2.73 kg BOD/(m<sup>3</sup>\*d). Βάσει των αποτελεσμάτων κατασκεύασε ένα διάγραμμα απομάκρυνσης BOD συναρτήσει της οργανικής φόρτισης [kg BOD/(m<sup>3</sup>\*d)], στο οποίο η προσαρμογή των δεδομένων σε μία ευθεία, της οποίας η κλίση αντιστοιχεί στην απόδοση, είναι πολύ καλή. Επομένως, ο Schulze εξήγαγε το συμπέρασμα ότι για το παραπάνω εύρος τιμών BOD, η οργανική φόρτιση δεν επηρεάζει την απόδοση, που προέκυψε ίση με 0.744 σε όλες τις περιπτώσεις.

Μία δεύτερη σειρά πειραμάτων πραγματοποιήθηκε σε σταθερή επιφανειακή φόρτιση 7.53 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*d), με μεταβαλλόμενη οργανική φόρτιση από 2.67 έως 6.47 kg BOD/(m<sup>3</sup>\*d), και BOD μεταβαλλόμενο από 600 έως 1,560 mg/L, που αντιστοιχεί σε βιομηχανικά απόβλητα. Στην περίπτωση αυτή η απόδοση υπολογίστηκε και πάλι περίπου σταθερή, ίση με 0.656, χωρίς να επηρεάζεται από την μεταβολή του BOD και της οργανικής φόρτισης.

Συγκρίνοντας τις δύο παραπάνω σειρές πειραμάτων που και οι δύο μαζί καλύπτουν ένα εύρος οργανικού φορτίου από 0.28 έως 6.47 kg BOD/(m<sup>3</sup>\*d), προκύπτει ότι με την αύξηση του οργανικού φορτίου δεν μειώνεται η απόδοση απομάκρυνσης BOD του φίλτρου. Αντίθετα, η αύξηση της επιφανειακής φόρτισης επιφέρει μείωση της απόδοσης, και ο Schulze απέδειξε ότι η μείωση αυτή είναι στατιστικά σημαντική, δεν οφείλεται δηλαδή σε στατιστικό σφάλμα. Ο Schulze διεξήγαγε και άλλες σειρές πειραμάτων με σταθερή επιφανειακή φόρτιση και μεταβαλλόμενο οργανικό φορτίο, οπότε προέκυψε η ίδια περίπου τιμή της απόδοσης. Έτσι, υποστήριξε το συμπέρασμά του ότι η απόδοση του βιολογικού φίλτρου μειώνεται με αύξηση της επιφανειακής φόρτισης και δεν επηρεάζεται από την αύξηση της οργανικής φόρτισης, εφόσον αυτή δεν υπερβαίνει τα 6.47 kg BOD/(m<sup>3</sup>\*d).

Βασιζόμενος στο παραπάνω συμπέρασμα, μελέτησε τα αποτελέσματα μιας νέας σειράς πειραμάτων μεταβάλλοντας την οργανική φόρτιση από 0.26 έως 1.64 kg BOD/(m<sup>3</sup>\*d) και την επιφανειακή φόρτιση από 4.55 έως 27.87 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*d), οπότε η απόδοση μειώθηκε από 0.810 σε 0.258. Η εξίσωση

υπολογισμού απόδοσης απομάκρυνσης BOD ενός βιολογικού φίλτρου που εξήγαγε ο Schulze μετά την διεξαγωγή όλων των παραπάνω σειρών πειραμάτων, έχει την εξής μορφή:

$$\frac{S_e}{S_0} = e^{-kD/q^n} \quad (8.1)$$

όπου:

$S_e$  : BOD του αποβλήτου μετά την δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης, mg/L

$S_0$  : BOD του αποβλήτου που εισέρχεται στο βιολογικό φίλτρο, λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση της ανακύκλωσης μέρους του αποβλήτου

$k$  : πειραματική σταθερά, που υπολογίστηκε ίση με  $0.69 \text{ d}^{-1}$  στους  $20^\circ \text{ C}$ .

$D$  : το βάθος του πληρωτικού υλικού, ft

$q$  : επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου, λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση της ανακύκλωσης μέρους του αποβλήτου, mgd/acre (χιλιάδες γαλόνια ανά ημέρα και ανά ακρ)

$n$  : σταθερά που εξαρτάται από το είδος του πληρωτικού υλικού και υπολογίστηκε από τον Schulze ίση με 0.67.

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση είναι, βάσει της παραπάνω εξίσωσης, η επιφανειακή φόρτιση και το βάθος του πληρωτικού υλικού. Το φίλτρο που χρησιμοποιήθηκε από τον Schulze είναι εργαστηριακής κλίμακας, αναφέρει όμως και άλλους ερευνητές (Rigbi et al., 1956 και Trebler et al., 1938) που κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της οργανικής φόρτισης πρακτικά δεν μεταβάλλει την απόδοση, βάσει δεδομένων που προέκυψαν από βιολογικά φίλτρα κανονικών διαστάσεων, και για τιμές οργανικής φόρτισης αντίστοιχες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν από τον Schulze. Επομένως, η απόδοση δεν μεταβάλλεται εφόσον η επιφανειακή φόρτιση είναι σταθερή και η οργανική φόρτιση δεν υπερβαίνει τα  $15 \text{ kg BOD}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  περίπου.

Για την επίδραση της θερμοκρασίας στην σταθερά  $k$ , και κατά συνέπεια στην απόδοση, ο Schulze χρησιμοποιεί την εξίσωση του Howland (Howland, 1958):

$$k_T = k_{20} \cdot 1.035^{T-20} \quad (8.2)$$

όπου:

$k_{T,20}$  : πειραματική σταθερά στους T και στους 20°C αντίστοιχα

Για να διαπιστώσει την συμβατότητα της εξίσωσής του με βιολογικά φίλτρα μεγάλων διαστάσεων, ο Schulze συγκρίνει τα πειραματικά αποτελέσματα από βιολογικά φίλτρα ύψους 1.83m, διατομής 3.34m<sup>2</sup> με πληρωτικό υλικό από θραυσμένη πέτρα ή χαλίκι, για επιφανειακή φόρτιση από 2.14 έως 21.55 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*d), με τα αντίστοιχα θεωρητικά αποτελέσματα. Προκύπτει αρκετά καλή προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων από την θεωρητική εξίσωση, ενώ θα ήταν αναμενόμενο τα βιολογικά φίλτρα μεγάλων διαστάσεων με πληρωτικό υλικό από πέτρα να εμφανίζουν μεγαλύτερες αποδόσεις, σε σχέση με το φίλτρο με το μεταλλικό πλέγμα.

Το αποτέλεσμα πιθανώς σχετίζεται και με τον τρόπο παροχής του αποβλήτου πάνω από το πληρωτικό υλικό, που μπορεί να προκαλεί τοπικά μεγαλύτερες τιμές επιφανειακής φόρτισης από αυτές που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς. Πάντως, το γενικό συμπέρασμα είναι ότι η εξίσωση του Schulze προβλέπει ικανοποιητικά την απόδοση των βιολογικών φίλτρων με πληρωτικό υλικό από πέτρα.

Όσον αφορά στην επίδραση της ανακύκλωσης μέρους του αποβλήτου μετά την δευτεροβάθμια καθίζηση και την επιστροφή του στο βιολογικό φίλτρο, ο Schulze θεωρεί ότι η τυχόν αύξηση στην απόδοση που προκαλεί η αραίωση του αποβλήτου λόγω της ανακύκλωσης, αντισταθμίζεται από την αύξηση της επιφανειακής φόρτισης που μειώνει την απόδοση, επομένως πρακτικά δεν την επηρεάζει. Πάντως, στην εξίσωση Schulze λαμβάνεται υπόψη η ανακύκλωση του αποβλήτου, βάσει της σχέσης:

$$q = q_{in} \cdot (1 + R) \quad (8.3)$$

όπου:

q : επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου, λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση της ανακύκλωσης μέρους του αποβλήτου, mgd/acre

$q_{in}$  : επιφανειακή φόρτιση βάσει του εισερχόμενου αποβλήτου χωρίς ανακύκλωση, mgd/acre

R : λόγος αναρροής του αποβλήτου

Η επίδραση της ανακύκλωσης λαμβάνεται υπόψη και στην τιμή του BOD του αποβλήτου που εισέρχεται στο φίλτρο, ως εξής:

$$S_0 = \frac{S_{in} + R \cdot S_e}{1 + R} \quad (8.4)$$

όπου:

$S_e$  : BOD του αποβλήτου μετά την δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης, mg/L

$S_0$  : BOD του αποβλήτου που εισέρχεται στο βιολογικό φίλτρο, λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση της ανακύκλωσης, mg/L

$S_{in}$  : BOD του αποβλήτου που εισέρχεται στο σύστημα, πριν την ανακύκλωση, mg/L

Το συμπέρασμα που προκύπτει από την εξίσωση Schulze ότι η επιφανειακή φόρτιση καθορίζει την απόδοση ενός βιολογικού φίλτρου με δεδομένο βάθος και σε ορισμένη θερμοκρασία, αντιστοιχίζει, σύμφωνα με τον ίδιο, την διεργασία ενός βιολογικού φίλτρου με το φαινόμενο της προσρόφησης, όπου η επιφανειακή φόρτιση αντιστοιχεί στο χρόνο επαφής μεταξύ προσροφητή και προσροφώμενης ουσίας, και επομένως καθορίζει την απόδοση.

### **8.1 Λογισμικό συσχέτισης απόδοσης – λόγου αναρροής**

Για την μελέτη της επίδρασης του λόγου αναρροής στην απόδοση ενός βιολογικού φίλτρου βάσει της εξίσωσης Schulze, κατασκευάστηκε λογισμικό που υπολογίζει το BOD εξόδου του αποβλήτου και εν συνεχεία την απόδοση, με σταδιακή αύξηση του λόγου αναρροής  $R$ . Ως παράμετροι εισόδου θεωρούνται η παροχή του αποβλήτου, το BOD εισόδου στο σύστημα, η διάμετρος και το βάθος του φίλτρου. Η εξίσωση Schulze έχει γενική εφαρμογή, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της απόδοσης επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με φίλτρο με κροκάλες, ή με φίλτρο με πλαστικό πληρωτικό υλικό. Για την προσομοίωση επεξεργασίας αστικών αποβλήτων για φίλτρο με κροκάλες, χρησιμοποιούνται τα δεδομένα εισόδου του Πίνακα 6. Για φίλτρα με πλαστικό πληρωτικό υλικό, χρησιμοποιούμε τα δεδομένα του Πίνακα 10.

**Πίνακας 10:** Δεδομένα εισόδου λογισμικού  $E = f(R)$  για φίλτρο με πλαστικό πληρωτικό υλικό.

Δεδομένα Εισόδου λογισμικού $E=f(R)$	
Παροχή αποβλήτου ( $m^3/d$ )	15,000
BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο (mg/L)	300
Ύψος φίλτρου (m)	10
Διάμετρος φίλτρου (m)	30
Θερμοκρασία αποβλήτου ( $^{\circ}C$ )	20
Εύρος επιφανειακής φόρτισης ( $m^3/m^2 \cdot d$ )	10 – 75
Εύρος οργανικής φόρτισης (kg BOD/ $m^3 \cdot d$ )	0.6 – 3.2

Από την διάμετρο του φίλτρου υπολογίζεται η κάθετη διατομή του (σχέση (6.3)), και εν συνεχεία η επιφανειακή φόρτιση μέσω της σχέσης (5.17). Ο όγκος του φίλτρου είναι:

$$V = A \cdot D \quad (8.5)$$

A: η επιφάνεια (κάθετη διατομή) του φίλτρου,  $m^2$

D: το ύψος του πληρωτικού υλικού, m

V: ο όγκος του φίλτρου,  $m^3$

Το οργανικό φορτίο (BOD) του φίλτρου υπολογίζεται από την σχέση (5.12), και η οργανική φόρτιση του φίλτρου από την σχέση (5.14), ώστε να ελέγχεται αν βρίσκεται μέσα στα όρια του Πίνακα 1.

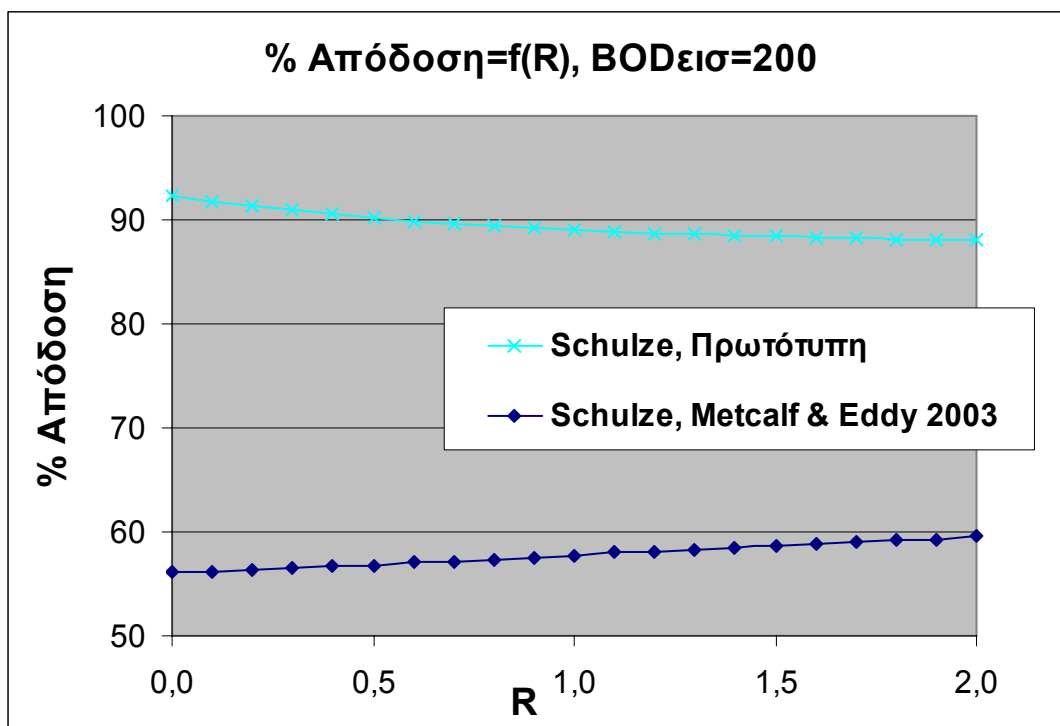
Αφού υπολογιστούν τα παραπάνω μεγέθη, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας αυξάνεται σταδιακά ο λόγος αναρροής R, από μια αρχική τιμή σε μια τελική, με ορισμένο βήμα ( $0 \leq R \leq 2$ , βήμα 0.1). Σε κάθε επανάληψη υπολογίζεται η ολική επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου (σχέση 5.18). Δίνεται μια ορισμένη δοκιμαστική τιμή στο BOD εξόδου του συστήματος, και ακολουθεί μια νέα επαναληπτική διαδικασία, εσωτερική της προηγούμενης, που αυξάνει σταδιακά την τιμή του BOD εξόδου, οπότε μέσω της σχέσης (8.4) υπολογίζεται το BOD εισόδου στο φίλτρο, λαμβάνοντας υπόψη και την ανακύκλωση. Από την εξίσωση Schulze (σχέση 8.1), εκτιμάται μια νέα τιμή για το BOD εξόδου, και η εσωτερική επαναληπτική διαδικασία ολοκληρώνεται όταν



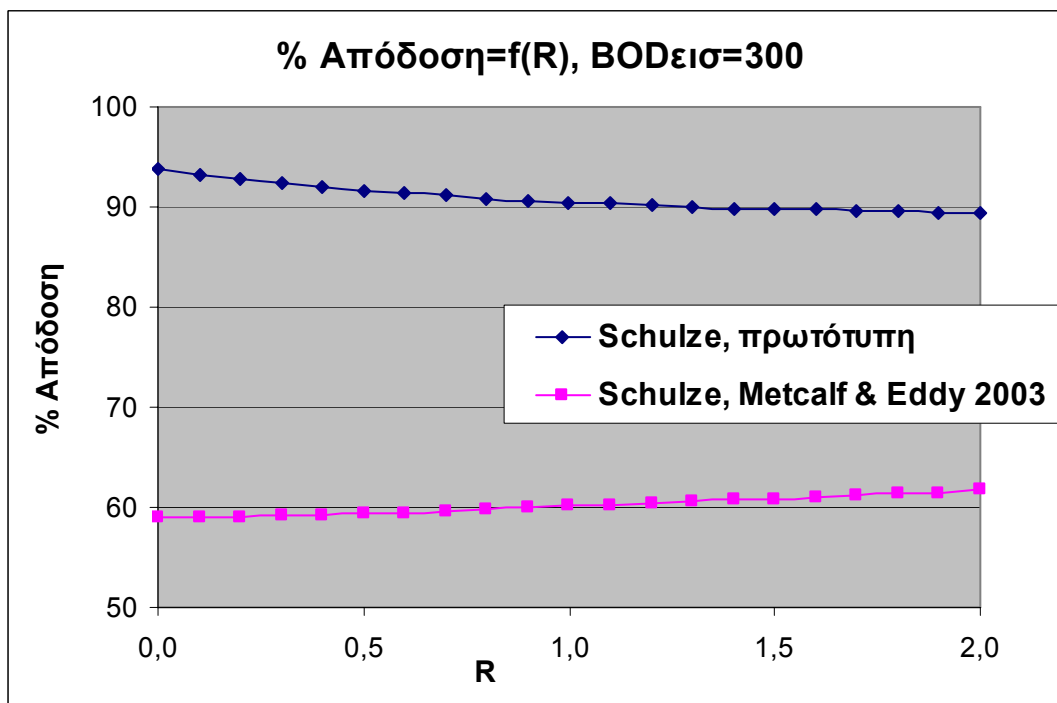
εξισωθούν οι δύο τιμές BOD. Για την εφαρμογή της εξίσωσης Schulze, όσες μονάδες των μεταβλητών είναι στο διεθνές σύστημα, μετατρέπονται από το λογισμικό στις μονάδες που χρησιμοποίησε ο ερευνητής, όπως αναφέρονται στην σχέση (8.1). Η απόδοση του συστήματος εκτιμάται από την σχέση (5.11), όπου ως BOD εισόδου λαμβάνεται αυτό του αποβλήτου που εισέρχεται στο σύστημα, ενώ ως BOD εξόδου, αυτό του αποβλήτου μετά την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης.

#### 8.1.1 Αποτελέσματα λογισμικού

Στα επόμενα Σχήματα 8.2 και 8.3 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης επεξεργασίας αστικών αποβλήτων με βιολογικά φίλτρα (μαζί με δευτεροβάθμια καθίζηση) χρησιμοποιώντας την μορφή της εξίσωσης Schulze όπως αναφέρεται στην πρωτότυπη δημοσίευση του ερευνητή, και την μορφή που αναφέρεται στην βιβλιογραφία (Metcalf & Eddy, 2003). Στην δεύτερη περίπτωση της βιβλιογραφίας έχει γίνει αναγωγή των μονάδων των μεταβλητών της εξίσωσης στο Διεθνές Σύστημα, γεγονός που επηρεάζει θεαματικά τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Πράγματι, στην πρώτη περίπτωση του Σχήματος 8.2 που η προσομοίωση αφορά σε φίλτρο με κροκάλες και τα δεδομένα εισόδου λαμβάνονται από τον Πίνακα 6, οι υπολογιζόμενες αποδόσεις διαφέρουν από 22 έως 36 εκατοστιαίες μονάδες. Στο Σχήμα 8.3 που αφορά σε φίλτρο με πλαστικό πληρωτικό υλικό, οι αποδόσεις διαφέρουν από 27 έως 35 μονάδες. Παρατηρούμε επίσης ότι στην πρωτότυπη εξίσωση η απόδοση εμφανίζει μικρή πτώση με την αύξηση του  $R$ , ενώ στην μορφή της βιβλιογραφίας εμφανίζει μικρή άνοδο. Αυτό είναι δυνατό να συμβαίνει, γιατί μέσα στην εξίσωση υπάρχει εκθετικός παράγοντας και ύψωση σε δύναμη μικρότερη της μονάδας. Παρατηρούμε λοιπόν ότι η αλλαγή του συστήματος μονάδων προκαλεί μεγάλη αλλοίωση στα αποτελέσματα.



**Σχήμα 8.2:** Σύγκριση απόδοσης επεξεργασίας αστικού αποβλήτου με βιολογικό φίλτρο με προσομοίωση βάσει της εξίσωσης Schulze, BOD εισόδου=200mg/L (αντιστοιχεί σε φίλτρο με κροκάλες).



**Σχήμα 8.3:** Σύγκριση απόδοσης επεξεργασίας αστικού αποβλήτου με βιολογικό φίλτρο με προσομοίωση βάσει της εξίσωσης Schulze, BOD εισόδου=300mg/L (αντιστοιχεί σε φίλτρο με πλαστικό πληρωτικό υλικό).

## 9. Η ΕΞΙΣΩΣΗ ECKENFELDER

Η μελέτη του Eckenfelder (1963), είχε ως στόχο να συσχετίσει την απόδοση απομάκρυνσης BOD των βιολογικών φίλτρων με σχεδιαστικές παραμέτρους όπως το βάθος του φίλτρου, η επιφανειακή φόρτιση και το είδος του πληρωτικού υλικού κατά την επεξεργασία των αστικών αποβλήτων.

Για την διατύπωση της εξίσωσης υπολογισμού της απόδοσης, ο Eckenfelder έλαβε υπόψη του ότι η απομάκρυνση του BOD από το απόβλητο μειώνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης ρύπων και με την πάροδο του χρόνου, γιατί υπάρχει διαφορά στον χρόνο που απαιτείται για την απομάκρυνση κάθε ουσίας από το απόβλητο. Έτσι, διατύπωσε την παρακάτω σχέση:

$$\frac{S_e}{S_0} = \frac{1}{1 + \frac{C \cdot D^{(1-m)}}{q^n}} \quad (9.1)$$

όπου:

$S_e$ : BOD αποβλήτου μετά την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, mg/L

$S_0$ : BOD αποβλήτου που εισέρχεται στο φίλτρο, mg/L

$D$ : βάθος πληρωτικού υλικού, ft

$q$ : επιφανειακή φόρτιση φίλτρου, mgd/acre ( $10^6$  γαλόνια ανά ακρ και ανά ημέρα)

Στην συνέχεια, οι σταθερές  $C$ ,  $(1-m)$  και  $n$  προσδιορίστηκαν με ανάλυση πολλαπλής παλινδρόμησης για μια σειρά δεδομένων απόδοσης που ελήφθησαν από την βιβλιογραφία και αναφέρονται σε διάφορες εφαρμογές βιολογικών φίλτρων για επεξεργασία αστικών αποβλήτων. Σύμφωνα με τον Eckenfelder, η επεξεργασία ενός αποβλήτου εξαρτάται από την κατανομή του βιολογικού υμένα πάνω στο πληρωτικό υλικό, την κατανομή του αποβλήτου στο πληρωτικό υλικό κατά την τροφοδοσία, το είδος του πληρωτικού υλικού, τις θερμοκρασιακές μεταβολές, καθώς και άλλες παραμέτρους που μπορεί να μεταβάλλονται σε κάθε διαφορετική εγκατάσταση. Για την επεξεργασία αστικών αποβλήτων με βιολογικά φίλτρα με πληρωτικό υλικό από πέτρα, για διάταξη χωρίς ανακύκλωση, ο Eckenfelder κατέληξε στην επόμενη εξίσωση:

$$\frac{S_e}{S_0} = \frac{1}{1 + \frac{2.5 \cdot D^{0.67}}{q^{0.5}}} \quad (9.2)$$

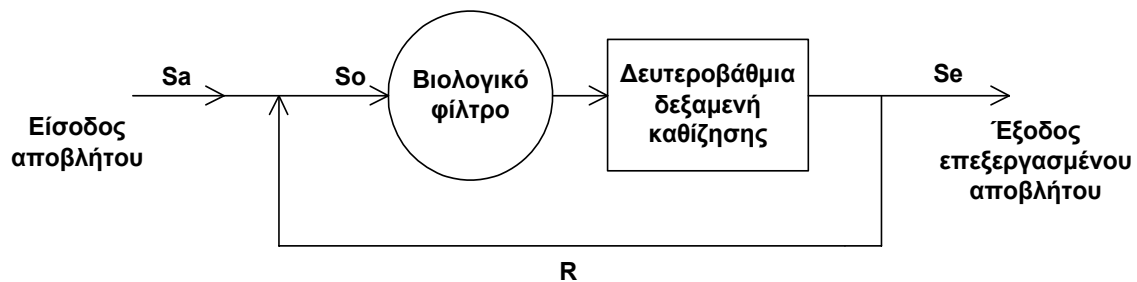
Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται διάταξη με ανακύκλωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.1, η εξίσωση τροποποιείται ως εξής:

$$\frac{S_e}{S_a} = \frac{1}{(1+R) \cdot \left(1 + \frac{2.5 \cdot D^{0.67}}{q^{0.5}}\right) - R} \quad (9.3)$$

όπου:

$S_a$ : BOD αποβλήτου που εισέρχεται στο σύστημα, mg/L

$R$ : λόγος αναρροής του αποβλήτου στο φίλτρο, αδιάστατο μέγεθος



**Σχήμα 9.1:** Διάταξη επεξεργασίας αποβλήτου με ανακύκλωση.

Ο παράγοντας  $S_0$ , δηλαδή η συγκέντρωση BOD του αποβλήτου κατά την είσοδο στο φίλτρο (λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της ανακύκλωσης), υπολογίζεται με ισοζύγιο στον κόμβο πριν την είσοδο του φίλτρου και προκύπτει:

$$S_0 = \frac{S_a + R \cdot S_e}{R + 1} \quad (9.4)$$

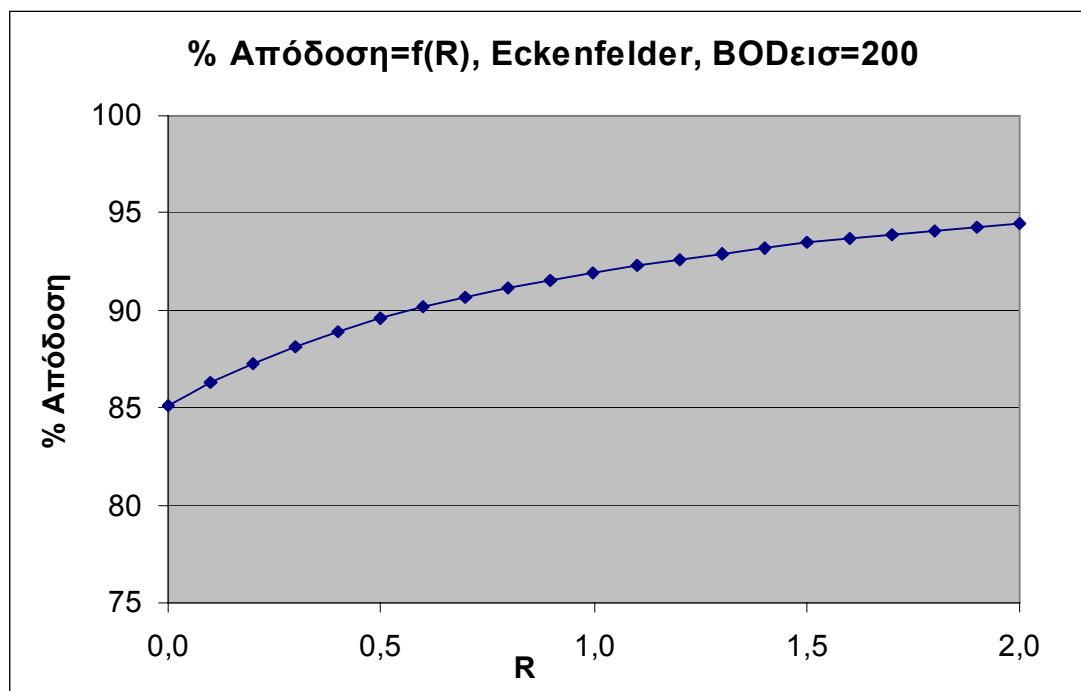
## 9.1 Λογισμικό συσχέτισης απόδοσης – λόγου αναρροής

Όπως αναφέραμε, η εξίσωση Eckenfelder εκτιμά την απόδοση βιολογικών φίλτρων με κροκάλες κατά την επεξεργασία λυμάτων, επομένως για την προσομοίωση της επεξεργασίας αστικών αποβλήτων θα χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα εισόδου του Πίνακα 6. Όπως αναφέρθηκε και στις παραγράφους 6.1, 7.3 και 8.1, ως παράμετροι εισόδου θεωρούνται η παροχή του αποβλήτου στο σύστημα, το BOD εισόδου του αποβλήτου στο σύστημα, η διάμετρος και το βάθος του φίλτρου.

Το λογισμικό συσχέτισης απόδοσης – λόγου αναρροής χρησιμοποιεί τα παραπάνω δεδομένα εισόδου για να υπολογίσει την διατομή του φίλτρου (σχέση (6.3)), την επιφανειακή φόρτιση (5.17), τον όγκο του πληρωτικού υλικού (σχέση (8.5)), το φορτίο BOD και την οργανική φόρτιση του φίλτρου (σχέσεις (5.12) και (5.14)). Στην συνέχεια, μέσω επαναληπτικής διαδικασίας αυξάνεται σταδιακά ο λόγος αναρροής  $R$  του αποβλήτου (από 0 έως 2 με βήμα 0.1), και σε κάθε βήμα της επανάληψης υπολογίζεται η ολική επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου (σχέση (5.18)) και το BOD του επεξεργασμένου αποβλήτου (μετά την δευτεροβάθμια δεξαμενή), μέσω της εξίσωσης Eckenfelder για διάταξη με ανακύκλωση (σχέση (9.3)). Στην σχέση αυτή χρησιμοποιείται το BOD εισόδου στο σύστημα του Σχήματος 9.1, δηλαδή το BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ανακύκλωση. Τέλος, από την σχέση (5.11) υπολογίζεται η απόδοση του συστήματος του βιολογικού φίλτρου (μαζί με την δευτεροβάθμια καθίζηση).

### 9.1.1 Αποτελέσματα λογισμικού

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αστικού αποβλήτου με την διάταξη του Σχήματος 9.1, δηλαδή με βιολογικό φίλτρο και δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης βάσει της εξίσωσης Eckenfelder, απεικονίζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 9.2. Η προσομοίωση αφορά στην μεταβολή της απόδοσης βιολογικού φίλτρου με κροκάλες συναρτήσει του λόγου αναρροής του αποβλήτου. Πηγή της εξίσωσης που χρησιμοποιήσαμε είναι η πρωτότυπη δημοσίευση του ερευνητή (Eckenfelder, 1963).



**Σχήμα 9.2:** Απόδοση βιολογικού φίλτρου με κροκάλες συναρτήσει του λόγου αναρροής του αποβλήτου, βάσει της εξίσωσης Eckenfelder. BOD εισόδου = 200mg/L.

## 10. Η ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΟΥ GERMAIN

Η εξίσωση που διατύπωσε ο Germain (1966), αναφέρεται στην επεξεργασία αστικών αποβλήτων με βιολογικά φίλτρα μεγάλης φόρτισης που χρησιμοποιούν πλαστικό πληρωτικό υλικό. Η εξίσωσή του είναι μία από τις πιο κλασικές και αξιόπιστες εξισώσεις που αναφέρονται στα βιολογικά φίλτρα, και ο ίδιος ένας από τους πιο καταξιωμένους ερευνητές στον τομέα αυτό. Στην δημοσίευσή του επιχειρεί να κάνει μια σύγκριση από άποψη κόστους ανάμεσα στην χρήση του πλαστικού ή της πέτρας ως πληρωτικού υλικού.

Η εξίσωση που προτείνει ο Germain για τον υπολογισμό του BOD του επεξεργασμένου αποβλήτου είναι η εξής:

$$\frac{S_e}{S_0} = e^{-kD/q^n} \quad (10.1)$$

όπου:

$S_e$ : συγκέντρωση BOD του εξερχόμενου αποβλήτου από την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, mg/L

$S_0$ : συγκέντρωση BOD του εισερχόμενου στο φίλτρο αποβλήτου, χωρίς την ανακύκλωση, mg/L

$k$ : συντελεστής πληρωτικού υλικού και επεξεργασίας αποβλήτου· ο Germain υπολόγισε ότι για αστικά απόβλητα,  $k=0.088$

$D$ : βάθος πληρωτικού υλικού, ft

$q$ : επιφανειακή φόρτιση του εισερχόμενου αποβλήτου, χωρίς την ανακύκλωση, gpm/ft<sup>2</sup> (γαλόνια ανά λεπτό και ανά τετραγωνικό πόδι)

$n$ : σταθερά του πληρωτικού υλικού, σύμφωνα με τον Germain  $n=0.5$

Σύμφωνα με τον Germain, η σταθερά  $n$  εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο πληρωτικό υλικό, αλλά μπορεί να μεταβάλλεται και ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη διάταξη του συστήματος των βιολογικών φίλτρων, καθώς επίσης και ανάλογα με το είδος του βιολογικού υμένα που σχηματίζεται πάνω στο πληρωτικό υλικό. Η σταθερά  $n$  συνήθως λαμβάνεται ίση με 0.5, ενώ τα περισσότερα πειράματα για τον υπολογισμό της έγιναν σε φίλτρα ύψους 6.1 έως 6.7m.

Όσον αφορά στην επίδραση της ανακύκλωσης αποβλήτου, δεν παρατηρείται στατιστικά σημαντική επίδραση αυτής στην απομάκρυνση του BOD υπό τις συνθήκες των σχετικών πειραμάτων που έγιναν για την μελέτη της

επίδρασης της παραμέτρου αυτής. Αντίθετα, προέκυψε ότι η απομάκρυνση του BOD από ένα αποβλήτο για ορισμένη επιφανειακή φόρτιση, είναι ανάλογη του BOD του αρχικού αποβλήτου. Η παρατήρηση αφορά κυρίως στο διαλυτό BOD (sBOD), και μπορεί να μην ισχύει πάντα με ακρίβεια λόγω της επίδρασης της αυτοοξειδωσης των παραπροϊόντων της βιολογικής διεργασίας. Επίσης, προέκυψε ότι η ανακύκλωση δεν επηρεάζει τον ρυθμό της αντίδρασης βιολογικής οξείδωσης των οργανικών του αποβλήτου.

Η χρήση ανακύκλωσης επηρεάζει τον απαιτούμενο χρόνο παραμονής του αποβλήτου στο φίλτρο. Όσο αυξάνεται ο λόγος αναρροής, μειώνεται το BOD του αποβλήτου που τροφοδοτεί το φίλτρο, και επομένως χρειάζεται μικρότερος χρόνος παραμονής σε αυτό για να επιτευχθεί ορισμένη απόδοση απομάκρυνσης. Έτσι η αύξηση του λόγου αναρροής μπορεί να μειώσει τον όγκο και επομένως το κόστος ενός βιολογικού φίλτρου. Επίσης, η ανακύκλωση μέρους του αποβλήτου στο φίλτρο είναι απαραίτητη σε περιόδους χαμηλής παροχής αποβλήτου, έτσι ώστε να διατηρείται περίπου σταθερή η επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου.

Η σταθερά  $k$  εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου, ο σχεδιασμός του φίλτρου και των δεξαμενών καθίζησης, οι συνθήκες λειτουργίας, η μέθοδος τροφοδοσίας αποβλήτου. Ο Germain διεξήγαγε μια σειρά πειραμάτων για να διαπιστώσει αν η απομάκρυνση BOD εξαρτάται από το BOD του εισερχόμενου αποβλήτου γενικά και όχι μόνο όσον αφορά στο διαλυτό BOD, από όπου κατέληξε στην διατύπωση της εξίσωσής του και στο υπολογισμό του συντελεστή  $k$ . Παρατήρησε πάντως ότι όπως και στα φίλτρα με πληρωτικό υλικό από πέτρα, η απομάκρυνση του BOD πάνω από ένα ορισμένο όριο καθίσταται πολύ δύσκολη, και πάνω από το όριο αυτό η εξίσωση που διατύπωσε δεν έχει πλέον ισχύ. Η επεξεργασία ενός αποβλήτου πάνω από το σημείο αυτό είναι περισσότερο θέμα χώνευσης των στερεών, παρά απομάκρυνσης του BOD. Φαίνεται ότι κάθε είδος αποβλήτου έχει ένα ορισμένο BOD ισορροπίας, πάνω από το οποίο δεν γίνεται περαιτέρω απομάκρυνση. Πάντως, για τα αστικά απόβλητα το BOD ισορροπίας είναι σχετικά χαμηλό, οπότε οι αποδόσεις επεξεργασίας τους σε ένα βιολογικό φίλτρο μπορεί να φθάνουν το 85 – 95%.

Σύμφωνα με τον Germain, το ύψος του φίλτρου επηρεάζει τον απαιτούμενο όγκο του πληρωτικού υλικού, και όταν αυτό μειωθεί κάτω από ορισμένη τιμή, που για τα δεδομένα του μελετητή υπολογίστηκε στα 3m, ο όγκος του πληρωτικού υλικού που απαιτείται για ορισμένη απόδοση αυξάνεται



απότομα, ενώ για ύψος 6m, ο όγκος που απαιτείται για την ίδια απόδοση είναι περίπου ο μισός.

### **10.1 Λογισμικό συσχέτισης απόδοσης – λόγου αναρροής**

Όπως αναφέραμε, η εξίσωση του Germain προβλέπει την απόδοση των βιολογικών φίλτρων με πλαστικό πληρωτικό υλικό, επομένως για την προσομοίωση της επεξεργασίας αστικών αποβλήτων θα χρησιμοποιήσουμε τα δεδομένα εισόδου του Πίνακα 10. Η εξίσωση δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση της ανακύκλωσης του αποβλήτου, ούτε στην επιφανειακή φόρτιση του αποβλήτου, ούτε στο BOD εισόδου του αποβλήτου στο βιολογικό φίλτρο. Επομένως, η διάταξη επεξεργασίας την οποία προσομοιώνει το εν λόγω λογισμικό είναι όμοια με αυτή του σχήματος 6.1, και περιλαμβάνει βιολογικό φίλτρο με δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης.

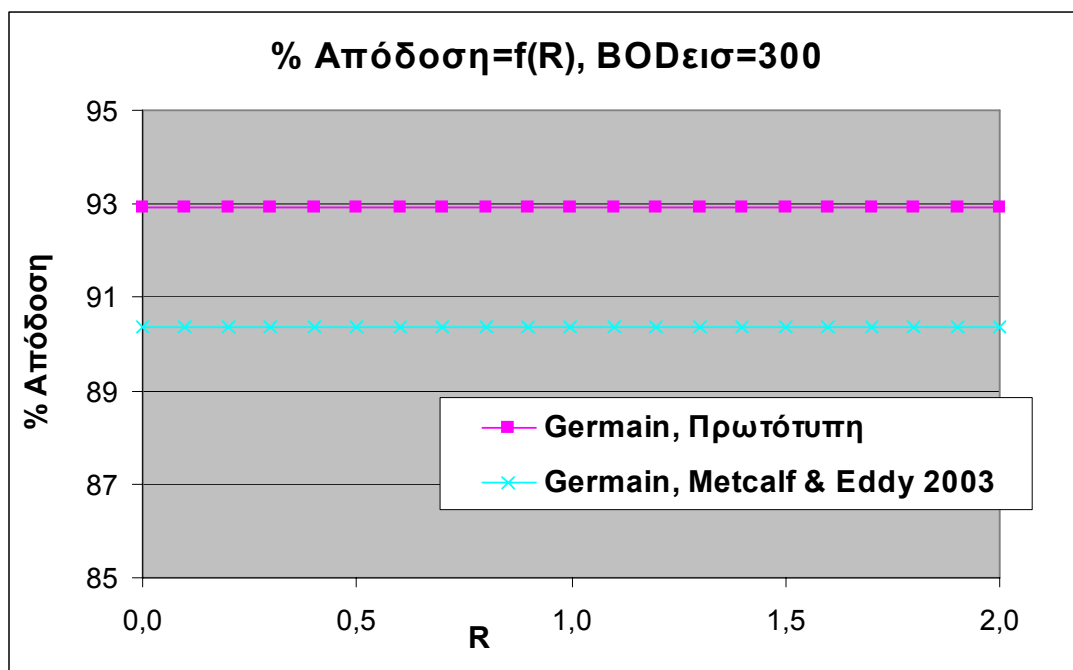
Βάσει των δεδομένων του Πίνακα 10, υπολογίζουμε την κάθετη διατομή του φίλτρου από την σχέση (6.3), την επιφανειακή φόρτιση και τον όγκο του πληρωτικού υλικού από τις σχέσεις (5.17) και (5.15) αντίστοιχα. Επίσης από τις σχέσεις (5.12) και (5.14) υπολογίζουμε το φορτίο BOD του φίλτρου και την οργανική φόρτιση. Ως τιμή της σταθεράς  $k$  λαμβάνεται αυτή που έχει υπολογιστεί από τον Germain, δηλαδή 0.088, και που αντιστοιχεί στις μονάδες που χρησιμοποιεί στην εξίσωσή του, και όχι σε μονάδες του Διεθνούς Συστήματος. Σε περίπτωση που η θερμοκρασία του αποβλήτου είναι διαφορετική από 20°C, το λογισμικό αναγάγει την σταθερά  $k$  στην θερμοκρασία του αποβλήτου μέσω της εξίσωσης (8.2), στο πρόβλημά μας όμως η θερμοκρασία του αποβλήτου θεωρείται 20°C και δεν απαιτείται αναγωγή της σταθεράς. Επίσης, χρησιμοποιείται η σχέση (7.3) όπως περιγράφεται στην παράγραφο 7.2 για την κανονικοποίηση της τιμής της σταθεράς  $k$  ανάλογα με το βάθος του πληρωτικού υλικού και το BOD εισόδου στο φίλτρο.

Το λογισμικό μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας μεταβάλλει την τιμή του λόγου  $R$  από 0 έως 2 με βήμα 0.1, και μέσω αυτής υπολογίζεται σε κάθε βήμα η ολική επιφανειακή φόρτιση του φίλτρου (σχέση (5.18)), έτσι ώστε να ελέγχεται ότι βρίσκεται στα όρια του Πίνακα 1. Η ανακύκλωση δεν επηρεάζει την απόδοση σύμφωνα με τον ερευνητή, επομένως το BOD του επεξεργασμένου αποβλήτου που υπολογίζεται σε κάθε βήμα μέσω της σχέσης

(10.1), έχει πάντα την ίδια τιμή. Τέλος, η απόδοση της διάταξης (βιολογικό φίλτρο και δευτεροβάθμια δεξαμενή) υπολογίζεται από την σχέση (5.11).

### 10.1.1 Αποτελέσματα λογισμικού

Για την προσομοίωση της επεξεργασίας αστικού αποβλήτου με την εξίσωση Germain χρησιμοποιήσαμε την εξίσωση με την μορφή που αναφέρεται στην πρωτότυπη δημοσίευση (Germain, 1966). Όπως αναφέραμε, ο Germain δεν λαμβάνει υπόψη την ανακύκλωση του αποβλήτου στον υπολογισμό της απόδοσης, επομένως η απόδοση δεν μεταβάλλεται συναρτήσει του  $R$ . Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της πρωτότυπης μορφής της εξίσωσης με την αντίστοιχη μορφή που αναφέρεται στην βιβλιογραφία (Metcalf & Eddy, 2003), παρατηρούμε διαφορές στην υπολογιζόμενη απόδοση, κατά τρεις ποσοστιαίες μονάδες περίπου. Η διαφορά δεν είναι τόσο μεγάλη όπως στην περίπτωση της εξίσωσης Schulze (Σχήμα 8.3), μπορούμε όμως να συμπεράνουμε ότι η μεταβολή της μορφής μιας εξίσωσης έτσι ώστε οι μονάδες των μεταβλητών της να είναι στο Διεθνές Σύστημα, μπορεί να προκαλέσει αλλοίωση των αποτελεσμάτων.



**Σχήμα 10.1:** Σύγκριση αποτελεσμάτων απόδοσης βιολογικού φίλτρου με πλαστικό πληρωτικό υλικό, της πρωτότυπης εξίσωσης Germain και αυτής που αναφέρεται στην βιβλιογραφία.

## 11. ΒΡΕΤΑΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η εξίσωση που αναφέρεται στα Βρετανικά Πρακτικά «Μονάδες Διεργασιών Βιολογικών Φίλτρων» (Packam, 1988) υπολογίζει το BOD εξόδου του αποβλήτου μετά από επεξεργασία σε φίλτρα με πληρωτικό υλικό τυχαίας διάταξης, από πέτρα ή πλαστικό, και σε φίλτρα με πλαστικό πληρωτικό υλικό καθορισμένης δομής. Τα είδη πληρωτικού υλικού που ανήκουν στις παραπάνω κατηγορίες και που είναι κατάλληλα για την απομάκρυνση του BOD από τα υγρά απόβλητα, καθώς και οι βασικές τους φυσικές ιδιότητες, αναφέρονται στον Πίνακα 7. Η εξίσωση του Βρετανικού Μοντέλου προέκυψε με ανάλυση πολλαπλής παλινδρόμησης σειράς πειραματικών δεδομένων από εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών αποβλήτων με βιολογικά φίλτρα και είναι η εξής (Πηγή: WEF, 2000):

$$\frac{S_e}{S_o} = \frac{1}{1 + K \cdot \Theta^{(T-15)} \cdot (A_s^m / Q^n)} \quad (11.1)$$

όπου:

$S_o$  : BOD εισόδου του αποβλήτου στο βιολογικό φίλτρο, mg/L

$S_e$  : BOD εξόδου του αποβλήτου από την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, mg/L

$K$  : σταθερά ρυθμού αντίδρασης πρώτης τάξης

$\Theta$  : συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας

$A_s$  : ειδική επιφάνεια πληρωτικού υλικού,  $m^2/m^3$

$m$  : σταθερά

$Q$  : ογκομετρική φόρτιση του φίλτρου,  $m^3/m^3 \cdot d$

$n$  : σταθερά

Οι τιμές των σταθερών και των συντελεστών που χρησιμοποιούνται στην ανωτέρω εξίσωση εξαρτώνται από το είδος του πληρωτικού υλικού που χρησιμοποιείται στο βιολογικό φίλτρο και αναφέρονται στον Πίνακα 11 που ακολουθεί. Για τις τιμές της ειδικής επιφάνειας του πληρωτικού υλικού μπορεί κανείς να ανατρέξει στον Πίνακα 7.

**Πίνακας 11:** Τιμές των σταθερών του βρετανικού μοντέλου

Σταθερά	Πληρωτικό υλικό τυχαίας διάταξης (πέτρα ή πλαστικό)	Πλαστικό πληρωτικό υλικό ορισμένης δομής
<b>K</b>	0.0204	0.400
<b>Θ</b>	1.111	1.089
<b>m</b>	1.407	0.7324
<b>n</b>	1.249	1.396

Συγκρίνοντας το βρετανικό μοντέλο με τα αμερικάνικα μοντέλα υπολογισμού της απόδοσης βιολογικών φίλτρων, πρέπει να γνωρίζουμε ότι τα απόβλητα που χρησιμοποιήθηκαν στην Βρετανία για την ανάπτυξη των μοντέλων ήταν ισχυρότερα σε σχέση με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στις Η.Π.Α., πράγμα που αντικατοπτρίζεται στις τιμές των συντελεστών των αντίστοιχων εξισώσεων.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία (WEF, 2000), υπάρχει σχετική συμφωνία του βρετανικού μοντέλου με τα αμερικάνικα στην πρόβλεψη της απόδοσης των βιολογικών φίλτρων, για τιμές της οργανικής φόρτισης μέχρι  $0.4 \text{ kg/m}^3\text{d}$  για πληρωτικό υλικό από πέτρα, και μέχρι  $1.1 \text{ kg/m}^3\text{d}$  για πλαστικό πληρωτικό υλικό. Για μεγαλύτερες τιμές της οργανικής φόρτισης και για θερμοκρασία αποβλήτου  $15^\circ\text{C}$ , τα αμερικάνικα μοντέλα προβλέπουν μεγαλύτερα ποσοστά απομάκρυνσης BOD σε σχέση με το βρετανικό. Πάντως, για τιμές οργανικής φόρτισης μεγαλύτερες από  $1.25 \text{ kg/m}^3\text{d}$ , η ακρίβεια του μοντέλου NRC είναι μικρή.

Οι τιμές της σταθεράς διόρθωσης θερμοκρασίας  $\Theta$  στο Βρετανικό Μοντέλο είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές στα αμερικάνικα μοντέλα. Πάντως, όταν η απομάκρυνση του BOD αναφέρεται σε απόβλητα θερμοκρασίας  $20^\circ\text{C}$ , τότε οι προβλέψεις για την απόδοση των βιολογικών φίλτρων είναι συγκρίσιμες σε ένα μεγαλύτερο εύρος τιμών οργανικής φόρτισης. Οι υψηλές τιμές της σταθεράς  $\Theta$  στο Βρετανικό Μοντέλο μπορεί να οφείλονται στο είδος των αποβλήτων που χρησιμοποιήθηκαν και στις συνθήκες που επικρατούσαν κατά την διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων. Σε πολλές περιπτώσεις, οι μεγάλες συγκεντρώσεις ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) στο απόβλητο εισόδου επηρεάζουν δυσμενώς την απόδοση.

Το Βρετανικό Μοντέλο χρησιμοποιεί ως ανεξάρτητη μεταβλητή υπολογισμού της απόδοσης την ογκομετρική φόρτιση του βιολογικού φίλτρου

( $\text{m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$ ) και όχι την επιφανειακή φόρτιση, όπως συμβαίνει στην πλειοψηφία των λοιπών μοντέλων. Πάντως, η δομή του μοντέλου βασίζεται στην οργανική φόρτιση ενός φίλτρου και όχι στην υδραυλική φόρτιση (ογκομετρική ή επιφανειακή), και είναι πιθανό ότι σε χαμηλές τιμές της οργανικής φόρτισης μπορεί να προβλέπονται τιμές απόδοσης μικρότερες από τις πραγματικές.

### 11.1 Λογισμικό συσχέτισης απόδοσης – λόγου αναρροής

Η εξίσωση υπολογισμού της απόδοσης του Βρετανικού Μοντέλου (σχέση (11.1)), δεν αναφέρει κάτι για την επίδραση της ανακύκλωσης του αποβλήτου στις διάφορες ανεξάρτητες μεταβλητές όπως το BOD εισόδου στο βιολογικό φίλτρο και η ογκομετρική φόρτιση. Επομένως, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση της ανακύκλωσης στον υπολογισμό της απόδοσης. Πάντως, η επίδραση της ανακύκλωσης πρέπει να ληφθεί υπόψη από το λογισμικό προσομοίωσης επεξεργασίας αστικών αποβλήτων για τον υπολογισμό της ογκομετρικής φόρτισης έτσι ώστε να βρίσκεται μέσα στο αποδεκτό εύρος τιμών για την σωστή λειτουργία ενός βιολογικού φίλτρου.

Το λογισμικό προσομοίωσης αφορά σε φίλτρο με πληρωτικό υλικό τυχαίας διάταξης από πέτρα, και σε φίλτρο με πλαστικό πληρωτικό υλικό καθορισμένης δομής. Το αποδεκτό εύρος τιμών της ογκομετρικής φόρτισης και οι τιμές της ειδικής επιφάνειας του πληρωτικού υλικού σε κάθε περίπτωση αναφέρονται στον Πίνακα 12.

**Πίνακας 12:** Δεδομένα εισόδου του λογισμικού προσομοίωσης βάσει του Βρετανικού Μοντέλου

	Πληρ. υλικό τυχαίας διάταξης (από πέτρα)	Πλαστικό πληρ. υλικό ορισμένης δομής
<b>Ογκομετρική φόρτιση φίλτρου (<math>\text{m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}</math>)</b>	0.5 – 10	
<b>Ειδική επιφάνεια πληρ. υλικού (<math>\text{m}^2/\text{m}^3</math>)</b>	45	90

Οι υπόλοιπες τιμές των μεταβλητών εισόδου του λογισμικού αναφέρονται στον Πίνακα 6 στην περίπτωση του πληρωτικού υλικού από πέτρα, και στην

περίπτωση του πλαστικού πληρωτικού υλικού στον Πίνακα 10. Και στις δύο περιπτώσεις δεν λαμβάνεται υπόψη το εύρος τιμών της επιφανειακής φόρτισης, αλλά της ογκομετρικής φόρτισης του φίλτρου που χρησιμοποιεί το Βρετανικό Μοντέλο. Η διάταξη στην οποία αντιστοιχεί η προσομοίωση επεξεργασίας αστικού αποβλήτου με το Βρετανικό Μοντέλο είναι αυτή που εικονίζεται στο Σχήμα 6.1 (βιολογικό φίλτρο με δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης).

Από τα δεδομένα εισόδου υπολογίζονται η διατομή του βιολογικού φίλτρου (6.3) και ο όγκος του πληρωτικού υλικού (5.15). Στην συνέχεια υπολογίζεται η ογκομετρική φόρτιση του φίλτρου μέσω της σχέσης:

$$q_v = \frac{Q}{V} \quad (11.2)$$

όπου:

$q_v$ : ογκομετρική φόρτιση του φίλτρου,  $m^3/m^3 \cdot d$

$Q$ : παροχή του αποβλήτου στο σύστημα (χωρίς την ανακύκλωση),  $m^3/d$

$V$ : ο όγκος του πληρωτικού υλικού,  $m^3$

Το οργανικό φορτίο BOD και η οργανική φόρτιση του φίλτρου υπολογίζονται από τις σχέσεις (5.12) και (5.14) αντίστοιχα. Στην συνέχεια, η επαναληπτική διαδικασία του λογισμικού μεταβάλλει τον λόγο αναρροής  $R$  από 0 έως 2 με βήμα 0.1, και σε κάθε βήμα υπολογίζεται η ολική ογκομετρική φόρτιση του φίλτρου έτσι ώστε να είναι μέσα στα όρια του Πίνακα 12:

$$q_{v,tot} = q_v \cdot (1 + R) \quad (11.3)$$

όπου:

$q_v$ : ολική ογκομετρική φόρτιση του φίλτρου,  $m^3/m^3 \cdot d$

$R$ : λόγος αναρροής του αποβλήτου στο φίλτρο

Η τιμή του BOD του επεξεργασμένου αποβλήτου που εξέρχεται από την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης υπολογίζεται από την σχέση (11.1), χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες τιμές των σταθερών του Πίνακα 11, ανάλογα με το είδος του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου πληρωτικού υλικού (από πέτρα, τυχαίας διάταξης ή πλαστικό, καθορισμένης δομής). Τέλος, η απόδοση του βιολογικού φίλτρου μαζί με την δευτεροβάθμια δεξαμενή υπολογίζεται από την σχέση (5.11).

### 11.1.1 Αποτελέσματα λογισμικού

Όπως αναφέραμε, πηγή για την εξίσωση που χρησιμοποιήσαμε για την εξίσωση είναι η βιβλιογραφία (WEF, 2000). Στην συγκεκριμένη μορφή της εξίσωσης δεν αναφέρεται τίποτα για την επίδραση της ανακύκλωσης στην απόδοση, ούτε λαμβάνεται υπόψη η επίδρασή της στις τιμές του BOD εισόδου του αποβλήτου στο φίλτρο και της ογκομετρικής φόρτισης (εξίσωση (11.1)). Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται η διάταξη του Σχήματος 6.1 για την προσομοίωση και η απόδοση του βιολογικού φίλτρου δεν επηρεάζεται από την τιμή του λόγου αναρροής  $R$ .

Αν θεωρήσουμε ότι η ανακύκλωση του αποβλήτου στο φίλτρο μετά την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης μεταβάλλει τις τιμές των μεταβλητών εισόδου του λογισμικού προσομοίωσης, τότε αλλάζει και η απόδοση. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούμε την σχέση (8.4) για να υπολογίσουμε το BOD εισόδου του αποβλήτου στο φίλτρο μετά την ανακύκλωση, με  $S_{in}$  την τιμή του BOD εισόδου του αποβλήτου στο σύστημα, και την σχέση (11.3) για να υπολογίσουμε την ολική ογκομετρική φόρτιση. Αυτές οι μεταβλητές εισάγονται στην εξίσωση του Βρετανικού Μοντέλου (11.1), οπότε προκύπτουν νέες τιμές για την απόδοση, λαμβάνοντας υπόψη και την ανακύκλωση.

Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με το Βρετανικό μοντέλο λαμβάνοντας ή όχι υπόψη την επίδραση της ανακύκλωσης στον υπολογισμό της απόδοσης του βιολογικού φίλτρου μαζί με την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, γίνεται στα διαγράμματα των σχημάτων που ακολουθούν. Η μορφή της εξίσωσης που χρησιμοποιήσαμε αναφέρεται στην βιβλιογραφία (WEF, 2000), και σε αυτήν δεν γίνεται κάποια αναφορά στην ανακύκλωση του αποβλήτου στο φίλτρο, ούτε αν επηρεάζει τις μεταβλητές εισόδου του προβλήματος, όπως το BOD εισόδου του αποβλήτου στο βιολογικό φίλτρο και την τιμή της ογκομετρικής φόρτισης.

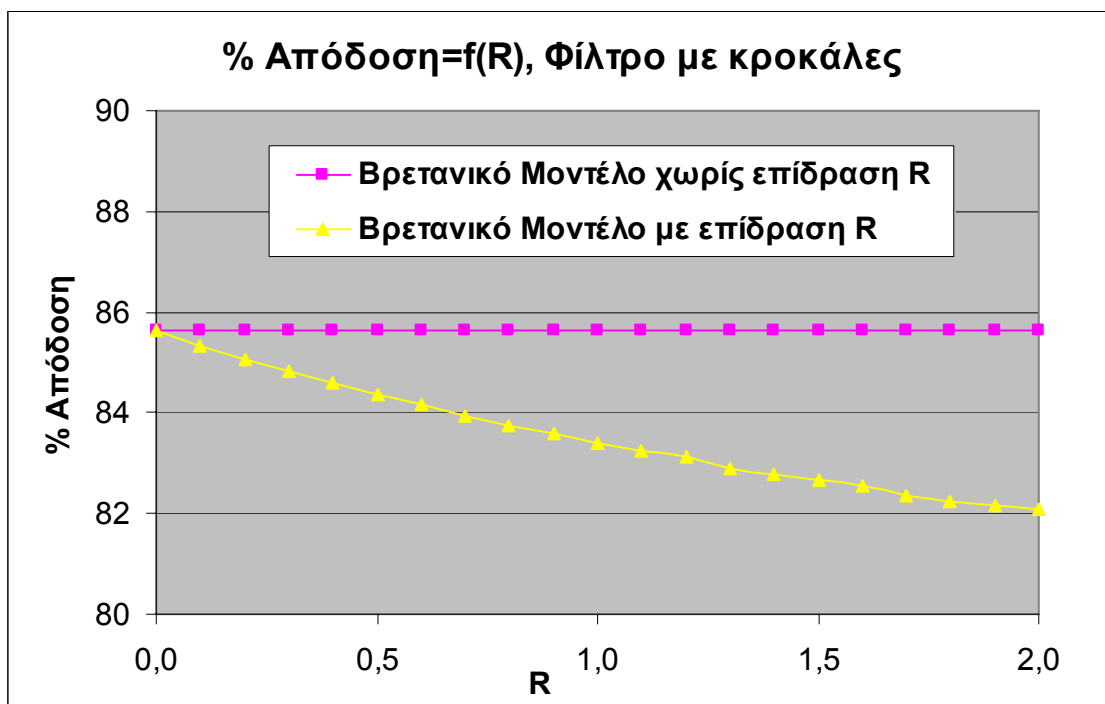
Αν λάβουμε υπόψη την ανακύκλωση στον υπολογισμό των μεταβλητών εισόδου, χρησιμοποιούμε την εξίσωση (8.4) για τον υπολογισμό του BOD εισόδου στο φίλτρο ( $S_0$ ), όπου  $S_{in}$  είναι το BOD εισόδου στο σύστημα πριν την ανακύκλωση που λαμβάνεται από του Πίνακες 6 και 10 για πληρωτικό υλικό από πέτρα και πλαστικό αντίστοιχα. Επίσης, χρησιμοποιούμε την ολική ογκομετρική φόρτιση του φίλτρου στην εξίσωση (11.1), η οποία υπολογίζεται από την σχέση (11.3). Στην περίπτωση αυτή, όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα του Σχήματος 11.1, για την περίπτωση του φίλτρου με κροκάλες

παρατηρείται μείωση της απόδοσης επεξεργασίας με την αύξηση του λόγου αναρροής από 0 έως 2, κατά τρεις περίπου ποσοστιαίες μονάδες. Αντίθετα, αν χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση (11.1) χωρίς να λάβουμε υπόψη την επίδραση της ανακύκλωσης, τότε η απόδοση του φίλτρου δεν επηρεάζεται από την τιμή του λόγου αναρροής, αλλά έχει σταθερή τιμή. Αντίστοιχες παρατηρήσεις ισχύουν και στην περίπτωση του φίλτρου με πλαστικό πληρωτικό υλικό, για το οποίο υπάρχει μείωση της απόδοσης κατά έξι ποσοστιαίες μονάδες, όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 11.3.

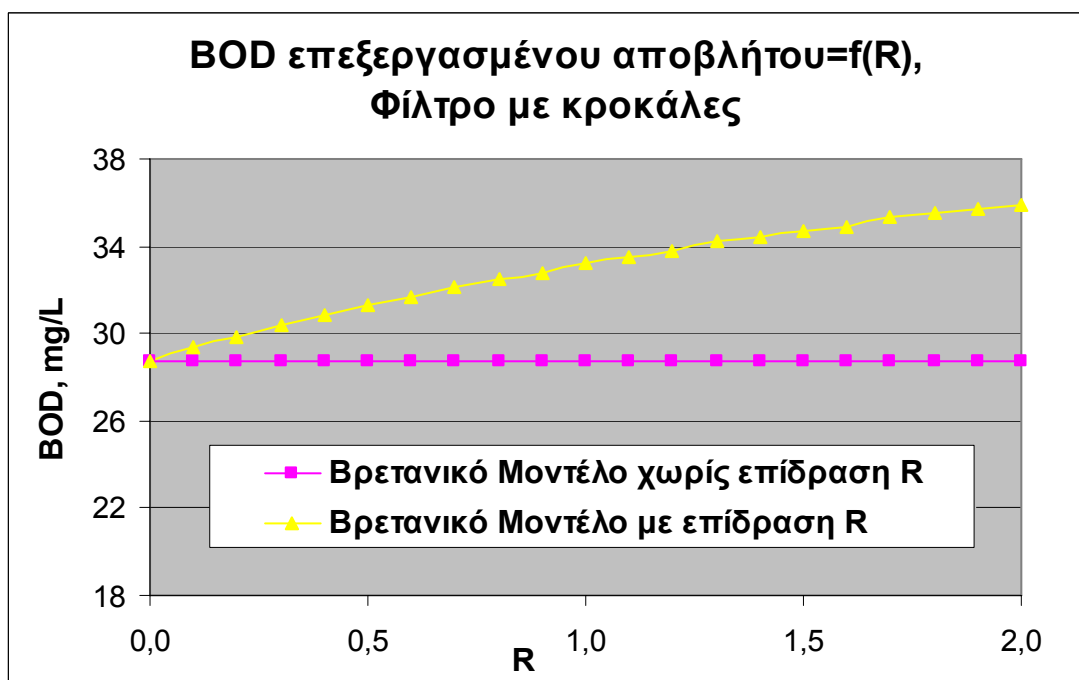
Από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η εξίσωση του Βρετανικού Μοντέλου είναι δομημένη έτσι ώστε να μην λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της ανακύκλωσης στον υπολογισμό της απόδοσης των βιολογικών φίλτρων. Πράγματι, υπάρχει μια ομάδα ερευνητών που θεωρεί ότι η επίδραση της ανακύκλωσης στην απόδοση δεν είναι σημαντική, επομένως ο λόγος που χρησιμοποιείται δεν είναι η αύξηση της απόδοσης αλλά ορισμένα άλλα πλεονεκτήματα που προσδίδει στο σύστημα επεξεργασίας, όπως η καλύτερη απόδοση διαβροχής του πληρωτικού υλικού, η εξισορρόπηση της παροχής όταν είναι μεταβαλλόμενη, η σταθεροποίηση της συγκέντρωσης BOD εισόδου του αποβλήτου όταν παρουσιάζει διακυμάνσεις, κλπ.

Η μείωση της απόδοσης με την αύξηση του λόγου αναρροής αντικατοπτρίζεται και στο BOD του επεξεργασμένου αποβλήτου, όπως παρατηρούμε από τα Σχήματα 11.2 και 11.4. Πράγματι, στην περίπτωση του φίλτρου με κροκάλες το BOD εξόδου αυξάνεται κατά 7mg/L περίπου, ενώ για το φίλτρο με πλαστικό η αύξηση είναι κατά 20mg/L περίπου, για τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήσαμε στην προσομοίωση (Πίνακες 6, 10 και 12).

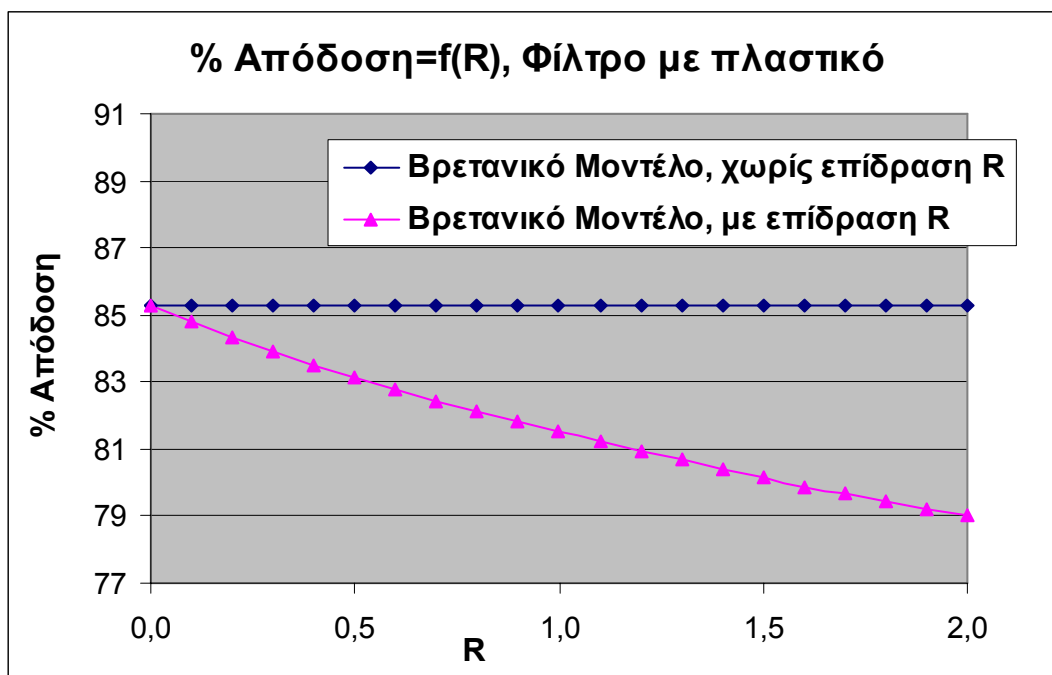




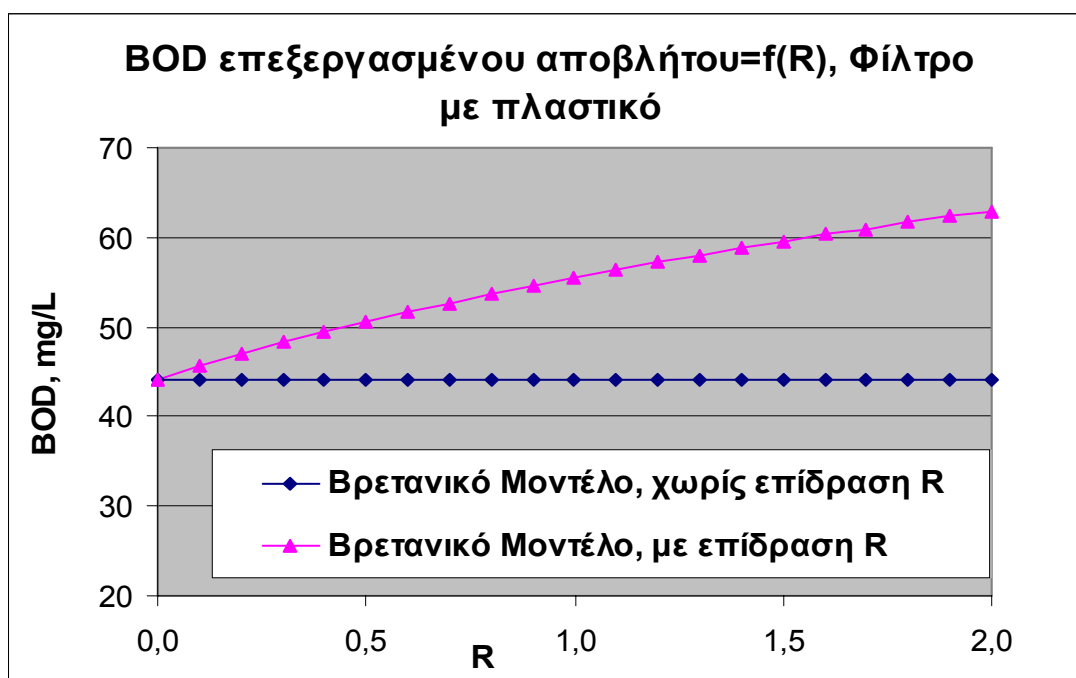
**Σχήμα 11.1:** Απόδοση βιολογικού φίλτρου με κροκάλες βάσει του Βρετανικού Μοντέλου, λαμβάνοντας ή όχι υπόψη την ανακύκλωση του αποβλήτου



**Σχήμα 11.2:** BOD επεξεργασμένου αποβλήτου σε φίλτρο με κροκάλες βάσει του Βρετανικού Μοντέλου, λαμβάνοντας ή όχι υπόψη την ανακύκλωση του αποβλήτου.



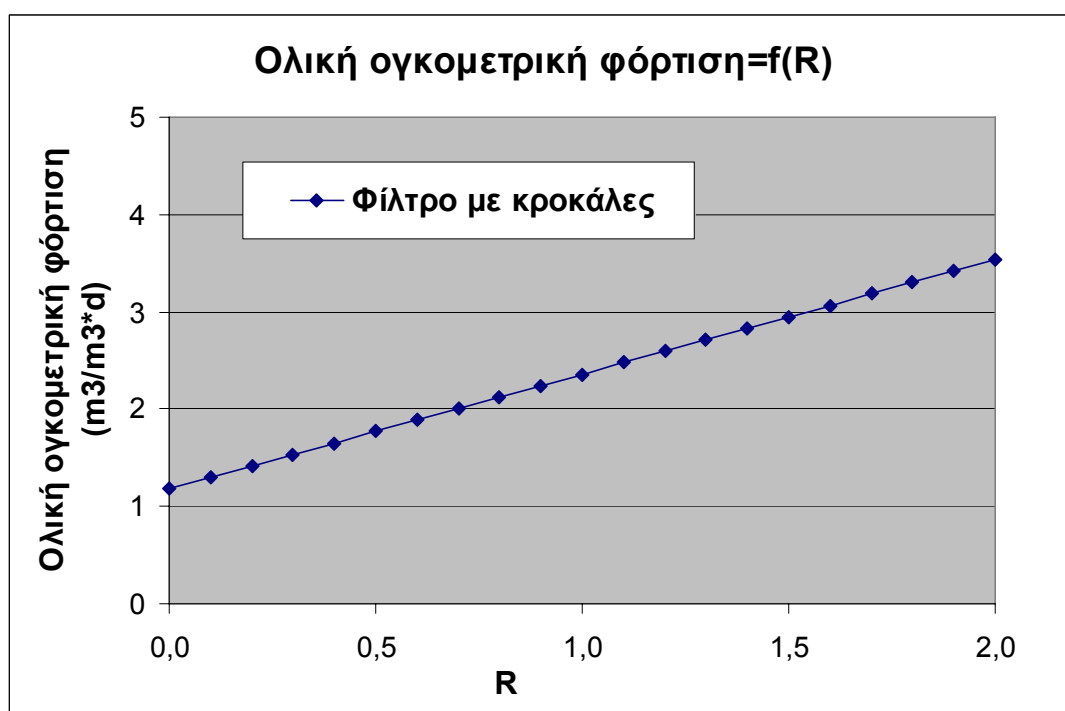
**Σχήμα 11.3:** Απόδοση βιολογικού φίλτρου με πλαστικό πληρωτικό υλικό βάσει του Βρετανικού Μοντέλου, λαμβάνοντας ή όχι υπόψη την ανακύκλωση του αποβλήτου



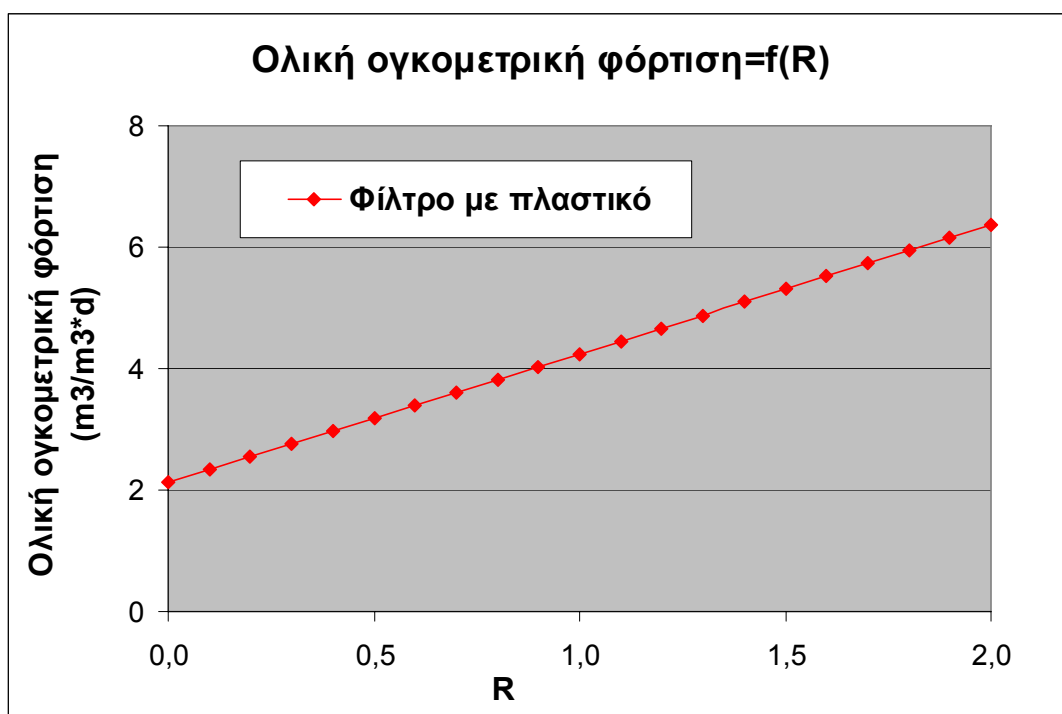
**Σχήμα 11.4:** BOD επεξεργασμένου αποβλήτου σε φίλτρο με πλαστικό πληρωτικό υλικό βάσει του Βρετανικού Μοντέλου, λαμβάνοντας ή όχι υπόψη την ανακύκλωση του αποβλήτου.

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, η εξίσωση του Βρετανικού Μοντέλου δεν χρησιμοποιεί ως ανεξάρτητη μεταβλητή υπολογισμού της απόδοσης του βιολογικού φίλτρου την επιφανειακή φόρτιση, αλλά την ογκομετρική φόρτιση ( $\text{m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$ ). Όπως και στις εξισώσεις που χρησιμοποιούν την επιφανειακή φόρτιση τίθεται ένα ορισμένο εύρος τιμών μέσα στο οποίο πρέπει να κυμαίνεται, το ίδιο συμβαίνει και σε αυτή την περίπτωση. Για να γίνεται σωστά ο σχεδιασμός ενός βιολογικού φίλτρου, έτσι ώστε κατά την λειτουργία του να υπάρχει αφενός μεν ικανή διαβροχή του πληρωτικού υλικού χωρίς να παρασύρεται ο βιολογικός υμένας από το απόβλητο, πρέπει η ογκομετρική φόρτιση να βρίσκεται μέσα σε ορισμένο εύρος τιμών. Στην βιβλιογραφία (WEF 2000) αναφέρεται ότι η ογκομετρική φόρτιση συνήθως κυμαίνεται από 0.5 έως  $10.0 \text{ m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$ , όριο που καταγράφεται και στον Πίνακα 12.

Στα ακόλουθα Σχήματα 11.5 και 11.6 φαίνεται η μεταβολή της ολικής ογκομετρικής φόρτισης (σχέση (11.3)) κατά την προσομοίωση της επεξεργασίας αστικού αποβλήτου με φίλτρο με κροκάλες και με φίλτρο με πλαστικό πληρωτικό υλικό. Πράγματι, με τα δεδομένα της προσομοίωσης η ογκομετρική φόρτιση βρίσκεται μέσα στα καθορισμένα όρια, επομένως η επεξεργασία είναι εφικτή.



**Σχήμα 11.5:** Ολική ογκομετρική φόρτιση βιολογικού φίλτρου με κροκάλες συναρτήσει του λόγου αναρροής του αποβλήτου



**Σχήμα 11.6:** Ολική ογκομετρική φόρτιση βιολογικού φίλτρου με πλαστικό πληρωτικό υλικό συναρτήσει του λόγου αναρροής του αποβλήτου

## **12. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ**

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σύγκριση και η αξιολόγηση των διαφόρων εξισώσεων υπολογισμού της απόδοσης των βιολογικών φίλτρων, έτσι ώστε να συμπεράνουμε κατά πόσο είναι αξιόπιστες και να κάνουμε κάποιες παρατηρήσεις ως προς τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτές. Από τις εξισώσεις που επεξεργαστήκαμε παραπάνω, ορισμένες έχουν αναπτυχθεί για να περιγράψουν την συμπεριφορά των φίλτρων με πληρωτικό υλικό από πέτρα (κροκάλες), γιατί στην εποχή που αναπτύχθηκαν, οι περισσότερες εφαρμογές αφορούσαν σε φίλτρα με κροκάλες. Οι εξισώσεις που εφαρμόζονται μόνο σε φίλτρα με κροκάλες είναι οι NRC (1946), Eckenfelder (1963) και Galler και Gotaas (1964). Αργότερα, επειδή οι εφαρμογές βιολογικών φίλτρων με πλαστικό πληρωτικό υλικό έγιναν συχνότερες και σταδιακά αποτέλεσαν την πλειοψηφία των εφαρμογών, αναπτύχθηκαν εξισώσεις που περιγράφουν την συμπεριφορά φίλτρων με πληρωτικό υλικό είτε από πέτρα ή πλαστικό, είτε αποκλειστικά με πλαστικό πληρωτικό υλικό. Στην πρώτη κατηγορία των εξισώσεων που εφαρμόζονται και στις δύο περιπτώσεις ανήκει η εξίσωση Schulze (1960), η τροποποιημένη εξίσωση Velz (1970) και το Βρετανικό Μοντέλο (1988). Η εξίσωση του Schulze αναπτύχθηκε βάσει πειραματικών δεδομένων που προέκυψαν από διάταξη βιολογικού φίλτρου με κάθετα συρμάτινα πλέγματα πάνω στα οποία αναπτύσσεται ο βιολογικός υμένας, όμως οι συγκρίσεις που έκανε ο μελετητής με τα δεδομένα της βιβλιογραφίας δείχνουν ότι η εξίσωσή του μπορεί να εφαρμοστεί και σε φίλτρα με πληρωτικό υλικό από πέτρα ή πλαστικό. Στις εξισώσεις που υπολογίζουν την απόδοση αποκλειστικά φίλτρων με πλαστικό πληρωτικό υλικό, ανήκει η εξίσωση Germain (1966).

### **12.1 Σύγκριση εξισώσεων για φίλτρα με κροκάλες**

Για την περιγραφή της συμπεριφοράς των φίλτρων με κροκάλες χρησιμοποιήσαμε τις εξισώσεις NRC, Eckenfelder, Galler και Gotaas, Schulze και το Βρετανικό Μοντέλο, δηλαδή τόσο αυτές που αναφέρονται αμιγώς σε φίλτρα με κροκάλες, όσο και αυτές που χρησιμοποιούνται και για τους δύο τύπους πληρωτικού υλικού. Η προσομοίωση της επεξεργασίας αστικών αποβλήτων με τις ανωτέρω εξισώσεις για τον υπολογισμό της απόδοσης

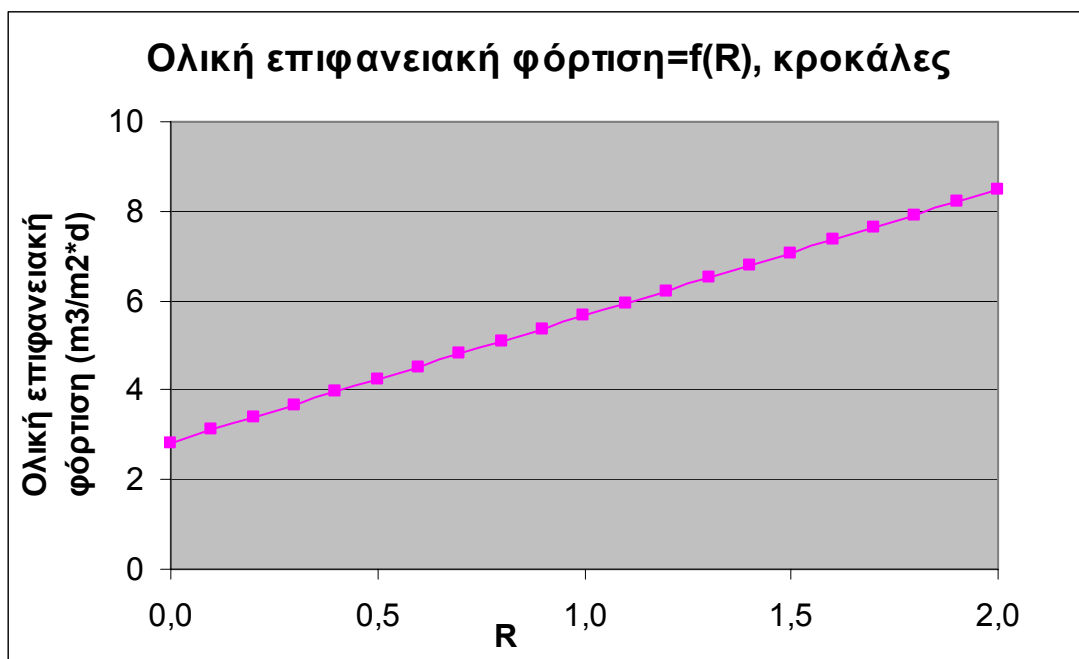
συναρτήσει του λόγου αναρροής του αποβλήτου R, έγινε βάσει λογισμικού σε γλώσσα Fortran, όπως περιγράφεται στις παραγράφους 5.4, 6.1, 8.1, 9.1 και 11.1.

Τα δεδομένα εισόδου των ανεξάρτητων μεταβλητών των εξισώσεων για τον υπολογισμό της απόδοσης, είναι στην περίπτωση των φίλτρων με κροκάλες αυτά που αναφέρονται στον Πίνακα 6. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που αφορούν στις μεταβλητές σχεδιασμού των βιολογικών φίλτρων είναι κοινά για όλες τις εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν και αναφέρονται στον Πίνακα 13. Τα αποτελέσματα αυτά υπολογίστηκαν από τα λογισμικά συσχετισμού απόδοσης – λόγου αναρροής. Οι διατάξεις προσομοίωσης αποτελούνται από ένα βιολογικό φίλτρο που ακολουθείται από δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, δηλαδή σε όλες τις περιπτώσεις το BOD αναφέρεται στο επεξεργασμένο απόβλητο μετά την καθίζηση.

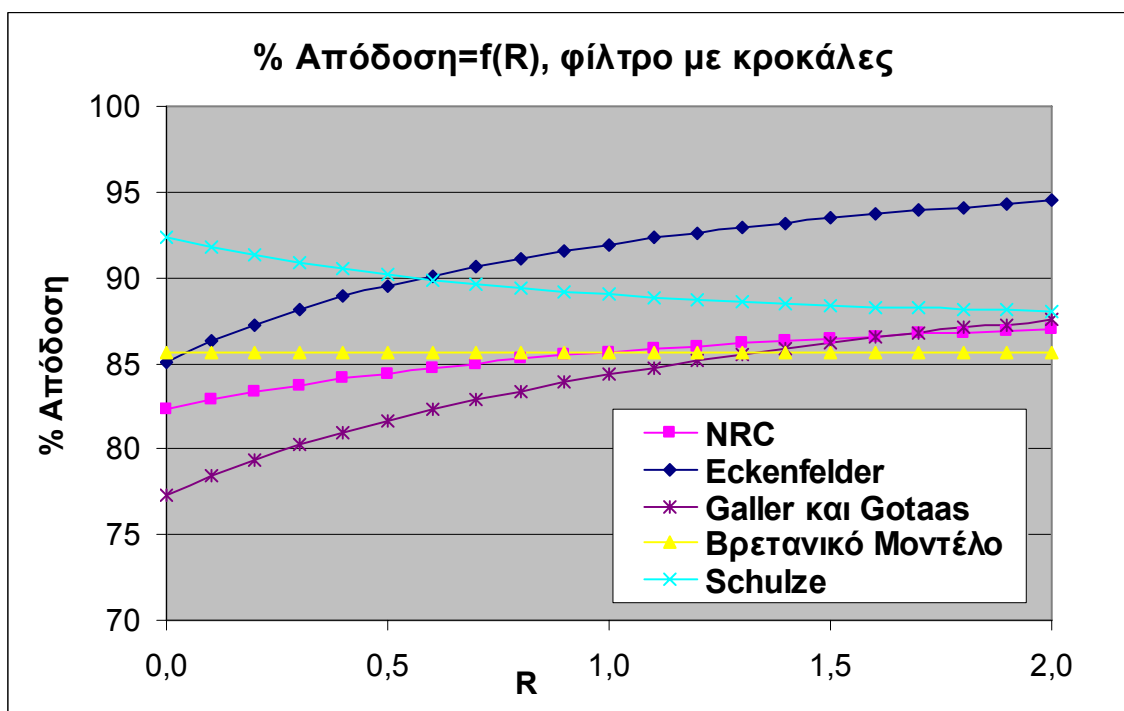
**Πίνακας 13:** Υπολογισμός μεταβλητών σχεδιασμού βιολογικών φίλτρων με κροκάλες από εμπειρικές εξισώσεις, βάσει των δεδομένων εισόδου του Πίνακα 6

<b>Αποτελέσματα λογισμικού E=f(R)</b>	
Διατομή φίλτρου (m <sup>2</sup> )	2,827.4
Επιφανειακή φόρτιση φίλτρου (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d) για R=0	2.8
Όγκος πληρωτικού υλικού (m <sup>3</sup> )	6,785.8
Οργανικό φορτίο (BOD) φίλτρου (kg/d)	1,600
Οργανική φόρτιση φίλτρου (kg/m <sup>3</sup> *d) χωρίς την επίδραση του R	0.236

Επίσης, η μεταβολή της ολικής επιφανειακής φόρτισης του φίλτρου λόγω της αύξησης του λόγου αναρροής του αποβλήτου είναι κοινή για όλες τις εμπειρικές εξισώσεις που χρησιμοποιήσαμε, γιατί υπολογίζεται από την σχέση (5.18), μέσω των (5.17) και (6.3) και εξαρτάται τελικά μόνο από τα δεδομένα εισόδου που είναι κοινά σε όλες τις περιπτώσεις (παροχή αποβλήτου, διάμετρος φίλτρου). Η μεταβολή της ολικής επιφανειακής φόρτισης εικονίζεται στο Σχήμα 12.1



**Σχήμα 12.1:** Μεταβολή της ολικής επιφανειακής φόρτισης συναρτήσει του λόγου αναρροής σε φίλτρο με κροκάλες.



**Σχήμα 12.2:** Σύγκριση εξισώσεων υπολογισμού απόδοσης βιολογικών φίλτρων με κροκάλες συναρτήσει του λόγου αναρροής, βάσει λογισμικού προσομοίωσης επεξεργασίας αστικού αποβλήτου

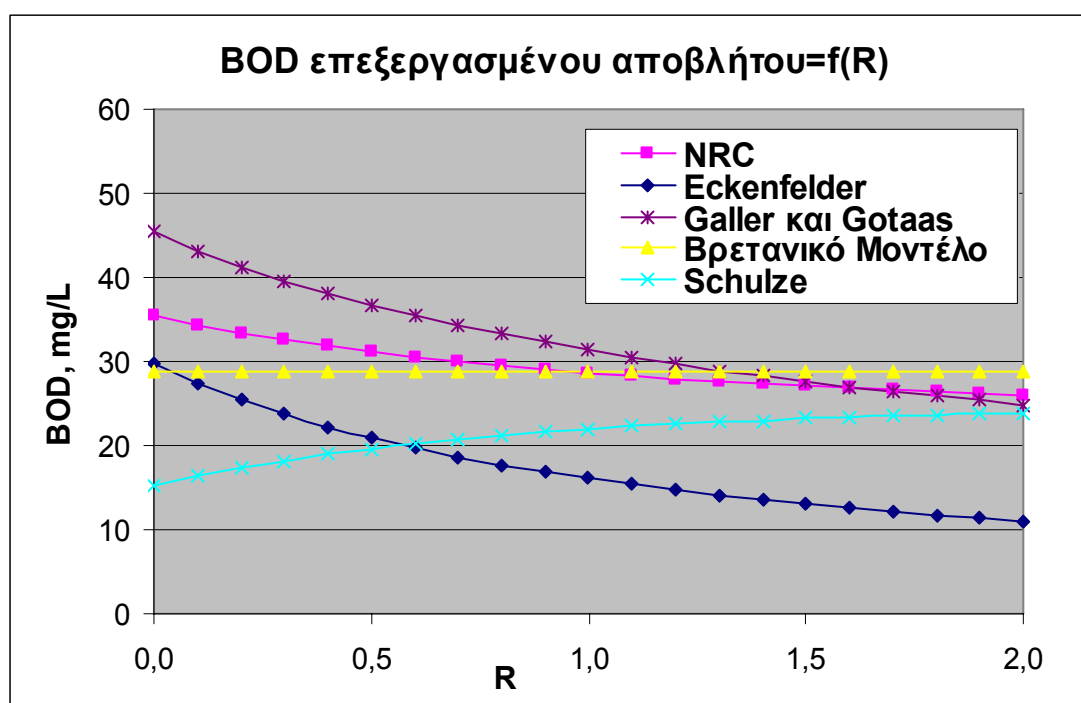
Όπως παρατηρούμε από το ανωτέρω Σχήμα 12.2, η μόνη εξίσωση που προβλέπει μείωση της απόδοσης με την αύξηση του λόγου αναρροής του αποβλήτου στο φίλτρο είναι η εξίσωση Schulze. Πράγματι, όπως αναφέρεται στην πρωτότυπη δημοσίευση του ερευνητή, η ανακύκλωση δεν αναμένεται να αυξήσει την απόδοση επεξεργασίας, αφού η αραίωση του εισερχόμενου αποβλήτου που επιτυγχάνεται, αντισταθμίζεται από την αύξηση της ολικής επιφανειακής φόρτισης. Επομένως, ο Schulze διαφωνεί με τους υπόλοιπους ερευνητές που θεωρούν ότι η ανακύκλωση αυξάνει την απόδοση, και θεωρεί ότι τα πλεονεκτήματα της ανακύκλωσης είναι δευτερεύοντα, όπως η εξισορρόπηση της επιφανειακής φόρτισης, η καλύτερη κατανομή του αποβλήτου πάνω από το πληρωτικό υλικό, και ο περιορισμός της έμφραξης του φίλτρου από συσσώρευση στερεών. Σύμφωνα με τον Schulze, η αύξηση της απόδοσης που παρατηρείται με την εφαρμογή ανακύκλωσης, οφείλεται σε αυτούς τους δευτερεύοντες παράγοντες.

Όπως εξηγήσαμε και στην παράγραφο 11.1.1, η εξίσωση του Βρετανικού Μοντέλου επίσης δεν λαμβάνει υπόψη την ανακύκλωση του αποβλήτου στον υπολογισμό της απόδοσης, γι' αυτό παρατηρούμε ότι η απόδοση έχει σταθερή τιμή ανεξάρτητα από την μεταβολή του  $R$ . Όσον αφορά στις υπόλοιπες εξισώσεις, η απόδοση που υπολογίζουν αυξάνεται με την αύξηση του λόγου αναρροής του αποβλήτου, παρατήρηση που είναι γενικά αποδεκτή από του περισσότερους ερευνητές. Ο μέσος όρος τιμών της απόδοσης που υπολογίστηκε από την προσομοίωση με τις πέντε εξισώσεις του Σχήματος 12.2, γενικά δεν εμφανίζει πάρα πολύ μεγάλες διαφορές και καταγράφεται στον Πίνακα 14 που ακολουθεί. Πράγματι, όπως παρατηρούμε από τις τιμές του πίνακα, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του μέσου όρου της % απόδοσης διαφέρουν μεταξύ τους κατά 7,5 μονάδες περίπου. Η μέγιστη τιμή αντιστοιχεί στην εξίσωση Eckenfelder και είναι 91.22%, ενώ η ελάχιστη τιμή απόδοσης προκύπτει από την Galler και Gotaas και είναι 83.68%. Μπορούμε επομένως να συμπεράνουμε ότι η περιγραφή της λειτουργίας ενός βιολογικού φίλτρου δεν διαφέρει πολύ για τις πέντε εμπειρικές εξισώσεις που μελετήσαμε, επομένως συμπεραίνουμε ότι γενικά είναι αξιόπιστες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την χονδρική εκτίμηση των απαραίτητων μεταβλητών σχεδιασμού ενός βιολογικού φίλτρου.



**Πίνακας 14:** Μέσος όρος απόδοσης βιολογικού φίλτρου με κροκάλες από εμπειρικές εξισώσεις για λόγο αναρροής από 0 έως 2.

Εξίσωση Προσομοίωσης	Μέσος όρος εκτιμώμενης % απόδοσης
Eckenfelder	91.22
Schulze	89.45
Βρετανικό Μοντέλο	85.62
NRC	85.32
Galler και Gotaas	83.68



**Σχήμα 12.3:** BOD επεξεργασμένου αποβλήτου με σύστημα βιολογικού φίλτρου με κροκάλες βάσει εμπειρικών εξισώσεων.

Αντίστοιχες παρατηρήσεις ισχύουν και για το BOD του επεξεργασμένου αποβλήτου που εξέρχεται από την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης που ακολουθεί το βιολογικό φίλτρο. Να υπενθυμίσουμε ότι η διάταξη προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε για την σύγκριση των εξισώσεων περιλαμβάνει ένα βιολογικό φίλτρο με δευτεροβάθμια δεξαμενή. Το BOD του επεξεργασμένου αποβλήτου μειώνεται γενικά με την αύξηση του λόγου αναρροής, με εξαίρεση την εξίσωση Schulze, βάσει της οποίας αυξάνεται κατά 8.5 mg/L περίπου για μεταβολή του R από 0 έως 2. Αυτό εξηγείται όπως

περιγράψαμε παραπάνω από την υπόθεση του Schulze ότι η εφαρμογή ανακύκλωσης του αποβλήτου δεν βελτιώνει την απόδοση επεξεργασίας. Επίσης, βάσει του Βρετανικού Μοντέλου η απόδοση δεν μεταβάλλεται συναρτήσει του R, άρα και το εξερχόμενο BOD έχει σταθερή τιμή όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 12.3. Γενικά η μείωση του BOD εξόδου με την αύξηση του R από 0 έως 2 κυμαίνεται από 6,5 mg/L έως και 20,5 mg/L περίπου. Η μεγαλύτερη μεταβολή αντιστοιχεί στην εξίσωση Galler και Gotaas, βάσει της οποίας η ανακύκλωση του αποβλήτου έχει σημαντικά μεγάλη επίδραση στην απόδοση επομένως και στην τιμή BOD του εξερχόμενου αποβλήτου. Σημαντική επίδραση στην ποιότητα του εξερχόμενου αποβλήτου έχει η ανακύκλωση και βάσει της εξίσωσης Eckenfelder, που εμφανίζει μείωση του εξερχόμενου BOD κατά 19mg/L περίπου. Οι τιμές του μέσου όρου BOD επεξεργασμένου αποβλήτου για τις διάφορες εμπειρικές εξισώσεις, που αντιστοιχούν στα δεδομένα του Σχήματος 12.3, καταγράφονται στον Πίνακα 15.

**Πίνακας 15:** Μέσος όρος BOD επεξεργασμένου αποβλήτου με σύστημα βιολογικού φίλτρου με κροκάλες, που υπολογίζεται από εμπειρικές εξισώσεις για λόγο αναρροής από 0 έως 2.

Εξίσωση Προσομοίωσης	Μέσος όρος BOD επεξεργασμένου αποβλήτου (mg/L)
Eckenfelder	17.56
Schulze	21.11
Βρετανικό Μοντέλο	28.75
NRC	29.37
Galler και Gotaas	32.64

## 12.2 Σύγκριση εξισώσεων για φίλτρα με πλαστικό

Προκειμένου να κάνουμε σύγκριση της εκτιμώμενης απόδοσης βιολογικού φίλτρου με πλαστικό πληρωτικό υλικό κατά την επεξεργασία αστικών αποβλήτων, όπως υπολογίζεται από τις διάφορες εμπειρικές εξισώσεις, χρησιμοποιήσαμε τις εξισώσεις των Schulze (1960), Germain (1966) και του Βρετανικού Μοντέλου (Packam, 1988). Από τις εξισώσεις αυτές το Βρετανικό Μοντέλο και η εξίσωση του Schulze εφαρμόζονται εξίσου σε βιολογικά φίλτρα

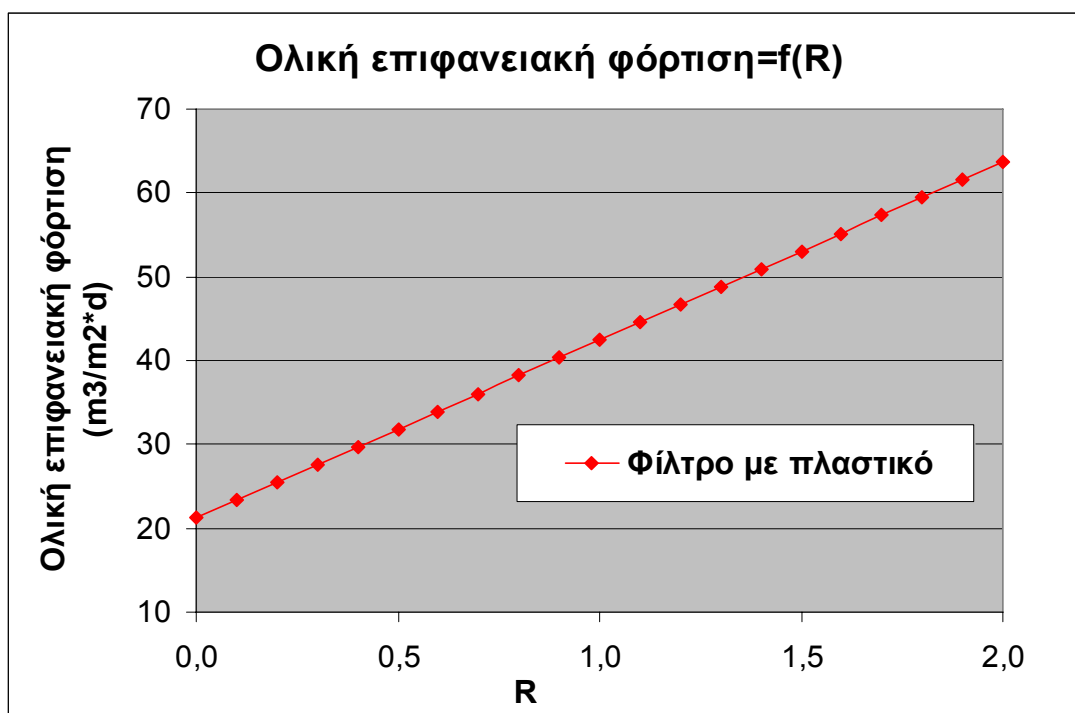
με πληρωτικό υλικό από πέτρα ή πλαστικό, ενώ η εξίσωση Germain έχει εξαχθεί αποκλειστικά για συστήματα με πλαστικό πληρωτικό υλικό.

Για την μελέτη των παραπάνω εξισώσεων χρησιμοποιήθηκε λογισμικό προσομοίωσης επεξεργασίας αστικών αποβλήτων με διάταξη βιολογικού φίλτρου ακολουθούμενου από μία δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, το οποίο υπολογίζει την απόδοση του φίλτρου συναρτήσει του λόγου αναρροής του αποβλήτου, όπως περιγράφηκε στις παραγράφους 8.1, 10.1 και 11.1. Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση και αφορούν στις μεταβλητές εισόδου του αποβλήτου, τις διαστάσεις του φίλτρου και τα όρια της επιτρεπόμενης φόρτισης σε φίλτρο με πλαστικό πληρωτικό υλικό καταγράφονται στον Πίνακα 10. Τα αποτελέσματα για τις μεταβλητές σχεδιασμού που προέκυψαν από την προσομοίωση και είναι κοινά και τις τρεις εξισώσεις που μελετήσαμε, καταγράφονται στον Πίνακα 16 που ακολουθεί.

**Πίνακας 16:** Υπολογισμός μεταβλητών σχεδιασμού βιολογικών φίλτρων με πλαστικό πληρωτικό υλικό βάσει εμπειρικών εξισώσεων, με τα δεδομένα εισόδου του Πίνακα 6.

Αποτελέσματα λογισμικού $E=f(R)$	
Διατομή φίλτρου ( $m^2$ )	706.9
Επιφανειακή φόρτιση φίλτρου ( $m^3/m^2*d$ ) για $R=0$	21.2
Όγκος πληρωτικού υλικού ( $m^3$ )	7,068.6
Οργανικό φορτίο (BOD) φίλτρου (kg/d)	4,500
Οργανική φόρτιση φίλτρου ( $kg/m^3*d$ ) χωρίς την επίδραση του R	0.64

Η οργανική φόρτιση του φίλτρου που υπολογίστηκε είναι μέσα στα όρια του Πίνακα 1 για πλαστικό πληρωτικό υλικό ( $0.6 - 3.2 \text{ kg}/m^3*d$ ). Το ίδιο ισχύει και για την ολική επιφανειακή φόρτιση, η μεταβολή της οποίας συναρτήσει της αύξησης του λόγου αναρροής φαίνεται στο Σχήμα 12.4, και είναι εντός των καθορισμένων ορίων ( $10 - 75 \text{ m}^3/m^2*d$ ).

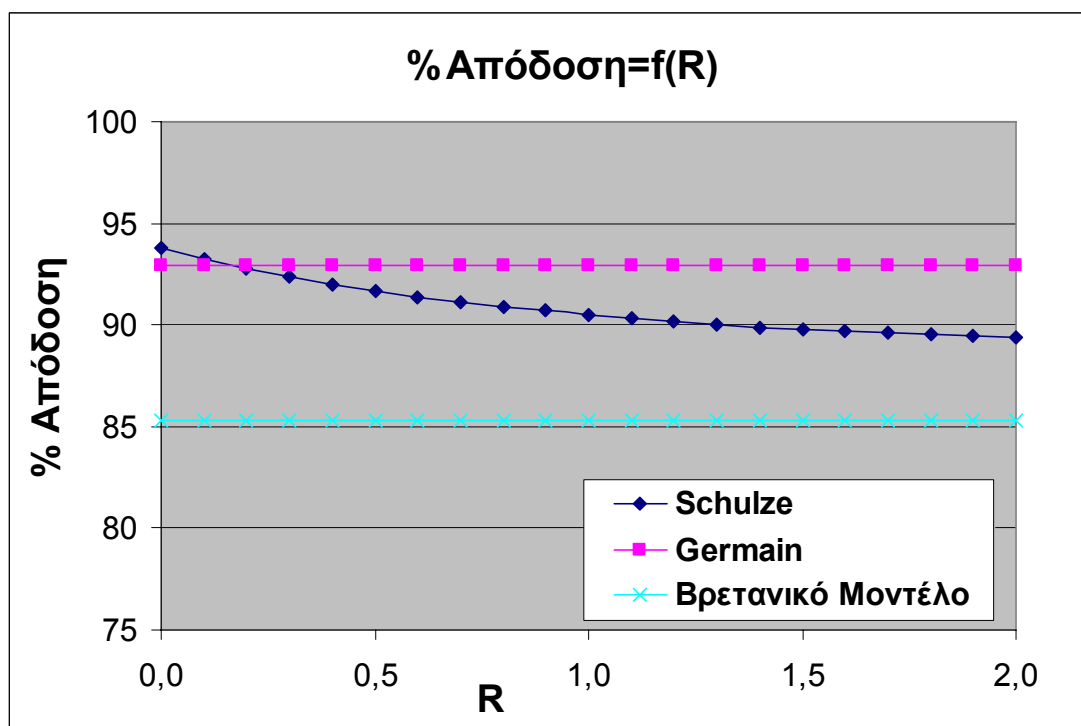


**Σχήμα 12.4:** Μεταβολή της ολικής επιφανειακής φόρτισης βιολογικού φίλτρου με πλαστικό πληρωτικό υλικό συναρτήσει του λόγου αναρροής.

Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 12.5, οι εξισώσεις του Germain και το Βρετανικό Μοντέλο δεν λαμβάνουν υπόψη την επίδραση της ανακύκλωσης του αποβλήτου στην απόδοση της διάταξης. Ο Schulze αντίθετα την λαμβάνει υπόψη στον υπολογισμό των μεταβλητών εισόδου του αποβλήτου στο φίλτρο, η εκτιμώμενη απόδοση όμως μειώνεται με την αύξηση του λόγου αναρροής. Για τα δεδομένα που χρησιμοποιήσαμε, με την αύξηση του λόγου R από 0 έως 2 η απόδοση μειώνεται κατά 4,5 ποσοστιαίες μονάδες περίπου. Στην πραγματικότητα, ο Schulze θεωρεί ότι η ανακύκλωση δεν αυξάνει την απόδοση του βιολογικού φίλτρου, τουλάχιστον όχι άμεσα, όπως εξηγήσαμε στην προηγούμενη παράγραφο (12.1).

Γενικά παρατηρούμε ότι στις εξισώσεις που προβλέπουν την απόδοση βιολογικών φίλτρων με πλαστικό πληρωτικό υλικό, η ανακύκλωση ως επί το πλείστον δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της απόδοσης, σε αντίθεση με τα φίλτρα με κροκάλες. Αυτό πιθανώς δικαιολογείται από την εξέλιξη της τεχνογνωσίας στην κατασκευή του πλαστικού πληρωτικού υλικού, που εξασφαλίζει μεγαλύτερο ποσοστό κενού χώρου ανά μονάδα όγκου του υλικού, σημαντικά μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια για την ανάπτυξη του βιολογικού υμένα, και πολύ μικρότερο ειδικό βάρος. Έτσι, γίνεται πιο αποτελεσματικά η διαβροχή του βιολογικού υμένα και καλύτερη κατανομή του αποβλήτου σε όλη

τη μάζα του πληρωτικού υλικού, αλλά και αποφεύγεται η έμφραξη του φίλτρου λόγω της συσσώρευσης στερεών στους κενούς χώρους που εμποδίζουν την ομαλή ροή του αποβλήτου. Τα φαινόμενα αυτά μειώνονται με την αύξηση του λόγου αναρροής στα φίλτρα με κροκάλες, με αποτέλεσμα να αυξάνεται αντίστοιχα και η απόδοση επεξεργασίας. Αντίθετα, στα φίλτρα με πλαστικό τα φαινόμενα αυτά είναι λιγότερο έντονα, με αποτέλεσμα, η επίδραση της ανακύκλωσης στην απόδοση του φίλτρου να μην είναι τόσο σημαντική, χωρίς όμως να μηδενίζεται εντελώς.



**Σχήμα 12.5:** Απόδοση βιολογικού φίλτρου με πλαστικό βάσει εμπειρικών εξισώσεων συναρτήσει του λόγου αναρροής του αποβλήτου.

Γενικά παρατηρούμε ότι η μέση τιμή της εκτιμώμενης απόδοσης για το εύρος τιμών του λόγου R που μελετάμε, δεν διαφέρει πάρα πολύ ανάμεσα στις εξισώσεις υπολογισμού. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 17, η μέγιστη από την ελάχιστη τιμή διαφέρουν λιγότερο από οκτώ ποσοστιαίες μονάδες. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι οι εμπειρικές εξισώσεις είναι γενικά αξιόπιστες, και βοηθούν σημαντικά στον σχεδιασμό ενός συστήματος βιολογικών φίλτρων. Βέβαια, επειδή η ποιότητα του εξερχόμενου αποβλήτου επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες που δεν είναι δυνατόν να συμπεριληφθούν σε μια εμπειρική εξίσωση, όπως το είδος του εισερχόμενου αποβλήτου, το είδος του

πληρωτικού υλικού, το σύστημα και ο ρυθμός τροφοδοσίας, οι μεταβολές στην παροχή, στην συγκέντρωση και στο είδος των περιεχόμενων ρύπων σε ένα αποβλήτο κ.α., καλό είναι να γίνονται επί τόπου μετρήσεις για την εκτίμηση των σταθερών της εμπειρικής εξίσωσης που θα επιλέξουμε.

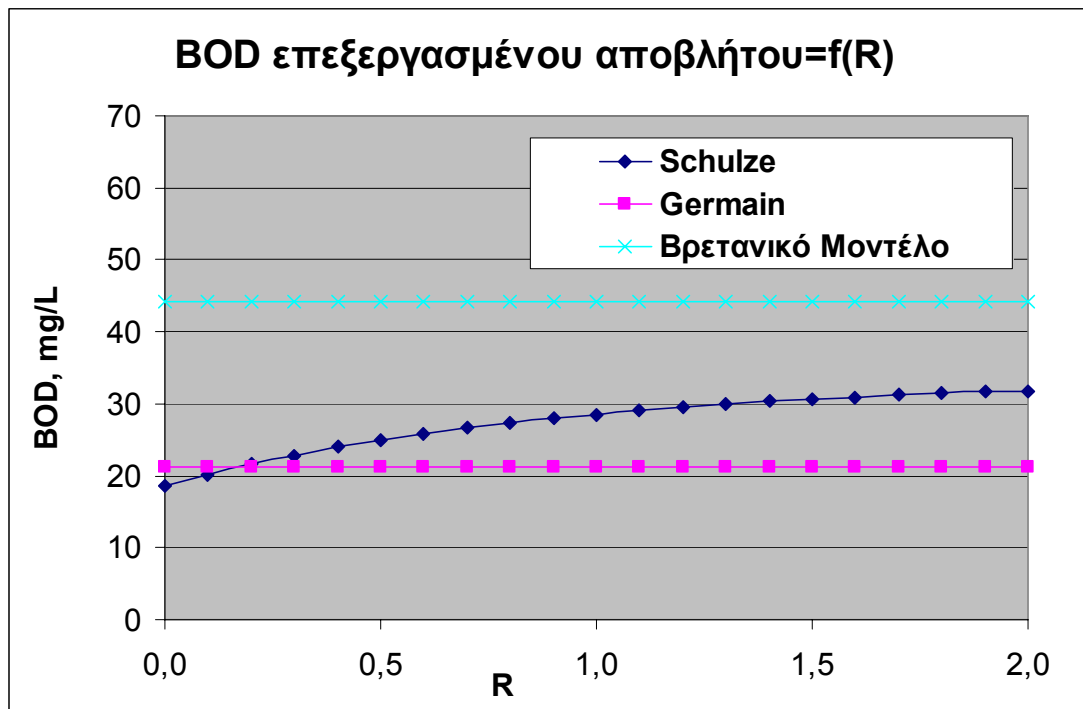
**Πίνακας 17:** Μέσος όρος απόδοσης βιολογικού φίλτρου με πλαστικό πληρωτικό υλικό, που υπολογίζεται από εμπειρικές εξισώσεις για λόγο αναρροής από 0 έως 2.

Εξίσωση Προσομοίωσης	Μέσος όρος εκτιμώμενης % απόδοσης
Germain	92.94
Schulze	90.88
Βρετανικό Μοντέλο	85.26

Αντίστοιχες παρατηρήσεις ισχύουν και για το BOD του εξερχόμενου αποβλήτου (Σχήμα 12.6), που δεν μεταβάλλεται με το R βάσει των εξισώσεων του Germain και του Βρετανικού Μοντέλου, ενώ σύμφωνα με την εξίσωση του Schulze αυξάνεται κατά 13 mg/L περίπου. Οι εκτιμώμενες τιμές για τον μέσο όρο BOD του εξερχόμενου αποβλήτου δεν διαφέρουν πολύ ανάμεσα στις εξισώσεις Germain και Schulze (6mg/L), ενώ βάσει του Βρετανικού Μοντέλου, η ποιότητα του εξερχόμενου αποβλήτου είναι αρκετά κατώτερη (Πίνακας 18).

**Πίνακας 18:** Μέσος όρος BOD επεξεργασμένου αποβλήτου με σύστημα βιολογικού φίλτρου με πλαστικό πληρωτικό υλικό, που υπολογίζεται από εμπειρικές εξισώσεις για λόγο αναρροής από 0 έως 2.

Εξίσωση Προσομοίωσης	Μέσος όρος BOD επεξεργασμένου αποβλήτου (mg/L)
Germain	21.17
Schulze	27.36
Βρετανικό Μοντέλο	44.21



**Σχήμα 12.6:** BOD επεξεργασμένου αποβλήτου με σύστημα βιολογικού φίλτρου με πλαστικό πληρωτικό υλικό βάσει εμπειρικών εξισώσεων, συναρτήσεως του λόγου αναρροής.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκε διεξοδικά η εμπειρική εξίσωση NRC, βάσει της οποίας έγινε υπολογισμός του όγκου του πληρωτικού υλικού που απαιτείται για την επεξεργασία αστικών αποβλήτων. Επίσης, έγινε σύγκριση διατάξεων επεξεργασίας με ένα ή δύο βιολογικά φίλτρα, βάσει της ίδιας εξίσωσης. Συγκρίναμε την απόδοση επεξεργασίας ενός συστήματος βιολογικού φίλτρου με δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, με πληρωτικό υλικό από πέτρα ή πλαστικό, βάσει των διαφόρων εμπειρικών εξισώσεων που χρησιμοποιούνται συχνότερα στην βιβλιογραφία. Τέλος, συγκρίναμε την απόδοση του ανωτέρω συστήματος βάσει ορισμένης εμπειρικής εξίσωσης, αφενός με την μορφή που απαντά στην πρωτότυπη δημοσίευση, και αφετέρου με την μορφή που απαντά στην βιβλιογραφία.

Βάσει της εξίσωσης NRC, την οποία μελετήσαμε διεξοδικότερα, προκύπτει ότι ο απαιτούμενος όγκος του πληρωτικού υλικού αυξάνεται και μάλιστα με αυξανόμενο ρυθμό, καθώς μεγαλώνει η απόδοση επεξεργασίας, για ορισμένο BOD εισόδου του αποβλήτου. Αντίστοιχα, για καθορισμένη συγκέντρωση BOD του επεξεργασμένου αποβλήτου, ο όγκος αυξάνεται με αυξανόμενο ρυθμό καθώς μεγαλώνει η συγκέντρωση BOD εισόδου του αποβλήτου στο σύστημα.

Για σύστημα επεξεργασίας με δύο βιολογικά φίλτρα, βάσει της εξίσωσης NRC προέκυψε ότι ο συνολικός όγκος του πληρωτικού υλικού μειώνεται με την αύξηση του λόγου αναρροής του αποβλήτου, για ορισμένο BOD εισόδου. Σε ένα σύστημα δύο φίλτρων, προκειμένου να επιτύχουμε ορισμένη συνολική απόδοση, αυξάνοντας τον όγκο και συνεπώς την μερική απόδοση του πρώτου φίλτρου, μειώνουμε αντίστοιχα τον όγκο και την μερική απόδοση του δεύτερου. Υπάρχει ένα βέλτιστο που αντιστοιχεί στην μερική απόδοση του πρώτου φίλτρου, για την οποία ελαχιστοποιείται ο συνολικός όγκος του πληρωτικού υλικού. Παρατηρούμε μάλιστα ότι η βέλτιστη τιμή της μερικής απόδοσης του πρώτου φίλτρου αυξάνεται, καθώς αυξάνεται το BOD εισόδου στο σύστημα.

Συγκρίνοντας τις διατάξεις επεξεργασίας με ένα και δύο βιολογικά φίλτρα αντίστοιχα βάσει της εξίσωσης NRC, παρατηρούμε ότι για απόβλητο καθορισμένης ισχύος και παροχής, ο όγκος του πληρωτικού υλικού που απαιτείται για την επεξεργασία του με ένα βιολογικό φίλτρο, είναι περίπου τετραπλάσιος σε σχέση με τον συνολικό όγκο που απαιτείται όταν χρησιμοποιούμε δύο φίλτρα. Το συμπέρασμα αυτό δικαιολογείται από την



αύξηση της επιφανειακής και της οργανικής φόρτισης στην περίπτωση των δύο φίλτρων, που έχει ως συνέπεια την εντονότερη και ταχύτερη επεξεργασία του αποβλήτου. Βέβαια, η αύξηση της φόρτισης δεν μπορεί να είναι απεριόριστη, γιατί τότε ο χρόνος επαφής του αποβλήτου με το φίλτρο δεν θα επαρκεί για την επεξεργασία του.

Όσον αφορά στα βιολογικά φίλτρα με κροκάλες, χρησιμοποιήσαμε πέντε εμπειρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της απόδοσής τους συναρτήσει του λόγου αναρροής του αποβλήτου, και τα αποτελέσματα που προέκυψαν δεν διαφέρουν πάρα πολύ. Η μέγιστη τιμή του μέσου όρου απόδοσης που αντιστοιχεί στην εξίσωση Eckenfelder, είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη τιμή που αντιστοιχεί στην εξίσωση Galler και Gotaas, μόλις κατά 9%. Επομένως συμπεραίνουμε ότι οι εξισώσεις που μελετήσαμε είναι γενικά αξιόπιστες, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την χονδρική εκτίμηση των απαραίτητων μεταβλητών σχεδιασμού ενός βιολογικού φίλτρου.

Στις εξισώσεις που προβλέπουν την απόδοση βιολογικών φίλτρων με πλαστικό πληρωτικό υλικό, η ανακύκλωση ως επί το πλείστον δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της απόδοσης, σε αντίθεση με τα φίλτρα με κροκάλες. Αυτό πιθανώς δικαιολογείται από την εξέλιξη της τεχνογνωσίας στην κατασκευή του πλαστικού πληρωτικού υλικού, με αποτέλεσμα, η επίδραση της ανακύκλωσης στην απόδοση του φίλτρου να μην είναι τόσο σημαντική, χωρίς όμως να μηδενίζεται εντελώς.

Γενικά παρατηρούμε ότι η μέση τιμή της εκτιμώμενης απόδοσης για το εύρος τιμών του λόγου  $R$  που μελετάμε, δεν διαφέρει πάρα πολύ ανάμεσα στις εξισώσεις υπολογισμού. Συγκεκριμένα η μέγιστη (εξίσωση Germain) από την ελάχιστη τιμή (Βρετανικό Μοντέλο) διαφέρουν κατά 9% περίπου, όπως και στην περίπτωση των φίλτρων με κροκάλες. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι και για τα φίλτρα με πλαστικό πληρωτικό υλικό, οι εμπειρικές εξισώσεις είναι γενικά αξιόπιστες, και βοηθούν σημαντικά στον σχεδιασμό ενός συστήματος βιολογικών φίλτρων.

Γενικά, οι εμπειρικές εξισώσεις αφορούν στις βασικές μεταβλητές σχεδιασμού ενός βιολογικού φίλτρου, όπως το ύψος και η διατομή του, η επιφανειακή και οργανική φόρτιση και η απόδοση του συστήματος (συνήθως συνυπολογίζεται η επίδραση της δευτεροβάθμιας καθίζησης). Βέβαια, επειδή η ποιότητα του εξερχόμενου αποβλήτου επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες που δεν είναι δυνατόν να συμπεριληφθούν σε μια εμπειρική εξίσωση, όπως το είδος του εισερχόμενου αποβλήτου, το είδος του πληρωτικού υλικού, η διάταξη

της ανακύκλωσης και του συστήματος επεξεργασίας και ο δοσομετρικός ρυθμός τροφοδοσίας, οι μεταβολές στην παροχή, στην συγκέντρωση και στο είδος των περιεχόμενων ρύπων σε ένα απόβλητο κ.α., καλό είναι να γίνονται επί τόπου μετρήσεις για την εκτίμηση των σταθερών της εμπειρικής εξίσωσης που θα επιλέξουμε.

Οι εξισώσεις των Velz, Germain, Schulze και Eckenfelder έχουν παρόμοια δομή και αντίστοιχους περιορισμούς. Οι σταθερές  $k$ ,  $K$  και  $n$  προσδιορίζονται εμπειρικά για κάθε σύστημα και επομένως επηρεάζονται από ένα πλήθος παραμέτρων όπως η επιφανειακή φόρτιση, το σύστημα παροχής του αποβλήτου, η θερμοκρασία, το διαλυτό κλάσμα του BOD του αποβλήτου, η βιοδιασπασιμότητα, το είδος του πληρωτικού υλικού, ο τρόπος αερισμού και άλλοι παράγοντες, πολλές φορές αστάθμητοι που επηρεάζουν μια συγκεκριμένη σειρά πειραματικών μετρήσεων. Οι παραπάνω εξισώσεις έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές κατά τον σχεδιασμό ενός βιολογικού φίλτρου, όμως η τροποποίηση της διάταξης του φίλτρου σε σχέση με την αρχική από την οποία προέκυψαν οι τιμές των εμπειρικών παραμέτρων πρέπει να γίνεται προσεκτικά. Υπάρχει πιθανότητα η τροποποίηση της διάταξης να μεταβάλλει την τιμή της σταθεράς  $k$ .

Συγκρίνοντας την εκτιμώμενη απόδοση για τις διάφορες εμπειρικές εξισώσεις, όπως προκύπτουν από την αρχική μορφή της εξίσωσης στην πρωτότυπη δημοσίευση και από την μορφή με την οποία απαντά στην βιβλιογραφία (Metcalf & Eddy, 2003), προέκυψαν ορισμένα πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, για την εξίσωση NRC οι διαφορές είναι αμελητέες, επομένως μπορούν να χρησιμοποιούνται και οι δύο μορφές εξίσου. Επίσης για την εξίσωση Germain, η υπολογιζόμενη απόδοση από την πρωτότυπη μορφή είναι για τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήσαμε κατά 3% μεγαλύτερη σε σχέση με την απόδοση που υπολογίσαμε από την μορφή της βιβλιογραφίας. Στην περίπτωση της εξίσωσης Schulze όμως, οι διαφορές είναι υπερβολικά μεγάλες. Η εκτιμώμενη απόδοση για φίλτρο με πλαστικό πληρωτικό υλικό είναι κατά 51% μεγαλύτερη από την απόδοση που υπολογίζεται από την μορφή της βιβλιογραφίας. Αντίστοιχα, για φίλτρο με κροκάλες η απόδοση που υπολογίζεται από την πρωτότυπη μορφή είναι κατά 54% μεγαλύτερη, πάντοτε για τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήσαμε.

Ως γενικό συμπέρασμα μπορούμε να πούμε ότι οι εμπειρικές εξισώσεις είναι γενικά αξιόπιστες για τον σχεδιασμό ενός βιολογικού φίλτρου όσον αφορά στις βασικές μεταβλητές σχεδιασμού, αρκεί να χρησιμοποιείται η εκάστοτε

μορφή που απαντάται στην πρωτότυπη δημοσίευση της εξίσωσης, με τις τιμές των σταθερών που χρησιμοποιήθηκαν από τον ερευνητή. Προκειμένου να γίνει λεπτομερέστερος σχεδιασμός και υπολογισμός των παραμέτρων που αφορούν σε κάθε συγκεκριμένη διάταξη, καλό είναι να γίνονται πειραματικές μετρήσεις σε κάθε συγκεκριμένη μονάδα για την αριστοποίηση των δευτερευόντων παραμέτρων σχεδιασμού όπως η χρησιμοποιούμενη διάταξη του συστήματος, το είδος του πληρωτικού υλικού, το σύστημα αερισμού, το σύστημα τροφοδοσίας και ο δοσομετρικός ρυθμός παροχής.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Albertson, O.E. (1989) "Optimizing Rotary Distributor Speed for Trickling Filters", *Water Pollution Control Federation Operators Forum*, Vol2, No1.
- Crites, R., Tchobanoglous, G. (1998) *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*, McGraw-Hill, New York.
- Dow Chemical Company (1964) Surface Process Evaluation Report. Rep. No AA-1925, Midland, Mich.
- Eckenfelder, W. W., Jr. (1963) "Trickling Filter Design and Performance", *Transactions, American Society of Civil Engineers*, Vol. 128, Part III, pp. 371 – 398
- Eckenfelder, W. W., Jr., and Barnhart, E. L. (1963) "Performance of a High Rate Trickling Filter Using Selected Media," *Journal of the Water Pollution Control Federation*, Vol. 35, No 12, pp. 1535-1551
- Galler, W.S., Gotaas, H.G. (1964) "Analysis of Biological Filter Variables," *Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 90, No 6, p. 59.
- Germain, J.E. (1966) "Economical Treatment of Domestic Waste by Plastic-Medium Trickling Filters", *Journal Water Pollution Control Federation*, Vol. 38, p. 192
- Gromiec, M.J., Malina, J.F., Jr. (1970) "Verification of Trickling Filter Models Using Surfpac. Rep. EHE-70-13 (CRWR-60)" Center Res. Water Resour., Civ. Eng. Dept., Univ. Texas, Austin
- Howland, W.E., et al., (1960) Kinetics in Trickling Filters. 3<sup>rd</sup> Annual Conference on Biological Waste Treatment, Manhattan College, New York, N.Y.
- Ingram, W. T. (1959) "An Investigation of the Mechanisms of Controlled Filtration", *Sewage and Industrial Wastes*, Vol. 31, pp. 1147-1158
- Metcalf & Eddy (2003) (Revised by G. Tchobanoglous, F.L. Burton and H. D. Stensel) "Wastewater Engineering – Treatment and Reuse", 4<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill, Inc.
- Mohlman, F.W. et al. (1946) "Sewage Treatment at Military Installations", National Research Council, Subcommittee Report, *Sewage Works Journal*, vol. 18, no 5, pp. 787-1028
- Moore, W. A., et al. (1950) "Efficiency Study of a Recirculating Sewage Filter at Centralia, Mo.", *Sewage and Industrial Wastes*, Vol. 22, pp. 184-189

- Onda, K., et al. (1968) "Mass Transfer Coefficients between Gas and Liquid Phases in Packed Columns". *J. Chem. Jpn.*, Vol. 1, No 56.
- Rigbi, M., et al. (1956) "Efficiency of a Small High-Rate Trickling Filter at Jerusalem, Israel." *Sewage and Industrial Wastes*, Vol. 28, No 7, p. 852
- Schroeder, E.D., Tchobanoglous, G. (1976) "Mass transfer limitations in trickling filter designs", *Journal Water Pollution Control Federation*, Vol. 48, pp. 771-775.
- Schulze, K. L. (1960) "Load and Efficiency in Trickling Filters," *Journal Water Pollution Control Federation*, Vol. 33, No3, pp. 145-260
- Suschka, J. (1987) "Hydraulic Performance of Percolating Biological Filters and Consideration of Oxygen Transfer." *Water Res. (G.B.)*, Vol. 21, No 865.
- Trebler, H.A., et al. (1938) "Dairy Waste Elimination and Sewage Disposal," *Sewage Works Journal*, Vol. 10, No 5, p. 868
- Velz, C.J. (1948) "A basic law for the performance of biological filters." *Sewage Works Journal*, Vol. 20, No 607.
- WEF (2000) *Aerobic Fixed-Growth Reactors; A special Publication*, Water Environment Federation, Alexandria, VA
- WEF (1998) *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*, Manual of Practice 8, Water Environment Federation, Alexandria, VA