

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
Τομέας Περιβαλλοντικής Μηχανικής και Επιστήμης
Εργαστήριο Διαχείρισης Αποβλήτων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

Δρ. Αθανάσιος Σ. Στασινάκης

Μυτιλήνη 2003

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
1.	ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	6
1.1	Μονάδες Μέτρησης	6
1.2	Ισοζύγια Μάζας	7
1.2.1	Ισοζύγια Μάζας σε Σταθερά Συστήματα με Μη-Μετατρέψιμα Χημικά Είδη	8
1.2.2	Ισοζύγια Μάζας σε Σταθερά Συστήματα με Μετατρέψιμα Χημικά Είδη	10
1.2.3	Ισοζύγια Μάζας σε Συστήματα που Βρίσκονται σε Μη Σταθερή Κατάσταση	14
1.3	Ισοζύγια Ενέργειας	18
1.3.1	Α' Θερμοδυναμικός Νόμος	18
1.3.2	Β' Θερμοδυναμικός Νόμος	23
1.3.3	Μεταφορά Θερμότητας	26
	Ασκήσεις	31
2.0	ΡΥΘΜΟΙ ΕΞΕΛΙΞΗΣ	33
2.1	Εισαγωγή	33
2.2	Εκθετική Αύξηση	33
2.3	Χρήση Φυσικών Πόρων	37
2.4	Αύξηση Πληθυσμού	41
2.5	Δημογραφία	44
	Ασκήσεις	50
3.	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	51
3.1	Υδρολογικός Κύκλος	51
3.2	Απαιτούμενη Ποιότητα Νερού	56
3.2.1	Κατηγορίες Ρύπων	56
3.2.1.1	Παθογόνοι Μικροοργανισμοί	56
3.2.1.2	Οργανικές Ενώσεις	57
3.2.1.3	Θρεπτικά	61
3.2.1.4	Άλατα	63
3.2.1.5	Βαρέα Μέταλλα	63
3.2.1.6	Φυτοφάρμακα	64

3.2.1.7	Πτητικές Οργανικές Ενώσεις	64
3.2.2	Διάθεση Λυμάτων σε Ποταμό	64
3.2.2.1	Αποδόμηση Οργανικών Ενώσεων	65
3.2.2.2	Επαναερισμός	66
3.2.2.3	Εξίσωση Streeter-Philips	68
3.2.3	Διάθεση Λυμάτων σε Λίμνη	72
3.3	Νομοθετικό Πλαίσιο	74
3.4	Συστήματα Επεξεργασίας Πόσιμου Νερού	78
3.4.1	Κροκίδωση – Συσσωμάτωση	78
3.4.2	Καθίζηση	79
3.4.3	Διήθηση	79
3.4.4	Απολύμανση	80
3.5	Συστήματα Επεξεργασίας Υγρών Αστικών Αποβλήτων	82
3.5.1	Προεπεξεργασία	83
3.5.2	Πρωτοβάθμια Καθίζηση	83
3.5.3	Δευτεροβάθμια Επεξεργασία	85
3.5.3.1	Μέθοδος Ενεργού Ιλύος	85
3.5.3.2	Απομάκρυνση Αζώτου - Φωσφόρου	89
3.5.3.3	Διάθεση Επεξεργασμένων Αποβλήτων και Λασπών	92
	Ασκήσεις	93
4.	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	97
4.1	Εισαγωγή	97
4.2	Μείωση στην Πηγή	100
4.3	Συστήματα Αποθήκευσης, Συλλογής και Μεταφοράς Στερεών Αποβλήτων	100
4.4	Ανακύκλωση	107
4.5	Συστήματα Επεξεργασίας και Διάθεσης Στερεών Αποβλήτων	110
4.5.1	Λιπασματοποίηση	110
4.5.2	Καύση	111
4.5.3	Υγειονομική Ταφή	115
4.6	Εκτίμηση Κύκλου Ζωής Υλικών	118
	Ασκήσεις	121
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	123

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παραδοσιακά η κατασκευή των τεχνικών έργων βασιζόταν μόνο στις τεχνικές και οικονομικές παραμέτρους, ενώ ερωτήματα όπως οι βραχυχρόνιες ή οι μακροχρόνιες επιπτώσεις της κατασκευής του έργου στο οικοσύστημα δεν λαμβάνονταν σοβαρά υπόψη. Η συνεχής αύξηση του πληθυσμού της γης σε συνδυασμό με την τεχνολογική ανάπτυξη είχε ως συνέπεια την αύξηση της απαίτησης για φυσικούς πόρους και την επιβάρυνση του περιβάλλοντος με υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων. Η νέα πραγματικότητα συνετέλεσε στην αλλαγή της στάσης απέναντι στο περιβάλλον. Η νομοθεσία απαιτεί πλέον την εκπόνηση περιβαλλοντικών μελετών για την πραγματοποίηση δημόσιων και ιδιωτικών έργων. Για την αντιμετώπιση αυτών των θεμάτων αναπτύχθηκε ο κλάδος της Περιβαλλοντικής Μηχανικής (Environmental Engineering) που ασχολείται με την προστασία του περιβάλλοντος από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες και με τη βελτίωση της ανθρώπινης υγείας και ευημερίας. Η Περιβαλλοντική Μηχανική συνδέεται στενά με άλλους κλάδους της μηχανικής και της επιστήμης, όπως την πολιτική (Civil Engineering) και χημική μηχανική (Chemical Engineering), τη χημεία, τη φυσική και τη βιολογία. Τα όρια της δεν είναι σαφώς καθορισμένα, καθώς αποτελεί έναν αναπτυσσόμενο κλάδο της μηχανικής, μπορεί να ειπωθεί όμως ότι ασχολείται με τις τεχνολογίες εκείνες που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση προβλημάτων που ανακύπτουν στο υδατικό, εδαφικό και αέριο περιβάλλον. Με τη βοήθεια της Περιβαλλοντικής Μηχανικής σχεδιάζονται ολοκληρωμένα συστήματα περιβαλλοντικής προστασίας που περιλαμβάνουν τη μετατροπή ή αντικατάσταση κάθε υποβαθμίζουσας δραστηριότητας και την προσθήκη τεχνολογικών μέσων για τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων της. Στη συνέχεια γίνεται μία σύντομη αναδρομή στην εξελικτική πορεία των επιστημών που οδήγησε στην ανάπτυξη του τομέα της Περιβαλλοντικής Μηχανικής.

Κατά τους Μεσαιωνικούς και Αναγεννησιακούς Χρόνους ο σχεδιασμός των απαραίτητων τεχνικών έργων και υποδομών γινόταν από μηχανικούς που παράλληλα εμπλέκονταν σε μία σειρά πεδίων της επιστήμης τελείως διαφορετικών μεταξύ τους, όπως τα μαθηματικά, την φιλοσοφία, την ιατρική και την αστρονομία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων προσωπικοτήτων αποτέλεσαν οι Γαλιλαίος και Λεονάρντο Ντα Βίντσι. Η βιομηχανική επανάσταση και η δημιουργία μεγαλύτερων αστικών κέντρων είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των απαιτήσεων για κατασκευές και τεχνικά έργα. Για την καλύτερη αντιμετώπιση των συγκεκριμένων θεμάτων αναπόφευκτα πραγματοποιήθηκε σταδιακή εξειδίκευση των

επιστημών. Ως αποτέλεσμα, με το σχεδιασμό των υποδομών στα αστικά κέντρα (δρόμοι, οικήματα, γέφυρες) ασχολήθηκε ο κλάδος του Πολιτικού Μηχανικού (Civil Engineer), ενώ με το σχεδιασμό των μηχανών ο κλάδος του Μηχανολόγου Μηχανικού (Mechanical Engineer). Για την καλύτερη αντιμετώπιση των θεμάτων που αφορούσαν στη μεταφορά και στη διάθεση του απαιτούμενου νερού δημιουργήθηκε στη συνέχεια η ειδικευση του Υδραυλικού Μηχανικού (Hydraulic Engineer), ενώ τέλος για θέματα που αφορούσαν στην ποιότητα του νερού και των υγρών αποβλήτων, καθώς και στη διάθεση των στερεών αποβλήτων, δημιουργήθηκε η περαιτέρω ειδικευση του Υγειονολόγου Μηχανικού (Sanitary Engineer). Η Περιβαλλοντική Μηχανική αναπτύχθηκε στο δεύτερο μισό του εικοστού αιώνα και θεωρείται ότι αποτελεί την εξέλιξη της Υγειονομικής Μηχανικής (Sanitary Engineering).

Στη συνέχεια πραγματοποιείται μία σύντομη ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη περιβαλλοντικών ζητημάτων όπως της διάθεσης των υγρών αποβλήτων, της επεξεργασίας του πόσιμου νερού και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, καθώς και στις μεθόδους αντιμετώπισης που υιοθετήθηκαν. Κατά το παρελθόν τα αστικά υγρά και στερεά απόβλητα απορρίπτονταν συνήθως στους δημόσιους δρόμους και αφήνονταν εκεί να αποσυντεθούν και να διασκορπιστούν από τον αέρα. Οι συγκεκριμένες πρακτικές είχαν ως αποτέλεσμα να παρουσιάζονται συχνά φαινόμενα επιδημιών που προκαλούσαν το θάνατο μεγάλων ομάδων του πληθυσμού. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η επιδημία πανούκλας που θανάτωσε το ένα τέταρτο του πληθυσμού της Ευρώπης το 14^ο αιώνα μ.Χ. και οι επιδημίες χολέρας που σημειώθηκαν στις ευρωπαϊκές πόλεις κατά το 19^ο αιώνα. Το 1842 στη Μεγάλη Βρετανία διατυπώθηκαν από τον *Edwin Chadwick* μια σειρά από προτάσεις για τον καθαρισμό των δρόμων και των κατοικιών. Οι συγκεκριμένες προτάσεις περιλάμβαναν την παροχή καθαρού πόσιμου νερού σε κάθε κατοικία, την απομάκρυνση των υγρών αποβλήτων από αυτές μέσω ενός δικτύου αγωγών και τέλος τη διάθεση των συλλεγόμενων αποβλήτων σε γεωργικά εδάφη μακριά από τις πόλεις. Το 1914 οι *Arden* και *Lockett* ανακάλυψαν ότι όταν τα οργανικά υγρά απόβλητα αερίζονται σε δεξαμενές, υφίστανται επεξεργασία, παρουσιάζοντας μερικές μέρες μετά χαμηλότερο οργανικό φορτίο από το αρχικό. Η συγκεκριμένα διεργασία ονομάστηκε *ενεργός ιλύς* και αποτελεί μέχρι και σήμερα την πλέον διαδεδομένη μέθοδος επεξεργασίας των αστικών υγρών αποβλήτων.

Η επεξεργασία του πόσιμου νερού χρονολογείται από τους ρωμαϊκούς χρόνους, όπου χρησιμοποιούνταν φίλτρα άμμου. Στον εικοστό αιώνα, ξεκίνησε η χρήση φίλτρων άμμου

αργής και ταχείας διήθησης για την επεξεργασία του πόσιμου νερού, ενώ για τη θανάτωση των παθογόνων μικροοργανισμών ενσωματώθηκε και η διεργασία της χλωρίωσης.

Σε ότι αφορά στην ατμοσφαιρική ρύπανση, η βιομηχανική επανάσταση είχε ως αποτέλεσμα σε πολλές μεγάλες πόλεις όπως το Λονδίνο, τη Νέα Υόρκη και το Βερολίνο να παρατηρούνται φαινόμενα κάλυψης της ατμόσφαιρας με μαύρο καπνό. Περιστατικά θανάτων λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης έχουν καταγραφεί σε πολλές περιπτώσεις κατά το παρελθόν. Το επεισόδιο που έδρασε καταλυτικά στην αλλαγή της νομοθεσίας ήταν το νέφος που εμφανίστηκε στο Λονδίνο το 1952 και το οποίο διάρκεσε αρκετές ημέρες και προκάλεσε 4000 θανάτους. Με τη νέα νομοθεσία έμφαση δόθηκε στη μείωση των αέριων ρύπων (σωματιδίων, CO₂, CO) που προκαλούνται από τη χρήση άνθρακα και πετρελαίου. Με την ανάπτυξη της χημικής βιομηχανίας και άλλοι αέριοι ρύποι άρχισαν να ανιχνεύονται στην ατμόσφαιρα, ενώ μία σειρά νέων επεισοδίων καταγράφηκαν. Ένα από τα σημαντικότερα επεισόδια καταγράφηκε το 1976 σε χημικό εργοστάσιο στο Σεβέζο της Ιταλίας, όπου παρατηρήθηκε απελευθέρωση διοξινών που επιβάρυναν μία περιοχή με πληθυσμό 37000 κατοίκων.

Η ανίχνευση “νέων” ρύπων στο περιβάλλον συνετέλεσε στην έκδοση μίας σειράς Οδηγιών από την Ευρωπαϊκή Ένωση για την προστασία των νερών, της ατμόσφαιρας και του εδάφους. Οι συγκεκριμένες Οδηγίες καθορίζουν τα όρια εκπομπής των συγκεκριμένων ρύπων από τη βιομηχανία και θέτουν ποιοτικούς στόχους για τις συγκεντρώσεις τους στο περιβάλλον.

Στόχος του συγκεκριμένου μαθήματος είναι η πρώτη επαφή των φοιτητών του Τμήματος Περιβάλλοντος με την Περιβαλλοντική Μηχανική. Για το λόγο αυτό τα δύο πρώτα κεφάλαια των σημειώσεων είναι εισαγωγικά και παρουσιάζουν θέματα ισοζυγίων μάζας και ενέργειας (Κεφάλαιο 1) και ζητήματα μεταβολής πληθυσμών (Κεφάλαιο 2). Η συγγραφή των συγκεκριμένων κεφαλαίων στηρίχθηκε στο βιβλίο του G.B. Masters “Introduction to Environmental Engineering and Technology” και στις παλιότερες σημειώσεις της Περιβαλλοντικής Μηχανικής του Καθηγητή του Τμήματος Περιβάλλοντος κ. Κ.Π. Χαλβαδάκη. Στα επόμενα κεφάλαια γίνεται συνοπτική αναφορά σε ορισμένα από τα θέματα με τα οποία ασχολείται η Περιβαλλοντική Μηχανική σήμερα, όπως τη διαχείριση και επεξεργασία του νερού και των υγρών αποβλήτων (Κεφάλαιο 3), τη διάθεση λυμάτων σε επιφανειακούς αποδέκτες (Κεφάλαιο 3) και τη διαχείριση και επεξεργασία των στερεών αποβλήτων (Κεφάλαιο 4).

1. ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Μονάδες Μέτρησης

Οι συγκεντρώσεις των ουσιών που είναι διαλυμένες στο νερό συνήθως εκφράζονται ως “μάζα ουσίας ανά μονάδα όγκου του διαλύματος”. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μονάδες στην περιβαλλοντική μηχανική είναι τα μίλι-γραμμάρια ($\text{mg} = 10^{-3} \text{ g}$) ή τα μικρο-γραμμάρια ($\mu\text{g} = 10^{-6} \text{ g}$) ουσίας ανά λίτρο (l) διαλύματος (Πίνακας 1.1). Καθώς οι συγκεντρώσεις των ρυπαντών είναι πολύ μικρές, το ειδικό βάρος του διαλύματος ισούται με το ειδικό βάρος του νερού, οπότε 1 λίτρο διαλύματος έχει μάζα 1000 g. Σύμφωνα με τα παραπάνω, όταν μία ουσία έχει συγκέντρωση **1 mg/l**, τότε περιέχεται 1 mg ουσίας σε 1000 g διαλύματος δηλαδή 1 μέρος ουσίας σε 1 εκατομμύριο μέρη διαλύματος (**1 ppm**). Παρομοίως, η συγκέντρωση **1 $\mu\text{g/l}$** εκφράζεται και ως 1 μέρος στο δισεκατομμύριο (**1 ppb**).

Πίνακας 1.1 Προθέματα που χρησιμοποιούνται ανάλογα με την ποσότητα της ουσίας.

Ποσότητα	Πρόθεμα	Σύμβολο
10^{-12}	pico	p
10^{-9}	nano	n
10^{-6}	micro	μ
10^{-3}	mili	m
10^3	kilo	K
10^6	mega	M
10^9	giga	G

Οι συγκεντρώσεις των ουσιών που βρίσκονται στο έδαφος ή σε άλλο ξηρό υλικό (ίζημα, ιλύς) εκφράζονται ως “μάζα ουσίας ανά μονάδα μάζας του ξηρού υλικού”. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μονάδες είναι το 1 mg ουσίας ανά Kg υλικού (1 ppm) και το 1 μg ουσίας ανά Kg υλικού (1 ppb). Τέλος, οι συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων εκφράζονται συνήθως ως mg ουσίας ανά m^3 αέρα ή ως μg ουσίας ανά m^3 αέρα. Η σχέση μεταξύ mg/m^3 και ppm εξαρτάται από την πίεση, τη θερμοκρασία και το μοριακό βάρος (MB) του ρύπου (εξίσωση 1.1).

$$\text{mg}/\text{m}^3 = \left(\frac{\text{ppm} \times \text{MB}}{22,414} \right) \times \left(\frac{273,15(\text{K})}{\text{T}(\text{K})} \right) \times \left(\frac{P(\text{atm})}{1(\text{atm})} \right) \quad (1.1)$$

Όπου:

P = η ατμοσφαιρική πίεση σε atm

MB = το MB της ουσίας

T = η απόλυτη θερμοκρασία σε K

Στη συνέχεια παρατίθενται οι βασικές μονάδες και οι συντελεστές μετατροπής τους για μία σειρά παραμέτρων (Πίνακας 1.2).

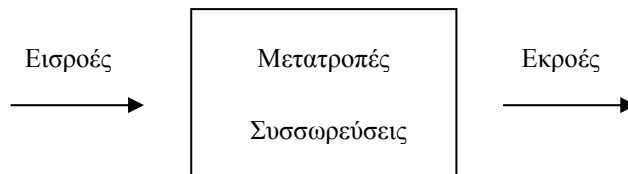
Πίνακας 1.2 Μονάδες των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων παραμέτρων στην Περιβαλλοντική Μηχανική.

Παράμετρος	Μονάδες	Συντελεστής Μετατροπής	Μονάδες
Μήκος	m	3,2808	ft
Μάζα	Kg	2,2046	lb
Θερμοκρασία	$^{\circ}\text{C}$	$1,8 (^{\circ}\text{C}) + 32$	$^{\circ}\text{F}$
Θερμοκρασία	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C} + 273,15$	$^{\circ}\text{K}$
Εμβαδόν	m^2	10,7639	ft^2
Όγκος	m^3	35,3147	ft^3
Όγκος	l	0,2667	gal
Ενέργεια	KJ	0,9478	Btu
Ισχύς	W	3,4121	Btu/ώρα
Ισχύς	W	1	J/s
Ταχύτητα	m/s	2,2369	mi/ώρα
Παροχή	m^3/s	35,3147	ft^3/s
Πυκνότητα	Kg/m^3	0,06243	lb/ft^3

1.2 Ισοζύγια Μάζας

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της μάζας κατά την πραγματοποίηση των χημικών αντιδράσεων η ύλη ούτε δημιουργείται ούτε καταστρέφεται (*Η παραπάνω αρχή δεν ισχύει στην περίπτωση των πυρηνικών αντιδράσεων όπου η μάζα μπορεί να μετατραπεί σε ενέργεια*). Το πρώτο βήμα για την εφαρμογή της παραπάνω αρχής είναι ο καθορισμός του χωροχρόνου, δηλαδή των ορίων του συστήματος που θα αναλυθεί και του χρονικού διαστήματος στο οποίο αναφερόμαστε. Ως σύστημα μπορεί να οριστεί μία δεξαμενή, μία λίμνη, ένα τμήμα ενός ποταμού, ο πλανήτης, ενώ ως χρόνος το έτος 2000, η χρονική στιγμή $t=0$ κ.α.

Το δεύτερο βήμα είναι ο καθορισμός του χημικού είδους ή της ουσίας που μας ενδιαφέρει (οργανικός άνθρακας, νερό κ.α.). Έχοντας καθορίσει τα όρια του συστήματος και το υπό διερεύνηση χημικό είδος - ουσία μπορούμε να εκφράσουμε τη ροή υλικών από και προς το σύστημα και να περιγράψουμε τις διεργασίες που πραγματοποιούνται σε αυτό. Συγκεκριμένα για μία ουσία που εισάγεται σε ένα σύστημα, ένα τμήμα της θα εγκαταλείψει το σύστημα αμετάβλητη, ένα άλλο θα συσσωρευτεί μέσα σε αυτό και ένα τελευταίο θα μετατραπεί σε κάποια άλλη ουσία (π.χ. από CO θα οξειδωθεί σε CO₂) (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 Καθορισμός ροής υλικών και διεργασιών που πραγματοποιούνται σε ένα σύστημα.

Το Σχήμα 1.1 μπορεί να αποδοθεί με τη μορφή μαθηματικών σχέσεων (εξίσωση 1.2):

$$\text{Εισροές} = \text{Εκροές} + \text{Συσσωρεύσεις} + \text{Μετατροπές} \quad (1.2)$$

1.2.1 Ισοζύγια Μάζας σε Σταθερά Συστήματα με Μη-Μετατρέψιμα Χημικά Είδη

Θεωρώντας ότι σε ένα σύστημα επικρατούν σταθερές συνθήκες (συσσώρευση μηδενική) και ότι αναφερόμαστε σε μη μετατρέψιμα χημικά είδη (μετατροπή μηδενική), τότε η εξίσωση 1.2 μετατρέπεται στην εξίσωση 1.3:

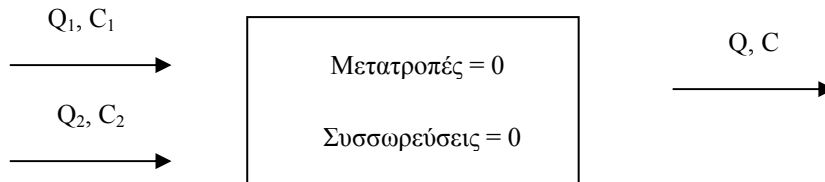
$$\text{Εισροές} = \text{Εκροές} \quad (1.3)$$

Παράδειγμα 1.1

Σε ένα χαλυβουργείο τα απόβλητα των δύο γραμμών παραγωγής απορρίπτονται σε μία δεξαμενή και από εκεί με συνεχή ροή οδηγούνται για επεξεργασία. Τα απόβλητα της γραμμής 1 έχουν παροχή 0,5 m³/s και συγκέντρωση σε χρώμιο (Cr) ίση με 10 mg/l, ενώ τα απόβλητα της γραμμής 2 έχουν παροχή 1,5 m³/s και συγκέντρωση σε χρώμιο (Cr) ίση με 2 mg/l. Να βρεθεί η συνολική παροχή και η συγκέντρωση Cr στα απόβλητα που εξέρχονται από τη δεξαμενή. Θεωρείστε ότι επικρατούν σταθερές συνθήκες και το χρώμιο αποτελεί μη μετατρέψιμο χημικό είδος.

Λύση:

Το σύστημα στο οποίο αναφερόμαστε είναι η δεξαμενή του χαλυβουργείου, ενώ η ουσία που μας ενδιαφέρει είναι το χρώμιο. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται οι ροές του χρωμίου και οι διεργασίες που πραγματοποιούνται εντός της δεξαμενής.



Οι παροχές των αποβλήτων της πρώτης και της δεύτερης γραμμής παραγωγής συμβολίζονται με Q_1 και Q_2 , αντίστοιχα, ενώ οι συγκεντρώσεις του χρωμίου με C_1 και C_2 . Η παροχή στην έξοδο της δεξαμενής με Q και η συγκέντρωση του χρωμίου με C . Δεδομένου ότι επικρατούν σταθερές συνθήκες (μηδενικές συσσωρεύσεις) και το χρώμιο αποτελεί μη μετατρέψιμο χημικό είδος (μηδενικές μετατροπές), ισχύει η εξίσωση 1.3:

$$\begin{aligned} \text{Εισροές} &= \text{Εκροές} \Rightarrow \\ (Q_1 \times C_1) + (Q_2 \times C_2) &= Q \times C \end{aligned}$$

Η παροχή στην έξοδο της δεξαμενής, Q ισούται με το άθροισμα των Q_1 και Q_2 , δηλαδή με $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Άρα η συγκέντρωση στην έξοδο της δεξαμενής ισούται με:

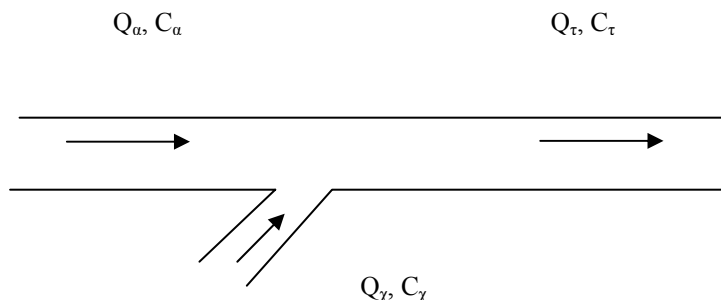
$$\begin{aligned} (0,5 \text{ m}^3/\text{s} \times 10 \text{ mg/l}) + (1,5 \text{ m}^3/\text{s} \times 2 \text{ mg/l}) &= 2 \text{ m}^3/\text{s} \times C \Rightarrow \\ \mathbf{C} &= \mathbf{4 \text{ mg/l}} \end{aligned}$$

Παράδειγμα 1.2

Χείμαρρος που ρέει με παροχή $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ενώνεται με ποταμό παροχής $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Η συγκέντρωση των χλωριόντων ανάντη του σημείου τομής ποταμού – χείμαρρου είναι 20 mg/l , ενώ η συγκέντρωση των χλωριόντων στο χείμαρρο 40 mg/l . Θεωρώντας ότι επικρατούν σταθερές συνθήκες και ότι τα χλωριόντα αποτελούν μη μετατρέψιμο χημικό είδος, να υπολογιστεί η συγκέντρωση των χλωριόντων κατάντη του σημείου τομής.

Λύση:

Το σύστημα στο οποίο αναφερόμαστε αποτελείται από τον ποταμό και το χείμαρρο, ενώ η ουσία που μας ενδιαφέρει είναι τα χλωριόντα. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται οι ροές των χλωριόντων.



Οι παροχή του ποταμού (πριν το σημείο τομής) και του χειμάρρου συμβολίζονται με Q_a και $Q_γ$, αντίστοιχα, ενώ οι συγκεντρώσεις των χλωριόντων με C_a και $C_γ$. Η παροχή του ποταμού κατάντη του σημείου τομής συμβολίζεται με $Q_τ$ και η συγκέντρωση των χλωριόντων με $C_τ$. Δεδομένου ότι επικρατούν σταθερές συνθήκες (μηδενικές συσσωρεύσεις) και τα χλωριόντα αποτελούν μη μετατρέψιμο χημικό είδος (μηδενικές μετατροπές), ισχύει η εξίσωση 1.3:

$$\begin{aligned} \text{Εισροές} &= \text{Εκροές} \Rightarrow \\ (Q_a \times C_a) + (Q_γ \times C_γ) &= Q_τ \times C_τ \end{aligned}$$

Η παροχή κατάντη του σημείου τομής, $Q_τ$ ισούται με το άθροισμα των Q_a και $Q_γ$, δηλαδή με $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Άρα η συγκέντρωση κατάντη του σημείου τομής ισούται με:

$$\begin{aligned} (10 \text{ m}^3/\text{s} \times 20 \text{ mg/l}) + (0,5 \text{ m}^3/\text{s} \times 40 \text{ mg/l}) &= 10,5 \text{ m}^3/\text{s} \times C \Rightarrow \\ \mathbf{C} &= \mathbf{20,95 \text{ mg/l}} \end{aligned}$$

1.2.2 Ισοζύγια Μάζας σε Σταθερά Συστήματα με Μετατρέψιμα Χημικά Είδη

Πολλοί ρύποι συμμετέχουν σε χημικές, βιολογικές και πυρηνικές αντιδράσεις με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η μορφή τους (μετατρέψιμα χημικά είδη). Σε αυτή την περίπτωση και υποθέτοντας ότι διατηρούνται σταθερές συνθήκες (συσσώρευση μηδενική) η εξίσωση 1.2 μετατρέπεται στην 1.4:

$$\text{Εισροές} = \text{Εκροές} + \text{Μετατροπές} \quad (1.4)$$

Η μετατροπή ενός μετατρέψιμου χημικού είδους συχνά θεωρείται ότι ακολουθεί κινητική Α τάξης. Θεωρείται δηλαδή ότι, η ταχύτητα μεταβολής της ουσίας είναι ανάλογη με την

αρχική συγκέντρωση της ουσίας (εξίσωση 1.5). Το αρνητικό πρόσημο της παρακάτω εξίσωσης υποδηλώνει την απώλεια της ουσίας με το χρόνο.

$$\frac{dC}{dt} = -KC \Rightarrow (1.5)$$

$$\int \frac{dC}{C} = \int (-K)dt \Rightarrow$$

$$\ln(C) - \ln(C_0) = -Kt \Rightarrow$$

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -Kt \Rightarrow$$

$$C = C_0 e^{-Kt} \quad (1.6)$$

Όπου:

K = η σταθερά της αντίδρασης (χρόνος⁻¹)

C = η συγκέντρωση της ουσίας (mg/l)

C_0 = η αρχική συγκέντρωση της ουσίας (mg/l)

Η εξίσωση 1.5 υποδεικνύει την ταχύτητα μεταβολής της συγκέντρωσης μίας ουσίας. Αν υποθέσουμε ότι η ουσία κατανέμεται ομοιόμορφα σε όγκο V , τότε το συνολικό ποσό της ουσίας ισούται με CV . Σε αυτή την περίπτωση, η ταχύτητα μεταβολής της ουσίας δίνεται από τη σχέση 1.7:

$$\text{Για } V \text{ σταθερό, } \frac{d(CV)}{dt} = V \times \frac{dC}{dt} \quad (1.7)$$

Από τις εξισώσεις 1.7, 1.5 και 1.4 προκύπτει η έκφραση του ισοζυγίου μάζας για μη μετατρέψιμο χημικό είδος και σταθερές συνθήκες (εξίσωση 1.8):

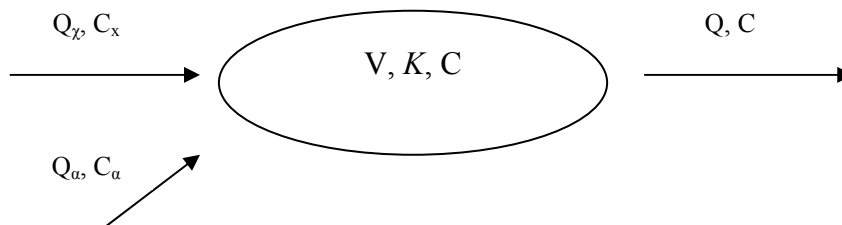
$$\text{Εισροές} = \text{Εκροές} + KCV \quad (1.8)$$

Παράδειγμα 1.3

Σε λίμνη με όγκο νερού $10,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ πέφτει ρυπασμένος χείμαρρος με παροχή $5 \text{ m}^3/\text{s}$ και συγκέντρωση ρύπου ίση με $10,0 \text{ mg/l}$. Στη λίμνη καταλήγει επίσης αγωγός λυμάτων με παροχή $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ και συγκέντρωση ρύπου ίση με 100 mg/l . Ο συντελεστής μετατροπής του ρύπου ισούται με $0,2 / \text{ημέρα}$. Θεωρώντας ότι στη λίμνη επικρατούν σταθερές συνθήκες, η μίξη νερού και αποβλήτων είναι πλήρης, ενώ δεν υπάρχουν απώλειες του ρύπου, να βρεθεί η συγκέντρωση του ρύπου στον χείμαρρο που εξέρχεται της λίμνης.

Λύση:

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται οι ροές του ρύπου και οι διεργασίες που πραγματοποιούνται στο σύστημα της λίμνης.



Οι παροχές του εισερχόμενου χειμάρρου και του αγωγού συμβολίζονται με Q_x και Q_a , αντίστοιχα, ενώ οι συγκεντρώσεις του ρύπου με C_x και C_a . Η παροχή του εξερχόμενου χειμάρρου συμβολίζεται με Q και η συγκέντρωση του ρύπου με C . Επειδή στη λίμνη επικρατούν συνθήκες πλήρους μίξης η συγκέντρωση του ρύπου στο χειμάρρο ισούται με τη συγκέντρωσή του στη λίμνη. Δεδομένου ότι επικρατούν σταθερές συνθήκες (μηδενικές συσσωρεύσεις) και ο ρύπος αποτελεί μετατρέψιμο χημικό είδος ισχύει η εξίσωση 1.8:

$$\text{Εισροές} = \text{Εκροές} + \text{KCV}$$

$$\text{Εισροές} = (Q_a \times C_a) + (Q_x \times C_x) \Rightarrow$$

$$\text{Εισροές} = [(0,5 \text{ m}^3/\text{s} \times 100 \text{ mg/l}) + (5 \text{ m}^3/\text{s} \times 10 \text{ mg/l})] \times 1000 \text{ l/m}^3 = 10^5 \text{ mg/s}$$

$$\text{Εκροές} = (Q \times C) = (5,5 \text{ m}^3/\text{s} \times C \text{ mg/l}) \times 1000 \text{ l/m}^3 = 5,5 \times 10^3 C \text{ mg/s}$$

$$\text{Μετατροπές} = \text{KCV} = [(0,2/\text{ημέρα} \times C \text{ mg/l} \times 10,0 \times 10^6 \text{ m}^3 \times 1000 \text{ l/m}^3)] / (24 \text{ ώρες} / \text{ημέρα} \times 3600 \text{ s/ώρα}) = 23,1 \times 10^3 C \text{ mg/s}$$

Αντικαθιστώντας στην 1.8:

$$10^5 \text{ mg/s} = 5,5 \times 10^3 C \text{ mg/s} + 23,1 \times 10^3 C \text{ mg/s} \Rightarrow$$

$$C = 3,5 \text{ mg/l}$$

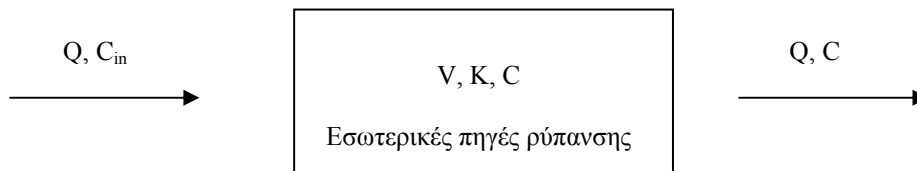
Παράδειγμα 1.4

Σε ένα bar με όγκο 500 m^3 βρίσκονται 50 καπνιστές που καπνίζουν 2 τσιγάρα ανά ώρα. Κάθε τσιγάρο εκπέμπει $1,4 \text{ mg}$ φορμαλδεΐδης (HCHO). Η φορμαλδεΐδη μετατρέπεται σε CO_2 με ταχύτητα αντίδρασης, K που ισούται με $0,4/\text{ώρα}$. Φρέσκος αέρας εισέρχεται στο bar με ρυθμό 1000 m^3 ανά ώρα και εξέρχεται με τον ίδιο ρυθμό. Υποθέτοντας καθεστώς πλήρους μίξης, να υπολογιστεί η συγκέντρωση της φορμαλδεΐδης στο χώρο σε σταθερές

συνθήκες. Αν η συγκέντρωση ερεθισμού των ματιών είναι 0,05 ppm, να διερευνήσετε αν θα προκληθεί ερεθισμός των ματιών των πελατών (θερμοκρασία 25 °C και πίεση 1 atm).

Λύση:

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται οι ροές της φορμαλδεΐδης και οι διεργασίες που πραγματοποιούνται στο σύστημα του bar.



Δεδομένου ότι επικρατούν σταθερές συνθήκες (μηδενικές συσσωρεύσεις) και ο ρύπος αποτελεί μετατρέψιμο χημικό είδος ισχύει η εξίσωση 1.8:

$$\text{Εισροές} = \text{Εκροές} + \text{KCV}$$

$$\text{Εσωτερικές πηγές ρύπανσης} = 50 \text{ καπνιστές} \times 2 \text{ τσιγάρα} / \text{καπνιστή} \times 1,4 \text{ mg HCHO} / \text{τσιγάρο} = 140 \text{ mg} / \text{ώρα}$$

$$\text{Εισροές} = (Q \times C_{in}) + \text{Εσωτερικές πηγές ρύπανσης} = 1000 \text{ m}^3/\text{ώρα} \times 0 \text{ mg/m}^3 + 140 \text{ mg/ώρα} = 140 \text{ mg} / \text{ώρα}$$

$$\text{Εκροές} = Q \times C = 1000 \text{ m}^3/\text{ώρα} \times C \text{ mg/m}^3 = 1000 C \text{ mg/ώρα}$$

$$\text{Μετατροπές} = \text{KCV} = 0,4 / \text{ώρα} \times C \text{ mg/m}^3 \times 500 \text{ m}^3 = 200 C \text{ mg/ώρα}$$

Αντικαθιστώντας στην 1.8:

$$140 \text{ mg} / \text{ώρα} = 1000 C \text{ mg/ώρα} + 200 C \text{ mg/ώρα} \Rightarrow$$

$$C = 0,117 \text{ mg/m}^3$$

Για τη μετατροπή της συγκέντρωσης σε ppm, δεδομένου ότι το MB της φορμαλδεΐδης είναι 30 τότε με τη βοήθεια της 1.1 προκύπτει:

$$\text{HCHO} = 0,095 \text{ ppm}$$

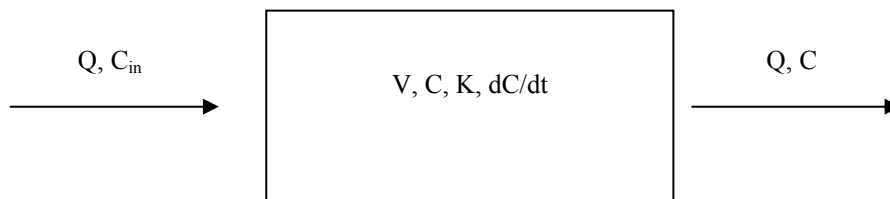
Η συγκεκριμένη συγκέντρωση είναι σχεδόν διπλάσια της συγκέντρωσης που προκαλεί ερεθισμό στα μάτια.

1.2.3 Ισοζύγια Μάζας σε Συστήματα που Βρίσκονται σε Μη Σταθερή Κατάσταση

Σε περιπτώσεις που το σύστημα που μελετούμε δεν βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση, αλλά η συγκέντρωση του αυξάνεται ή μειώνεται με το χρόνο (συσσώρευση μη μηδενική), τότε θα ισχύει η εξίσωση 1.2:

$$\text{Εισροές} = \text{Εκροές} + \text{Συσσωρεύσεις} + \text{Μετατροπές} \quad (1.2)$$

Στον παρακάτω αντιδραστήρα (Σχήμα 1.2) επικρατούν συνθήκες πλήρους μίξης, δηλαδή η συγκέντρωση του ρύπου μέσα σε αυτόν ισούται με τη συγκέντρωση του ρύπου στο ρεύμα που τον εγκαταλείπει (C). Επίσης, η συνολική μάζα του ρύπου μέσα στον αντιδραστήρα είναι $V \times C$ και η ταχύτητα αύξησης της συγκέντρωσης του ρύπου στον αντιδραστήρα ισούται με $V \times \frac{dC}{dt}$. Αν ο ρύπος θεωρείται μετατρέψιμος και ακολουθεί κινητική Α τάξης με σταθερά αντίδρασης K, θα ισχύει η εξίσωση 1.9:



Σχήμα 1.2 Γραφική απεικόνιση συστήματος που βρίσκεται σε μη σταθερή κατάσταση και ο ρύπος θεωρείται μετατρέψιμος.

$$(Q \times C_{in}) = (Q \times C) + \left(V \times \frac{dC}{dt} \right) + (K \times C \times V) \quad (1.9)$$

Όπου:

V = ο όγκος του αντιδραστήρα (l)

C = η συγκέντρωση του ρύπου στον αντιδραστήρα και στο εξερχόμενο ρεύμα (mg/l)

C_{in} = η συγκέντρωση του ρύπου στο εισερχόμενο ρεύμα (mg/l)

Q = η εισερχόμενη και εξερχόμενη παροχή στον αντιδραστήρα (l/ώρα)

K = η σταθερά της αντίδρασης (ώρα⁻¹)

Επιλύοντας ως προς $V \times \frac{dC}{dt}$ προκύπτει η εξίσωση 1.10:

$$V \times \frac{dC}{dt} = (Q \times C_{in}) - (Q \times C) - (K \times C \times V) \quad (1.10)$$

Όταν στον αντιδραστήρα επικρατήσουν σταθερές συνθήκες ($t = \infty$), τότε $dC/dt = 0$ και η συγκέντρωση C_{∞} προκύπτει από την 1.11:

$$C_{\infty} = \frac{(Q \times C_{in})}{(Q + KV)} \quad (1.11)$$

Για να υπολογίσουμε τη συγκέντρωση C πριν την επίτευξη σταθερών συνθηκών, επιλύουμε την 1.10 και προκύπτει η εξίσωση 1.12:

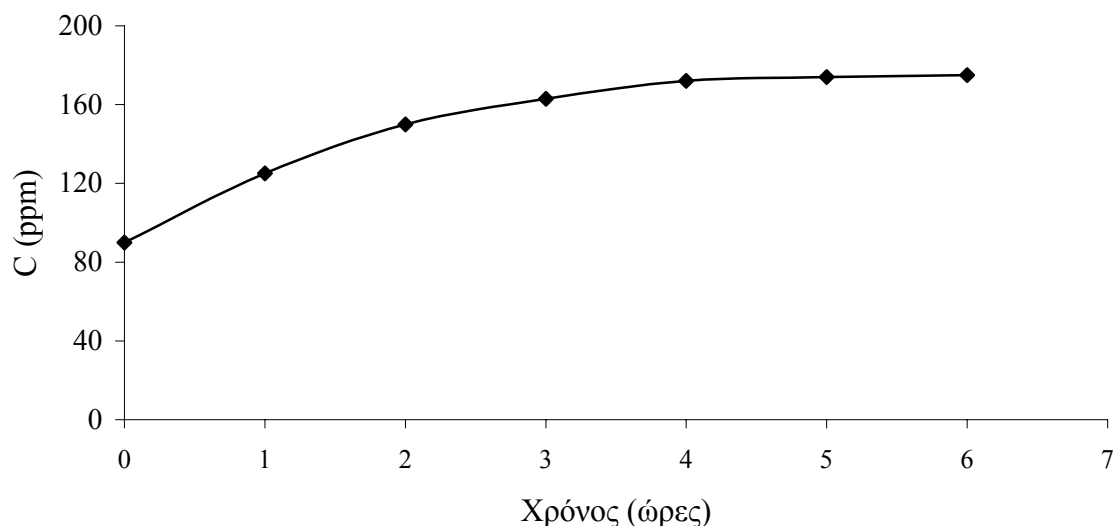
$$C_t = C_{\infty} + (C_0 - C_{\infty}) e^{-(K+Q/V)t} \quad (1.12)$$

Όπου:

C_0 = η συγκέντρωση στον αντιδραστήρα την χρονική στιγμή $t = 0$

C_t = η συγκέντρωση στον αντιδραστήρα την χρονική στιγμή t

Αν στην παραπάνω εξίσωση αντικατασταθεί ο χρόνος με $t = 0$, τότε προκύπτει $C_t = C_0$, ενώ αν $t = \infty$, τότε $C_t = C_{\infty}$ (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3 Μεταβολή της συγκέντρωσης με το χρόνο σε σύστημα που βρίσκεται σε μη σταθερή κατάσταση.

Παράδειγμα 1.5

Στο bar του Παραδείγματος 1.4 που έχει όγκο 500 m^3 εισέρχεται φρέσκος αέρας με ρυθμό 1000 m^3 ανά ώρα. Υποθέστε ότι στις 22:00 που ανοίγει το bar ο αέρας είναι καθαρός. Αν η

φορμαλδεΰδη εκπέμπεται από τον καπνό του τσιγάρου με ρυθμό 140 mg/ώρα, ποια θα είναι η συγκέντρωση της φορμαλδεΰδης στο χώρο στις 23:00. Υποθέστε ότι επικρατούν συνθήκες πλήρους μίξης και η φορμαλδεΰδη μετατρέπεται σε CO₂ με ταχύτητα αντίδρασης, K που ισούται με 0,4/ώρα.

Λύση:

Το σύστημα που μελετούμε δεν βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση, αλλά η συγκέντρωση του αυξάνεται με το χρόνο. Επιπλέον, ο ρύπος αποτελεί μετατρέψιμο χημικό είδος, οπότε ισχύει η εξίσωση 1.12:

$$C_t = C_\infty + (C_0 - C_\infty) e^{-(K+Q/V)t} \quad (1.12)$$

Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης C_∞ όταν επικρατήσουν σταθερές συνθήκες χρησιμοποιείται η εξίσωση 1.11.

$$C_\infty = \frac{(Q \times C_{in})}{(Q + KV)} \quad (1.11)$$

Ο αριθμητής στη συγκεκριμένη εξίσωση ($Q \times C_{in}$) υποδεικνύει τον ρυθμό εισαγωγής της φορμαλδεΰδης και ισούται με 140 mg/ώρα. Άρα με τη βοήθεια της 1.11:

$$C_\infty = \frac{(Q \times C_{in})}{(Q + KV)} \Rightarrow$$

$$C_\infty = 140 \text{ mg/ώρα} / (1000 \text{ m}^3/\text{ώρα} + 0,4/\text{ώρα} \times 500 \text{ m}^3) \Rightarrow$$

$$C_\infty = 0,117 \text{ mg/m}^3$$

Με τη βοήθεια της 1.12, υπολογίζουμε τη συγκέντρωση C_t μία ώρα μετά το άνοιγμα του bar:

$$C_t = C_\infty + (C_0 - C_\infty) e^{-(K+Q/V)t} \Rightarrow$$

$$C_t = 0,117 \text{ mg/m}^3 + (0 - 0,117 \text{ mg/m}^3) e^{-(0,4/\text{ώρα} + 1000 \text{ m}^3/\text{ώρα} / 500 \text{ m}^3) 1 \text{ ώρα}} \Rightarrow$$

$$C_{1\text{ώρα}} = 0,106 \text{ mg/m}^3$$

Παράδειγμα 1.6

Θεωρείστε τη λίμνη του Παραδείγματος 1.3 ($V=10 \times 10^6 \text{ m}^3$), στην οποία βρέθηκε ότι η συγκέντρωση του ρύπου σε σταθερές συνθήκες ισούται με 3,5 mg/l. Ο ρύπος θεωρείται μετατρέψιμος με $K=0,2/\text{ημέρα}$. Επειδή η συγκεκριμένη συγκέντρωση του ρύπου θεωρείται πολύ υψηλή αποφασίζεται να διακοπεί η απόρριψη λυμάτων σε αυτόν. Ως αποτέλεσμα στη λίμνη πλέον καταλήγει μόνο ο χειμάρρος που έχει παροχή ίση με $5 \text{ m}^3/\text{s}$ και συγκέντρωση

του ρύπου ίση με 10 mg/l. Θεωρώντας συνθήκες πλήρους μίξης να βρεθεί η συγκέντρωση του ρύπου στη λίμνη μία εβδομάδα μετά τη διακοπή απόρριψης των λυμάτων.

Λύση:

Το σύστημα που μελετούμε δεν βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση, αλλά η συγκέντρωση του μειώνεται με το χρόνο. Επιπλέον, ο ρύπος αποτελεί μετατρέψιμο χημικό είδος, οπότε ισχύει η εξίσωση 1.12:

$$C_t = C_\infty + (C_0 - C_\infty) e^{-(K+Q/V)t}$$

Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης C_∞ όταν επικρατήσουν σταθερές συνθήκες χρησιμοποιείται η εξίσωση 1.11:

$$C_\infty = \frac{(Q \times C_{in})}{(Q + KV)}$$

Όπου:

$$Q = 5 \text{ m}^3/\text{s} \times 3600 \text{ s/ώρα} \times 24 \text{ ώρες / ημέρα} = 43,2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

$$C_\infty = (43,2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{ημέρα} \times 10 \text{ mg/l}) / (43,2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{ημέρα} + 0,2/\text{ημέρα} \times 10,0 \times 10^6 \text{ m}^3) \Rightarrow$$

$$C_\infty = 1,8 \text{ mg/l}$$

Με τη βοήθεια της 1.12:

$$C_t = C_\infty + (C_0 - C_\infty) e^{-(K+Q/V)t} \Rightarrow$$

$$C_{7 \text{ ημέρες}} = 1,8 \text{ mg/l} + (3,5 \text{ mg/l} - 1,8 \text{ mg/l}) e^{-(0,2/\text{ημέρα} + 43,2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{ημέρα} / 10,0 \times 10^6 \text{ m}^3) 7 \text{ ημέρες}} \Rightarrow$$

$$C_{7 \text{ ημέρες}} = 2,1 \text{ mg/l}$$

1.3 Ισοζύγια Ενέργειας

1.3.1 Α Θερμοδυναμικός Νόμος

Ως ενέργεια, E ορίζεται η ικανότητα πραγματοποίησης έργου, W . Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες μονάδες μέτρησης της ενέργειας είναι το Joule (J) και το Btu. Ισχύς ονομάζεται ο ρυθμός πραγματοποίησης έργου και εκφράζεται ως μονάδες ενέργειας ανά μονάδα χρόνου. Βάση των παραπάνω, η ισχύς δίνεται σε J/s ή KJ/s. Πρέπει να αναφερθεί ότι 1 J/s ισούται με 1 Watt (W), που ισούται με 3,412 Btu/ώρα (Πίνακας 1.2).

Σύμφωνα με τον Ά νόμο της Θερμοδυναμικής *η ενέργεια ούτε δημιουργείται ούτε καταστρέφεται, αλλά αλλάζει μορφές*. Για παράδειγμα, σε μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η χημική ενέργεια του καυσίμου μετατρέπεται σε θερμική και ηλεκτρική. Για την εφαρμογή του Ά θερμοδυναμικού νόμου είναι απαραίτητος αρχικά ο ορισμός του υπό διερεύνηση συστήματος. Ως σύστημα μπορεί να θεωρηθεί μία μηχανή αυτοκινήτου, ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας, η γη κ.α. Συστήματα στα οποία παρατηρείται μεταφορά ενέργειας και μάζας θεωρούνται *ανοικτά συστήματα*, ενώ συστήματα στα οποία πραγματοποιείται μόνο μεταφορά ενέργειας θεωρούνται *κλειστά συστήματα*.

Για κάθε σύστημα με βάση τον Ά θερμοδυναμικό νόμο ισχύει:

$$\text{Εισρέουσα } E = \text{Εκρέουσα } E + \text{Μεταβολή } E_{\text{εσωτ}} \quad (1.13)$$

Όπου:

$E_{\text{εσωτ}}$: η αποθηκευμένη ενέργεια στο σύστημα

Η προσθήκη ενέργειας σε ένα σύστημα σε πολλές περιπτώσεις προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του συστήματος. Για παράδειγμα, η αποβαλλόμενη θερμότητα ενός εργοστασίου παραγωγής ενέργειας προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας στο νερό ψύξης. Το ποσό της ενέργειας που προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας μίας μονάδας μάζας ενός υλικού κατά 1°C ονομάζεται *ειδική θερμότητα* και συμβολίζεται με c . Η ενέργεια που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας 1 lb νερού κατά 1°F καλείται Btu, ενώ η ενέργεια για την αύξηση της θερμοκρασίας 1 Kg νερού κατά 1°C καλείται kilocalorie. Γενικά ισχύει ότι $1\text{Kcal/Kg }^{\circ}\text{C} = 1 \text{ Btu/lb }^{\circ}\text{F} = 4,184 \text{ KJ/Kg }^{\circ}\text{C}$. Στα περιβαλλοντικά συστήματα, η μεταβολή της αποθηκευμένης ενέργειας σε ένα σύστημα μάζας m , όταν η θερμοκρασία αλλάζει κατά ΔT , δίνεται από την εξίσωση (1.14):

$$\Delta E_{\text{εσωτ}} = m c \Delta T \quad (1.14)$$

Παράδειγμα 1.7

Πόσος χρόνος χρειάζεται για να ζεσταθεί το νερό ηλεκτρικού θερμοσίφωνα, όγκου 40 γαλονιών, από τους 50 °F στους 140 °F, αν η ισχύς της αντίστασης είναι 5 KW. Θεωρείστε ότι όλη η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική, ενώ η ενέργεια που προσδίδεται στο δοχείο και οι απώλειες θερμότητας είναι αμελητέες. Δίνεται ότι $c = 1 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$.

Λύση:

Σύμφωνα με τον Α νόμο της θερμοδυναμικής ισχύει ότι:

$$\text{Εισερχόμενη } E = \text{Εξερχόμενη } E + \text{Μεταβολή } E_{\text{εσωτ}} \quad (1.13)$$

Ο υπολογισμός της Εισερχόμενης E γίνεται πολλαπλασιάζοντας την ισχύ του θερμοσίφωνα με το χρόνο που λειτουργίας του. Δηλαδή:

$$\text{Εισερχόμενη } E = 5 \text{ KW} \times \Delta t \text{ sec} = 5 \times 10^3 \text{ J/s} \times \Delta t \text{ sec}$$

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας από τη δεξαμενή, η εξερχόμενη ενέργεια είναι μηδενική. Η μεταβολή της αποθηκευμένης ενέργειας δίνεται από την εξίσωση 1.14:

$$\text{Μεταβολή της αποθηκευμένης ενέργειας} = \Delta E_{\text{εσωτ}} = m c \Delta T \quad (1.14)$$

Όπου:

$$m = 40 \text{ γαλόνια} \times 3,75 \text{ l/γαλόνι} \times 10^3 \text{ g/l} = 1,5 \times 10^5 \text{ g}$$

$$c = 1 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C} = 4,184 \text{ J/g } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 60 - 10 = 50 \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ όπου για τη μετατροπή των θερμοκρασιών σε } ^\circ\text{C} \text{ χρησιμοποιείται η ισότητα } ^\circ\text{C} = (^\circ\text{F} - 32) / 1,8$$

Άρα με αντικατάσταση της (1.14) προκύπτει:

$$5 \times 10^3 \text{ J/s} \times \Delta t \text{ sec} = (1,5 \times 10^5 \text{ g}) (4,184 \text{ J/g } ^\circ\text{C}) (50 \text{ } ^\circ\text{C}) \Rightarrow$$

$$\Delta t = 6334,6 \text{ sec} = \mathbf{1,76 \text{ ώρες}}$$

Στην εξίσωση 1.14 ισχύουν οι παραδοχές ότι α) η ειδική θερμότητα παραμένει σταθερή για το δεδομένο θερμοκρασιακό εύρος παρόλο που στην πραγματικότητα μεταβάλλεται ελαφρά και β) δεν έχουμε μεταβολή φάσης του συγκεκριμένου υλικού. Όταν ένα υλικό αλλάζει φάση, απορροφάται ή απελευθερώνεται ενέργεια χωρίς παράλληλη μεταβολή της θερμοκρασίας. Η ενέργεια που απαιτείται για να προκαλέσει αλλαγή φάσης μίας μονάδας

μάζας υλικού από τη στερεή στην υγρή φάση -υπό σταθερή πίεση- καλείται *λανθάνουσα θερμότητα τήξης*. Παρομοίως, η ενέργεια που απαιτείται για να προκαλέσει αλλαγή φάσης μίας μονάδας μάζας υλικού από την υγρή στην αέρια φάση -υπό σταθερή πίεση- καλείται *λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης*. Γενικά ισχύει ότι ενέργεια 333 KJ προκαλεί τήξη 1 Kg πάγου (θερμοκρασία 0 °C), ενώ 2257 KJ απαιτούνται για τη μετατροπή 1 Kg νερού θερμοκρασίας 100 °C σε ατμό της ίδιας θερμοκρασίας (Πίνακας 1.3). Όταν ο ατμός συμπυκνώνεται ή όταν το νερό παγώνει, τα παραπάνω ποσά ενέργειας απελευθερώνονται.

Πίνακας 1.3 Φυσικές ιδιότητες του νερού

Ιδιότητες	Μονάδες SI	Μονάδες USCS
Ειδική Θερμότητα (15 °C)	4,184 KJ/Kg °C	1,0 Btu/lb °F
Ειδική Θερμότητα (<0 °C)	2,1 KJ/Kg °C	
Ειδική Θερμότητα (>100 °C)	2,0 KJ/Kg °C	
Λανθάνουσα Θερμότητα Εξάτμισης	2257 KJ/Kg	972 Btu/lb
Λανθάνουσα Θερμότητα Τήξης	333 KJ/Kg	144 Btu/lb
Πυκνότητα (4 °C)	1000 Kg/m ³	62,4 lb/ft ³

Η ενέργεια που απελευθερώνεται ή απορροφάται κατά τη μεταβολή φάσης υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης 1.15:

$$\text{Ενέργεια που απελευθερώνεται ή απορροφάται κατά την αλλαγή φάσης} = m L \quad (1.15)$$

Όπου:

m = η μάζα του υλικού

L = η λανθάνουσα θερμότητα τήξης ή εξάτμισης

Με τη βοήθεια του Πίνακα 1.3 μπορεί να υπολογιστεί η ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται για τη μετατροπή 1 Kg πάγου σε ατμό. Συγκεκριμένα, για την αλλαγή της θερμοκρασίας 1Kg πάγου απαιτούνται 2,1 KJ/°C. Για την αλλαγή φάσης του πάγου σε νερό απαιτούνται 333 KJ (λανθάνουσα θερμότητα τήξης). Για την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού απαιτούνται 4,184 KJ/ °C, ενώ για τη μεταβολή της φάσης από την υγρή στην αέρια απαιτούνται 2257 KJ (λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης). Τέλος, για την αύξηση της θερμοκρασίας 1 Kg ατμού απαιτούνται 2 KJ/ °C.

Παράδειγμα 1.8

Το ύψος της παγκόσμιας βροχόπτωσης εκτιμάται σε 1 m νερού ανά έτος, ενώ η συνολική επιφάνεια της Γης ανέρχεται σε $5,1 \times 10^{14} \text{ m}^2$. Να βρεθεί η ενέργεια που απαιτείται για την εξάτμιση όλης της ετήσιας βροχόπτωσης του πλανήτη αν θεωρήσουμε ότι η μέση θερμοκρασία της γης ισούται με $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Συγκρίνετε αυτό το ποσό ενέργειας με την ενεργειακή κατανάλωση του πλανήτη κατά το έτος 1987 ($3,3 \times 10^{17} \text{ KJ}$) και με τη μέση ηλιακή ενέργεια (168 W/m^2).

Λύση:

Η ενέργεια που απαιτείται για την εξάτμιση 1 Kg νερού θερμοκρασίας $15 \text{ }^\circ\text{C}$ σύμφωνα με τον Πίνακα 1.3 ισούται με:

$$\text{Απαιτούμενη Ενέργεια} = (\text{Ειδική Θερμότητα} \times \text{Μεταβολή Θερμοκρασίας}) + \text{Λανθάνουσα Θερμότητα Τήξης} \Rightarrow$$

$$\text{Απαιτούμενη Ενέργεια} = [4,184 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C} \times (100 \text{ }^\circ\text{C} - 15 \text{ }^\circ\text{C})] + 2257 \text{ KJ/Kg} = 2613 \text{ KJ/Kg}$$

Για την εξάτμιση όλης της ποσότητας του νερού ισχύει:

$$E = 1 \text{ m/έτος} \times 5,1 \times 10^{14} \text{ m}^2 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3 \times 2613 \text{ KJ/Kg} = \mathbf{1,33 \times 10^{21} \text{ KJ/έτος}}$$

Συγκρίνοντας τη συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας με τη μέση ενεργειακή χρήση στη Γη κατά το 1987 προκύπτει ότι:

$$1,33 \times 10^{21} \text{ KJ/έτος} / 3,3 \times 10^{17} \text{ KJ/έτος} = \mathbf{4030}$$

Άρα η απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας είναι περίπου 4000 περισσότερη από τη μέση ενεργειακή χρήση στη Γη.

Η ενέργεια που απαιτείται για την εξάτμιση της ετήσιας βροχόπτωσης ισούται με:

$$E = (1,33 \times 10^{24} \text{ J/έτος} \times 1 \text{ W/J/sec}) / (365 \text{ ημέρες} / \text{έτος} \times 24 \text{ ώρες} / \text{ημέρα} \times 3600 \text{ sec} / \text{ώρα} \times 5,1 \times 10^{14} \text{ m}^2) = \mathbf{78 \text{ W/m}^2}.$$

Η παραπάνω ποσότητα ενέργειας ισούται περίπου με το μισό της ενέργειας που απορροφάται στη γη μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας.

Όπως προαναφέρθηκε σε περιπτώσεις ανοικτών συστημάτων παρατηρείται ροή μάζας και ενέργειας από και προς το σύστημα. Σε αυτές τις περιπτώσεις η εξίσωση 1.14 μετατρέπεται στην 1.16:

$$\text{Ρυθμός μεταφοράς της ενέργειας} = \Delta \text{ } ^\circ\text{E}_{\text{εσωτ}} = m^\circ c \Delta T \quad (1.16)$$

Όπου:

m° = ο ρυθμός μεταφοράς μάζας στο σύστημα ($\text{m}^3/\text{s} \times \text{Kg}/\text{m}^3$)

ΔT = η αλλαγή της θερμοκρασίας του ρευστού που είναι φορέας της θερμοκρασίας

$\Delta \text{ } ^\circ\text{E}_{\text{εσωτ}}$ = ο ρυθμός μεταφοράς ενέργειας (J/s ή W)

Για παράδειγμα, αν χρησιμοποιείται νερό για την ψύξη ενός εργοστασίου παραγωγής ενέργειας, τότε m° θα είναι ο ρυθμός μεταφοράς της μάζας του νερού και ΔT η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού ψύξης καθώς περνά μέσα από το εργοστάσιο.

Παράδειγμα 1.9

Σε έναν ατμοηλεκτρικό σταθμό παραγωγής ενέργειας η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται αποτελεί το 1/3 της θερμικής ενέργειας του καυσίμου. Η ηλεκτρική ισχύς της μονάδας είναι 1000 MW. Το υπόλοιπο της ενέργειας χάνεται στο περιβάλλον ως θερμότητα. Το 15% της αποβαλλόμενης θερμότητας απομακρύνεται μέσω των απαερίων, ενώ το υπόλοιπο 85% μέσω των νερών ψύξης που λαμβάνονται από παρακείμενο ποτάμι. Το συγκεκριμένο ποτάμι έχει παροχή $100 \text{ m}^3/\text{s}$ και θερμοκρασία $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Αν η θερμοκρασία του νερού ψύξης επιτρέπεται να αυξηθεί μόνο κατά $10 \text{ }^\circ\text{C}$, τι παροχή νερού απαιτείται από το ποτάμι; Ποια θα είναι η θερμοκρασία του ποταμού μετά την απόρριψη σε αυτό του νερού ψύξης;

Λύση:

Καθώς τα 1000 MW ισούται με το 1/3 της εισερχόμενης ενέργειας στο εργοστάσιο, τότε αυτή θα ισούται με:

$$\text{Εισερχόμενη Ενέργεια} = \text{Εξερχόμενη Ενέργεια} / 0,333 \Rightarrow$$

$$\text{Εισερχόμενη Ενέργεια} = 1000 \text{ MW} / 0,333 = 3000 \text{ MW}$$

Βάση των παραπάνω, οι απώλειες σε ενέργεια ισούται με 2000 MW. Δεδομένου ότι το 15% της αποβαλλόμενης θερμότητας απομακρύνεται μέσω των απαερίων, ενώ το υπόλοιπο 85% μέσω των νερών ψύξης, η ενέργεια που χάνεται στα απαέρια ισούται με $0,15 \times 2000 \text{ MW} = 300 \text{ MW}$, ενώ η ενέργεια που χάνεται στο νερό ψύξης με $0,85 \times 2000 \text{ MW} = 1700 \text{ MW}$.

Α) Για να βρεθεί η παροχή του νερού ψύξης που απαιτείται για να απομακρυνθεί ενέργεια ίση με 1700 MW χρησιμοποιούμε την εξίσωση 1.16:

$$\text{Ρυθμός μεταφοράς της αποθηκευμένης ενέργειας} = m^\circ c \Delta T \Rightarrow$$

$$1700 \text{ MW} = \dot{m} \times 4184 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C} \times 10^0 \text{ } ^\circ\text{C} \times 1\text{MW}/(10^6 \text{ J/s}) \Rightarrow$$

$$\dot{m} = 40,6 \times 10^3 \text{ Kg/sec} = \mathbf{40,6 \text{ m}^3/\text{sec}}$$

B) Για τον υπολογισμό της νέας θερμοκρασίας του ποταμού χρησιμοποιείται πάλι η εξίσωση 1.16:

$$\text{Ρυθμός μεταφοράς της αποθηκευμένης ενέργειας} = \dot{m} c \Delta T \Rightarrow$$

$$1700 \text{ MW} \times (10^6 \text{ J/sec} / \text{MW}) = 100 \text{ m}^3/\text{sec} \times 10^3 \text{ Kg/m}^3 \times 4184 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C} \times \Delta T \Rightarrow$$

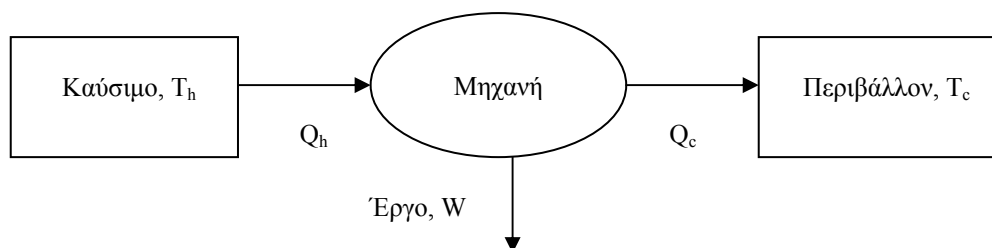
$$\Delta T = \mathbf{4,1 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Άρα η θερμοκρασία του ποταμού θα αυξηθεί κατά 4,1 $^\circ\text{C}$, δηλαδή θα φθάσει τους 24,1 $^\circ\text{C}$.

1.3.2 Β' Θερμοδυναμικός Νόμος

Σύμφωνα με το Β' Νόμο της Θερμοδυναμικής “*καμία μετατροπή ενέργειας δεν είναι απόλυτα αποδοτική, αλλά πάντα υπάρχουν απώλειες ενέργειας*”. Η παραπάνω πρόταση εκ πρώτης όψεως φαίνεται να έρχεται σε αντίθεση με τον Α' θερμοδυναμικό νόμο σύμφωνα με τον οποίο η ενέργεια ούτε δημιουργείται ούτε καταστρέφεται. Στην πραγματικότητα μιλώντας για απώλεια ενέργειας αναφερόμαστε στη μετατροπή της σε μορφές ενέργειας “χαμηλότερης ποιότητας”, όπως για παράδειγμα σε θερμική ενέργεια που απελευθερώνεται στο περιβάλλον.

Στο Σχήμα 1.4 παριστάνεται μία θερμομηχανή, που λαμβάνει θερμική ενέργεια, Q_h από μία πηγή υψηλής θερμότητας (καύσιμο που καίγεται και έχει θερμοκρασία T_h), μετατρέπει ένα μέρος της σε έργο W (ηλεκτρική ενέργεια) και αποβάλλει την υπόλοιπη θερμική ενέργεια, Q_c στο περιβάλλον όπου η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη και συμβολίζεται με T_c .



Σχήμα 1.4 Αναπαράσταση λειτουργίας θερμομηχανής

Η απόδοση της συγκεκριμένης μηχανής, n ισούται με το λόγο του έργου που παράχθηκε, W προς το ποσό της θερμικής ενέργειας που προσφέρθηκε από την πηγή υψηλής θερμότητας, Q_h (εξίσωση 1.17).

$$n = \frac{W}{Q_h} = \frac{(Q_h - Q_c)}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} \quad (1.17)$$

Η πλέον αποδοτική θερμομηχανή ονομάζεται μηχανή Carnot, από το Γάλλο μηχανικό Sadi Carnot που τη σχεδίασε το 1820. Η απόδοση μίας τέτοιας θερμομηχανής δίνεται από την εξίσωση 1.18, όπου οι απόλυτες θερμοκρασίες μετρούνται σε Kelvin:

$$n_{\max} = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad (1.18)$$

Από την παραπάνω εξίσωση φαίνεται ότι η απόδοση της εν λόγω μηχανής αυξάνει όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, T_h της πηγής υψηλής θερμότητας ή όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία, T_c του περιβάλλοντος. Εφόσον $T_h < \infty$ και $T_c > 0 \text{ } ^\circ\text{K}$, η απόδοση της μηχανής δεν μπορεί να ξεπεράσει το 100%. Στην πραγματικότητα η απόδοση των μηχανών είναι πολύ χαμηλότερη. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού η μέγιστη θερμοκρασία του ατμού που παράγεται από την καύση του καύσιμου (T_h) δεν ξεπερνά τους $600 \text{ } ^\circ\text{C}$, ενώ η μέση θερμοκρασία του περιβάλλοντος όπου καταλήγει η αποβαλλόμενη θερμότητα (T_c) είναι $20 \text{ } ^\circ\text{C}$. Με τη βοήθεια της εξίσωσης 1.18 υπολογίζεται ότι η μέγιστη απόδοση στη συγκεκριμένη μονάδα είναι:

$$n_{\max} = 1 - \frac{(20 + 273)}{(600 + 273)} = 0,66$$

Στην πράξη η μέση απόδοση των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν ξεπερνά το 33%, δηλαδή για κάθε τρεις μονάδες ενέργειας που εισέρχονται στο εργοστάσιο, η μία μονάδα μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια και οι άλλες δύο αποβάλλονται στο περιβάλλον ως θερμότητα.

Παράδειγμα 1.10

Ατμοηλεκτρικός σταθμός παραγωγής ενέργειας καίει κάρβουνο που έχει ενεργειακό περιεχόμενο 24KJ/g και μέσω περιεχόμενο σε άνθρακα 62%. Το συγκεκριμένο καύσιμο περιέχει επίσης 2% S και 10% τέφρα. Η νομοθεσία που ισχύει για τις εκπομπές αερίων ρύπων επιτρέπει την εκπομπή 260 g SO_2 (130 g S) και 13 g αιωρούμενων σωματιδίων ανά

10^6 KJ θερμικής ενέργειας που εισέρχονται στον ατμοηλεκτρικό σταθμό. Υποθέστε ότι για την παραγωγή μίας μονάδας ηλεκτρικής ενέργειας απαιτούνται τρεις μονάδες θερμικής ενέργειας. Επίσης, το 70% της τέφρας απελευθερώνεται ως ιπτάμενη τέφρα, ενώ το 30% κατακρημνίζεται και καταλήγει στο έδαφος. Α) Να βρεθούν οι επιτρεπόμενες εκπομπές SO_2 και αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα ανά κιλοβατώρα ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται. Β) Να υπολογιστούν οι εκπομπές C στην ατμόσφαιρα αν υποτεθεί ότι όλος ο C απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα Γ) Ποια θα πρέπει να είναι η απόδοση του συστήματος ελέγχου εκπομπών SO_2 για να επιτυγχάνονται τα όρια εκπομπής που ορίζονται από τη νομοθεσία Δ) Ποια θα πρέπει να είναι η απόδοση του συστήματος ελέγχου εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων για να επιτυγχάνονται τα όρια εκπομπής που ορίζονται από τη νομοθεσία Ε) Να παρασταθεί γραφικά το ισοζύγιο μάζας και ενέργειας στο συγκεκριμένο ατμοηλεκτρικό σταθμό για την παραγωγή 1 KWhr ηλεκτρικής ενέργειας. Θεωρείστε ότι το 85% της αποβαλλόμενης θερμότητας απομακρύνεται με το νερό ψύξης, ενώ το υπόλοιπο 15% με τα απαέρια.

Λύση:

Α) Καθώς οι 3 μονάδες θερμικής ενέργειας παράγουν μία μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας ισχύει ότι για την παραγωγή 1 KWhr ηλεκτρικής ενέργειας απαιτούνται 3 KWhr θερμότητας. Οπου:

$$3 \text{ KW ανά ώρα} \times 1 \text{ (KJ/s)/KW} \times 3600 \text{ s/ώρα} = 10800 \text{ KJ}$$

Σύμφωνα με τη νομοθεσία οι εκπομπές του SO_2 θα πρέπει να είναι 260 g SO_2 ανά 10^6 KJ θερμικής ενέργειας, άρα στα 10800 KJ που απαιτούνται για την παραγωγή 1 KWhr ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει να εκπέμπονται:

$$(260 \text{ g } SO_2 / 10^6 \text{ KJ}) \times (10800 \text{ KJ/KWhr}) = \mathbf{2,8 \text{ g } SO_2 / KWhr}$$

Ομοίως για τα αιωρούμενα σωματίδια:

$$(13 \text{ g αιωρ. σωματιδίων} / 10^6 \text{ KJ}) \times (10800 \text{ KJ/KWhr}) = \mathbf{0,14 \text{ g αιωρ. σωματιδίων} / KWhr}$$

Β) Δεδομένου ότι το ενεργειακό περιεχόμενο του καυσίμου είναι 24KJ/g, τότε για την παραγωγή 1 KWhr ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνονται $10800 \text{ KJ} / 24 \text{ KJ/g} = 450 \text{ g}$ καυσίμου. Εφόσον το καύσιμο περιέχει κατά 62% C, τότε:

$$\text{Εκπομπές C} = 0,62 \text{ g C} / \text{g καυσίμου} \times 450 \text{ g καυσίμου/KWhr} = \mathbf{280 \text{ g C/KWhr}}$$

Γ) Εφόσον το καύσιμο περιέχει 2% S, τότε για την παραγωγή 1 KWhr ηλεκτρικής ενέργειας απελευθερώνονται:

Εκπομπές S = $0,02 \text{ g S} / \text{g καυσίμου} \times 450 \text{ g καυσίμου/KWhr} = \mathbf{9 \text{ g S} \text{ ή } 18 \text{ g SO}_2/\text{KWhr}$

Αρα η απόδοση του συστήματος ελέγχου εκπομπών SO₂ για να επιτυγχάνονται τα όρια εκπομπής που ορίζονται από τη νομοθεσία θα πρέπει να είναι:

$$\text{Απόδοση} = 100 \times (18-2,8)/18 = \mathbf{84,4\%}$$

Δ) Εφόσον το καύσιμο περιέχει 10% τέφρα, τότε για την παραγωγή 1 KWhr ηλεκτρικής ενέργειας απελευθερώνονται:

$$\text{Εκπομπές τέφρας} = 0,1 \text{ g τέφρας} / \text{g καυσίμου} \times 450 \text{ g καυσίμου/KWhr} = \mathbf{45 \text{ g τέφρας/KWhr}}$$

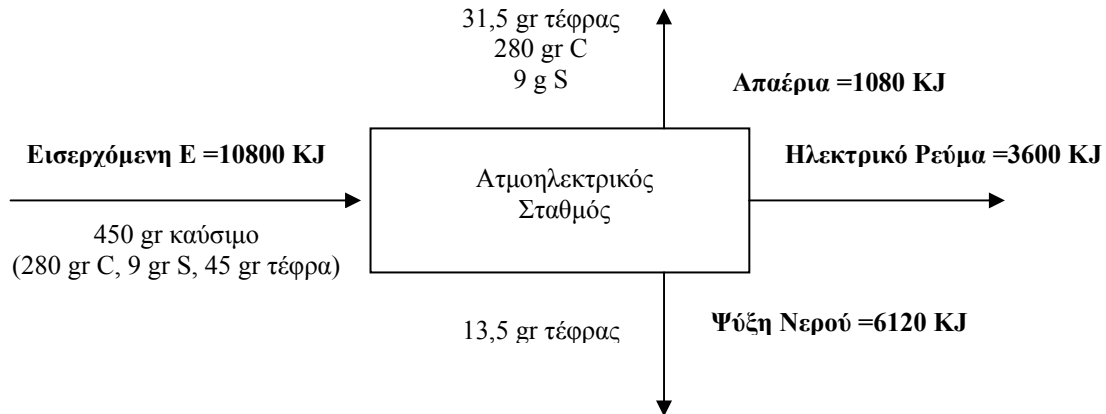
Από τη συγκεκριμένη ποσότητα τέφρας το 70% απελευθερώνεται ως ιπτάμενη τέφρα στην ατμόσφαιρα, δηλαδή ποσότητα ίση με:

$$0,7 \times 45 \text{ g τέφρας/KWhr} = \mathbf{31,5 \text{ g τέφρας/KWhr}}$$

Αρα η απόδοση του συστήματος ελέγχου εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων για να επιτυγχάνονται τα όρια εκπομπής που ορίζονται από τη νομοθεσία θα πρέπει να είναι:

$$\text{Απόδοση} = 100 \times (31,5-0,14)/31,5 = \mathbf{99,5\%}$$

Ε)



1.3.3 Μεταφορά Θερμότητας

Όταν δύο αντικείμενα έχουν διαφορετική θερμοκρασία μεταφέρεται θερμότητα από το θερμότερο στο ψυχρότερο. Η μεταφορά θερμότητας μπορεί να γίνει α) μέσω επαφής, όταν υπάρχει φυσική επαφή των δύο αντικειμένων, β) μέσω ακτινοβολίας και γ) δια μέσου του υγρού ή αέριου μέσου που παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο αντικειμένων.

Η μεταφορά θερμότητας μέσω επαφής συνδέεται κυρίως με τα στερεά σώματα, καθώς ένα μόριο ταλαντώνεται με το επόμενο στο κρυσταλλικό πλέγμα. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας σε αυτή την περίπτωση είναι ανάλογος με τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Η μεταφορά θερμότητας μέσω ενός υγρού ή αέριου μέσου πραγματοποιείται όταν ένα ρευστό δεδομένης θερμοκρασίας έρχεται σε επαφή με ένα υλικό διαφορετικής θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, η επαφή θερμού νερού με μία παγωμένη επιφάνεια έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά θερμότητας στην παγωμένη επιφάνεια. Για τον υπολογισμό του συνολικού ρυθμού μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιείται η εξίσωση 1.19:

$$q = \frac{A(T_i - T_o)}{R} \quad (1.19)$$

Όπου:

q = ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας (W ή Btu/ώρα)

A = η επιφάνεια μεταφοράς (m^2)

T_i = η θερμοκρασία στη μία πλευρά της επιφάνειας ($^{\circ}C$)

T_o = η θερμοκρασία στην άλλη πλευρά της επιφάνειας ($^{\circ}C$)

R = η ολική θερμική αντίσταση ($m^2 \text{ }^{\circ}C/W$)

Παράδειγμα 1.11

Ένα διαμέρισμα βρίσκεται σε περιοχή όπου για 8 μήνες το έτος επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες ($40 \text{ }^{\circ}F$), με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η λειτουργία του καλοριφέρ, ώστε να διατηρείται θερμοκρασία ίση με $70 \text{ }^{\circ}F$ εντός του διαμερίσματος. Προτείνεται στον ιδιοκτήτη να ξοδέψει 1000 Ευρώ για να βελτιώσει τη μόνωση της οροφής, αυξάνοντας την ολική θερμική αντίστασή της από 11 σε $40 \text{ ft}^2 \text{ }^{\circ}F \text{ ώρα/Btu}$. Αν θεωρηθεί ότι η οροφή έχει εμβαδόν 1500 ft^2 και το διαμέρισμα θερμαίνεται με ηλεκτρικό ρεύμα που κοστίζει 0,08 Ευρώ/ KWhr, σε πόσα χρόνια θα αποσβεσθεί η επένδυση; Αν υποθεθεί ότι 1.000.000 σπίτια που τροφοδοτούνται ηλεκτρικά από τη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος του Παραδείγματος 1.10 βελτιώνουν τη μόνωση της οροφής τους. Να εκτιμηθεί η ετήσια μείωση σε εκπομπές SO_2 , σωματιδίων και C.

Λύση:

A) Με τη βοήθεια της εξίσωσης 1.19 υπολογίζεται η απώλεια θερμότητας από την οροφή, όταν δεν υπάρχει επιπλέον μόνωση:

$$q = \frac{A(T_i - T_o)}{R} \Rightarrow$$

$$q = 1500 \text{ ft}^2 \times (70-40) \text{ } ^\circ\text{F} / 11 \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ ώρα/Btu} = 4090 \text{ Btu/ώρα}$$

Μετά την προσθήκη του μονωτικού υλικού, η απώλεια θερμότητας υπολογίζεται σε:

$$q = 1500 \text{ ft}^2 \times (70-40) \text{ } ^\circ\text{F} / 40 \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ ώρα/Btu} = 1125 \text{ Btu/ώρα}$$

Άρα μετά την προσθήκη του μονωτικού υλικού εξοικονομούνται $4090-1125 = 2965$ Btu/ώρα, δηλαδή $2965 \times 8 \times 30 \times 24 = 17078400$ Btu /έτος = 5005 KWhr/έτος. Δεδομένου ότι 1 KWhr κοστίζει 0,08 Ευρώ, τότε κάθε χρόνο εξοικονομούνται 400 Ευρώ. Εφόσον το κόστος του μονωτικού υλικού είναι 1000 Ευρώ, η απόσβεσή του θα γίνει σε **2,5 χρόνια**.

B) Στο παράδειγμα 1.10 βρέθηκε ότι κατά την παραγωγή 1 KWhr ηλεκτρικού ρεύματος εκπέμπονται τελικά 0,14 g τέφρας, 2,8 g SO₂ και 280 g C. Αν 1000000 σπίτια βάλουν επιπλέον μόνωση στην οροφή, τότε σε ένα χρόνο θα εξοικονομηθεί ποσό ενέργειας ίσο με:

$$5005 \text{ KWhr/έτος} \times 1000000 = 5005 \cdot 10^6 \text{ KWhr/έτος}$$

Οι εκπομπές της τέφρας, του SO₂ και του C θα είναι μειωμένες κατά:

$$\text{τέφρα: } 0,14 \text{ g τέφρα/KWhr} \times 5005 \cdot 10^6 \text{ KWhr/έτος} = \mathbf{0,7 \times 10^9 \text{ g τέφρα/έτος}}$$

$$\text{SO}_2: 2,8 \text{ g SO}_2 \text{ /KWhr} \times 5005 \cdot 10^6 \text{ KWhr/έτος} = \mathbf{14 \times 10^9 \text{ g SO}_2 \text{ /έτος}}$$

$$\text{C: } 280 \text{ g C/KWhr} \times 5005 \cdot 10^6 \text{ KWhr/έτος} = \mathbf{1400 \times 10^9 \text{ g C/έτος}}$$

Η μεταφορά της ενέργειας μέσω ακτινοβολίας γίνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και δεν απαιτείται η ύπαρξη κάποιου μέσου για την πραγματοποίησή της. Κάθε αντικείμενο εκπέμπει θερμική ακτινοβολία. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος για να περιγραφεί το ποσό της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο είναι να συγκριθεί με το ποσό της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα. Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζεται ένα αντικείμενο που λειτουργεί ως τέλειος πομπός και δέκτης ενέργειας. Ως τέλειος πομπός, ακτινοβολεί περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα επιφανείας από κάθε άλλο αντικείμενο της ίδιας θερμοκρασίας, ενώ ως τέλειος δέκτης απορροφά όλη την ακτινοβολία που καταλήγει σε αυτό. Ο λόγος του ποσού της ακτινοβολίας που ένα πραγματικό αντικείμενο εκπέμπει προς το ποσό της ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία ονομάζεται *ικανότητα εκπομπής* και συμβολίζεται με ϵ . Η τιμή της ϵ για την έρημο ισούται περίπου με 0,90, για το νερό με 0,95 και για το ανθρώπινο σώμα με 0,96.

Για τον υπολογισμό της μέγιστης ενέργειας εκπομπής από μέλαν σώμα χρησιμοποιείται ο νόμος των Stefan – Boltzmann (εξίσωση 1.20):

$$E_{\max} = \sigma A T^4 \quad (1.20)$$

Όπου:

E_{\max} = ο μέγιστος ρυθμός εκπομπής ενός μέλαν σώματος (W)

σ = η σταθερά Stefan – Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

T = η απόλυτη θερμοκρασία του αντικειμένου (K)

A = η επιφάνεια του αντικειμένου (m^2)

Για τον υπολογισμό του μήκους κύματος, λ_{\max} όπου παρατηρείται η μέγιστη εκπομπή ενός μέλαν σώματος χρησιμοποιείται ο κανόνας του Wien (εξίσωση 1.21). Στη συγκεκριμένη εξίσωση το μήκος κύματος υπολογίζεται σε μm και η θερμοκρασία σε Kelvin.

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad (1.21)$$

Παράδειγμα 1.12

Θεωρείστε τη γη ως μέλαν σώμα με μέση θερμοκρασία $15 \text{ }^\circ\text{C}$ και εμβαδόν $5,1 \times 10^{14} \text{ m}^2$. Να βρεθεί ο ρυθμός με τον οποίο εκπέμπεται ενέργεια από τη γη και το μήκος κύματος στο οποίο ακτινοβολείτε η μέγιστη ποσότητα ενέργειας. Συγκρίνετε το συγκεκριμένο μήκος κύματος με το μήκος κύματος που εκπέμπεται η μέγιστη ακτινοβολία από τον ήλιο (θερμοκρασία ηλίου, 5800 K).

Λύση:

A) Για τον υπολογισμό του ρυθμού εκπομπής ενέργειας χρησιμοποιείται η εξίσωση 1.20:

$$\begin{aligned} E_{\max} &= \sigma A T^4 \Rightarrow \\ E_{\max} &= 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4 \times 5,1 \times 10^{14} \text{ m}^2 \times (15 + 273\text{K})^4 \Rightarrow \\ E_{\max} &= \mathbf{2,0 \times 10^{17} \text{ W}} \end{aligned}$$

B) Για τον υπολογισμό του μήκους κύματος στο οποίο η γη ακτινοβολεί τη μέγιστη ποσότητα ενέργειας χρησιμοποιείται η εξίσωση 1.21:

$$\begin{aligned} \lambda_{\max} &= \frac{2898}{T} \Rightarrow \\ \lambda_{\max} &= 2898 / (15+273) \Rightarrow \\ \lambda_{\max} &= \mathbf{10,1 \mu\text{m}} \end{aligned}$$

Γ) Για τον υπολογισμό του μήκους κύματος στο οποίο ο ήλιος ακτινοβολεί τη μέγιστη ποσότητα ενέργειας χρησιμοποιείται πάλι η εξίσωση 1.21:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \Rightarrow$$

$$\lambda_{\max} = 2898 / 5800 \Rightarrow$$

$$\lambda_{\max} = \mathbf{0,48 \mu m}$$

Το ποσό της ενέργειας που εκπέμπεται από τη γη και υπολογίστηκε στο παραπάνω παράδειγμα ισοσκελίζεται με το ποσό της ενέργειας που απορροφάται από τη γη, προερχόμενο από τον ήλιο. Το γεγονός όμως ότι η μέγιστη ενέργεια εκπέμπεται σε διαφορετικά μήκη κύματος έχει σημαντική συμβολή στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα, το CO₂ και τα υπόλοιπα αέρια του θερμοκηπίου δεν απορροφούν τα μικρά μήκη κύματος της ενέργειας που προέρχεται από τον ήλιο, ενώ παρουσιάζουν μεγαλύτερη απορρόφηση στα μεγαλύτερα μήκη κύματος που εκπέμπονται από τη γη. Με τον τρόπο αυτό συμβάλλουν στη διατάραξη της ισορροπίας και στην αύξηση της θερμοκρασίας της γης.

Ασκήσεις

1. Ένας ποταμός με συγκέντρωση 400 ppm αλάτων (μη μετατρέψιμο χημικό είδος) και παροχή $25 \text{ m}^3/\text{s}$ δέχεται ρεύμα αποβλήτων παροχής $5 \text{ m}^3/\text{s}$ και συγκέντρωσης 2000 mg/l αλάτων. Μία πόλη που βρίσκεται κατάντη του σημείου απόρριψης των αποβλήτων, αντλεί νερό από τον ποταμό και το αναμιγνύει με ποσότητα νερού που προέρχεται από γεώτρηση και η οποία έχει μηδενική συγκέντρωση αλάτων. Ποιος θα πρέπει να είναι ο λόγος μίξης νερού από γεώτρηση προς νερό από ποταμό, ώστε η συγκέντρωση των αλάτων στο νερό που καταλήγει στα σπίτια να μην ξεπερνά τα 500 ppm.
2. Μία δεξαμενή σχεδιάζεται με στόχο να δέχεται $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ αποβλήτων που περιέχουν ρύπο συγκέντρωσης 30 mg/l. Ο ρύπος θεωρείται μετατρέψιμο χημικό είδος και η σταθερά αντίδρασης K ισούται με $0,2/\text{ημέρα}$. Τα εξερχόμενα απόβλητα της δεξαμενής έχουν συγκέντρωση 10 mg/l. Αν θεωρηθεί ότι στη δεξαμενή πραγματοποιείται πλήρης μίξη, ποιος θα πρέπει να είναι ο όγκος της δεξαμενής;
3. Δεξαμενή όγκου 1200 m^3 δέχεται συνεχώς απόβλητα με παροχή $100 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$. Στα απόβλητα υπάρχει ρύπος που θεωρείται μη μετατρέψιμο χημικό είδος και έχει συγκέντρωση 10 mg/l. Θεωρώντας ότι το σύστημα έχει φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας και σε αυτό επικρατούν συνθήκες πλήρους μίξης να υπολογιστεί η συγκέντρωση του ρύπου στα εξερχόμενα απόβλητα. Αν η συγκέντρωση του ρύπου στα εισερχόμενα απόβλητα αυξηθεί στα 100 mg/l, ποια θα είναι η συγκέντρωσή του στην έξοδο της δεξαμενής 7 ημέρες αργότερα; Αν ο ρύπος θεωρηθεί μετατρέψιμο χημικό είδος με $K=0,2/\text{ημέρα}$, ποια θα είναι η συγκέντρωσή του στην έξοδο της δεξαμενής 7 ημέρες αργότερα;
4. Σε λέσχη σμηνιτών που έχει διαστάσεις $4 \times 7 \times 2,5 \text{ m}$ βρίσκονται 8 καπνιστές που καπνίζουν 3 τσιγάρα ανά ώρα. Κάθε τσιγάρο εκπέμπει $1,4 \text{ mg}$ φορμαλδεΐδης (HCHO). Η φορμαλδεΐδη μετατρέπεται σε CO_2 με ταχύτητα αντίδρασης, K που ισούται με $0,4/\text{ώρα}$. Φρέσκος αέρας εισέρχεται στη λέσχη με ρυθμό 200 m^3 ανά ώρα και εξέρχεται με τον ίδιο ρυθμό. Υποθέτοντας καθεστώς πλήρους μίξης, να υπολογιστεί η συγκέντρωση της φορμαλδεΐδης στο χώρο σε σταθερές συνθήκες. Αν η συγκέντρωση ερεθισμού των ματιών είναι 0,05 ppm, να διερευνήσετε αν θα προκληθεί ερεθισμός των ματιών των σμηνιτών (θερμοκρασία 20°C και πίεση 1 atm). Αν υποθεθεί ότι στις 20:00 που ανοίγει η λέσχη ο αέρας είναι τελείως καθαρός, ποια θα είναι η συγκέντρωση της φορμαλδεΐδης στο χώρο στις 21:00, 22:00, 23:00 και 24:00; Να παρασταθεί γραφικά η μεταβολή της συγκέντρωσης της φορμαλδεΐδης με το χρόνο.

5. Ένας ηλεκτρικός θερμοσίφωνας διατηρείται στους 140 °F, βρισκόμενος σε δωμάτιο με μέση θερμοκρασία 40 °F. Όταν αγοράστηκε η ολική θερμική του αντίστασή R ήταν ίση με 5 ft² °F ώρα/Btu. Μετά την προσθήκη μονωτικού υλικού συνολικού εμβαδού 25 ft², η ολική θερμική του αντίστασή R αυξήθηκε σε 15 ft² °F ώρα/Btu. Υποθέτοντας μηδενικές απώλειες κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε ζεστό νερό, να υπολογιστεί πόση ενέργεια (σε KWhr) θα εξοικονομείται κάθε χρόνο. Αν το ηλεκτρικό ρεύμα κοστίζει 0,08 Ευρώ ανά KWhr, πόσα χρήματα θα εξοικονομούνται ετησίως.
6. Μία λάμπα φθορισμού 15 W παράγει την ίδια ποσότητα φωτός με μία λάμπα πυρακτώσεως 60 W, ενώ χρησιμοποιεί μόνο το ¼ της ισχύος της. Αν αντικατασταθεί η λάμπα πυρακτώσεως με τη λάμπα φθορισμού, να υπολογιστεί η μείωση των εκπομπών C, SO₂ και σωματιδίων που θα επιτευχθεί στις 9000 ώρες ζωής της λάμπας φθορισμού. Θεωρείστε ότι κατά την παραγωγή 1 KWhr ηλεκτρικού ρεύματος απελευθερώνονται 280 g C, 18 g SO₂ και 45 g τέφρας.
7. Το πετρέλαιο που τροφοδοτεί μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιέχει 20 Kg C ανά 10⁹ J εισερχόμενης ενέργειας. Αν η απόδοση της μονάδας είναι 40%, να βρεθούν οι εκπομπές C ανά KWhr ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται, υποθέτοντας ότι το σύνολο του C εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με τη νέα νομοθεσία, οι εκπομπές SO₂ και NO_x περιορίζονται στα 86 mg SO₂ και 130 mg NO_x ανά MJ εισερχόμενης ενέργειας. Να εκτιμηθεί η μέγιστη επιτρεπόμενη εκπομπή SO₂ και NO_x ανά KWh.
8. Τα αντικείμενα δεν εκπέμπουν μόνο ενέργεια μέσω ακτινοβολίας, αλλά και απορροφούν. Η καθαρή ποσότητα ενέργειας που εκπέμπει ένα αντικείμενο θερμοκρασίας T₁ σε περιβάλλον που έχει θερμοκρασία T₂ δίνεται από τον τύπο:

$$E_{\text{net}} = \sigma A [(T_1)^4 - (T_2)^4]$$

Υποθέστε ότι ένα ανθρώπινο σώμα έχει συνολική επιφάνεια 1,35 m², μέση θερμοκρασία 36,6 °C και βρίσκεται σε δωμάτιο που έχει θερμοκρασία 15 °C. Θεωρώντας το ανθρώπινο σώμα ως μέλαν σώμα, να βρεθεί η καθαρή απώλεια θερμότητας από ακτινοβολία (σε Watt).

2. ΡΥΘΜΟΙ ΕΞΕΛΙΞΗΣ

2.1 Εισαγωγή

Για την επίλυση των περιβαλλοντικών προβλημάτων είναι συχνά αναγκαία η πρόβλεψη της μεταβολής μίας σειράς παραμέτρων. Για παράδειγμα, κατά το σχεδιασμό μίας μονάδας επεξεργασίας πόσιμου νερού είναι απαραίτητη η πρόβλεψη της εξέλιξης του πληθυσμού της περιοχής για τις επόμενες δεκαετίες. Επίσης, για την ομαλή λειτουργία μίας μονάδας ενεργού ιλύος είναι απαραίτητη η πρόβλεψη της ταχύτητας αύξησης των μικροοργανισμών μέσα στον αντιδραστήρα. Για την επίλυση πιο σύνθετων περιβαλλοντικών προβλημάτων, όπως της μελλοντικής επίδρασης των εκπομπών του CO₂ στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, ο αριθμός των περιβαλλοντικών παραμέτρων που θα πρέπει να προβλεφθούν αυξάνει σημαντικά. Ως αποτέλεσμα, για το παραπάνω ζήτημα είναι απαραίτητη η πρόβλεψη παραμέτρων όπως της αύξησης του πληθυσμού του πλανήτη και της μεταβολής της οικονομικής του κατάστασης, της ταχύτητα χρήσης του πετρελαίου, των γαιανθράκων και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, της ταχύτητα μεταβολής των δασικών εκτάσεων για τις επόμενες δεκαετίες κ.α. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο χρονικός ορίζοντας της πρόβλεψης, τόσο λιγότερη ακριβής θα είναι αυτή. Για την πρόβλεψη της μεταβολής των περιβαλλοντικών παραμέτρων χρησιμοποιούνται μία σειρά από μαθηματικά μοντέλα. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο από αυτά είναι το μοντέλο της εκθετικής αύξησης που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

2.2 Εκθετική Αύξηση

Κατά την *εκθετική αύξηση*, η ταχύτητα αύξησης μίας ποσότητας N είναι ανάλογη με τη ποσότητα N . Δηλαδή ισχύει η εξίσωση 2.1:

$$\frac{dN}{dt} = rN \quad (2.1)$$

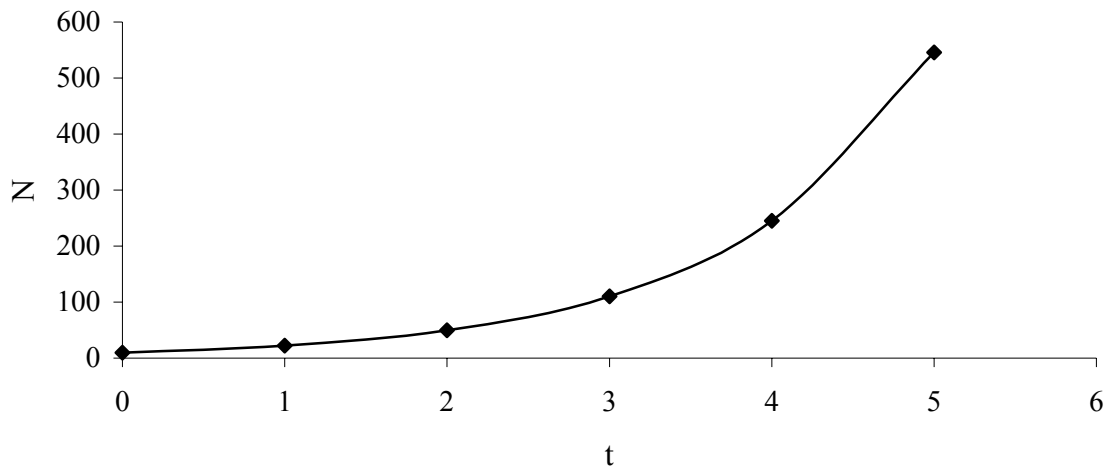
Όπου:

r = η ταχύτητα αύξησης (time⁻¹)

Η συγκεκριμένη εξίσωση είναι η ίδια με την εξίσωση 1.5 που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 1 και μετά από ολοκλήρωση μετατρέπεται στην εξίσωση 2.2:

$$N = N_0 e^{rt} \quad (2.2)$$

Η γραφική απεικόνιση της παραπάνω συνάρτησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Απεικόνιση της εκθετικής συνάρτησης.

Παράδειγμα 2.1

Το 1995 στις Η.Π.Α καταναλώθηκαν 3×10^{12} KWhr ηλεκτρικού ρεύματος. Αν η μέση ποσοστιαία ταχύτητα αύξησης της κατανάλωσης ρεύματος είναι σταθερή και ισούται με 1,8%, ποια θα είναι η κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος το 2050.

Λύση:

Με τη βοήθεια της εξίσωσης 2.2 προκύπτει:

$$\begin{aligned} N &= N_0 e^{rt} \Rightarrow \\ N &= 3 \times 10^{12} \text{ KWhr } e^{0,018 \times 55} \Rightarrow \\ N &= 8,07 \times 10^{12} \text{ KWhr} \end{aligned}$$

Για να υπολογισθεί ο χρόνος διπλασιασμού (T_d) μίας ποσότητας που αυξάνει με εκθετικό ρυθμό r χρησιμοποιούμε την εξίσωση 2.2, αντικαθιστώντας $N = 2 N_0$:

$$\begin{aligned} N &= N_0 e^{rT_d} \Rightarrow \\ 2 N_0 &= N_0 e^{rT_d} \Rightarrow \\ \ln 2 &= rT_d \Rightarrow \\ T_d &= \frac{0,693}{r} \quad (2.3) \end{aligned}$$

Όταν η ταχύτητα μείωσης μίας ποσότητας είναι ανάλογη με την παρούσα ποσότητα, τότε αναφερόμαστε σε *εκθετική μείωση*. Δηλαδή ισχύει η εξίσωση 2.4:

$$\frac{dN}{dt} = -KN \quad (2.4)$$

Όπου:

K = η ταχύτητα μείωσης (time^{-1})

Η συγκεκριμένη εξίσωση μετά την επίλυσή της μετατρέπεται στην εξίσωση 2.5:

$$N = N_0 e^{-Kt} \quad (2.5)$$

Για τον υπολογισμό του χρόνου υποδιπλασιασμού ($T_{1/2}$) μίας ποσότητας, αντικαθιστούμε στην εξίσωση 2.5 την ποσότητα N με $N_0/2$:

$$\begin{aligned} N &= N_0 e^{-KT_{1/2}} \Rightarrow \\ N_0/2 &= N_0 e^{-KT_{1/2}} \Rightarrow \\ \ln(1/2) &= -KT_{1/2} \Rightarrow \\ T_{1/2} &= \frac{0,693}{K} \quad (2.6) \end{aligned}$$

Παράδειγμα 2.2

Αν ξεκινήσουμε με 1,0 Ci Rn^{222} και ο χρόνος υποδιπλασιασμού του (ή η ημίσεια ζωή του) είναι 3,8 ημέρες, πόσα Ci θα έχουμε μετά από 5 ημέρες;

Λύση:

Με τη βοήθεια της 2.6 υπολογίζουμε την ταχύτητα μείωσης, K :

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{K} \Rightarrow$$

$$K = 0,693/3,8 \text{ ημέρες} = 0,182/\text{ημέρα}$$

Με τη βοήθεια της 2.5 υπολογίζουμε την ποσότητα του Rn^{222} πέντε ημέρες μετά:

$$N = N_0 e^{-Kt} \Rightarrow$$

$$N = 1 \text{ Ci } e^{-0,182/\text{ημέρα} \times 5 \text{ ημέρες}} \Rightarrow$$

$$\mathbf{N = 0,40 \text{ Ci}}$$

Στην περίπτωση που θέλουμε να εκτιμήσουμε τις εκπομπές άνθρακα, τότε θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας περισσότερες από μία παραμέτρους και συγκεκριμένα τον πληθυσμό, την κατανάλωση ενέργειας ανά άτομο και την ποσότητα άνθρακα που καταναλώνεται για κάθε μονάδα ενέργειας που παράγεται. Άρα οι εκπομπές του C υπολογίζονται με τη βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης:

$$\text{Εκπομπές C} = \text{Πληθυσμός} \times \text{Ενέργεια} / \text{Άτομο} \times \text{Άνθρακας} / \text{Ενέργεια}$$

Δεδομένου ότι καθένας από τους παραπάνω παράγοντες μεταβάλλεται εκθετικά, τότε ισχύει:

$$\begin{aligned} N &= (N_1 e^{K_1 T}) \times (N_2 e^{K_2 T}) \times (N_3 e^{K_3 T}) \Rightarrow \\ N &= (N_1 N_2 N_3) e^{(K_1 + K_2 + K_3) t} \quad (2.7) \end{aligned}$$

Η εξίσωση 2.7 είναι και αυτή της μορφής $N = N_0 e^{Kt}$, όπου $N_0 = N_1 N_2 N_3$ και $K = K_1 + K_2 + K_3$.

Παράδειγμα 2.3

Η απαίτηση σε ενέργεια δίνεται από τον τύπο:

$$\text{Απαίτηση σε Ενέργεια} = \text{Πληθυσμός} \times (\text{ΑΕΠ} / \text{Άτομο}) \times (\text{Ενέργεια} / \text{ΑΕΠ})$$

Το ΑΕΠ στις ΗΠΑ αυξάνεται κατά 2,3% και ο πληθυσμός κατά 0,6%, ενώ η απαιτούμενη ενέργεια ανά δολάριο του ΑΕΠ μειώνεται εκθετικά με τον ίδιο ρυθμό που μειωνόταν και στο χρονικό διάστημα 1978-1995. Αν το 1978 ο λόγος Ενέργειας / ΑΕΠ ήταν 17,38 ΚΒtu/δολάριο και το 1995 13,45 ΚΒtu/δολάριο, ενώ η ενεργειακή απαίτηση των ΗΠΑ το 1995 ήταν $90,6 \times 10^{15}$ Btu, ποια θα είναι η ενεργειακή απαίτηση το 2010;

Λύση:

Για τον υπολογισμό του ρυθμού μείωσης του λόγου Ενέργειας / ΑΕΠ χρησιμοποιούμε την εξίσωση 2.5:

$$\begin{aligned} N &= N_0 e^{-K_1 t} \Rightarrow \\ K_1 &= -\frac{1}{t} \ln \frac{N}{N_0} = -\frac{1}{17} \ln \frac{13,45}{17,38} = -0,015 \end{aligned}$$

Για να υπολογιστεί η απαίτηση σε ενέργεια το 2010 χρησιμοποιούμε την εξίσωση 2.7:

$$\begin{aligned} N &= N_0 e^{(K_1 + K_2 + K_3) t} \Rightarrow \\ \text{Απαίτηση σε Ενέργεια} &= 90,6 \times 10^{15} \text{ Btu/έτος} e^{(0,006 + 0,023 - 0,015) \times 15} \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\text{Απαίτηση σε Ενέργεια} = 112 \times 10^{15} \text{ Btu/έτος}$$

2.3 Χρήση Φυσικών Πόρων

Η διατήρηση της ανθρώπινης ζωής σε μεγάλο βαθμό εξαρτάται από την αφθονία των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των ορυκτών πόρων. Ο χρόνος ύπαρξης των συγκεκριμένων πόρων εξαρτάται από την συνολική τους ποσότητα και το ρυθμό με τον οποίο τους χρησιμοποιούμε. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι για να μοντελοποιηθεί ο ρυθμός χρήσης ενός φυσικού πόρου. Ο πρώτος βασίζεται στην εκθετική αύξηση, ενώ ο δεύτερος σε ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο που έχει προταθεί από τον Hubbert (1969) και παρέχει ένα συμμετρικό κύκλο χρήσης του πόρου.

Όταν ένας ορυκτός πόρος εξάγεται από τη γη, οι γεωλόγοι μιλούν για παραγωγή του φυσικού πόρου. Αν υποθέσουμε ότι ο ρυθμός παραγωγής του φυσικού πόρου αυξάνεται εκθετικά, τότε μπορεί να υπολογιστεί το συνολικό πόσό που παράχθηκε σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Αν το χρονικό διάστημα που μας ενδιαφέρει ξεκινά από $t = 0$, τότε:

$$Q = \int P dt \Rightarrow$$

$$Q = \int P_0 e^{rt} dt \Rightarrow$$

$$Q = \frac{P_0}{r} (e^{rt} - 1) \quad (2.8)$$

Όπου:

Q = η συνολική παραγωγή του πόρου από τη χρονική στιγμή 0 έως την t (τόνοι)

P_0 = ο αρχικός ρυθμός παραγωγής (τόνοι / έτος)

r = ο εκθετικός ρυθμός αύξησης της παραγωγής (έτος⁻¹)

Σε περίπτωση που θέλουμε να υπολογίσουμε πόσος χρόνος θα χρειαστεί για να παραχθεί ένα συγκεκριμένο ποσό του φυσικού πόρου, τότε η 2.8 μετατρέπεται στην 2.9:

$$T = \frac{1}{r} \ln\left(\frac{rQ}{P_0} + 1\right) \quad (2.9)$$

Όπου:

T = ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την παραγωγή ενός ποσού Q (έτη)

Διάκριση θα πρέπει να γίνει μεταξύ *αποθεμάτων* και *πόρων*. Αποθέματα ονομάζουμε τις ποσότητες που μπορούν να ανακτηθούν με την υπάρχουσα τεχνολογία, ενώ πόρους τη συνολική ποσότητα του εκάστοτε υλικού ανεξάρτητα από το αν μπορεί ανακτηθεί με την υπάρχουσα τεχνολογία και τις τρέχουσες οικονομικές συνθήκες.

Παράδειγμα 2.4

Η παγκόσμια παραγωγή άνθρακα το 2002 εκτιμήθηκε σε $5,0 \times 10^9$ τόνους / έτος, ενώ η συνολική ποσότητα του άνθρακα που μπορεί να ανακτηθεί (αποθέματα) υπολογίζεται σε $1,1 \times 10^{12}$ τόνους. Η αύξηση στην παραγωγή άνθρακα υπολογίζεται σε 1,5% ανά έτος. Πόσος χρόνος θα χρειαστεί για να καταναλωθούν όλα τα αποθέματα αν διατηρηθεί ο σημερινός ρυθμός παραγωγής και πόσος χρόνος αν η παραγωγή συνεχίσει να αυξάνεται κατά 1,5%.

Λύση:

Αν η παραγωγή παραμείνει σταθερή στα επίπεδα του 2002 τότε θα απαιτηθούν:

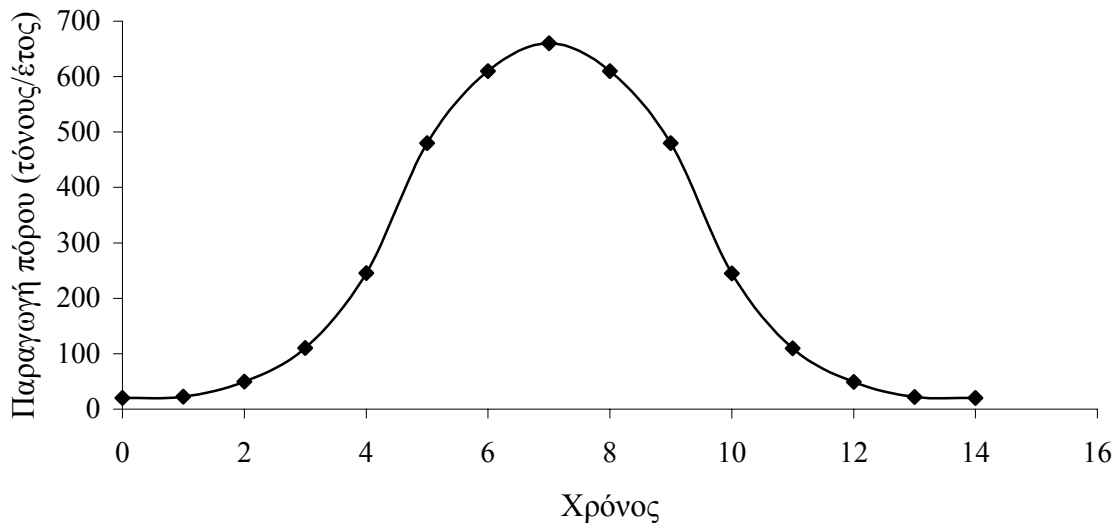
$$1,1 \times 10^{12} \text{ τόνοι} / 5,0 \times 10^9 \text{ τόνοι} / \text{έτος} = \mathbf{220 \text{ χρόνια}}$$

Αν η παραγωγή αυξάνει με ρυθμό 1,5% τότε χρησιμοποιώντας την εξίσωση 2.9:

$$T = \frac{1}{r} \ln\left(\frac{rQ}{P_0} + 1\right) \Rightarrow$$

$$T = 1/0,015 \ln [(0,015 \times 1,1 \times 10^{12} \text{ τόνοι} / 5,0 \times 10^9 \text{ τόνοι}) + 1] = \mathbf{97 \text{ χρόνια}}$$

Η εκθετική αύξηση της χρήσης ενός φυσικού πόρου δεν αποτελεί μία ιδιαίτερα ρεαλιστική προσέγγιση, δεδομένου ότι μοιάζει απίθανο μία μέρα πριν την εξάντληση των αποθεμάτων η βιομηχανία να βρίσκεται σε φάση μέγιστης παραγωγής και στη συνέχεια να τερματίσει τη λειτουργία της. Για το λόγο αυτό προτάθηκε ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο από τον M. K. Humbert (1969). Σύμφωνα με αυτό, η χρήση ενός πόρου αρχικά ακολουθεί εκθετική αύξηση, καθώς ο πόρος είναι άφθονος και σε χαμηλή τιμή. Στη συνέχεια, καθώς τα αποθέματά του πόρου μειώνονται και η τιμή του αυξάνει, οι ρυθμοί χρήσης του μειώνονται και υπερिशύει η χρήση άλλων υποκατάστατων. Συνεπώς, ένα γράφημα κατανάλωσης του πόρου σε συνάρτηση με το χρόνο θα ξεκινά από το μηδέν, θα αυξάνει φθάνοντας στην κορυφή και στη συνέχεια θα μειώνεται μέχρι να φθάσει στο μηδέν. Μία τέτοια καμπύλη ονομάζεται *κανονική* ή καμπύλη του *Gauss* (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2 Κατανάλωση πόρου που ακολουθεί την καμπύλη Gauss.

Ο ρυθμός παραγωγής ενός πόρου υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης 2.10:

$$P = P_m \times e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t-t_m}{\sigma}\right)^2\right]} \quad (2.10)$$

Όπου:

P = ο ρυθμός παραγωγής ενός πόρου (τόνοι / έτος)

P_m = ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής (τόνοι / έτος)

t_m = ο χρόνος κατά τον οποίο ο ρυθμός παραγωγής γίνεται μέγιστος (έτη)

σ = η τυπική απόκλιση (έτη)

Δεδομένου ότι η περιοχή που περικλείεται από την καμπύλη του Σχήματος 2.2 ισούται με τη συνολική παραγωγή του πόρου (Q_m), τότε η περιοχή που καθορίζεται από το χρονικό διάστημα $\pm 1\sigma$ μακριά από τη χρονική στιγμή της μέγιστης παραγωγής (t_m) θα ισούται με το 68,3% της συνολικής παραγωγής του πόρου, ενώ η περιοχή που καθορίζεται από το χρονικό διάστημα $\pm 2\sigma$ μακριά από τη χρονική στιγμή της μέγιστης παραγωγής θα ισούται με το 95% της συνολικής παραγωγής.

Η συνολική παραγόμενη ποσότητα ενός πόρου υπολογίζεται με τη βοήθεια της 2.11:

$$Q_\infty = \int P dt = P_m \times e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t-t_m}{\sigma}\right)^2\right]} dt \Rightarrow$$

$$Q_\infty = \sigma P_m \sqrt{2\pi} \quad (2.11)$$

Αν στην εξίσωση 2.10 θέσουμε $t = 0$ και επιλύσουμε ως προς t_m , τότε με τη βοήθεια της 2.12 υπολογίζουμε το χρόνο που απαιτείται για να έχουμε τη μέγιστη παραγωγή του πόρου.

$$t_m = \sigma \sqrt{2 \ln \frac{P_m}{P_0}} \quad (2.12)$$

Παράδειγμα 2.5

Υποθέστε ότι το συνολικό απόθεμα άνθρακα στις ΗΠΑ είναι 538×10^9 τόνους. Ο ρυθμός παραγωγής άνθρακα το 1995 ήταν $1,0 \times 10^9$ τόνους / έτος. Αν ακολουθείται η καμπύλη Gauss, πόσος χρόνος απαιτείται για να φθάσουμε μέγιστο ρυθμό παραγωγής που θα είναι τετραπλάσιος του ρυθμού παραγωγής του 1995.

Λύση:

Για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης, σ , χρησιμοποιούμε την εξίσωση 2.11:

$$Q_\infty = \sigma P_m \sqrt{2\pi} \Rightarrow$$

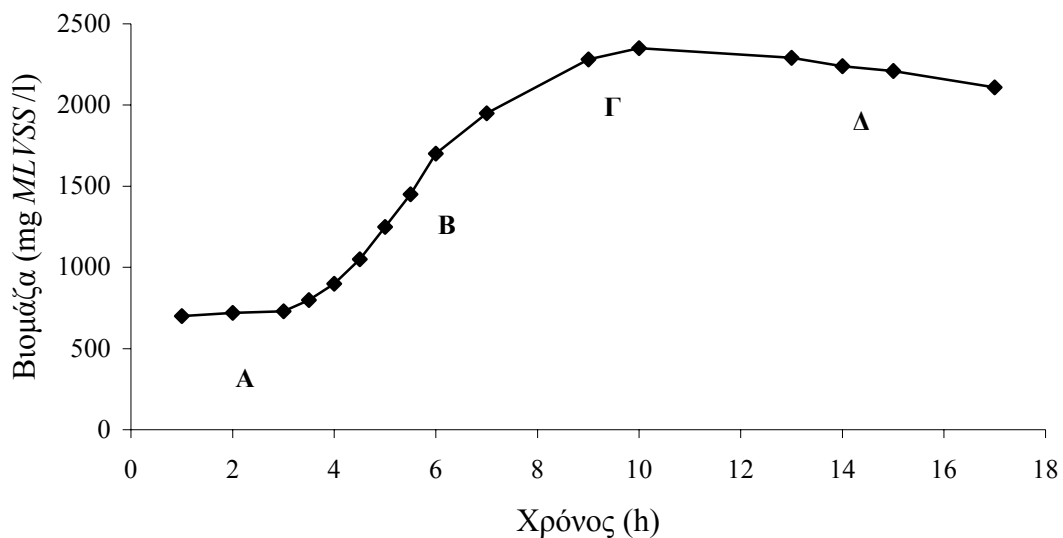
$$\sigma = (538 \times 10^9 \text{ τόνους}) / (4 \times 1,0 \times 10^9 \text{ τόνους/ έτος} \sqrt{2\pi}) = 53,5 \text{ χρόνια}$$

Για να βρούμε το χρόνο που απαιτείται για να φθάσουμε τη μέγιστη παραγωγή χρησιμοποιούμε την εξίσωση 2.12:

$$t_m = \sigma \sqrt{2 \ln \frac{P_m}{P_0}} = 53,5 \sqrt{2 \ln 4} = \mathbf{89 \text{ χρόνια}}$$

2.4 Αύξηση Πληθυσμού

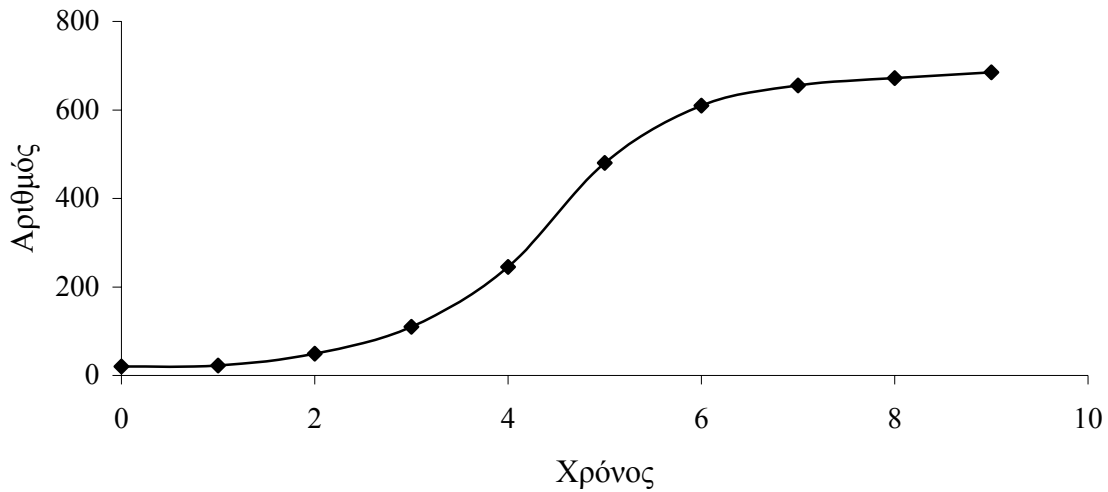
Σε περιπτώσεις αρχικής αφθονίας τροφής (υποστρώματος), η μεταβολή ενός μικροβιακού πληθυσμού σε έναν αντιδραστήρα διακοπτόμενης ροής (batch reactor) ακολουθεί την καμπύλη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Για την περιγραφή της αύξησης των μικροοργανισμών συχνά χρησιμοποιείται η παράμετρος των πτητικά αιωρούμενων στερεών (MLVSS), μπορεί να χρησιμοποιηθούν όμως και άλλες παράμετροι όπως ο αριθμός των βακτηρίων, η ταχύτητα κατανάλωσης οξυγόνου (OUR), η αύξηση του DNA κ.τ.λ.



Σχήμα 2.3 Φάσεις αύξησης μικροοργανισμών σε αντιδραστήρα διακοπτόμενης ροής με αρχική αφθονία υποστρώματος.

Κατά την πρώτη φάση της καμπύλης αύξησης, *φάση εγκλιματισμού* (Α), οι μικροοργανισμοί προσαρμόζονται στο νέο περιβάλλον μέσω τροποποιήσεων του εξωκυτταρικού υλικού ή του κυττάρου και δεν παρατηρείται σημαντική αύξηση του αριθμού τους. Κατά τη *φάση της εκθετικής αύξησης* (Β), υπάρχει αφθονία διαθέσιμου υποστρώματος και ο μόνος περιοριστικός παράγοντας αύξησης των μικροοργανισμών είναι η ικανότητά τους να αναπαράγονται. Κατά τη *φάση στασιμότητας* (Γ), η αύξηση των μικροοργανισμών εμποδίζεται από την έλλειψη θρεπτικών ή τη συσσώρευση τοξικών μεταβολιτών με αποτέλεσμα η κυτταρική αύξηση να εξισώνεται με την κυτταρική φθορά. Κατά τη *φάση της ενδογενούς αναπνοής* (Δ), έχει εξαντληθεί όλο το διαθέσιμο υπόστρωμα και ο ρυθμός κυτταρικής φθοράς είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό αύξησης των μικροοργανισμών, με αποτέλεσμα ο συνολικός αριθμός των μικροοργανισμών να μειώνεται.

Οι μεταβολές ενός πληθυσμού συχνά μοντελοποιούνται μαθηματικά με τη βοήθεια της λογιστικής ή σιγμοειδούς καμπύλης αύξησης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Η λογιστική ή σιγμοειδής καμπύλη αύξησης.

Σε μία τέτοια καμπύλη αρχικά παρατηρείται εκθετική αύξηση του πληθυσμού, ενώ στη συνέχεια -καθώς ο πληθυσμός πλησιάζει τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα του συστήματος- παρατηρούνται μικρότεροι ρυθμοί αύξησης. Η παραπάνω καμπύλη προκύπτει από την παρακάτω διαφορική εξίσωση:

$$\frac{dN}{dt} = rN\left(1 - \frac{N}{K}\right) \quad (2.13)$$

Όπου:

N = ο πληθυσμός

K = η φέρουσα ικανότητα του συστήματος

r = ο εκθετικός ρυθμός αύξησης του πληθυσμού που παρατηρείται όταν ο πληθυσμός είναι σημαντικά χαμηλότερος της φέρουσας ικανότητας του συστήματος

Όταν $N \ll K$ τότε $N/K \ll 1$ και η εξίσωση 2.13 μετατρέπεται σε $dN / dt = r N$ (εκθετική)

Όταν $N=K$ τότε $N/K = 1$ και η εξίσωση 2.13 μετατρέπεται σε $dN / dt = 0$ (καμία αύξηση)

Η λύση της εξίσωσης 2.13 δίνει την εξίσωση 2.14:

$$N = \frac{K}{(1 + e^{-r(t-t^*)})} \quad (2.14)$$

Όπου:

t^* = ο χρόνος κατά τον οποίο ο πληθυσμός ισούται με το μισό της φέρουσας ικανότητας του συστήματος, $N = K/2$.

Για τον υπολογισμό του t^* χρησιμοποιούμε την εξίσωση 2.15:

$$t^* = \frac{1}{r} \ln\left(\frac{K}{N_0} - 1\right) \quad (2.15)$$

Όπου:

N_0 = ο πληθυσμός τη χρονική στιγμή $t = 0$

Αν υποθέσουμε ότι με R_0 συμβολίζεται ο στιγμιαίος ρυθμός αύξησης, τότε τη χρονική στιγμή $t = 0$ όπου η αύξηση είναι εκθετική, ισχύει:

$$\frac{dN}{dt} = R_0 \times N_0 \quad (2.16)$$

Όμως, για τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή σύμφωνα με τη 2.13 ισχύει επίσης ότι:

$$\frac{dN}{dt} = rN_0\left(1 - \frac{N_0}{K}\right) \quad (2.17)$$

Από τις εξισώσεις 2.16 και 2.17 προκύπτει:

$$r = \frac{R_0}{\left(1 - \frac{N_0}{K}\right)} \quad (2.18)$$

Παράδειγμα 2.6

Υποθέστε ότι ο ανθρώπινος πληθυσμός ακολουθεί τη λογιστική καμπύλη αύξησης μέχρι να σταθεροποιηθεί στους 15×10^9 κατοίκους. Το 1995 ο πληθυσμός της γης ήταν $5,7 \times 10^9$ κάτοικοι και ο ρυθμός αύξησής του 1,5%. Πότε ο πληθυσμός της γης θα φθάσει τους $7,5 \times 10^9$ και πότε τους 14×10^9 κατοίκους;

Λύση:

Με τη βοήθεια της 2.18 υπολογίζουμε την τιμή του r :

$$r = \frac{R_0}{\left(1 - \frac{N_0}{K}\right)} \Rightarrow$$

$$r = 0,015 / \{1 - [(5,7 \times 10^9 / 15 \times 10^9)]\} \Rightarrow$$

$$r = 0,024$$

Ο απαιτούμενος χρόνος για να φθάσει ο πληθυσμός της γης τους $7,5 \times 10^9$ κατοίκους, δηλαδή το μισό του μέγιστου πληθυσμού, υπολογίζεται με τη βοήθεια της 2.15:

$$t^* = \frac{1}{r} \ln\left(\frac{K}{N_0} - 1\right) \Rightarrow$$

$$t^* = 1/0,024 \ln [(15 \times 10^9 / 5,7 \times 10^9) - 1] = \mathbf{20 \text{ χρόνια}}$$

Για να υπολογιστεί ο χρόνος που απαιτείται για να αυξηθεί ο πληθυσμός σε 14×10^9 κατοίκους επιλύουμε την 2.14 ως προς t:

$$t = t^* - \frac{1}{r} \ln\left(\frac{K}{N} - 1\right) \Rightarrow$$

$$t = 20 - 1/0,024 \ln [(15 \times 10^9 / 14 \times 10^9) - 1] = \mathbf{130 \text{ χρόνια}}$$

2.5 Δημογραφία

Για να εκτιμηθεί η αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού συχνά απαιτούνται στοιχεία όπως οι ρυθμοί γονιμότητας - θνησιμότητας και η κατανομή των ηλικιών του πληθυσμού. Ο γενικός ρυθμός γεννήσεων (αριθμός ζωντανών νεογνών ανά 1000 κατοίκους σε ένα συγκεκριμένο έτος) αποτελεί την απλούστερη μέτρηση της γονιμότητας. Ο γενικός αριθμός γεννήσεων κυμαίνεται μεταξύ 30-40 γεννήσεις/1000 κατοίκους για τις φτωχότερες χώρες, ενώ είναι σημαντικά χαμηλότερος (10 γεννήσεις/1000 κατοίκους) για τις πιο αναπτυγμένες χώρες. Ο συνολικός ρυθμός γονιμότητας αποτελεί το μέσο αριθμό παιδιών που γεννιούνται ζωντανά από μία γυναίκα. Στις αναπτυγμένες χώρες, ο συγκεκριμένος δείκτης είχε τιμή 1,6 παιδιά/γυναίκα (1995), ενώ στις φτωχότερες χώρες φθάνει και τα 7 παιδιά/γυναίκα. Ο αριθμός των παιδιών που μία γυναίκα θα πρέπει να έχει κατά μέσον όρο για να αντικαταστήσει τον εαυτόν της με μία κόρη της καλείται *γονιμότητα αντικατάστασης*. Στις Η.Π.Α. η γονιμότητα αντικατάστασης έχει τιμή 2,11 παιδιά/γυναίκα. Η συγκεκριμένη τιμή σημαίνει ότι 100 γυναίκες θα γεννήσουν 211 παιδιά κατά μέσο όρο. Στατιστικά, 108 θα είναι τα αγόρια, ενώ 103 τα κορίτσια. Δεδομένου ότι το 3% των γυναικών αναμένεται να πεθάνει πριν να τεκνοποιήσει, θα μείνουν 100 γυναίκες στην επόμενη γενιά.

Ο γενικός αριθμός θανάτων (αριθμός θανάτων/1000 κατοίκους σε ένα συγκεκριμένο έτος) αποτελεί την απλούστερη μέτρηση της θνησιμότητας. Σημαντική είναι επίσης, η μέτρηση

της παιδικής θνησιμότητας (θάνατοι παιδιών ηλικίας μικρότερης του 1 έτους/1000 γεννήσεις ζωντανών παιδιών σε ένα συγκεκριμένο έτος). Στις φτωχότερες χώρες ο συγκεκριμένος δείκτης έχει τιμή 150, ενώ στις πιο ανεπτυγμένες χώρες είναι μικρότερος των 10.

Παράδειγμα 2.6

Το 1995 το 80% του πληθυσμού της γης ($4,5 \times 10^9$ κάτοικοι) ζούσε στις λιγότερο αναπτυγμένες χώρες. Σε αυτές τις χώρες ο γενικός ρυθμός γεννήσεων ήταν 28, ο γενικός ρυθμός θανάτων 9 και η παιδική θνησιμότητα 67. Τι μέρος των συνολικών θανάτων οφείλεται στην παιδική θνησιμότητα; Αν η παιδική θνησιμότητα στις λιγότερο αναπτυγμένες χώρες μειωνόταν σε 10, πόσοι θάνατοι παιδιών θα αποφεύγονταν κάθε έτος;

Λύση:

Εφόσον ο γενικός ρυθμός γεννήσεων ήταν 28, τότε το 1995 γεννήθηκαν:

$$4,5 \times 10^9 \text{ κάτοικοι} \times (28/1000) = 126 \times 10^6 \text{ παιδιά}$$

Εφόσον ο γενικός ρυθμός θανάτων ήταν 9, τότε το 1995 πέθαναν:

$$4,5 \times 10^9 \text{ κάτοικοι} \times (9/1000) = 40,5 \times 10^6 \text{ κάτοικοι}$$

Εφόσον η παιδική θνησιμότητα ήταν 67, τότε το 1995 πέθαναν:

$$126 \times 10^6 \text{ κάτοικοι} \times (67/1000) = 8442 \times 10^3 \text{ παιδιά}$$

Το μέρος των θανάτων που οφειλόταν στην παιδική θνησιμότητα ισούται με:

$$8442 \times 10^3 \text{ παιδιά} / 40,5 \times 10^6 \text{ κάτοικοι} = \mathbf{0,21}$$

Εφόσον η παιδική θνησιμότητα μειωνόταν σε 10, τότε το 1995 θα πέθαιναν:

$$126 \times 10^6 \text{ κάτοικοι} \times (10/1000) = 1260 \times 10^3 \text{ παιδιά}$$

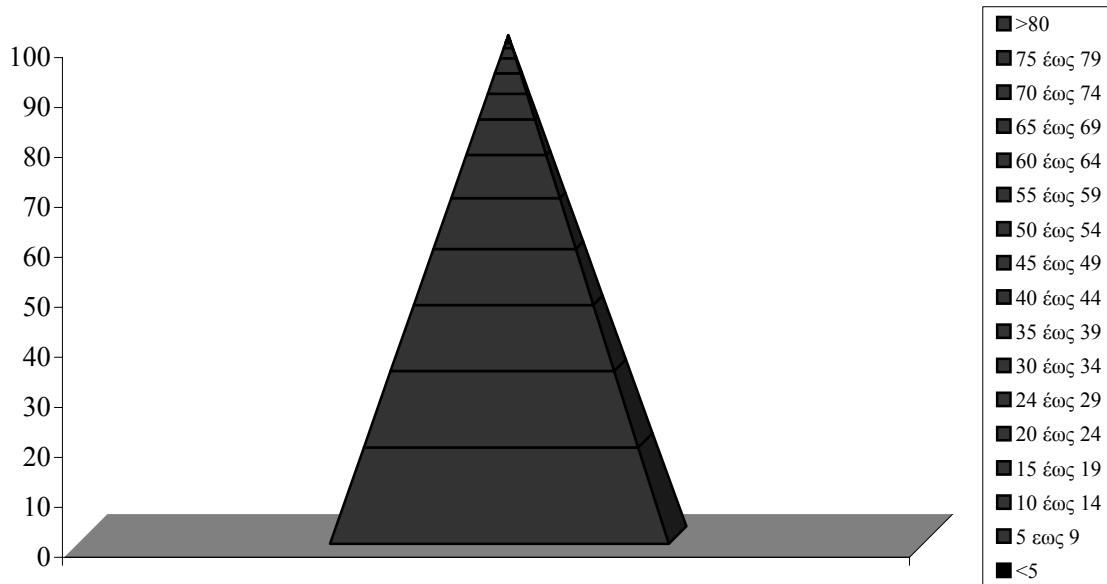
Άρα θα αποφεύγονταν:

$$8442 \times 10^3 \text{ παιδιά} - 1260 \times 10^3 \text{ παιδιά} = \mathbf{7182 \times 10^3 \text{ θάνατοι}}$$

Η διαφορά μεταξύ γενικού αριθμού γεννήσεων, b και γενικού αριθμού θανάτων, d ονομάζεται φυσική αύξηση του πληθυσμού, r . Για το σωστότερο υπολογισμό της φυσικής αύξησης του πληθυσμού, θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μας και τον καθαρό ρυθμό μετακινήσεων, m (παλιννοστήσεις – μεταναστεύσεις). Βάση των παραπάνω, η φυσική αύξηση του πληθυσμού υπολογίζεται από την εξίσωση 2.19:

$$r = b - d \pm m \quad (2.19)$$

Χρήσιμα στοιχεία για τη δυναμική ενός πληθυσμού εξάγονται από τις *πληθυσμιακές πυραμίδες* που αναπαριστούν τον αριθμό των ανθρώπων σε κάθε ηλικιακή κατηγορία. Οι πληθυσμιακές πυραμίδες των αναπτυσσόμενων χωρών έχουν τριγωνικό σχήμα και μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού τους έχει ηλικία μικρότερη των 15 ετών (Σχήμα 2.5). Στις αναπτυγμένες χώρες αντίθετα, η ηλικιακή πυραμίδα έχει κάθετο σχήμα και τα ποσοστά του πληθυσμού που ανήκουν σε μικρές ηλικίες είναι χαμηλά, υποδεικνύοντας πολύ αργούς έως και μηδενικούς ρυθμούς ανάπτυξης.



Σχήμα 2.5 Χαρακτηριστικό παράδειγμα ηλικιακής πυραμίδας σε αναπτυσσόμενη χώρα.

Για την περιγραφή των ηλικιακών πυραμίδων είναι απαραίτητο να καθοριστούν οι εξής όροι. Ως *σταθερός πληθυσμός* θεωρείται ένας πληθυσμός που παρουσιάζει σταθερούς ειδικούς ρυθμούς γεννήσεων και θανάτων για τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα, ώστε τα ποσοστά του πληθυσμού σε κάθε ηλικιακή κατηγορία να μην αλλάζουν. Ένας τέτοιος πληθυσμός είναι πιθανόν να αυξάνει ή να μειώνεται με σταθερό ρυθμό. Όταν ένας πληθυσμός είναι σταθερός, αλλά παράλληλα δεν αλλάζει και σε μέγεθος, τότε λέμε ότι βρίσκεται σε *φάση στασιμότητας*.

Αν η ηλικιακή πυραμίδα ενός πληθυσμού συνδυαστεί με δεδομένα που αφορούν στους ρυθμούς γεννήσεων και θανάτων, τότε είναι δυνατόν να γίνουν προβλέψεις για το μέγεθος και τη σύνθεση του μελλοντικού πληθυσμού. Για να γίνουν οι παραπάνω προβλέψεις αρχικά κατασκευάζονται *πίνακες επιβίωσης*. Η κατασκευή ενός πίνακα επιβίωσης γίνεται με την εφαρμογή πραγματικών ειδικών ρυθμών θανάτων σε έναν υποθετικά σταθερό

πληθυσμό που βρίσκεται σε φάση στασιμότητας και ο οποίος έχει 100.000 γεννήσεις κάθε χρόνο, ενώ οι μετακινήσεις πληθυσμού θεωρούνται μηδενικές (Πίνακας 2.1). Στον παρακάτω πίνακα η πρώτη στήλη παρουσιάζει τις ηλικιακές κατηγορίες, ενώ η δεύτερη τον αριθμό των ανθρώπων που θα είναι ζωντανοί όταν βρίσκονται στη συγκεκριμένη ηλικιακή κατηγορία. Η τρίτη στήλη αποτελεί το λόγο του αριθμού των ανθρώπων που βρίσκονται στην ηλικιακή κατηγορία $x+5$ προς τον αριθμό των ανθρώπων που ανήκουν στην κατηγορία, x .

Πίνακας 2.1 Κατανομή ηλικιών σε έναν πληθυσμό που βρίσκεται σε φάση στασιμότητας και παρουσιάζει 100.000 γεννήσεις ανά έτος.

Ηλικιακή κατηγορία, x	Αριθμός ανθρώπων, L_x	L_{x+5} / L_x
0-4	494.285	0,9979
5-9	493.250	0,9989
10-14	492.699	0,9973
15-19	491.382	0,9951
20-24	488.972	0,9944
25-29	486.219	0,9940
30-34	483.310	0,9927
35-39	479.794	0,9898
40-44	474.877	0,9841
45-49	467.346	0,9745
50-54	455.448	0,9597
55-59	437.078	0,9381
60-64	410.020	0,9082
65-69	372.397	0,8658
70-74	322.425	0,8050
75-79	259.548	0,7163
80-84	185.922	0,9660
>85	179.601	0,0000

Αν με $P_x(0)$ συμβολίσουμε τον αριθμό των ανθρώπων στην κατηγορία x τη χρονική στιγμή $t = 0$ και $P_{x+5}(5)$ τον αριθμό των ανθρώπων στην επόμενη ηλικιακή κατηγορία, 5 χρόνια αργότερα, τότε:

$$P_{x+5}(5) = P_x(0) \frac{L_{x+5}}{L_x} \quad (2.20)$$

Με τη βοήθεια του παραπάνω πίνακα μπορούμε να υπολογίσουμε τον πληθυσμό σε μία συγκεκριμένη ηλικιακή κατηγορία. Για παράδειγμα, αν στις ΗΠΑ το 1985 υπήρχαν 18 εκατομμύρια άνθρωποι ηλικίας 0-4 ετών, τότε θα ισχύει ότι $P_0(1985) = 18,0 \times 10^6$. Το 1990 ο πληθυσμός των ζωντανών ανθρώπων ηλικίας 5-9 θα είναι:

$$P_5(1990) = P_0(1985) (L_5/L_0) \Rightarrow$$

$$P_5(1990) = 18,0 \times 10^6 \times 0,9979 = 17,98 \times 10^6 \text{ άνθρωποι}$$

Χρησιμοποιώντας την ίδια μεθοδολογία για όλες τις ηλικιακές κατηγορίες μπορούμε να προβλέψουμε τον αριθμό των ανθρώπων σε κάθε ηλικιακή κατηγορία για το 1990 (Πίνακας 2.2).

Πίνακας 2.2 Πρόβλεψη για τον πληθυσμό των ΗΠΑ το 1990, βασισμένη στην ηλικιακή πυραμίδα του 1985.

Ηλικιακή κατηγορία, x	L_{x+5} / L_x	$P_x(1985)$ (χιλιάδες)	$P_x(1990)$ (χιλιάδες)
0-4	0,9979	18020	$P_0(1990)$
5-9	0,9989	17000	17982
10-14	0,9973	16068	16981
15-19	0,9951	18245	16025
20-24	0,9944	20491	18156
25-29	0,9940	21896	20376
30-34	0,9927	20178	21765
35-39	0,9898	18756	20031
40-44	0,9841	14362	18564
45-49	0,9745	11912	14134
50-54	0,9597	10748	11609
55-59	0,9381	11132	10314
60-64	0,9082	10948	10443
65-69	0,8658	9420	9943
70-74	0,8050	7616	8156
75-79	0,7163	5410	6131

80-84	0,9660	3312	3875
>85	0,0000	2113	3199
Σύνολο		237627	227684 + P ₀ (1990)

Για να υπολογίσουμε τον αριθμό των παιδιών ηλικίας 0-4 στον Πίνακα 2.2, θα πρέπει να γνωρίζουμε στοιχεία για τον αριθμό των γυναικών σε κάθε ηλικιακή κατηγορία, τον αριθμό των ζωντανών γεννήσεων ανά γυναίκα σε κάθε ηλικιακή κατηγορία και την παιδική θνησιμότητα στα 5 πρώτα χρόνια ζωής των παιδιών. Με απλούστερο τρόπο, ο αριθμός των παιδιών ηλικίας 0-4, θα μπορούσε να υπολογιστεί με τη βοήθεια της εξίσωσης 2.21:

$$P_0(n+5) = b_{15}P_{15}(n) + b_{20}P_{20}(n) + \dots + b_{45}P_{45}(n) \quad (2.21)$$

Όπου:

b_x = ο αριθμός των παιδιών που γεννιούνται ανά κάτοικο στην ηλικιακή κατηγορία x

Η εξίσωση 2.21 έχει γραφτεί υποθέτοντας ότι δεν γεννιούνται παιδιά από γονείς ηλικίας μικρότερης των 15 ετών και μεγαλύτερης των 49. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζεται ο αριθμός των γεννήσεων, όπως υπολογίστηκε με τη βοήθεια της εξίσωσης 2.21.

Πίνακας 2.3 Αριθμός γεννήσεων για τις ΗΠΑ

Ηλικιακή Κατηγορία	P _x (1985) (χιλιάδες)	b _x (γεννήσεις/άτομο σε διάστημα 5 χρόνων)	Γεννήσεις (χιλιάδες σε 5 χρόνια)
15-19	18245	0,146	2664
20-24	20491	0,289	5922
25-29	21896	0,291	6372
30-34	20178	0,190	3834
35-39	18756	0,075	1407
40-45	14362	0,013	187
Σύνολο		1,004	20385

Ασκήσεις

1. Ο πληθυσμός της γης πριν από 10000 χρόνια ήταν 5.000.000 κάτοικοι. Αν το 1850 ο πληθυσμός είχε αυξηθεί σε 1.000.000.000 κατοίκους να υπολογιστεί ο εκθετικός ρυθμός αύξησης που συνέβαλε στη συγκεκριμένη αύξηση του πληθυσμού. Αν ο συγκεκριμένος ρυθμός αύξησης συνέχιζε να υφίσταται να υπολογιστεί ποιος θα ήταν ο πληθυσμός της γης το 2000.
2. Υποθέστε ότι η έκταση της γης που καλλιεργείται εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες.

$$Γη = (Γη/Τροφή) \times (Τροφή/Kcal) \times (Kcal/Άτομο) \times (Πληθυσμός)$$

Αν οι ετήσιοι ρυθμοί αύξησης για καθέναν από τους παραπάνω παράγοντες είναι: α) γη που απαιτείται ανά μονάδα παραγόμενης τροφής (-1%), β) ποσό της τροφής που παράγεται ανά θερμίδα τροφής που καταναλώνεται από τον άνθρωπο (+ 0,5%), γ) κατανάλωση θερμίδων ανά άτομο (+0,1%) και δ) μέγεθος του πληθυσμού (+1,5%). Αν ισχύουν οι παραπάνω ετήσιοι ρυθμοί αύξησης, πόσος χρόνος χρειάζεται για να διπλασιαστεί η έκταση της απαιτούμενης καλλιεργούμενης γης.

3. Υποθέστε ότι η καμπύλη Gauss χρησιμοποιείται για να περιγράψει την παραγωγή χρωμίου. Αν η μέγιστη παραγωγή που μπορεί να επιτευχθεί είναι εξαπλάσια του σημερινού ρυθμού των 2×10^6 τόνων ανά έτος, πόσος χρόνος θα απαιτηθεί για να φθάσουμε τι μέγιστη παραγωγή, εφόσον η συνολική ποσότητα του χρωμίου που μπορεί να εξαχθεί είναι 2×10^9 τόνοι. Πόσος χρόνος απαιτείται για να καταναλωθεί το 80% των συνολικών αποθεμάτων. Θεωρίστε ότι σύμφωνα με την καμπύλη Gauss το 80% της συνολικής παραγωγής του πόρου θα έχει εξορυχτεί σε χρόνο ίσο με $\pm 1,3\sigma$ από τη χρονική στιγμή της μέγιστης παραγωγής (t_m).
4. Το βισμούθιο-210 έχει χρόνο ημίσειας ζωής 4,85 ημέρες. Αν η αρχική του ποσότητα τώρα είναι 10 g, τι ποσότητα θα έχει παραμείνει σε 7 ημέρες;
5. Υποθέστε ότι ο ανθρώπινος πληθυσμός αυξάνεται από $6,3 \times 10^9$ κατοίκους το 2000 σε έναν τελικό πληθυσμό των $14,0 \times 10^9$ κατοίκων ακολουθώντας τη λογιστική καμπύλη. Θεωρώντας ότι ο ρυθμός αύξησης το 2000 ήταν 1,5%, τότε ο πληθυσμός θα φθάσει τα 9×10^9 κατοίκους;
6. Υποθέστε ότι απόβλητα που ρίπτονται σε ένα χείμαρρο αποδομούνται με ρυθμό K ίσο με 0,2 / ημέρα. Ποιος θα είναι ο χρόνος ημίσειας ζωής των αποβλήτων; Τι μέρος των αποβλήτων θα παραμένει στο ποτάμι μετά από 5 ημέρες;

3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

3.1 Υδρολογικός Κύκλος

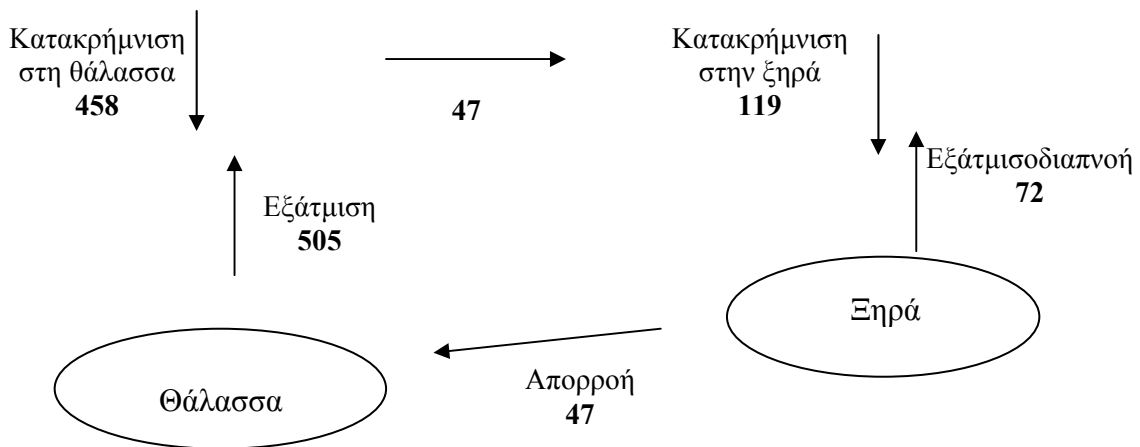
Το μεγαλύτερο τμήμα του νερού του πλανήτη μας ($\approx 96,5\%$) βρίσκεται στους ωκεανούς, ενώ στις λίμνες και τα ποτάμια που αποτελούν τις κύριες πηγές νερού για ανθρώπινη χρήση συσσωρεύεται μόλις το $0,0072\%$ των παγκοσμίων αποθεμάτων νερού (Πίνακας 3.1). Η υψηλή συγκέντρωση αλάτων στο θαλασσίνο νερό καθιστά ουσιαστικά αδύνατη τη χρήση του στις περισσότερες αστικές, αγροτικές και βιομηχανικές δραστηριότητες. Ενώ οι τεχνολογίες αφαλάτωσης είναι διαθέσιμες, το υψηλό κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος τέτοιων μονάδων καθιστά απαγορευτική την χρήση τους σε μεγάλη κλίμακα.

Πίνακας 3.1 Αποθέματα νερού στη γη (Shiklomanov, 1993).

Θέση	Ποσότητα (10^6 Km^3)	Ποσοστό επί των Παγκόσμιων Αποθεμάτων Νερού (%)
Ωκεανοί	1338,0	96,5
Πάγοι	24,1	1,74
Υπόγεια νερά	23,4	1,7
Μόνιμα παγωμένο έδαφος	0,30	0,022
Λίμνες γλυκού νερού	0,091	0,007
Λίμνες αλμυρού νερού	0,085	0,006
Έλη	0,011	0,008
Ατμόσφαιρα	0,013	0,001
Ποτάμια-Χείμαρροι	0,002	0,0002
Ζώντες οργανισμοί	0,001	0,0001

Ευτυχώς για τον πλανήτη μας, η διεργασία της αφαλάτωσης πραγματοποιείται σε παγκόσμια κλίμακα από τον ήλιο, που προσφέρει την απαραίτητη ενέργεια για την εξάτμιση του νερού. Συγκεκριμένα, περίπου το μισό της ηλιακής ενέργειας που απορροφάται στην επιφάνεια της γης συμβάλλει στην απομάκρυνση του νερού από τις υγρές επιφάνειες μέσω του μηχανισμού της εξάτμισης και από τα φύλλα των φυτών μέσω του μηχανισμού της διαπνοής. Ως αποτέλεσμα, οι δύο παραπάνω μηχανισμοί (εξατμισοδιαπνοή) απομακρύνουν ετησίως ποσότητα νερού που είναι ίση με αυτή που περιέχεται σε μία επιφάνεια πάχους 1 m γύρω από τον πλανήτη. Οι σχηματιζόμενοι

υδρατμοί μεταφέρονται από μετακινούμενες αέριες μάζες και τελικώς συμπυκνώνονται και επιστρέφουν στη γη μέσω του μηχανισμού της *κατακρήμισης*. Πάνω από τους ωκεανούς, η εξάτμιση είναι μεγαλύτερη της κατακρήμισης, ενώ πάνω από τη χέρσο η κατακρήμιση υπερέρχει της εξατμισοδιαπνοής. Η διαφορά μεταξύ κατακρήμισης και εξατμισοδιαπνοής στη χέρσο είναι το νερό που επιστρέφει στους ωκεανούς μέσω της επιφανειακής και της υπόγειας *απορροής* (Σχήμα 3.1). Ως *επιφανειακή απορροή* ορίζεται το μέρος του νερού που μεταφέρεται επιφανειακά μέσω χειμάρρων και ποταμών στη θάλασσα, ενώ ως *υπόγεια απορροή* το μέρος του νερού που διεισδύει στο έδαφος και υπόγεια μετακινείται αργά προς τη θάλασσα.



Σχήμα 3.1 Υδρολογικός κύκλος (οι ποσότητες του νερού σε $10^3 \text{ Km}^3/\text{έτος}$, Shiklomanov, 1993).

Η παραπάνω αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου αποτελεί μία απλουστευμένη εκδοχή που δεν λαμβάνει υπόψη της φαινόμενα όπως τη πιθανή δέσμευση μέρους των κατακρημισμάτων στους πάγους για εκατοντάδες χρόνια, την άνοδο νερού από τον υπόγειο υδροφόρο σε επιφανειακούς αποδέκτες κ.λ.π.

Βάση των παραπάνω, η απλούστερη ισότητα που περιγράφει τον κύκλο του νερού στη ξηρά είναι η εξής:

$$P = R + E \quad (3.1)$$

Όπου:

P = κατακρήμιση, mm/έτος

E = εξατμισοδιαπνοή, mm/έτος

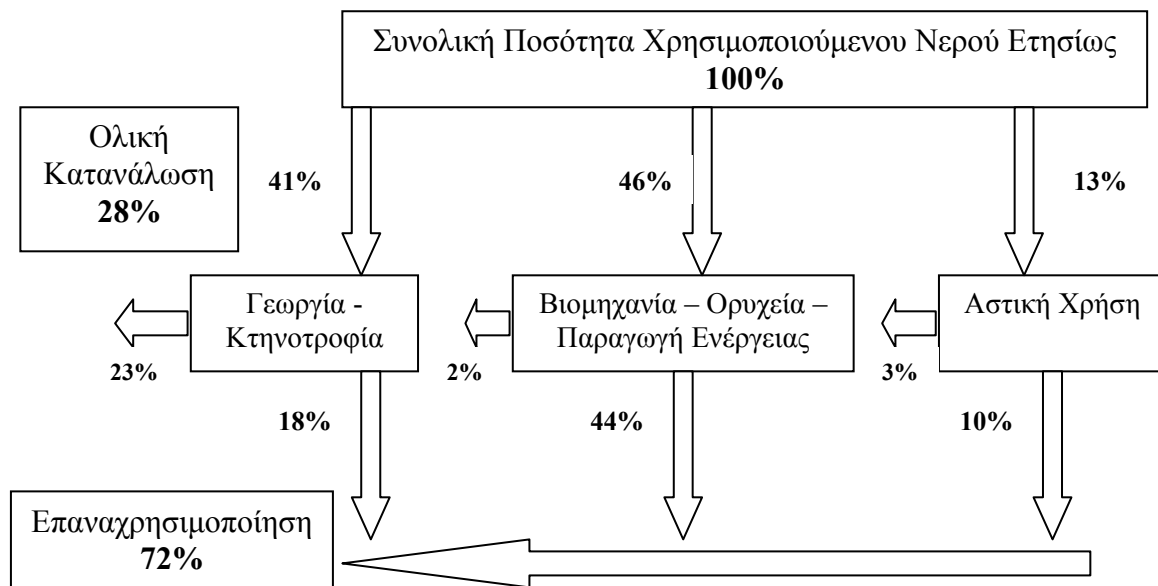
R = επιφανειακή απορροή, mm/έτος

Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται ότι -σε παγκόσμια κλίμακα- η ποσότητα του νερού που υπολογίζεται ως απορροή (επιφανειακή και υπόγεια) ανέρχεται σε $47.000 \text{ Km}^3/\text{έτος}$. Η

συγκεκριμένη ποσότητα νερού είναι ανανεώσιμη και μπορεί να χρησιμοποιείται κάθε χρόνο χωρίς κίνδυνο να παρουσιαστούν φαινόμενα εξάντλησης των διαθέσιμων ποσοτήτων νερού του πλανήτη μας. Δεδομένου ότι ο σημερινός πληθυσμός της Γης ξεπερνά τους 6.300.000.000 κατοίκους (Ο.Η.Ε., 2002), μπορεί να υπολογιστεί ότι σε κάθε κάτοικο αντιστοιχούν περίπου 20.400 λίτρα νερού ανά ημέρα. Παρά την υπολογιζόμενη μεγάλη διαθέσιμη ποσότητα νερού ανά κάτοικο, είναι γνωστό ότι σε διάφορες περιοχές του πλανήτη μας συναντώνται σημαντικά προβλήματα ανεπάρκειας νερού που οφείλονται σε ποικίλους παράγοντες. Τέτοιοι είναι η ανομοιόμορφη χωρική και χρονική κατανομή των κατακρημνίσεων και η μεγάλη κατανάλωση νερού για αγροτικές και βιομηχανικές δραστηριότητες, που σε πολλές περιπτώσεις έχει ως συνέπεια την υποβάθμιση της ποιότητάς του, καθιστώντας το ακατάλληλο για χρήση.

Αναλυτικότερα, η γεωγραφική κατανομή του νερού δεν σχετίζεται με την πληθυσμιακή κατανομή στον πλανήτη. Για παράδειγμα στην Ασία με πληθυσμό που προσεγγίζει το 60% του παγκόσμιου πληθυσμού, καταγράφεται το 36% της ετήσιας απορροής, ενώ στη Νότια Αμερική με πληθυσμό ίσο με το 5% του παγκόσμιου πληθυσμού, καταγράφεται το 25% της ετήσιας απορροής. Η απαίτηση για νερό συχνά δημιουργεί προβλήματα μεταξύ γειτονικών χωρών που μοιράζονται κοινές πηγές νερού. Για παράδειγμα, η Αίγυπτος καλύπτει το 97% των αναγκών της από το Νείλο που πηγάζει στη γειτονική Αιθιοπία. Η Τουρκία, η Συρία και το Ιράκ μοιράζονται τον Ευφράτη, το Μπαγκλαντές καλύπτει το 42% των αναγκών του σε νερό από το Γάγγη που πηγάζει στην Ινδία, το Ισραήλ και η Ιορδανία μοιράζονται τον ποταμό Ιορδάνη.

Επίσης, όταν αναφερόμαστε στην ποσότητα του νερού που καταναλώνεται, ιδιαίτερη σημασία θα πρέπει να δίνεται στον τρόπο χρήσης του νερού και στη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησής του μετά την εν λόγω χρήση. Το καταναλισκόμενο νερό χρησιμοποιείται σε αγροτικές, βιομηχανικές και αστικές δραστηριότητες. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζονται στοιχεία για την ποσοστιαία χρήση του νερού σε διάφορες δραστηριότητες στις Η.Π.Α. και για το μέρος του νερού που είναι διαθέσιμο για επαναχρησιμοποίηση. Η χρήση του νερού για αγροτικούς σκοπούς έχει ως αποτέλεσμα -εξαιτίας της μεγάλης εξάτμισης και κατείδυσης του προς τον υδροφόρο- ένα ποσοστό του νερού μικρότερο του 50% ($\approx 44\%$) να είναι διαθέσιμο για κάποια άλλη χρήση στη συνέχεια. Σε αντιδιαστολή, μεγάλο μέρος του νερού που διατίθεται σε βιομηχανικές και αστικές δραστηριότητες μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί, εφόσον υποστεί κάποια επεξεργασία.

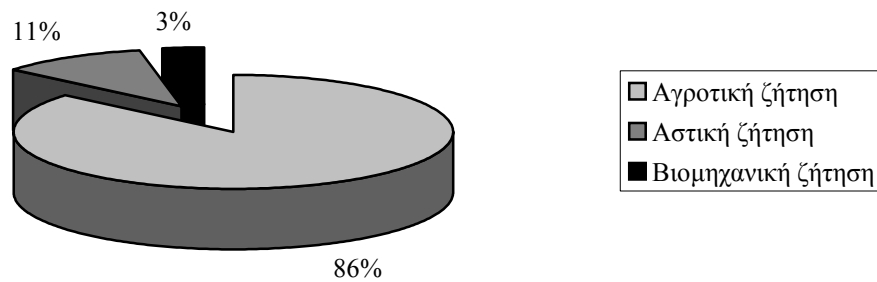


Σχήμα 3.2 Κατανομή νερού σε διάφορες δραστηριότητες στις Η.Π.Α. κατά το 1990 (Gleick, 1993).

Σε ορισμένες περιπτώσεις επίσης, όπως κατά τη χρήση του νερού ως ψυκτικού μέσου σε μονάδες παραγωγής ενέργειας, δίνεται η δυνατότητα επιστροφής σχεδόν του συνόλου του νερού στον αποδέκτη ($\approx 97\%$, σε λίγο υψηλότερη θερμοκρασία) και η επαναχρησιμοποίησή του χωρίς επεξεργασία στη συνέχεια. Η καταναλισκόμενη ποσότητα νερού σε αστικές δραστηριότητες στις Η.Π.Α. υπολογίζεται σε 400 λίτρα ανά άτομο και ημέρα. Η συγκεκριμένη ποσότητα διαφοροποιείται ανάλογα με το βιοτικό επίπεδο των κατοίκων και για τις μεσογειακές χώρες υπολογίζεται μεταξύ 200-300 λίτρων ανά άτομο και ημέρα.

Η κατανομή της ζήτησης του νερού στις επιμέρους δραστηριότητες διαφοροποιείται σημαντικά από χώρα σε χώρα. Στο Σχήμα 3.2 παρατηρείται ότι στις Η.Π.Α. παρόμοιες ποσότητες νερού καταναλώνονται σε αγροτικές και βιομηχανικές δραστηριότητες (41% και 46%, αντίστοιχα). Στην Ελλάδα αντίθετα, το μεγαλύτερο μέρος του νερού ($\approx 86\%$) διατίθεται για αγροτική χρήση, ενώ σε αστικές δραστηριότητες καταναλώνεται ποσοστό ίσο με το 11% της συνολικά καταναλισκόμενης ποσότητας νερού (Σχήμα 3.3). Σημαντική είναι η διαφοροποίηση στην ποσότητα του νερού που χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές δραστηριότητες και το οποίο δεν ξεπερνά το 3%. Όπως είναι αναμενόμενο, το μεγαλύτερο μέρος του νερού που χρησιμοποιείται σε αστικές δραστηριότητες καταναλώνεται στο νομό Αττικής (37,1%) και στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας (10,5%), ενώ η ζήτηση

νερού για αγροτική χρήση επικεντρώνεται στην περιφέρεια Θεσσαλίας (25,1%) και στις περιφέρειες Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (12,5%) και Κεντρικής Μακεδονίας (10,5%).



Σχήμα 3.3 Συνολική κατανομή της ζήτησης νερού στην Ελλάδα κατά το 2002 (Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας, 2003)

Στον Πίνακα 3.2 γίνεται εκτίμηση των ποσοτήτων νερού που καταναλώνονται σε διάφορες καθημερινές δραστηριότητες και συγκρίνονται με τις ποσότητες νερού που απαιτούνται για την παραγωγή ορισμένων αγροτικών και βιομηχανικών προϊόντων.

Πίνακας 3.2 Απαίτηση νερού σε διάφορες δραστηριότητες (Masters, 1996; Kiely, 1996).

Αστική Δραστηριότητα	Κατανάλωση Νερού (λίτρα)
Τουαλέτα	6-15
Πλυντήριο Πιάτων	40-120
Πλύσιμο Πιάτων με το Χέρι	20-40
Μπάνιο	100-150
Πλύσιμο Ρούχων	75-100
Μαγείρεμα	30
Πλύσιμο Αυτοκινήτου	60-400
Αγροτική Δραστηριότητα	
1 αυγό	150
Ρύζι (1 Kg)	2120
Μαλλί (1 Kg)	7730
Βιομηχανική Δραστηριότητα	
Ατσάλι (1 Kg)	250
Εφημερίδα	500-1000

3.2 Απαιτούμενη Ποιότητα Νερού

Το νερό που χρησιμοποιείται στις διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες προέρχεται από τα ποτάμια, τις λίμνες - ταμιευτήρες νερού και από τους υπόγειους υδροφορείς. Η επιλογή της πηγής επηρεάζεται από μία σειρά παραγόντων όπως την εγγύτητά της στον καταναλωτή, την επάρκειά της και την ποιότητα του παρεχόμενου νερού. Στη συνέχεια θα δοθούν στοιχεία για τις κατηγορίες ρύπων που ανιχνεύονται στο νερό, για την ρύπανση ποταμών και λιμνών από τη διάθεση αποβλήτων και για το νομοθετικό πλαίσιο που διέπει τις επιφανειακές και υπόγειες πηγές νερού.

3.2.1 Κατηγορίες Ρύπων

3.2.1.1 Παθογόνοι Μικροοργανισμοί

Η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών οφείλεται στις ανθρώπινες και ζωικές εκκρίσεις. Παραδείγματα παθογόνων μικροοργανισμών που συνδέονται με το νερό αποτελούν τα *βακτήρια* που θεωρούνται υπεύθυνα για τη χολέρα, τη βακτηριακή δυσεντερία και τον τυφοειδή πυρετό (Πίνακας 3.3), οι *ιοί* που θεωρούνται υπεύθυνοι για την ηπατίτιδα και την πολυμυελίτιδα, τα *πρωτόζωα* που προκαλούν αμοιβική δυσεντερία, γιάρδαση και κρυπτοσποριδίωση. Επιδημίες μολυσματικών ασθενειών εμφανίζονται περιοδικά σε περιοχές όπου η υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα και το κακό αποχετευτικό δίκτυο επιτρέπουν τη γρήγορη μεταφορά των μικροβίων. Η αυξημένη κίνηση των ανθρώπων σήμερα έχει ως αποτέλεσμα τοπικές επιδημίες να εξαπλώνονται ταχύτατα παγκοσμίως.

Πίνακας 3.3 Παθογόνα βακτήρια που σχετίζονται με το νερό (Kiely, 1996)

Γένος	Είδος	Ξενιστής	Νόσος	Οδός Μεταφοράς
<i>Salmonella</i>	<i>S. typhi</i>	Ανθρώπινο και	Τυφοειδής	Νερό και τροφές
	<i>S. enteritidis</i>	ζωικό εντερικό	πυρετός	παρασκευασμένες
	<i>S. typhimurium</i>	σύστημα, Μολυσμένο νερό, τροφή		με μολυσμένο νερό
<i>Shigella</i>	<i>S. sonnei</i>	Άνθρωπος	Συγκέλλωση	Όπως παραπάνω
	<i>S. flexneri</i>			και ανθρώπινη

	<i>S. dysentericae</i>			επαφή
<i>Vibrio</i>	<i>V. cholera</i>	Άνθρωπος	Χολέρα	Μολυσμένο νερό, ανθρώπινη επαφή
<i>Leptospira</i>	<i>L. pomona</i> <i>L. australis</i>	Άνθρωπος	Λεπτοσπίρωση	Μολυσμένο νερό, μεταφορά στο αίμα από ζώα
<i>E. coli</i>	Διάφορα	Θερμόαιμα ζώα	Μολύνσεις ουροποιητικού	Μολυσμένο νερό και τροφές

Το ακατέργαστο νερό δεν αναλύεται τακτικά για την παρουσία βακτηρίων και ιών εξαιτίας του υψηλού κόστους και της μεγάλης ποικιλότητας των συγκεκριμένων μικροοργανισμών. Αντί αυτού, η συνήθης αναλυτική διαδικασία χρησιμοποιεί μικροοργανισμούς δείκτες που πιστοποιούν την παρουσία των παθογόνων μικροοργανισμών. Χαρακτηριστικό είδος βακτηρίου που αποτελεί μικροοργανισμό δείκτη αποτελεί το *Escherichia coli*.

3.2.1.2 Οργανικές Ενώσεις

Σε περιπτώσεις που εύκολα βιοδιασπάσιμες οργανικές ενώσεις απελευθερώνονται σε ένα υδάτινο σώμα, οι μικροοργανισμοί που τρέφονται με αυτές τις ουσίες, τις διασπούν σε απλούστερες οργανικές και ανόργανες ενώσεις. Όταν η αποδόμηση γίνεται υπό αερόβιες συνθήκες παράγονται προϊόντα όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), θειικά (SO₄), ορθοφωσφορικά (PO₄) και νιτρικά (NO₃) σύμφωνα με την αντίδραση:



Το ποσό του οξυγόνου που απαιτείται από τους μικροοργανισμούς για την αερόβια οξείδωση των οργανικών ενώσεων καλείται *βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD)* και εκφράζεται συνήθως ως mg O₂ που απαιτούνται ανά λίτρο αποβλήτων (mg/l). Η μέτρηση του BOD αποτελεί τη σημαντικότερη παράμετρο που χαρακτηρίζει την ένταση της οργανικής ρύπανσης. Συχνά χρησιμοποιείται και η παράμετρος του *χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD)* που αναφέρεται στο ποσό του οξυγόνου που απαιτείται για τη χημική οξείδωση των οργανικών ενώσεων. Ο προσδιορισμός του COD πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός ισχυρά οξειδωτικού χημικού παράγοντα (π.χ. K₂Cr₂O₇) που χρησιμοποιείται για την οξείδωση των οργανικών ενώσεων. Η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί πολύ λιγότερο χρόνο πραγματοποίησης από την αντίστοιχη του BOD, αλλά παρουσιάζει το μειονέκτημα

ότι συνυπολογίζει τόσο το οξυγόνο που απαιτείται για την χημική οξείδωση των βιοδιασπάσιμων οργανικών ενώσεων, όσο και αυτό που απαιτείται για τη χημική οξείδωση του αδρανούς οργανικού υλικού (οργανικές ενώσεις όπως κυταρίνες, φαινόλες βιοδιασπώνται σε μικρό βαθμό). Ως αποτέλεσμα στις περισσότερες των περιπτώσεων η τιμή του COD είναι σημαντικά υψηλότερη της αντίστοιχης του BOD. Μερικές φορές επίσης, χρησιμοποιείται και η παράμετρος του *θεωρητικά απαιτούμενου οξυγόνου (ThOD)*, που εκφράζει το ποσό του οξυγόνου που απαιτείται για να οξειδωθεί πλήρως μία οργανική ένωση όπως υπολογίζεται από τη στοιχειομετρική αντίδραση.

Προσδιορισμός BOD₅

Κατά τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του οργανικού φορτίου για πρακτικούς λόγους έχει επικρατήσει ο προσδιορισμός του BOD₅, που αποτελεί την ολική ποσότητα οξυγόνου που καταναλώνεται από τους μικροοργανισμούς κατά τις πρώτες πέντε (5) ημέρες της βιοαποδόμησης. Στην απλούστερη μορφή του ένα τεστ BOD₅ πραγματοποιείται με την εφαρμογή δείγματος αποβλήτων σε πωματισμένη σκουρόχρωμη φιάλη και μέτρηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στο δείγμα κατά την αρχή (t=0) και το τέλος του πειράματος (t=5 days).

$$\text{BOD}_5 = \text{DO}_{(t=0)} - \text{DO}_{(t=5)} \quad (3.2)$$

Όπου:

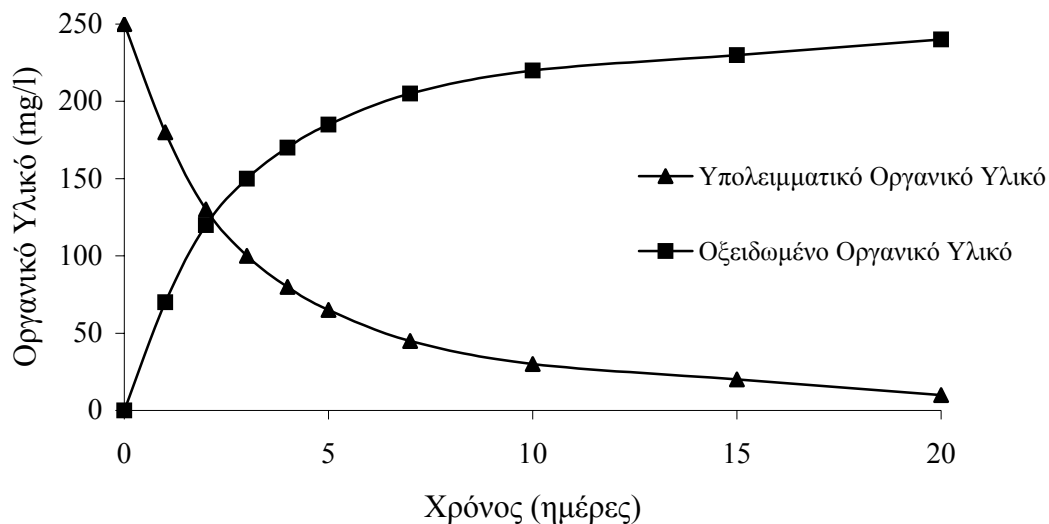
$\text{DO}_{(t=0)}$ = η αρχική συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (DO) στο δείγμα των αποβλήτων (mg/l)

$\text{DO}_{(t=5)}$ = η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου (DO) στο δείγμα των αποβλήτων 5 μέρες μετά την έναρξη του πειράματος, mg/l

Η επιλογή σκουρόχρωμης φιάλης γίνεται για να μην ευνοείται η φωτοσύνθεση και κατά συνέπεια η παραγωγή O₂ από φωτοσυνθετικούς μικροοργανισμούς μέσα στη φιάλη, ενώ ο πωματισμός της φιάλης γίνεται για να μην αναπληρώνεται το O₂ που έχει καταναλωθεί κατά τη βιοαποδόμηση. Η όλη διαδικασία πραγματοποιείται στη θερμοκρασία των 20 °C. Καθώς η απαίτηση σε οξυγόνο σε ένα ρυπασμένο δείγμα μπορεί να είναι της τάξης των μερικών εκατοντάδων mg/l, ενώ η συγκέντρωση κορεσμού του οξυγόνου στους 20 °C μόνο 9.1 mg/l, συχνά είναι απαραίτητη η αρχική αραίωση του δείγματος, ώστε να διατηρηθεί η τελική συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου σε επίπεδα υψηλότερα του μηδενός. Αν κατά τη διάρκεια των πέντε ημερών, η τιμή του DO πέσει στο μηδέν, το τεστ είναι άκυρο

καθώς θα μπορούσε να απομακρυνθεί μεγαλύτερη ποσότητα οξυγόνου από αυτή που είναι διαθέσιμη. Για να θεωρηθεί ακριβές το τεστ θα πρέπει να παρατηρηθεί μία πτώση τουλάχιστον 2 mg/l στο DO κατά τη διάρκεια των 5 ημερών, ενώ η τελική συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου δεν θα πρέπει να είναι χαμηλότερη των 2 mg/l.

Θεωρώντας ότι σε φιάλη BOD περιέχονται βιοδιασπάσιμα οργανικά απόβλητα. Καθώς τα βακτήρια οξειδώνουν τα απόβλητα, το ποσό του οργανικού υλικού που παραμένει στη φιάλη μειώνεται με το χρόνο. Παράλληλα το ποσό του οργανικού υλικού που οξειδώνεται αυξάνεται με το χρόνο (Σχήμα 3.4). Παρόμοια περιγραφή μπορεί να γίνει και για την απαίτηση σε οξυγόνο. Συγκεκριμένα, η υπολειμματική απαίτηση σε οξυγόνο μειώνεται με το χρόνο, ενώ το ποσό του οξυγόνου που έχει χρησιμοποιηθεί αυξάνεται συνεχώς μέχρι να ικανοποιηθεί πλήρως η απαίτηση σε οξυγόνο.



Σχήμα 3.4 Μεταβολή συγκέντρωσης οργανικού υλικού σε φιάλη BOD₅.

Θεωρούμε ότι ο ρυθμός αποδόμησης του οργανικού υλικού είναι ανάλογος με το ποσό του υπολειμματικού οργανικού υλικού που παραμένει στη φιάλη. Αν παραστήσουμε με L_t την υπολειμματική απαίτηση σε οξυγόνο μετά από χρόνο t , τότε θεωρώντας κινητική Α τάξης προκύπτει ότι:

$$\frac{dL_t}{dt} = -kL_t \quad (3.3)$$

$$L_t = L_0 e^{-kt} \quad (3.4)$$

Όπου:

k = η σταθερά αντίδρασης BOD, υποδεικνύει την ταχύτητα βιοαποδόμησης των αποβλήτων (t^{-1})

L_0 = η ολική απαίτηση ανθρακογενούς οξυγόνου ή το ολικό ποσό οξυγόνου που απαιτείται από τους μικροοργανισμούς για την πλήρη οξείδωση του ανθρακογενούς κλάσματος των λυμάτων (mg/l)

L_t = η απαίτηση σε οξυγόνο για την οξείδωση του ανθρακογενούς οργανικού υλικού που παραμένει στη φιάλη μετά από χρόνο t (mg/l)

Δεδομένου ότι η ολική απαίτηση σε οξυγόνο (L_0) ισούται με το άθροισμα του ποσού του οξυγόνου που έχει καταναλωθεί από τους μικροοργανισμούς κατά τις πρώτες t ημέρες του πειράματος (BOD_t) και του ποσού του οξυγόνου που πρόκειται να καταναλωθεί μετά από το χρόνο t (L_t), τότε ισχύει ότι:

$$L_0 = BOD_t + L_t \quad (3.5)$$

Από τις (3.4) και (3.5) προκύπτει ότι:

$$BOD_t = L_0 (1 - e^{-kt}) \quad (3.6)$$

Παράδειγμα 3.1

Αστικά απόβλητα όγκου 5 ml προστίθενται σε φιάλη BOD και ο υπόλοιπος όγκος της συμπληρώνεται με νερό (τελικός όγκος φιάλης 300 ml). Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στη φιάλη κατά την 1^η ημέρα του τεστ ήταν 8,5 mg/l, ενώ την 5^η ημέρα είχε μειωθεί σε 2,5 mg/l. Να προσδιοριστεί η συγκέντρωση του BOD₅ στα απόβλητα. Αν η σταθερά ταχύτητας αντίδρασης k ισούται με 0,22 d⁻¹. Να υπολογιστεί η τιμή του ολικού ανθρακογενούς BOD, L_0 και να υπολογιστεί η υπολειμματική απαίτηση σε οξυγόνο, L_t μετά από τις 5 ημέρες.

Λύση:

A) Η συγκέντρωση του BOD₅ στη φιάλη (στο μίγμα αποβλήτων και νερού) υπολογίζεται με την βοήθεια της εξίσωσης (3.2):

$$BOD_5 = DO_{(t=0)} - DO_{(t=5)} = 8,5 - 2,5 = 6,0 \text{ mg/l}$$

Δεδομένου ότι τα απόβλητα είχαν αραιωθεί κατά την πραγματοποίηση του τεστ, ο υπολογισμός της συγκέντρωσης του BOD₅ στα απόβλητα γίνεται με τη βοήθεια του νόμου της αραιώσης:

$$C_1 V_1 = C_2 V_2 \Rightarrow C_1 \times 5 \text{ ml} = 6,0 \text{ mg/l} \times 300 \text{ ml} \Rightarrow C_1 = 360 \text{ mg/l}$$

Όπου στην προκειμένη περίπτωση:

C_1 = η συγκέντρωση BOD₅ στα απόβλητα (mg/l)

C_2 = η συγκέντρωση BOD₅ στη φιάλη (mg/l)

V_1 = ο όγκος των αποβλήτων που προστέθηκαν στη φιάλη (ml)

V_2 = ο τελικός όγκος του μίγματος νερού και αποβλήτων στη φιάλη (ml)

Β) Η ολική ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για την αποδόμηση του ανθρακογενούς κλάσματος των αποβλήτων υπολογίζεται επιλύοντας την εξίσωση (3.6) ως προς L_0 :

$$L_0 = \text{BOD}_5 / (1 - e^{-kt}) = 360 / (1 - e^{-0,22 \times 5}) = >$$

$$L_0 = \mathbf{545 \text{ mg/l}}$$

Γ) Πέντε ημέρες μετά την έναρξη του τεστ, τα 360 mg/l από τα 545 mg/l θα έχουν χρησιμοποιηθεί. Ως αποτέλεσμα η υπολειμματική απαίτηση σε οξυγόνο θα είναι σύμφωνα με την εξίσωση (3.5):

$$L_t = L_0 - \text{BOD}_5 = 545 - 360 \text{ mg/l} =>$$

$$L_t = \mathbf{185 \text{ mg/l}}$$

3.2.1.3 Θρεπτικά

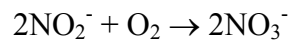
Ως θρεπτικά ορίζονται οι ενώσεις που έχουν ως βάση στοιχεία όπως το άζωτο, τον φώσφορο, το ασβέστιο, το νάτριο, το μαγνήσιο και το θείο και τα οποία είναι βασικά για την ανάπτυξη των ζωντανών οργανισμών. Οι συγκεκριμένες ενώσεις θεωρούνται ρυπαντές σε περιπτώσεις που οι συγκεντρώσεις τους είναι τέτοιες που ευνοούν την υπερανάπτυξη των υδρόβιων φυτών και κυρίως των αλγών. Κατά την αποσύνθεση των αλγών καταναλώνονται μεγάλες ποσότητες οξυγόνου, με συνέπεια τη σταδιακή μείωση των επιπέδων του οξυγόνου στο νερό, καθιστώντας το ανεπαρκές για τη διατήρηση των υπολοίπων μορφών ζωής (ευτροφισμός). Η αυξημένη συγκέντρωση αλγών και αποσυντιθέμενου οργανικού υλικού συντελεί στο χρωματισμό των νερών και στη δημιουργία οσμών και γεύσεων καθιστώντας το ακατάλληλο για αστική χρήση.

Μεγαλύτερο ενδιαφέρον από τα παραπάνω στοιχεία παρουσιάζουν το άζωτο και ο φώσφορος. Οι κυριότερες ανθρωπογενείς πηγές αζώτου και φωσφόρου στα νερά είναι τα αστικά λύματα, οι ζωοτροφές και τα χημικά λιπάσματα. Η οξείδωση των ενώσεων του αζώτου συμβάλλει στην αύξηση της απαιτούμενης ποσότητας οξυγόνου. Συγκεκριμένα, οι οργανικές μορφές του αζώτου μετατρέπονται σε αμμωνία από τα βακτήρια και τους μύκητες. Στη συνέχεια, η μικροβιακή οξείδωση της αμμωνίας πραγματοποιείται σε δύο

στάδια. Σε καθένα από αυτά εμπλέκονται διαφορετικά είδη χημιοαυτότροφων μικροοργανισμών, που χρησιμοποιούν το CO₂ ως πηγή άνθρακα για τη βιοσύνθεση και την οξειδωση των ενώσεων του αζώτου ως πηγή ενέργειας. Κατά το πρώτο στάδιο, που καταλύεται από το γένος *Nitrosomonas*, συντελείται οξείδωση των αμμωνιακών ιόντων σε νιτρώδη.



Κατά το δεύτερο στάδιο, που καταλύεται από το γένος *Nitrobacter*, τα νιτρώδη οξειδώνονται σε νιτρικά:



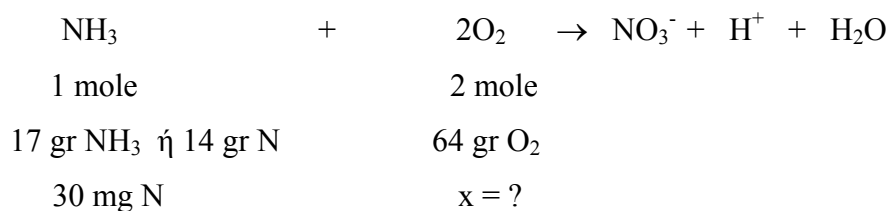
Η παραπάνω μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρικά ονομάζεται νιτροποίηση. Η απαίτηση σε οξυγόνο για την πραγματοποίηση της παραπάνω διεργασίας καλείται νιτρογενής απαίτηση σε οξυγόνο (NBOD).

Παράδειγμα 3.2

Αστικά λύματα περιέχουν συγκέντρωση 30 mg/l αζώτου ως NH₃. Θεωρώντας ότι δεν χρησιμοποιείται άζωτο για την κυτταρική σύνθεση, να βρεθεί η νιτρογενής απαίτηση σε οξυγόνο, NBOD. Δίνονται τα ατομικά βάρη του αζώτου (ΑΒ:14), του υδρογόνου (ΑΒ:1) και του οξυγόνου (ΑΒ:16).

Λύση:

Συνδυάζοντας τις χημικές αντιδράσεις που περιγράφουν την νιτροποίηση προκύπτει η παρακάτω αντίδραση σύμφωνα με την οποία 1 mole αμμωνίας (17 gr) απαιτούν 2 mole O₂ (2×32=64 gr).



Δεδομένου ότι τα 17 gr αμμωνίας περιέχουν 14 gr αζώτου και η συγκέντρωση του αζώτου στα λύματα ισούται με 30 mg/l, η νιτρογενής απαίτηση σε οξυγόνο ισούται με:

$$\text{NBOD} = (64 \text{ gr O}_2 \times 30 \text{ mg N}) / 14 \text{ gr N} \Rightarrow$$

$$\text{NBOD} = 137 \text{ mg O}_2/\text{l}$$

3.2.1.4 Άλατα

Το νερό κατά την κίνηση του μέσω του εδάφους εμπλουτίζεται με μία ποικιλία διαλυτών στερεών και αλάτων. Η εξάτμιση μέρους του νερού έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των συγκεντρώσεων των αλάτων. Η απλούστερη μέθοδος εκτίμησης της αλατότητας είναι μέσω προσδιορισμού της συγκέντρωσης των ολικών διαλυμένων στερεών (*Total Dissolved Solids, TDS*). Για τα επιφανειακά νερά αναμένεται συγκέντρωση TDS μικρότερη των 1500 mg/l, ενώ για τα υφάλμυρα μικρότερη των 5000 mg/l. Το θαλασσίνο νερό έχει συγκέντρωση 30000-34000 mg/l TDS.

3.2.1.5 Βαρέα Μέταλλα

Ως βαρέα μέταλλα χαρακτηρίζονται τα στοιχεία με ειδικό βάρος ίσο ή μεγαλύτερο των 5 g cm⁻³. Σε εργασίες που αφορούν στο περιβάλλον, συχνά στα βαρέα μέταλλα περιλαμβάνονται και ελαφρύτερα στοιχεία (Al, Be) και μεταλλοειδή (As, Se, Sb). Τα βαρέα μέταλλα καταλήγουν στο νερό κυρίως λόγω της χρήσης του σε διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες (μεταλλουργεία, παραγωγή χημικών, εξόρυξη ορυκτών κ.λ.π). Σημαντική είναι επίσης η συνεισφορά των αστικών απορροών που επιβαρύνονται με βαρέα μέταλλα μέσω των ανθρώπινων εκκρίσεων και της χρήσης απορρυπαντικών και ειδών κοσμητολογίας, καθώς και των εμπορικών δραστηριοτήτων που πραγματοποιούνται εντός των ορίων των οικισμών (συνεργεία αυτοκινήτων, πλυντήρια, φωτογραφεία).

Η τοξικότητα των βαρέων μετάλλων διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος του μετάλλου και τη μορφή με την οποία είναι διαθέσιμα στο περιβάλλον. Συγκεκριμένα, ορισμένα από τα βαρέα μέταλλα όπως ο σίδηρος (Fe) και το τρισθενές χρώμιο (Cr(III)) αποτελούν απαραίτητα ιχνοστοιχεία για τον ανθρώπινο οργανισμό, ενώ άλλα όπως ο υδράργυρος (Hg), το κάδμιο (Cd), ο μόλυβδος (Pb), το νικέλιο (Ni) και το αρσενικό (As) παρουσιάζουν πολύ υψηλή τοξικότητα ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Σε ότι αφορά στην διαφοροποίηση της τοξικότητας των μετάλλων ανάλογα με τη μορφή που είναι διαθέσιμα μπορεί να αναφερθεί το παράδειγμα του Hg. Ο υγρός Hg είναι λιγότερο τοξικός από τον αέριο Hg, που μέσω των πνευμόνων διαχέεται στο αίμα και καταλήγει στον εγκέφαλο προκαλώντας σοβαρές βλάβες στο κεντρικό νευρικό σύστημα. Τα μέταλλα δεν βιοαποδομούνται, είναι εφικτή όμως η βιομετατροπή τους από τη μία χημική μορφή σε μία άλλη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το εξασθενές χρώμιο (Cr(VI)) που υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις ανάγεται με τη βοήθεια μικροοργανισμών σε Cr(III).

3.2.1.6 Φυτοφάρμακα

Ο συγκεκριμένος όρος χρησιμοποιείται για να καλύψει μία σειρά συνθετικών οργανικών ουσιών που χρησιμοποιούνται για τη θανάτωση οργανισμών ανεπιθύμητων για τον άνθρωπο όπως έντομα, ζιζάνια και μύκητες. Οι τρεις κύριες κατηγορίες συνθετικών οργανικών εντομοκτόνων είναι τα οργανοχλωριωμένα, τα οργανοφωσφορικά και τα καρβαμικά. Στην πρώτη κατηγορία εντομοκτόνων ανήκει το *DDT* (διχλωροδιφαινυλτριχλωροαιθάνιο), που είχε ευρύτατα χρησιμοποιηθεί κατά το παρελθόν για τον έλεγχο εντόμων που ήταν φορείς μολυσματικών ασθενειών και τα *aldrin*, *dieldrin*, *endosulfan*, *heptachlor*. Τα εντομοκτόνα που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία απαιτούν μεγάλο χρονικό διάστημα για να διασπαστούν και συσσωρεύονται στους λιπώδεις ιστούς. Ως αποτέλεσμα, οι οργανισμοί που βρίσκονται στις ανώτερες βαθμίδες της τροφικής αλυσίδας συσσωρεύουν υψηλές συγκεντρώσεις αυτών των ουσιών.

Τα οργανοφωσφορικά εντομοκτόνα όπως τα *parathion*, *malathion* και *diazinon* διασπώνται πιο γρήγορα και για το λόγο αυτό αντικατέστησαν τα οργανοχλωριωμένα. Παρουσιάζουν όμως υψηλότερη οξεία τοξικότητα από τα οργανοχλωριωμένα και απορροφούνται γρήγορα από το δέρμα, τους πνεύμονες και το πεπτικό σύστημα. Η τρίτη κατηγορία εντομοκτόνων, τα καρβαμικά, προέρχονται από το καρβαμικό οξύ (H_2NCOOH). Παρουσιάζουν κι αυτά το πλεονέκτημα της μικρής παραμονής στο περιβάλλον, άρα και της μικρής βιοσυσσώρευσής τους, αλλά και το μειονέκτημα της υψηλής οξείας τοξικότητας.

3.2.1.7 Πτητικές Οργανικές Ενώσεις

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις (*Volatile Organic Compounds, VOCs*) είναι μεταξύ των ουσιών που ανιχνεύονται συχνότερα στα υπόγεια νερά. Χρησιμοποιούνται κυρίως ως διαλύτες στη βιομηχανία και πολλές από αυτές θεωρούνται καρκινογόνες ή μεταλλαξιογόνες. Περισσότερο τοξικές θεωρούνται το βινυλοχλωρίδιο, το τετραχλωροαιθυλένιο, το τριχλωροαιθυλένιο, το 1,2-διχλωροαιθάνιο και ο τετραχλωράνθρακας.

3.2.2 Διάθεση Λυμάτων σε Ποταμό

Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου (DO) στο νερό είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους που υποδεικνύουν την κατάσταση του υδάτινου σώματος. Σε περιπτώσεις που

η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου μειώνεται σε επίπεδα μικρότερα των 4 ή 5 mg/l, οι μορφές ζωής που μπορούν να επιβιώσουν ελαττώνονται. Σε ακραίες περιπτώσεις αναερόβιων συνθηκών οι περισσότερες μορφές ζωής εκλείπουν. Η απλούστερη προσέγγιση για τη μεταβολή της συγκέντρωσης του οξυγόνου στα ποτάμια λαμβάνει υπόψη της δύο κύριες διεργασίες: α) τη μείωση της συγκέντρωσης του DO από τους μικροοργανισμούς κατά την αποδόμηση των οργανικών ενώσεων και β) την αναπλήρωση του DO εξαιτίας του επαναερισμού που πραγματοποιείται στη διεπιφάνεια μεταξύ ποταμού και ατμόσφαιρας. Στο παραπάνω μοντέλο θεωρείται ότι υπάρχει συνεχής διάθεση αποβλήτων σε συγκεκριμένη θέση του ποταμού και η μίξη λυμάτων και νερού είναι πλήρης.

3.2.2.1 Αποδόμηση Οργανικών Ενώσεων

Η ταχύτητα αποξυγόνωσης λόγω αποδόμησης των οργανικών ενώσεων σε κάθε σημείο του ποταμού θεωρείται ότι είναι ανάλογη με την υπολειμματική συγκέντρωση BOD στο συγκεκριμένο σημείο (εξίσωση 3.7):

$$\text{Ταχύτητα Αποξυγόνωσης} = k_d \times L_t \quad (3.7)$$

Όπου:

k_d = η σταθερά ταχύτητας αποξυγόνωσης (ημέρες⁻¹)

L_t = η υπολειμματική συγκέντρωση BOD t ημέρες μετά την είσοδο των λυμάτων στον ποταμό (mg/l)

Η σταθερά ταχύτητας αποξυγόνωσης, k_d , συχνά θεωρείται ότι έχει την ίδια τιμή (για τη δεδομένη θερμοκρασία) με τη σταθερά μεταβολής του BOD, k .

Παράδειγμα 3.3

Μονάδα επεξεργασίας υγρών αστικών αποβλήτων απορρίπτει επεξεργασμένα λύματα συγκέντρωσης 50 mg/l ως BOD και παροχής 1,1 m³/s σε χείμαρρο. Η παροχή του χείμαρρου και η συγκέντρωση του BOD ανάντη του σημείου εκβολής είναι 8,7 m³/s είναι 6,0 mg/l, αντίστοιχα. Θεωρώντας ότι πραγματοποιείται πλήρης και άμεση μίξη νερού και λυμάτων να υπολογιστεί η συγκέντρωση του BOD στο σημείο εκβολής. Αν η ταχύτητα του χείμαρρου είναι σταθερή και ίση με 0,3 m/s να υπολογιστεί το υπολειμματικό BOD σε μία απόσταση 3000 m από το σημείο εκβολής των λυμάτων. Να θεωρηθεί ότι η σταθερά αποξυγόνωσης, k , ισούται με 0,2 ημέρες⁻¹.

Λύση:

A) Το BOD στο σημείο εκβολής υπολογίζεται με τη βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης:

$$C_1Q_1 + C_2Q_2 = C_{\text{τελ}}Q_{\text{τελ}} \Rightarrow$$

$$(50 \text{ mg/l} \times 1,1 \text{ m}^3/\text{s}) + (6 \text{ mg/l} \times 8,7 \text{ m}^3/\text{s}) = C_{\text{τελ}} \times 9,8 \text{ m}^3/\text{s} \Rightarrow$$

$$C_{\text{τελ}} = 10,9 \text{ mg/l}$$

B) Δεδομένου ότι η ταχύτητα του χειμάρρου είναι 0,3 m/s, η απόσταση των 3000 m θα καλυφθεί σε χρόνο ίσο με:

$$t = \frac{s}{u} \Rightarrow t = \frac{3000 \text{ m}}{0,3 \text{ m/s}} = 10000 \text{ s} = 0,116 \text{ days}$$

Από την εξίσωση (3.4):

$$L_t = L_0 e^{-kt} \Rightarrow$$

$$L_t = 10,9 \text{ mg/l} \times e^{-(0,2/\text{day} \times 0,116 \text{ day})} \Rightarrow$$

$$L_t = 10,65 \text{ mg/l BOD}$$

3.2.2.2 Επαναερισμός

Η ταχύτητα αναπλήρωσης του οξυγόνου θεωρείται ότι είναι ανάλογη της διαφοράς μεταξύ της πραγματικής συγκέντρωσης του οξυγόνου στον ποταμό DO και της τιμής κορεσμού του οξυγόνου για τη δεδομένη θερμοκρασία (εξίσωση 3.8). Η διαφορά αυτή καλείται έλλειμμα οξυγόνου, D .

$$\text{Ταχύτητα Επαναερισμού} = k_r \times D \quad (3.8)$$

Όπου:

k_r = σταθερά επαναερισμού στους 20 °C (ημέρες⁻¹)

D = έλλειμμα οξυγόνου = ($DO_{\text{κορεσμού}}$ – DO)

$DO_{\text{κορεσμού}}$ = η συγκέντρωση κορεσμού του διαλυμένου οξυγόνου για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία

DO = η πραγματική συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στη δεδομένη θέση του ποταμού

Η συγκέντρωση κορεσμού του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την ατμοσφαιρική πίεση και την αλατότητα. Η μεταβολή της διαλυτότητας του οξυγόνου στο νερό σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία δίνεται στον Πίνακα 3.4. Η σταθερά επαναερισμού, k_r επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους όπως την ταχύτητα ροής του ποταμού και το βάθος του. Μία εμπειρική εξίσωση για τον υπολογισμό της σταθεράς επαναερισμού δίνεται στη συνέχεια (εξίσωση 3.9).

$$k_r = \frac{(3,9 \times u^{1/2})}{H^{3/2}} \quad (3.9)$$

Όπου:

k_r = η σταθερά επαναερισμού στους 20 °C (ημέρες⁻¹)

u = η μέση ταχύτητα του ποταμού (m/s)

H = το μέσο βάθος του ποταμού (m)

Πίνακας 3.4 Διαλυτότητα οξυγόνου στο νερό σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία (πίεση 1Atm, μηδενική συγκέντρωση χλωριόντων)

Θερμοκρασία (°C)	Διαλυμένο Οξυγόνο (mg/l)
0	14,62
5	12,77
10	11,29
15	10,08
20	9,1
25	8,26
30	7,56

Παράδειγμα 3.4

Μονάδα επεξεργασίας υγρών αστικών αποβλήτων απορρίπτει επεξεργασμένα λύματα με παροχή 1,1 m³/s σε χείμαρρο. Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στα απόβλητα είναι 2 mg/l. Η παροχή του ποταμού που δέχεται τα απόβλητα είναι 8,7 m³/s, ενώ η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου σε αυτό 8,3 mg/l. Υποθέτοντας πλήρη μίξη να εκτιμηθεί το έλλειμμα οξυγόνου στο μίγμα αποβλήτων και ποταμού κατόπιν του σημείου απόρριψης των λυμάτων. Δίνεται θερμοκρασία ποταμού και λυμάτων ίση με 20 °C.

Λύση:

Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο σημείο μίξης των λυμάτων υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης:

$$C_1Q_1 + C_2Q_2 = C_{\text{τελ}}Q_{\text{τελ}} \Rightarrow$$

$$(2 \text{ mg/l} \times 1,1 \text{ m}^3/\text{s}) + (8,3 \text{ mg/l} \times 8,7 \text{ m}^3/\text{s}) = C_{\text{τελ}} \times 9,8 \text{ m}^3/\text{s} \Rightarrow$$

$$C_{\text{τελ}} = \text{DO} = 7,6 \text{ mg/l}$$

Δεδομένου ότι για τη θερμοκρασία των 20 °C η συγκέντρωση κορεσμού του διαλυμένου οξυγόνου είναι 9,09 mg/l (Πίνακας 3.4), το έλλειμμα οξυγόνου, D είναι:

$$D = 9,1 \text{ mg/l} - 7,6 \text{ mg/l} \Rightarrow \mathbf{D = 1,5 \text{ mg/l}}$$

3.2.2.3 Εξίσωση Streeter-Philips

Η αποξυγόνωση που προκαλείται από τη μικροβιακή αποδόμηση των οργανικών αποβλήτων και η οξυγόνωση λόγω επαναερισμού είναι ανταγωνιστικές διεργασίες που ταυτόχρονα απομακρύνουν και προσθέτουν οξυγόνο σε ένα υδάτινο ρεύμα. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3.7) και (3.8), η ταχύτητα αύξησης του ελλείμματος οξυγόνου υπολογίζεται από την εξίσωση (3.9):

Ταχύτητα Αύξησης Ελλείμματος O₂ = Ταχύτητα Αποξυγόνωσης – Ταχύτητα Επαναερισμού

$$\frac{dD}{dt} = (k_d \times L_0 e^{-k_d t}) - (k_r \times D) \quad (3.9) \Rightarrow$$

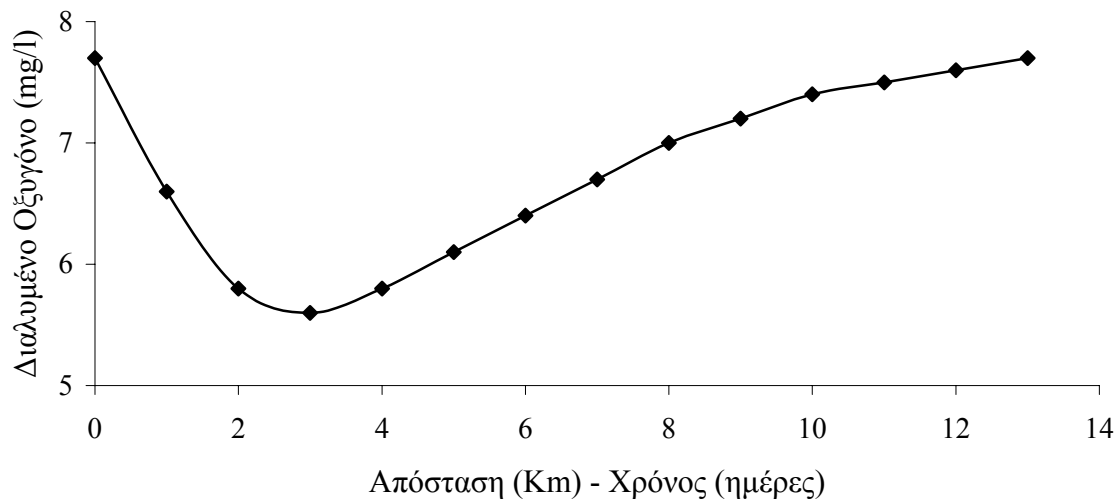
$$D = \frac{(k_d \times L_0) \times (e^{-k_d t} - e^{-k_r t})}{(k_r - k_d)} + D_0 e^{-k_r t} \quad (3.10)$$

Δεδομένου ότι το έλλειμμα οξυγόνου είναι η διαφορά μεταξύ της συγκέντρωσης κορεσμού του διαλυμένου οξυγόνου, DO_{κορεσμού} και της πραγματικής του τιμής, DO προκύπτει:

$$DO = DO_{\text{κορεσμού}} - \left[\frac{(k_d \times L_0) \times (e^{-k_d t} - e^{-k_r t})}{(k_r - k_d)} + D_0 e^{-k_r t} \right] \quad (3.11)$$

Η εξίσωση (3.11) αποτελεί την κλασσική εξίσωση **Streeter-Philips**, που παρουσιάζεται και γραφικά στο Σχήμα 3.5. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου αρχίζει να μειώνεται αμέσως μετά το σημείο διάθεσης των λυμάτων και φθάνει την ελάχιστη συγκέντρωση σε ένα σημείο που χαρακτηρίζεται ως *κρίσιμο σημείο*. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά οφείλεται στο γεγονός ότι αμέσως μετά τη διάθεση των λυμάτων υπάρχει μεγάλο ποσό οργανικού φορτίου που αποδομείται με συνέπεια η ταχύτητα απομάκρυνσης του DO από το νερό να είναι υψηλότερη από την ταχύτητα προσθήκης του και ως αποτέλεσμα η συγκέντρωση του DO να μειώνεται. Στο κρίσιμο σημείο η ταχύτητα απομάκρυνσης διαλυμένου οξυγόνου ισούται με την ταχύτητα προσθήκης του. Πέρα από αυτό το σημείο, η συγκέντρωση του οργανικού φορτίου έχει μειωθεί τόσο, ώστε το οξυγόνο να προστίθεται στο νερό (λόγω επαναερισμού) με ρυθμό

ταχύτερο από ότι απομακρύνεται (λόγω βιοαποδόμησης) και ως συνέπεια η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου αυξάνει.



Σχήμα 3.5 Καμπύλη μεταβολής διαλυμένου οξυγόνου που ακολουθεί το μοντέλο Streeter-Phelps.

Εάν ο ποταμός έχει σταθερή διατομή και η ταχύτητα του είναι u , τότε ο χρόνος και η απόσταση κατάντη συνδέονται με την εξίσωση (3.12):

$$x = u \times t \quad (3.12)$$

Όπου:

x = η απόσταση κατάντη (m)

u = η ταχύτητα ποταμού (m/s)

t = ο χρόνος που απαιτήθηκε για μετακίνηση σε απόσταση x (s).

Με τη βοήθεια της (3.12), η εξίσωση (3.10) μετατρέπεται στην (3.13):

$$D = \frac{(k_d \times L_0) \times (e^{-k_d \times x/u} - e^{-k_r \times x/u})}{(k_r - k_d)} + D_0 e^{-k_r \times x/u} \quad (3.13)$$

Το σημείο του ποταμού που χαρακτηρίζεται ως **κρίσιμο σημείο** και η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου σε αυτό έχουν ιδιαίτερη σημασία, καθώς στο σημείο αυτό οι ποιοτικές συνθήκες του ποταμού είναι οι χειρότερες. Ορίζοντας την παράγωγο του ελλείμματος οξυγόνου ίση με μηδέν και επιλύοντας ως προς τον κρίσιμο χρόνο, t_c , προκύπτει:

$$t_c = \frac{1}{k_r - k_d} \ln \left\{ \frac{k_r}{k_d} \left[1 - \frac{D_0(k_r - k_d)}{k_d L_0} \right] \right\} \quad (3.14)$$

Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο κρίσιμο σημείο μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της (3.11), αν για την παράμετρο t χρησιμοποιήσουμε την τιμή t_c .

Σύμφωνα με την εξίσωση 3.11, η καμπύλη του διαλυμένου οξυγόνου του Σχήματος 3.5 μεταβάλλεται αποκλειστικά εξαιτίας της αύξησης του BOD από την απόρριψη λυμάτων. Στην πραγματικότητα η καμπύλη του οξυγόνου επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες όπως τη θερμοκρασία, την ώρα της ημέρας, έστω κι αν η συγκέντρωση του οργανικού φορτίου που αποβάλλεται είναι σταθερή. Για παράδειγμα η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μικροβιακής δραστηριότητας και κατά συνέπεια την αύξηση της ταχύτητας αποξυγόνωσης. Επιπλέον σε υψηλότερες θερμοκρασίες η συγκέντρωση κορεσμού του διαλυμένου οξυγόνου είναι χαμηλότερη (Πίνακας 3.4), με αποτέλεσμα η ταχύτητα επαναερισμού να είναι χαμηλότερη. Ο συνδυασμός των παραπάνω παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα το **κρίσιμο σημείο** να προσεγγίζεται συντομότερα και η ελάχιστη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου να είναι χαμηλότερη.

Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό επηρεάζεται επίσης από τη φωτοσύνθεση. Κατά τη διάρκεια της ημέρας οι υδρόβιοι μικροοργανισμοί προσθέτουν οξυγόνο στο νερό λόγω της φωτοσύνθεσης. Τη νύχτα αντίθετα η φωτοσύνθεση διακόπτεται, ενώ η κατανάλωση οξυγόνου λόγω της αναπνοής συνεχίζεται. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω διεργασιών, είναι πιθανόν να παρατηρείται υψηλότερη συγκέντρωση του DO κατά τις απογευματινές ώρες και χαμηλότερη κατά της νυχτερινές. Σε ένα χείμαρρο που απορρίπτονται λύματα και παρατηρείται υπερανάπτυξη αλγών είναι πιθανόν να παρατηρηθεί σημαντική πτώση της ελάχιστης συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου τις νυχτερινές ώρες.

Παράδειγμα 3.5

Μονάδα παραγωγής γαλακτοκομικών προϊόντων διαθέτει τα επεξεργασμένα λύματα της σε παρακείμενο ποταμό. Ακριβώς μετά το σημείο ρίψης των αποβλήτων, μετρώνται συγκεντρώσεις BOD και διαλυμένου οξυγόνου 10,9 και 7,6 mg/l, αντίστοιχα. Θεωρήστε ότι η θερμοκρασία των αποβλήτων και του ποταμού είναι 20 °C, η σταθερά αποξυγόνωσης k_d ίση με 0,2/day, η μέση ταχύτητα του ποταμού 0,3 m/s και το μέσο βάθος του 3 m. Να

υπολογιστεί ο χρόνος και η απόσταση που παρατηρείται το μέγιστο έλλειμμα οξυγόνου. Να βρεθεί η συγκέντρωση του DO στο συγκεκριμένο σημείο.

Λύση:

Στους 20 °C η συγκέντρωση κορεσμού του διαλυμένου οξυγόνου είναι 9,1 mg/l, έτσι το αρχικό έλλειμμα οξυγόνου, D_0 είναι:

$$D_0 = DO_s - DO = 9,1 - 7,6 = 1,5 \text{ mg/l}$$

Για τον υπολογισμό της σταθεράς επαναερισμού χρησιμοποιείται η εξίσωση (3.9):

$$k_r = \frac{(3,9 \times u^{1/2})}{H^{3/2}} \Rightarrow$$

$$k_r = (3,9 \times 0,3^{1/2}) / 3^{3/2} \Rightarrow$$

$$k_r = 0,41/\text{day}$$

Για τον υπολογισμό του χρονικού σημείου στο οποίο παρατηρείται το μέγιστο έλλειμμα οξυγόνου, χρησιμοποιούμε την εξίσωση (3.14):

$$t_c = \frac{1}{k_r - k_d} \ln \left\{ \frac{k_r}{k_d} \left[1 - \frac{D_0(k_r - k_d)}{k_d L_0} \right] \right\} \Rightarrow$$

$$t_c = \frac{1}{0,41 - 0,2} \ln \left\{ \frac{0,41}{0,2} \left[1 - \frac{1,5(0,41 - 0,2)}{0,2 \times 10,9} \right] \right\} \Rightarrow$$

$$t_c = 2,67 \text{ ημέρες}$$

Η κρίσιμη απόσταση υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης (3.12):

$$x = u \times t \Rightarrow$$

$$x = 0,3 \text{ m/s} \times 3600 \text{ s/hr} \times 24 \text{ hr/d} \times 2,67 \text{ d} \Rightarrow$$

$$x = 69,3 \text{ Km}$$

Η συγκέντρωση του DO στο συγκεκριμένο σημείο βρίσκεται με τη βοήθεια της εξίσωσης (3.11):

$$DO = DO_{\text{κορεσμού}} - \left[\frac{(k_d \times L_0) \times (e^{-k_d t} - e^{-k_r t})}{(k_r - k_d)} + D_0 e^{-k_r t} \right] \Rightarrow$$

$$DO = 9,1 - [(0,2 \times 10,9) \times (e^{-0,2 \times 2,67} - e^{-0,41 \times 2,67}) / (0,41 - 0,2) + 1,5 e^{-0,41 \times 2,67}] \Rightarrow$$

$$DO = 6 \text{ mg/l}$$

3.2.3 Διάθεση Λυμάτων σε Λίμνη

Όλες οι λίμνες σταδιακά συσσωρεύουν λάσπη και οργανικό υλικό μέσω μίας φυσικής διαδικασίας γήρανσής τους που καλείται *ευτροφισμός*. Συγκεκριμένα, μία λίμνη μικρής ηλικίας αρχικά χαρακτηρίζεται από χαμηλό φορτίο θρεπτικών και χαμηλή παραγωγικότητα (*ολιγοτροφική λίμνη*). Η μεταφορά θρεπτικών από την λεκάνη απορροής έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των φυτοπλακτονικών μικροοργανισμών στη λίμνη. Η θανάτωση των συγκεκριμένων μικροοργανισμών συντελεί στην ύπαρξη μεγάλου ποσού οργανικού φορτίου που είναι διαθέσιμο για αποδόμηση και στη μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου (*ευτροφική λίμνη*). Η διαρκής συσσώρευση λάσπης και οργανικού υλικού έχει ως αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση του βάθους της λίμνης και την τελική μετατροπή της σε έλος.

Ενώ ο ευτροφισμός είναι μία φυσική διεργασία που απαιτεί εκατοντάδες χρόνια για την πραγματοποίησή του, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες μέσω της απόρριψης αστικών, βιομηχανικών λυμάτων και αγροτικών απορροών μπορεί να επιταχύνουν σημαντικά την παραπάνω διεργασία. Από τα στοιχεία που ανήκουν στην κατηγορία των θρεπτικών, αυτά που συμβάλλουν κυρίως στο φαινόμενο του ευτροφισμού είναι ο φώσφορος και το άζωτο. Δεδομένου ότι η αύξηση των αλγών ουσιαστικά ελέγχεται από το θρεπτικό στοιχείο που είναι λιγότερο διαθέσιμο και χαρακτηρίζεται ως *περιοριστικός παράγοντας*, ο ευκολότερος τρόπος ελέγχου του ευτροφισμού είναι η εύρεση του στοιχείου που αποτελεί τον περιοριστικό παράγοντα και η μείωση της συγκέντρωσής του.

Παράδειγμα 3.6

Σε λίμνη που περιοριστικός παράγοντας είναι ο φώσφορος, καταλήγει χειμάρρος με παροχή $15 \text{ m}^3/\text{s}$ και συγκέντρωση φωσφόρου $0,010 \text{ mg/l}$. Επιπλέον, σε αυτή ρίχνονται τα επεξεργασμένα λύματα μονάδας επεξεργασίας αστικών αποβλήτων με παροχή $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ και συγκέντρωση φωσφόρου 2 mg/l . Εντός της λίμνης, μέρος του φωσφόρου καθιζάνει με ταχύτητα καθίζησης ίση με $10\text{m}/\text{έτος}$. Θεωρώντας ότι το εμβαδόν επιφανείας της λίμνης ισούται με $80 \times 10^6 \text{ m}^2$ και ότι από τη λίμνη εκβάλλει χειμάρρος με παροχή ίση με το άθροισμα των εισερχόμενων παροχών ($15,5 \text{ m}^3/\text{s}$), να υπολογιστεί η συγκέντρωση του φωσφόρου στη λίμνη. Αν η αποδεκτή συγκέντρωση του φωσφόρου στη λίμνη είναι $0,010 \text{ mg/l}$, να διερευνηθεί αν εκπληρώνεται ο συγκεκριμένος ποιοτικός στόχος και σε αρνητική

περίπτωση να υπολογιστεί η απαιτούμενη συγκέντρωση του φωσφόρου στα λύματα, ώστε να πραγματοποιηθεί αυτός ο στόχος.

Λύση:

A) Υπολογίζοντας το ισοζύγιο μάζας για τον φώσφορο στη λίμνη έχουμε:

$$(Q_r \times C_r) + (Q_w \times C_r) = (Q \times C) + (u \times A \times C)$$

Όπου:

Q_r = η παροχή του ποταμού (m^3/s)

Q_w = η παροχή των επεξεργασμένων αποβλήτων (m^3/s)

Q = η παροχή στην έξοδο της λίμνης (m^3/s)

C_r = η συγκέντρωση του φωσφόρου στον ποταμό (mg/l)

C_w = η συγκέντρωση του φωσφόρου στα επεξεργασμένα λύματα (mg/l)

C = η συγκέντρωση του φωσφόρου στη λίμνη (mg/l)

u = η ταχύτητα καθίζησης του φωσφόρου ($m/έτος$)

A = η επιφάνεια της λίμνης (m^2)

Αρχικά μετατρέπουμε την ταχύτητα καθίζησης από $m/έτος$ σε m/s .

$$U = (10 \text{ m/έτος}) / (365 \text{ ημέρες/έτος} \times 24 \text{ ώρες/ημέρα} \times 3600 \text{ s/ώρα}) = 3,17 \times 10^{-7} \text{ m/s}$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές στην παραπάνω εξίσωση προκύπτει:

$$(15 \text{ m}^3/\text{s} \times 0,01 \text{ mg/l}) + (0,5 \text{ m}^3/\text{s} \times 2 \text{ mg/l}) = (15,5 \text{ m}^3/\text{s} \times C \text{ mg/l}) + (3,17 \times 10^{-7} \text{ m/s} \times 80 \times 10^6 \text{ m}^2 \times C) \Rightarrow$$

$$\mathbf{C = 0,028 \text{ mg/l}}$$

B) Δεδομένου ότι η συγκέντρωση του φωσφόρου στη λίμνη ισούται με $0,028 \text{ mg/l}$ δεν εκπληρώνεται ο ποιοτικός στόχος των $0,010 \text{ mg/l}$. Για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου, θα πρέπει η συγκέντρωση του φωσφόρου στα επεξεργασμένα λύματα να είναι:

$$(15 \text{ m}^3/\text{s} \times 0,01 \text{ mg/l}) + (0,5 \text{ m}^3/\text{s} \times C_w \text{ mg/l}) = (15,5 \text{ m}^3/\text{s} \times 0,01 \text{ mg/l}) + (3,17 \times 10^{-7} \text{ m/s} \times 80 \times 10^6 \text{ m}^2 \times 0,01) \Rightarrow$$

$$\mathbf{C_w = 0.52 \text{ mg/l}}$$

3.3 Νομοθετικό Πλαίσιο

Η ποιότητα των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης καθορίζεται από τις Οδηγίες 76/464/ΕΟΚ και 80/68/ΕΟΚ, αντίστοιχα. Επίσης, η ποιότητα του πόσιμου νερού καθορίζεται από την Οδηγία 98/83/ΕΚ. Οι τρεις παραπάνω Οδηγίες ουσιαστικά αντιμετωπίζουν το ζήτημα της ποιότητας του νερού από την πηγή έως το τελικό σημείο διάθεσής του στο κοινό. Οδηγίες παρόμοιου περιεχομένου έχουν εκδοθεί κατά το παρελθόν και από άλλους φορείς όπως την Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας (WHO) και το Γραφείο Προστασίας Περιβάλλοντος (EPA).

Η Οδηγία 76/464/ΕΟΚ και μία σειρά θυγατρικών Οδηγιών χαρακτηρίζει κάποιες ουσίες ως τοξικές για το περιβάλλον και τις εντάσσει στους Κατάλογο Ι και ΙΙ, θεσπίζοντας όρια εκπομπής για τις κατηγορίες των βιομηχανιών που χρησιμοποιούν ή παράγουν τέτοιες ουσίες και ορίζοντας ποιοτικούς στόχους ανά κατηγορία υδάτινου αποδέκτη. Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζονται οι ουσίες που έχουν ενταχθεί στον Κατάλογο Ι και αναφέρονται οι ποιοτικοί στόχοι που έχουν ορισθεί ανά κατηγορία αποδέκτη.

Πίνακας 3.5 Ποιοτικοί στόχοι του Καταλόγου Ι της 76/464/ΕΟΚ Οδηγίας ανά κατηγορία υδάτινου αποδέκτη.

Ουσία	Εσωτερικά	Ύδατα	Εσωτερικά	Χωρικά
	Επιφανειακά Ύδατα (μg/l)	Εκβολών (μg/l)	Ύδατα Ακτών εκτός Εκβολών (μg/l)	Θαλάσσια Ύδατα (μg/l)
Κάδμιο	5	5	2,5	2,5
Υδράργυρος	1	0,5	0,3	0,3
Εξαχλωροκυκλοεξάνιο	0,1	0,02	0,1	0,02
Τετραχλωράνθρακας	12	12	12	12
DDT (ολικό)	25	25	25	25
Πενταχλωροφαινόλη	2	2	2	2
Αλδρίνη	0,01	0,01	0,005	0,005
Διελδρίνη	0,01	0,01	0,005	0,005
Ελδρίνη	0,01	0,01	0,005	0,005
Ισοδρίνη	0,01	0,01	0,005	0,005

Εξαχλωροβενζόλιο	0,03	0,03	0,03	0,03
Εξαχλωροβουταδιένιο	0,1	0,1	0,1	0,1
Χλωροφόρμιο	12	12	12	12
1,2-Διχλωροαιθάνιο	10	10	10	10
Τριχλωροαιθυλένιο	10	10	10	10
Τετραχλωροαιθυλένιο	10	10	10	10
Τριχλωροβενζόλιο	10	10	10	10

Η Οδηγία 98/83/ΕΚ δημιουργήθηκε για να αντικαταστήσει την Οδηγία 80/778/ΕΟΚ περί ποιότητας πόσιμου νερού και αφορά την ποιότητα του νερού “ανθρώπινης κατανάλωσης”. Ως νερό ανθρώπινης κατανάλωσης ορίζεται α) το νερό που προορίζεται για πόση, μαγείρεμα, προπαρασκευή τροφής ή άλλες οικιακές χρήσεις ανεξάρτητα από την προέλευσή του και από το αν παρέχεται από δίκτυο διανομής, βυτίο, φιάλες ή δοχεία β) το νερό που χρησιμοποιείται στις επιχειρήσεις παραγωγής τροφίμων για την παρασκευή, επεξεργασία, συντήρηση ή εμπορία προϊόντων ή ουσιών που προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση.

Μέσω της Οδηγίας 98/83/ΕΚ επιβάλλονται παραμετρικές τιμές σε μία σειρά ουσιών που θεωρούνται σημαντικές για τη διασφάλιση της ανθρώπινης υγείας (Πίνακας 3.6), θεσπίζονται προγράμματα ελέγχου για το νερό που προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση και καθορίζονται οι χρησιμοποιούμενες για την ποιοτική ανάλυση του νερού αναλυτικές μέθοδοι, ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία και η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 3.6 Παράμετροι και παραμετρικές τιμές Οδηγίας 98/83/ΕΚ.

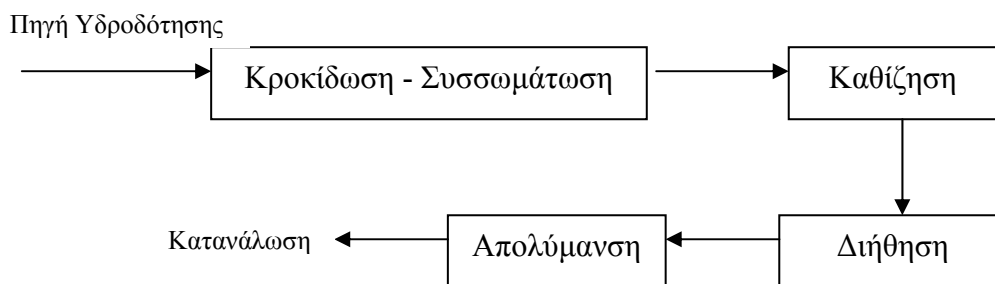
Μικροβιολογικές Παράμετροι	
Escherichia coli (E. coli)	0 (αριθμός/100 ml)
Εντερόκοκκοι	0 (αριθμός/100 ml)
Χημικές Παράμετροι	
Ακρυλαμίδιο	0,10 µg/l
Αντιμόνιο	5,0 µg/l
Αρσενικό	10 µg/l
Βενζόλιο	1,0 µg/l
Βενζο-α-πυρένιο	0,010 µg/l

Βόριο	1,0 mg/l
Βρωμικά Άλατα	10 µg/l
Κάδμιο	5,0 µg/l
Χρόμιο	50 µg/l
Χαλκός	2,0 mg/l
Κυανιούχα Άλατα	50 µg/l
1,2-διχλωροαιθάνιο	3,0 µg/l
Επιγλωρυδρίνη	0,10 µg/l
Φθοριούχα Άλατα	1,5 mg/l
Μόλυβδος	10 µg/l
Υδράργυρος	1,0 µg/l
Νικέλιο	20 µg/l
Νιτρικά Άλατα	50 mg/l
Νιτρώδη Άλατα	0,50 mg/l
Παρασιτοκτόνα	0,10 µg/l
Σύνολο Παρασιτοκτόνων	0,50 µg/l
Πολυκυκλικοί Αρωματικοί	0,10 µg/l
Υδρογονάνθρακες	
Σελήνιο	10 µg/l
Τετραχλωροαιθένιο και	10 µg/l
Τριχλωροαιθένιο	
Ολικά Τριαλογονομεθάνια	100 µg/l
Βινυλοχλωρίδιο	0,50 µg/l
Ενδεικτικές Παράμετροι	
Αργίλιο	200 µg/l
Αμμώνιο	0,50 mg/l
Χλωριούχα Άλατα	250 mg/l
<i>Clostridium perfringens</i>	0 (αριθμός/100 ml)
Χρώμα	Αποδεκτό για τους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής
Αγωγιμότητα	2500 µS cm ⁻¹ στους 20 °C
Συγκέντρωση Ιόντων	≥6,5 και ≤9,5
Υδρογόνου	

Σίδηρος	200 µg/l
Μαγγάνιο	50 µg/l
Οσμή	Αποδεκτή για τους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής
Οξειδωσιμότητα	5,0 mg/l O ₂
Θεικά Άλατα	250 mg/l
Νάτριο	200 mg/l
Γεύση	Αποδεκτό για τους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής
Αριθμός Αποικιών σε 22 °C	Άνευ ασυνήθους μεταβολής
Κολοβακτηριοειδή	0 (αριθμός/100 ml)
Ολικός Οργανικός Άνθρακας (TOC)	Άνευ ασυνήθους μεταβολής
Θολότητα	Αποδεκτή για τους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής
Ραδιενέργεια	
Τρίτιο	100 becquerel/l
Ολική Ενδεικτική Δόση	0,10 mSv/έτος

3.4 Συστήματα Επεξεργασίας Πόσιμου Νερού

Ο σκοπός των συστημάτων επεξεργασίας νερού είναι η βελτίωση της ποιότητας του νερού που αντλείται από τις εκάστοτε πηγές υδροδότησης, έτσι ώστε να πληροί τις προδιαγραφές της Οδηγίας 98/83/ΕΚ που αναφέρεται στο πόσιμο νερό. Το είδος της επεξεργασίας που θα επιλεγεί διαφοροποιείται ανάλογα με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού στην πηγή υδροδότησης. Το πλέον τυπικό σχήμα επεξεργασίας στην περίπτωση επιφανειακών υδάτων περιλαμβάνει τις ακόλουθες διεργασίες:



Σχήμα 3.6 Τυπικό διάγραμμα διεργασιών που πραγματοποιούνται κατά την επεξεργασία του πόσιμου νερού.

3.4.1 Κροκίδωση – Συσσωμάτωση

Το νερό που αντλείται από την πηγή υδροδότησης είναι πιθανό να περιέχει αιωρούμενα σωματίδια πολύ μικρού μεγέθους (*κολλοειδή*) που δεν είναι εφικτό να καθιζήσουν ή να απομακρυνθούν κατά τη διήθηση. Τα συγκεκριμένα σωματίδια παραμένουν σε αιώρηση εξαιτίας του αρνητικού επιφανειακού τους φορτίου που τα απωθεί. Με τη χρήση χημικών ουσιών που ονομάζονται *κροκιδωτικά* εξουδετερώνεται το φορτίο των σωματιδίων και ευνοείται η προσέγγισή τους και ο σχηματισμός μεγαλύτερων συσσωματωμάτων. Ως κροκιδωτικά έχουν χρησιμοποιηθεί ουσίες όπως $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 18 \text{H}_2\text{O}$, FeCl_3 , FeSO_4 , καθώς και οργανικές πολυμερείς ενώσεις που ονομάζονται πολυηλεκτρολύτες.

Η προσθήκη του κροκιδωτικού πραγματοποιείται σε δεξαμενή με μέσο χρόνο παραμονής που κυμαίνεται μεταξύ 30-60sec, υπό συνθήκες ταχείας ανάμιξης. Η ταχεία ανάμιξη στοχεύει στην ομοιόμορφη διασπορά του διαλύματος του κροκιδωτικού στη μάζα του προς επεξεργασία νερού. Σε επόμενη δεξαμενή όπου επικρατούν συνθήκες αργής ανάμιξης και χρόνος παραμονής ίσος με μίση ώρα, πραγματοποιείται η *συσσωμάτωση*. Η μίξη στη συγκεκριμένη δεξαμενή θα πρέπει να ενθαρρύνει την επαφή μεταξύ των αιωρουμένων

σωματιδίων και την αύξηση του μεγέθους τους, αλλά δεν θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα έντονη διότι προκαλείται θραύση των συσσωματωμάτων.

3.4.2 Καθίζηση

Μετά τη συσσωμάτωση, το νερό οδηγείται στη δεξαμενή καθίζησης. Σκοπός της συγκεκριμένης δεξαμενής είναι η παραμονή του νερού σε αυτή για χρονικό διάστημα που θα είναι επαρκές για την καθίζηση των αιωρούμενων στερεών. Ο χρόνος παραμονής στις συγκεκριμένες δεξαμενές κυμαίνεται μεταξύ 1-10 ώρες και υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης 1.15.

$$\theta = \frac{V}{Q} \quad (3.15)$$

Όπου:

θ = ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (ώρες)

V = ο όγκος της δεξαμενής (m^3)

Q = η παροχή του εισερχόμενου νερού ($m^3/ώρα$)

Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος παραμονής τόσο πιο ικανοποιητική θα είναι η απομάκρυνση των στερεών αλλά και μεγαλύτερος ο απαιτούμενος όγκος της δεξαμενής. Τα αιωρούμενα στερεά που συσσωρεύονται στον πυθμένα απομακρύνονται με τη βοήθεια αντλίας, ενώ το επεξεργασμένο νερό απομακρύνεται από την υπερχειλίση της δεξαμενής.

3.4.3 Διήθηση

Κατά τη διεργασία της διήθησης απομακρύνονται από το νερό αιωρούμενα στερεά και κολλοειδή μέσω της διέλευσής του από πορώδες μέσο, όπως στρώμα άμμου ή άλλο κοκκώδες υλικό. Ο βαθμός συγκράτησης των σωματιδίων του νερού στο φίλτρο εξαρτάται από το μέγεθος τους σε σχέση με το μέγεθος των κενών του διηθητικού μέσου. Τα μεγαλύτερα σωματίδια κατακρατούνται στην επιφάνεια του διηθητικού μέσου, ενώ μεγάλο μέρος των μικρών σωματιδίων διεισδύει και συγκρατείται σε κάποιο βάθος από την επιφάνεια. Καθώς όμως αρχίζει να δημιουργείται στην επιφάνεια ένα λεπτό στρώμα από κατακρατημένο υλικό, εμποδίζεται η διέλευση των μικρότερων σωματιδίων με συνέπεια να κατακρατούνται και αυτά στο επιφανειακό στρώμα. Ως αποτέλεσμα, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα λειτουργίας τα συγκρατούμενα σωματίδια προκαλούν έμφραξη στο

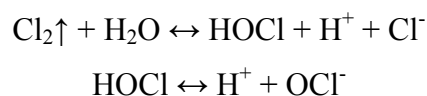
φίλτρο και παρατηρείται αύξηση της πτώσης πίεσης και μείωση της απόδοσης της διήθησης. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται καθαρισμός του φίλτρου, μέσω αντιστροφής της ροής του νερού. Η ταχύτητα ροής του νερού μέσα από τα φίλτρα κυμαίνεται μεταξύ 4-25 m/ώρα, ενώ καθαρισμός των φίλτρων πραγματοποιείται συνήθως κάθε 12-72 ώρες.

Οι κύριοι μηχανισμοί που συμβάλλουν στη συγκράτηση των σωματιδίων από το διηθητικό υλικό είναι:

- A) *Κατακράτηση*, σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από το μέγεθος των κενών που δημιουργεί το διηθητικό μέσο συγκρατούνται στην επιφάνεια
- B) *Καθίζηση*, τα σωματίδια επικάθονται επάνω στους κόκκους του διηθητικού μέσου
- Γ) *Προσκόλληση*, τα κροκιδωμένα σωματίδια προσκολλούνται στην επιφάνεια των κόκκων
- Δ) *Φυσική ή χημική προσρόφηση*, τα σωματίδια που έχουν έρθει σε επαφή με το διηθητικό μέσο προσκολλούνται στην επιφάνειά του με χημικούς δεσμούς ή με τη βοήθεια ηλεκτροστατικών δυνάμεων ή δυνάμεων van der Waals.

3.4.4 Απολύμανση

Στις διεργασίες που περιγράφηκαν παραπάνω απομακρύνεται το μεγαλύτερο ποσοστό των αιωρούμενων στερεών και ένα μόνο μικρό μέρος των βακτηρίων. Στόχος της διεργασίας της απολύμανσης είναι η απομάκρυνση και των υπολοίπων παθογόνων μικροοργανισμών. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος απολύμανσης είναι η χλωρίωση με τη χρήση αερίου χλωρίου (Cl_2), υποχλωριώδους νατρίου (NaOCl) ή υποχλωριώδους ασβεστίου (Ca(OCl)_2). Οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά τη χλωρίωση δίνονται στη συνέχεια:



Οι χημικές μορφές HOCl και OCl^- αποτελούν το ελεύθερο διαθέσιμο χλώριο. Το κύριο πλεονέκτημα της χλωρίωσης έναντι των άλλων μεθόδων απολύμανσης είναι το γεγονός ότι, το υπολειμματικό χλώριο συνεχίζει να δρα και μετά την έξοδο του νερού από τη μονάδα επεξεργασίας, προστατεύοντας το νερό από επιμόλυνση που μπορεί να συμβεί στο δίκτυο ύδρευσης. Το κύριο μειονέκτημα της χλωρίωσης είναι ο σχηματισμός τριαλογονομένων μεθανίων (THMs), όπως το καρκινογόνο χλωροφόρμιο (CHCl_3). Ο σχηματισμός των THMs προκαλείται από την ένωση του χλωρίου με οργανικές ενώσεις που είναι παρούσες

στο νερό. Η απομάκρυνση των συγκεκριμένων οργανικών ενώσεων πριν τη χλωρίωση, μειώνει σημαντικά το σχηματισμό των THMs.

Ως απολυμαντικά έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης ουσίες όπως οι χλωραμίνες, το διοξείδιο του χλωρίου και το όζον. Τα συγκεκριμένα απολυμαντικά δεν σχηματίζουν THMs, παρουσιάζουν όμως άλλα μειονεκτήματα. Οι χλωραμίνες δεν είναι ιδιαίτερα δραστικά απολυμαντικά και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλες ουσίες. Το διοξείδιο του χλωρίου (ClO_2) είναι ιδιαίτερα δραστικό ως απολυμαντικό, αλλά έχει υψηλό κόστος. Τέλος το όζον (O_3) είναι ιδιαίτερα δραστικό, αλλά δεν έχει υπολειμματική δράση στο επεξεργασμένο νερό.

3.5 Συστήματα Επεξεργασίας Υγρών Αστικών Αποβλήτων

Τα αστικά απόβλητα αποτελούνται κατά το 99,9% από νερό. Η σύνθεση των αποβλήτων παρουσιάζεται στη δεύτερη στήλη του Πίνακα 3.6.

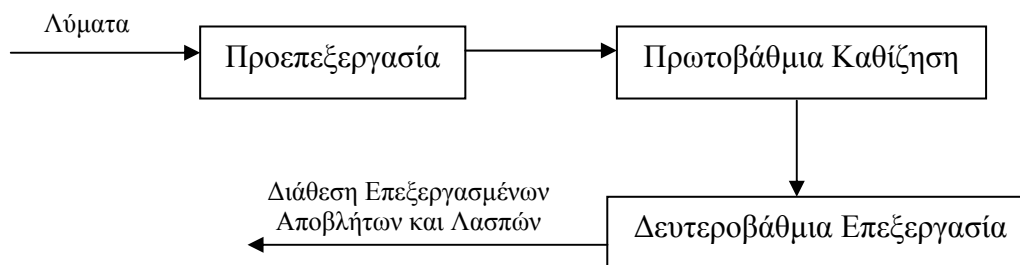
Πίνακας 3.6 Σύνθεση υγρών αστικών αποβλήτων (Masters, 1996)

Χαρακτηριστικά	Συγκέντρωση (mg/l)	Όρια Οδηγίας 91/271
BOD ₅	100-300	≤ 25
COD	250-1000	≤ 125
Αιωρούμενα Στερεά	100-350	≤ 35 ^A
Ολικό Άζωτο (Kjeldahl)	20-80	≤ 10 ^B
Ολικός Φώσφορος	5-20	≤ 1 ^B

^AΓια πληθυσμό άνω των 10000 κατοίκων

^BΓια πληθυσμό άνω των 100000 κατοίκων

Κατά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων επιδιώκεται η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών, η μείωση του οργανικού φορτίου των λυμάτων και των ενώσεων του αζώτου και του φωσφόρου. Ένα τυπικό σύστημα επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:



Σχήμα 3.7 Τυπικό διάγραμμα διεργασιών που πραγματοποιούνται κατά την επεξεργασία των υγρών αστικών αποβλήτων.

Η ποιότητα των εκροών μονάδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων καθορίζεται από την Οδηγία 91/271 της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η συγκεκριμένη Οδηγία επιβάλλει σε οικισμούς με πληθυσμό μεταξύ των 2000 και 10000 κατοίκων την κατασκευή δικτύου αποχέτευσης μέχρι τις 31/12/2005 και την κατασκευή δευτεροβάθμιας επεξεργασίας (μέχρι 31/12/2005) στην περίπτωση που τα λύματα αποβάλλονται σε επιφανειακά νερά και εκβολές ποταμών. Για μεγαλύτερους οικισμούς η κατασκευή δικτύου αποχέτευσης και συστήματος

δευτεροβάθμιας επεξεργασίας των αποβλήτων είναι απαραίτητη ανεξάρτητα από το σημείο διάθεσης των επεξεργασμένων αποβλήτων. Η ίδια Οδηγία καθορίζει οριακές τιμές σε μία σειρά παραμέτρων των επεξεργασμένων αποβλήτων (Πίνακας 3.6, 3^η στήλη).

3.5.1 Προεπεξεργασία

Στο στάδιο της προεπεξεργασίας επιδιώκεται η απομάκρυνση αντικειμένων που επιπλέουν ή βρίσκονται σε αιώρηση στα λύματα και που εγκυμονούν κινδύνους έμφραξης των αγωγών, φθοράς του μηχανολογικού εξοπλισμού και δυσλειτουργίας των συστημάτων επεξεργασίας που ακολουθούν. Στο πρώτο στάδιο της προεπεξεργασίας επιδιώκεται η απομάκρυνση των ογκωδών αντικειμένων (χαρτιά, κουρέλια, πλαστικά υλικά). Για το λόγο αυτό τα λύματα περνούν μέσα από μεταλλικές σχάρες που έχουν τοποθετηθεί σε κατακόρυφη ή κεκλιμένη θέση και απέχουν μεταξύ τους 2 με 7 cm (εσχάρωση). Στη συνέχεια, τα απόβλητα περνούν μέσα από δεξαμενή (εξαμμωτή) όπου παραμένουν για μερικά λεπτά, ώστε να καθιζήσουν τα βαρύτερα σωματίδια (άμμος, ανόργανα συστατικά).

3.5.2 Πρωτοβάθμια Καθίζηση

Στόχος της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας είναι η απομάκρυνση σημαντικού μέρους του οργανικού υλικού των λυμάτων που βρίσκεται σε σωματιδιακή μορφή. Για το λόγο αυτό, τα λύματα οδηγούνται στη δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης, όπου παραμένουν για χρονικό διάστημα 2-3 ωρών. Στη συγκεκριμένη δεξαμενή επιτυγχάνεται απομάκρυνση 50-65% των αιωρούμενων στερεών και 25-40% του BOD. Οι δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης είναι κυκλικές ή ορθογωνικές. Στις κυκλικές δεξαμενές τα λύματα εισέρχονται από το κέντρο της δεξαμενής, ενώ τα επεξεργασμένα απόβλητα απομακρύνονται από την υπερχειλίση που βρίσκεται περιμετρικά. Τα αιωρούμενα στερεά που καθιζάνουν αποτελούν την πρωτοβάθμια ιλύ (λάσπη) και απομακρύνονται με τη βοήθεια αντλιών.

Ένα από τα σχεδιαστικά κριτήρια της δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης είναι το επιφανειακό φορτίο (εξίσωση 3.16), που λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 15 και 30 m³/ημέρα και m².

$$\text{Επιφανειακό Φορτίο} = \frac{Q}{A} \quad (3.16)$$

Όπου:

Q = μέση ημερήσια παροχή (m³/ημέρα)

A = επιφάνεια δεξαμενής (m²)

Παράδειγμα 3.7

Σε πόλη 30000 κατοίκων παράγεται $0,5 \text{ m}^3$ αποβλήτων ανά κάτοικο και ημέρα. Τα απόβλητα διοχετεύονται μέσω του αποχετευτικού δικτύου σε κυκλική δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης. Αν ο υδραυλικός χρόνος παραμονής στη δεξαμενή ισούται με 2,5 ώρες και το επιφανειακό φορτίο με $20 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ ανά m^2 , να υπολογιστούν οι διαστάσεις της δεξαμενής;

Λύση:

Η ημερήσια παροχή των αποβλήτων στην πόλη ισούται με:

$$Q = 30000 \text{ κάτοικοι} \times 0,5 \text{ m}^3/\text{ημέρα} \Rightarrow$$

$$Q = 15000 \text{ m}^3/\text{ημέρα} \text{ ή } 625 \text{ m}^3/\text{ώρα}$$

Από την εξίσωση 3.16 υπολογίζεται το εμβαδόν της δεξαμενής:

$$A = \frac{Q}{\text{ΕπιφανειακόΦορτίο}} \Rightarrow$$

$$A = 15000 \text{ m}^3/\text{ημέρα} / 20 \text{ m}^3/\text{ημέρα ανά m}^2 \Rightarrow$$

$$A = 750 \text{ m}^2$$

Εφόσον η δεξαμενή είναι κυκλική, το εμβαδόν της ισούται με:

$$A = (\pi/4) \times d^2$$

Όπου d η διάμετρος της δεξαμενής και $\pi = 3,14$. Λύνοντας ως προς d προκύπτει:

$$\text{Διάμετρος} = \mathbf{d = 30,9 \text{ m}}$$

Από την εξίσωση 3.15 υπολογίζεται ο όγκος της δεξαμενής:

$$V = \theta \times Q \Rightarrow$$

$$V = 2,5 \text{ ώρες} \times 625 \text{ m}^3/\text{ώρα} \Rightarrow$$

$$V = 1562,5 \text{ m}^3$$

Δεδομένου ότι:

$$V = A \times H$$

Όπου:

V = ο όγκος της δεξαμενής

A = το εμβαδόν της δεξαμενής

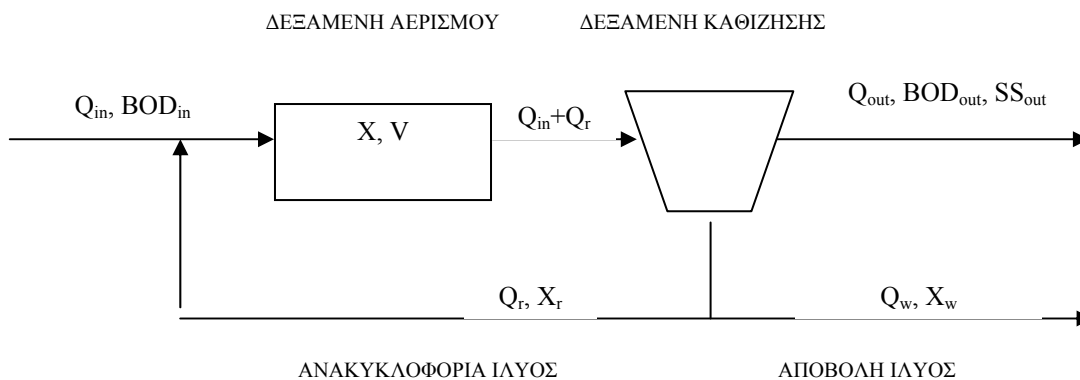
H = το ύψος της δεξαμενής

$$\text{Υπολογίζεται ύψος } \mathbf{H = 2,08 \text{ m}}$$

3.5.3 Δευτεροβάθμια Επεξεργασία

3.5.3.1 Μέθοδος Ενεργού Ιλύος

Η μέθοδος της ενεργού ιλύος είναι σήμερα η πιο διαδεδομένη μέθοδος βιολογικής επεξεργασίας των αστικών υγρών αποβλήτων. Από την πρώτη εφαρμογή της μεθόδου σε μονάδα συνεχούς ροής (1913) μέχρι σήμερα, ένας σημαντικός αριθμός παραλλαγών της έχει αναπτυχθεί, προσδίδοντας ιδιαίτερη ευελιξία στη χρήση της. Στην απλούστερη μορφή του, ένα σύστημα ενεργού ιλύος συνεχούς ροής αποτελείται από δύο δεξαμενές σε σειρά, τη δεξαμενή αερισμού και τη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης (Σχήμα 3.8). Στη δεξαμενή αερισμού, τα εισερχόμενα λύματα έρχονται σε επαφή με αιωρούμενα συσσωματώματα μικροοργανισμών (βιοκροκίδες), υπό αερόβιες συνθήκες. Μέρος του οργανικού φορτίου οξειδώνεται σε απλά τελικά προϊόντα (CO_2 , H_2O , NO_3^-), ενώ το υπόλοιπο μετατρέπεται σε νέο κυτταρικό υλικό. Στη συνέχεια, το μίγμα αποβλήτων και μικροβιακής βιομάζας (μικτό υγρό) οδηγείται στη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης, όπου υπό συνθήκες ηρεμίας οι βιοκροκίδες διαχωρίζονται με καθίζηση (ιλύς). Μέρος της ιλύος ανακυκλοφορεί στη δεξαμενή αερισμού για τη διατήρηση επαρκούς συγκέντρωσης βιομάζας για την αποδόμηση των λυμάτων, ενώ το υπερκείμενο υγρό οδηγείται για περαιτέρω επεξεργασία ή καταλήγει στον τελικό αποδέκτη (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8 Σχηματικό διάγραμμα της διεργασίας της ενεργού ιλύος

Για την ικανοποιητική απόδοση της διεργασίας της ενεργού ιλύος, οι μικροοργανισμοί στην δεξαμενή αερισμού πρέπει να εμφανίζονται με τη μορφή συσσωματωμάτων, που ονομάζονται βιοκροκίδες. Ο σωστός σχηματισμός βιοκροκίδων συμβάλει τόσο στην απομάκρυνση του οργανικού φορτίου στη δεξαμενή αερισμού, μέσω των διεργασιών της απορρόφησης και προσρόφησης, όσο και στο διαχωρισμό των αιωρούμενων στερεών από

τα επεξεργασμένα απόβλητα στη δεξαμενή καθίζησης. Σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό των βιοκροκίδων παίζει η παρουσία εξωκυτταρικών πολυμερών που παράγονται από διάφορα είδη μικροοργανισμών της ενεργού ιλύος και αποτελούνται από πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, νουκλεϊκά οξέα και λιπίδια.

Ιδιαίτερη σημασία για την ομαλή λειτουργία μίας μονάδας ενεργού ιλύος έχει επίσης η διατήρηση στη δεξαμενή αερισμού περιβαλλοντικών συνθηκών που ευνοούν τη δράση των μικροοργανισμών. Τέτοιες συνθήκες είναι η επίτευξη συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου μεγαλύτερης του 1-2 mg/l, η διατήρηση της τιμής του pH σε επίπεδα μεταξύ 6.5-8.0 και η ικανοποίηση λόγου BOD:N:P ίσου με 100:6:1.

Τέλος, σημαντική είναι η ικανοποίηση των τιμών μίας σειράς λειτουργικών παραμέτρων της μονάδας, οι σπουδαιότερες των οποίων είναι οι εξής:

- *Υδραυλικός χρόνος παραμονής των λυμάτων στη δεξαμενή αερισμού (θ)*, λαμβάνει τιμές από 3.5-36 ώρες και εκφράζει τον μέσο χρόνο αερισμού των λυμάτων (εξίσωση 3.15).
- *Χρόνος παραμονής των μικροοργανισμών στο σύστημα (θ_c)*, λαμβάνει τιμές από 3-40 ημέρες και εκφράζει την ηλικία των μικροοργανισμών στο σύστημα.

$$\theta_c = \frac{(MLVSS \times V)}{(Q_{out} \times SS_{out}) + (Q_w \times X_w)} \quad (3.17)$$

Όπου:

MLVSS = η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών στη δεξαμενή αερισμού (mg MLVSS/l)

V = ο όγκος της δεξαμενής αερισμού (m³)

Q_w = η παροχή της αποβαλλόμενης ιλύος (m³/ώρα)

Q_{out} = Q_{in} - Q_w = η παροχή των επεξεργασμένων αποβλήτων (m³/ώρα)

SS_{out} = η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών στα επεξεργασμένα απόβλητα (mg MLVSS/l)

X_w = η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών στην αποβαλλόμενη ιλύ (mg MLVSS/l)

- *Φορτίο ιλύος (F/M)*, λαμβάνει τιμές από 0.05-1.0 Kg BOD₅ ανά Kg βιομάζας ανά ημέρα και εκφράζει το λόγο τροφής προς μικροοργανισμούς στη δεξαμενή αερισμού.

$$F / M = \frac{(Q_{in} \times BOD_{in})}{(MLVSS \times V)} \quad (3.18)$$

Όπου:

Q_{in} = η παροχή των εισερχόμενων αποβλήτων στη δεξαμενή αερισμού ($m^3/ώρα$)

BOD_{in} = η συγκέντρωση του οργανικού φορτίου στα εισερχόμενα απόβλητα (mg/l BOD)

MLVSS = η συγκέντρωση της βιομάζας στη δεξαμενή αερισμού (mg MLVSS/l)

V = ο όγκος της δεξαμενής αερισμού (m^3)

- Υδραυλικό φορτίο δεξαμενής καθίζησης, λαμβάνει τιμές από $12-41 m^3$ ημέρα⁻¹ και εκφράζει τον όγκο λυμάτων που εφαρμόζονται ανά ημέρα στη δεξαμενή καθίζησης (εξίσωση 3.16).

Παράδειγμα 3.8

Μονάδα ενεργού ιλύος επεξεργάζεται $20000 m^3/ημέρα$ υγρά απόβλητα με BOD εισόδου $300 mg/l$. Ο συνολικός όγκος των δεξαμενών αερισμού είναι $10000 m^3$ και η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών σε αυτές $2700 mg/l$. Να υπολογιστεί η ελάχιστη απαιτούμενη απόδοση της μονάδας ώστε να εκπληρώνεται το όριο της Οδηγίας 91/271 για τα επεξεργασμένα απόβλητα. Να υπολογιστεί ο χρόνος παραμονής των λυμάτων στη δεξαμενή αερισμού δεδομένου ότι η παροχή της ανακυκλοφορούσας ιλύος ισούται με $5000 m^3/ημέρα$. Να υπολογιστεί η τιμή του φορτίου ιλύος.

Λύση:

A) Η Οδηγία 91/271 ορίζει τιμή του BOD στα επεξεργασμένα απόβλητα μικρότερη ή ίση των $25mg/l$. Άρα για να εκπληρώνεται ο στόχος της συγκεκριμένης Οδηγίας, θα πρέπει η μονάδα να έχει ελάχιστη απόδοση ίση με:

$$E = 100 \times \frac{(BOD_{in} - BOD_{out})}{BOD_{in}} \Rightarrow$$

$$E = 100 \times \frac{(300mg/l - 25mg/l)}{300mg/l} \Rightarrow$$

$$E = 91,7 \%$$

B) Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής των λυμάτων στη δεξαμενή αερισμού υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης 3.15:

$$\theta = \frac{V}{Q} \Rightarrow$$

$$\theta = 10000 m^3 / 25000 m^3/ημέρα \Rightarrow$$

$$\theta = 0,4 \text{ ημέρες} = 9,6 \text{ ώρες}$$

(Όπου $Q = Q_{in} + Q_r = 20000 + 5000 = 25000 m^3/ημέρα$)

Γ) Η τιμή του φορτίου ιλύος υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης 3.18:

$$F / M = \frac{(Q_{in} \times BOD_{in})}{(MLVSS \times V)} \Rightarrow$$

$$F/M = (20000 \text{ m}^3/\text{ημέρα} \times 300 \text{ mg/l}) / (2700 \text{ mg/l} \times 10000 \text{ m}^3) \Rightarrow$$

$$F/M = \mathbf{0,22 \text{ mg BOD}_5 \text{ ανά mg βιομάζας ανά ημέρα}}$$

Παράδειγμα 3.9

Η μονάδα επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων της Μυτιλήνης δέχεται 4000 m³ αποβλήτων ημερησίως. Η συγκέντρωση του BOD των λυμάτων στο αποχετευτικό δίκτυο ισούται με 350 mg/l. Μετά την πρωτοβάθμια καθίζηση η συγκέντρωση του BOD έχει μειωθεί κατά 40%. Αν ο υδραυλικός χρόνος παραμονής στη δεξαμενή αερισμού ισούται με 12 ώρες και η παροχή της ανακυκλοφορούσας ιλύος με 1800 m³ να υπολογιστεί ο όγκος της δεξαμενής αερισμού. Αν η παροχή της αποβαλλόμενης ιλύος ισούται με 100 m³ / ημέρα, η συγκέντρωση των αιωρουμένων στερεών στην αποβαλλόμενη ιλύ με 8000 mg/l, η συγκέντρωση των αιωρουμένων στερεών στην έξοδο της μονάδας με 20 mg/l και η συγκέντρωση των αιωρουμένων στερεών στη δεξαμενή αερισμού με 2500 mg/l να υπολογιστεί η ηλικία ιλύος τα μονάδας. Να υπολογιστεί το φορτίο της ιλύος και να φτιαχτεί γράφημα που θα αναπαριστά τις τιμές των παροχών και τις συγκεντρώσεις του BOD και των αιωρουμένων στερεών στα διάφορα σημεία της μονάδας.

Λύση:

A) Ο όγκος της δεξαμενής αερισμού υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης 3.15:

$$V = \theta \times Q \Rightarrow$$

$$V = 0,5 \text{ ημέρες} \times 5800 \text{ m}^3/\text{ημέρα} \Rightarrow$$

$$V = \mathbf{2900 \text{ m}^3}$$

B) Η παροχή των επεξεργασμένων αποβλήτων ισούται με:

$$Q_{out} = Q_{in} - Q_w = 3900 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

Η ηλικία ιλύος της μονάδας υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης 3.17:

$$\theta_c = (2500 \text{ mg/l} \times 2900 \text{ m}^3) / (3900 \text{ m}^3/\text{ημέρα} \times 20 \text{ mg/l}) + (100 \text{ m}^3/\text{ημέρα} \times 8000 \text{ mg/l})$$

$$\theta_c = \mathbf{8,3 \text{ ημέρες}}$$

Γ) Δεδομένου ότι στην πρωτοβάθμια καθίζηση απομακρύνεται το 40% του εισερχόμενου BOD τότε το BOD στην είσοδο της δεξαμενής αερισμού θα ισούται με:

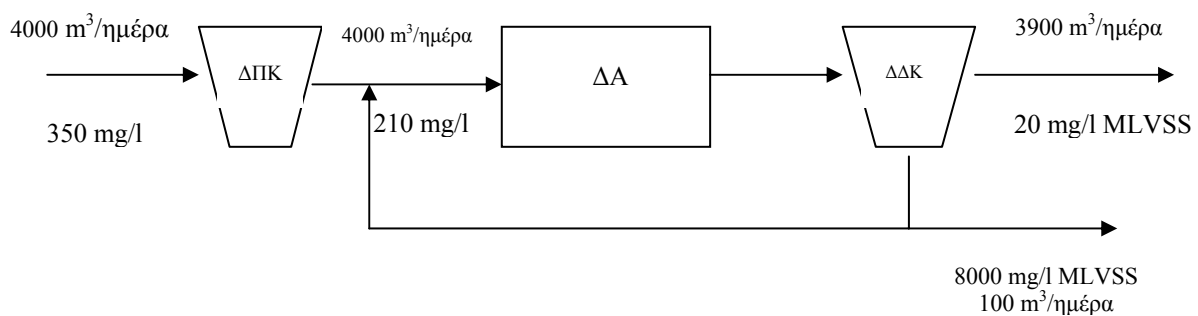
$$BOD_{in \Delta A} = 0,6 \times 350 \text{ mg/l} = 210 \text{ mg/l}$$

Το φορτίο ιλύος υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης 3.18:

$$F / M = \frac{(Q_{in} \times BOD_{in})}{(MLVSS \times V)} \Rightarrow$$

$$F/M = (4000 \text{ m}^3/\text{ημέρα} \times 210 \text{ mg/l}) / (2500 \text{ mg/l} \times 2900 \text{ m}^3) \Rightarrow$$

$$F/M = \mathbf{0,116 \text{ mg BOD}_5 \text{ ανά mg βιομάζας ανά ημέρα}}$$

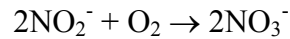


3.5.3.2 Απομάκρυνση Αζώτου - Φωσφόρου

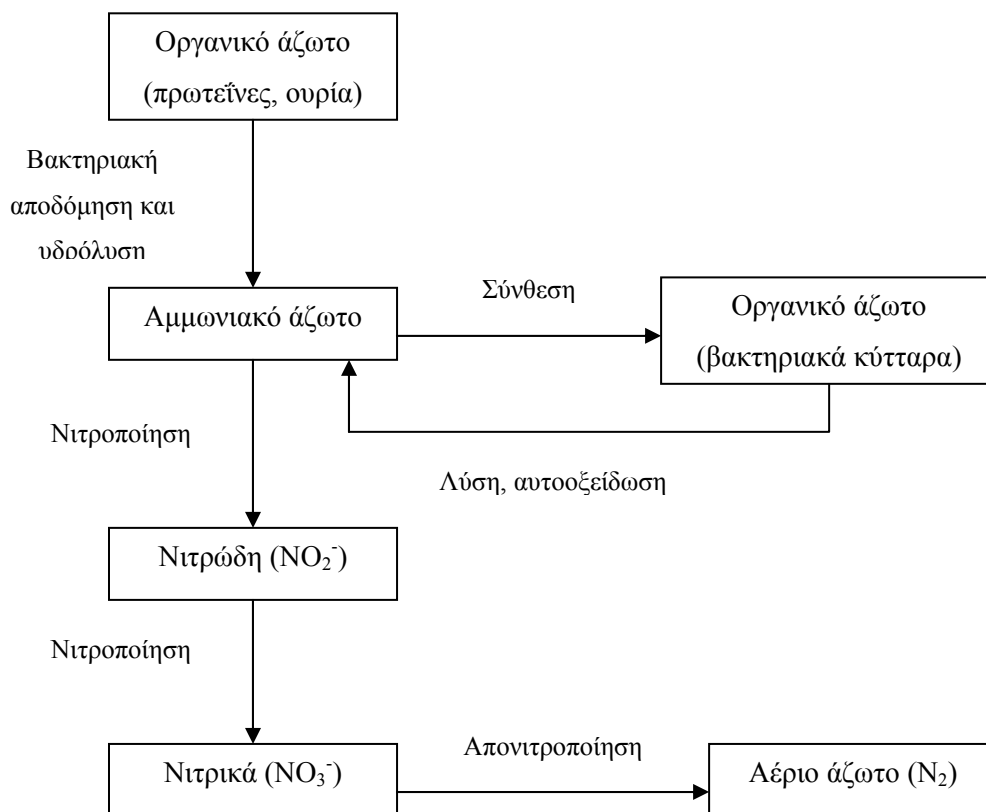
Η παρουσία ενώσεων αζώτου και φωσφόρου στα εισερχόμενα λύματα και η συμβολή τους στο φαινόμενο του ευτροφισμού, καθιστούν συχνά αναγκαία την απομάκρυνση τους κατά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων.

Από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους απομάκρυνσης των ενώσεων του αζώτου σε μονάδες ενεργού ιλύος είναι η βιολογική νιτροποίηση και απονιτροποίησή τους, που επιτυγχάνεται με την εναλλαγή αερόβιων και ανοξικών συνθηκών. Σε ότι αφορά στις ενώσεις του φωσφόρου, συχνή είναι η βιολογική απομάκρυνσή τους σε συστήματα που περιλαμβάνουν και αναερόβιες δεξαμενές. Στο αποχετευτικό δίκτυο το οργανικό άζωτο γρήγορα μετατρέπεται σε ουρία και αυτή με την σειρά της υδρολύεται σε αμμωνία (Σχήμα 3.9). Στις μονάδες ενεργού ιλύος, η αμμωνία σε ένα μικρό ποσοστό χρησιμοποιείται στη σύνθεση των ετερότροφων μικροοργανισμών (Σχήμα 3.9), ενώ το υπόλοιπο τμήμα της οξειδώνεται από τα αυτότροφα νιτροποιά βακτήρια (νιτροποιητές) μέσω της διεργασίας της νιτροποίησης που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.2.1.3:





Οι νιτροποιητές είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι μικροοργανισμοί με συνέπεια η νιτροποίηση να επηρεάζεται από μία σειρά παραγόντων, όπως τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου, την ηλικία ιλύος, τις τιμές της θερμοκρασίας και του pH, την ύπαρξη τοξικών ουσιών στα απόβλητα. Η νιτροποίηση επιτυγχάνεται στους αερόβιους αντιδραστήρες (δεξαμενές αερισμού) που χρησιμοποιούνται και για την απομάκρυνση του ανθρακογενούς υποστρώματος.



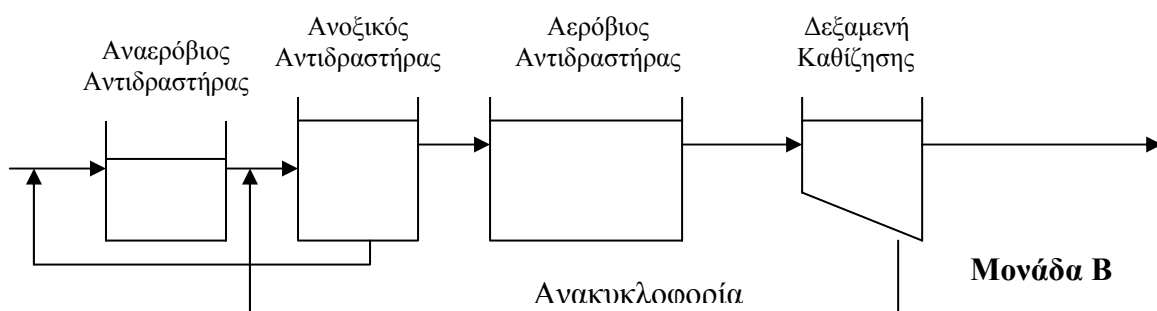
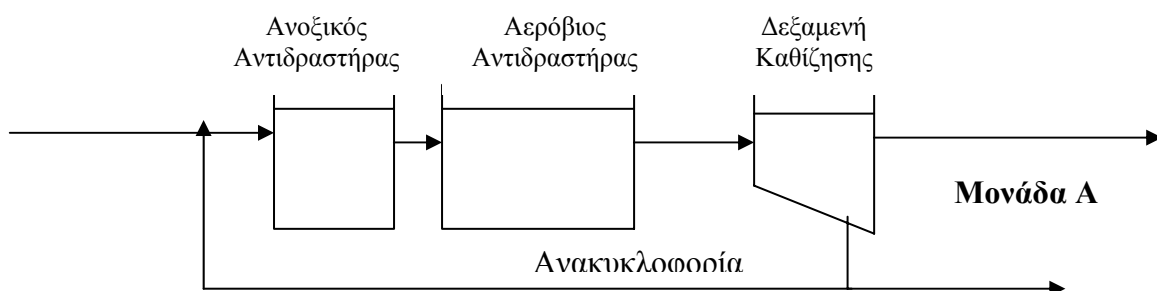
Σχήμα 3.9 Απεικόνιση μετατροπής των ενώσεων του αζώτου, σε σύστημα ενεργού ιλύος που πραγματοποιεί νιτροποίηση-απονιτροποίηση.

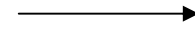
Η μετατροπή των νιτρικών σε αέριο άζωτο επιτυγχάνεται μέσω της διεργασίας της απονιτροποίησης (Σχήμα 3.9). Ως απονιτροποίηση ορίζεται η αναγωγή των νιτρικών σε αέριο άζωτο, διεργασία που ακολουθεί τέσσερα στάδια:



Στη συγκεκριμένη διεργασία που πραγματοποιείται από ετερότροφα, απονιτροποιά βακτήρια, η διάσπαση των οργανικών ενώσεων ακολουθεί τις ίδιες βιοχημικές αντιδράσεις με την αερόβια αναπνοή με τη διαφορά ότι τελικός αποδέκτης των ηλεκτρονίων είναι το νιτρικό άζωτο. Τα απονιτροποιά βακτήρια αποκτούν την απαραίτητη ενέργεια για την αύξησή τους από την αναγωγή των νιτρικών, ενώ παράλληλα χρησιμοποιούν μία πηγή άνθρακα για τη σύνθεση των κυττάρων τους. Για τη μετατροπή των νιτρικών σε αέριο άζωτο, κατασκευάζονται συνήθως ανοξικοί αντιδραστήρες ανάντη των δεξαμενών αερισμού. Στους συγκεκριμένους αντιδραστήρες η απαραίτητη συγκέντρωση νιτρικών επιτυγχάνεται με την ανακυκλοφορία μέρους του μικτού υγρού από τη δεξαμενή καθίζησης στην ανοξική δεξαμενή (Σχήμα 3.10, Μονάδα Α).

Ο φώσφορος στα εισερχόμενα απόβλητα εμφανίζεται κυρίως ως ανόργανός φώσφορος (πολυφωσφορικές ρίζες). Η βιολογική απομάκρυνση του ανόργανου φωσφόρου επιτυγχάνεται με τη διαδοχή αναερόβιων - αερόβιων συνθηκών, που υποβοηθά την ανάπτυξη αερόβιων βακτηρίων με μεγαλύτερη ικανότητα ενδοκυτταρικής αποθήκευσης φωσφόρου (πολυφωσφορικά βακτήρια). Για το λόγο αυτό κατασκευάζονται αναερόβιοι αντιδραστήρες στην αρχή της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας. Για τη διατήρηση επαρκούς συγκέντρωσης μικροοργανισμών στην αναερόβια δεξαμενή, μέρος του μικτού υγρού από την ανοξική δεξαμενή ανακυκλοφορεί στην αναερόβια δεξαμενή (Σχήμα 3.10, Μονάδα Β).





Σχήμα 3.10 Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ενεργού ιλύος που επιτυγχάνει βιολογική απομάκρυνση αζώτου (Μονάδα Α) και βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου (Μονάδα Β).

3.5.3.3 Διάθεση Επεξεργασμένων Αποβλήτων και Λασπών

Η ιλύς που αποβάλλεται από τη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης συνήθως υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία που έχει ως στόχο τη μείωση του όγκου της (*πάχυνση*) και τη μείωση του οργανικού της φορτίου (*χώνευση*). Η διάθεση της επεξεργασμένης ιλύος γίνεται στους χώρους διάθεσης των στερεών απορριμμάτων (χωματερές, χώροι υγειονομικής ταφής). Σε περιπτώσεις που στην ιλύ δεν ανιχνεύονται σημαντικές συγκεντρώσεις τοξικών ουσιών, είναι δυνατή η χρήση της ως εδαφοβελτιωτικό.

Τα επεξεργασμένα απόβλητα της δεξαμενής δευτεροβάθμιας καθίζησης συνήθως υφίστανται απολύμανση για τη θανάτωση των παθογόνων μικροοργανισμών και στη συνέχεια διατίθενται στον τελικό αποδέκτη (επιφανειακά ύδατα, θάλασσα, έδαφος). Η εδαφική διάθεση των επεξεργασμένων αποβλήτων μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους όπως άρδευση, ταχεία διήθηση και επιφανειακή ροή.

Ασκήσεις

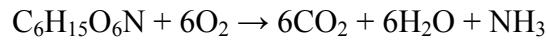
1. Τα εισερχόμενα λύματα μονάδας επεξεργασίας αστικών αποβλήτων έχουν BOD₅ ίσο με 200 mg/l, ενώ κατά την επεξεργασία τους επιτυγχάνεται μείωση του οργανικού φορτίου κατά 90%. Πρόκειται να πραγματοποιηθεί τεστ BOD₅ στα επεξεργασμένα λύματα. Θεωρώντας ότι η αρχική συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου είναι 9.2 mg/l, να υπολογιστεί: Α) ποιος ο μέγιστος όγκος των επεξεργασμένων λυμάτων που θα πρέπει να προστεθεί στη φιάλη BOD, ώστε η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο τέλος του τεστ να μην είναι μικρότερη των 2 mg/l (όγκος φιάλης BOD, 300 ml). Β) Αν κατά την έναρξη του τεστ, ο μισός όγκος της φιάλης BOD πληρωθεί με επεξεργασμένα λύματα και ο υπόλοιπος με νερό, να υπολογιστεί η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου που αναμένεται μετά από 5 ημέρες.
2. Τεστ BOD₅ πραγματοποιείται σε φιάλη που πληρώνεται με τέσσερα (4) μέρη νερού και ένα (1) μέρος αποβλήτων. Η αρχική συγκέντρωση του DO στη φιάλη είναι 9.0 mg/l, ενώ μετά από πέντε ημέρες 1.0 mg/l. Ποια είναι η τιμή του BOD₅;
3. Τα παρακάτω δεδομένα αποκτήθηκαν κατά την πραγματοποίηση τεστ BOD που πραγματοποιήθηκε για να εκτιμηθεί η απόδοση λειτουργίας μονάδας επεξεργασίας αστικών αποβλήτων. Τι ποσοστό του BOD απομακρύνεται από τη μονάδα επεξεργασίας των αποβλήτων; Αν η μονάδα έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί με απόδοση 85%, να απαντηθεί κατά πόσον εκπληρώνεται το συγκεκριμένο κριτήριο σχεδιασμού.

	Αρχικό DO (mg/l)	Τελικό DO (mg/l)	Όγκος αποβλήτων (ml)	Όγκος νερού (ml)
Εισερχόμενα Λύματα	6.0	2.0	5	295
Επεξεργασμένα Λύματα	9.0	4.0	15	285

4. Ένα τεστ BOD πραγματοποιείται με τη μίξη 100 ml επεξεργασμένων αποβλήτων και 200 ml νερού. Η αρχική συγκέντρωση DO στο μίγμα είναι 9.0 mg/l. Πέντε ημέρες μετά την έναρξη του τεστ, η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου είχε μειωθεί σε 4.0 mg/l. Ένα μεγάλο διάστημα μετά την έναρξη του τεστ, η συγκέντρωση του DO είχε πέσει στην τελική τιμή των 2.0 mg/l. Θεωρώντας ότι η νιτροποίηση είχε παρεμποδιστεί και ως εκ τούτου η μοναδική απαίτηση σε BOD ήταν η ανθρακογενής, να υπολογιστεί: Α) Η τιμή του BOD₅ στα απόβλητα, Β) Η ολική απαίτηση σε BOD, Γ) Ποια ήταν η τιμή

του υπολειμματικού BOD πέντε ημέρες μετά την έναρξη του τεστ, Δ) Να εκτιμηθεί η ταχύτητα της αντίδρασης k (ημέρες⁻¹).

5. Λίμνη περιέχει άλγη που αναπαρίστανται από την χημική ένωση $C_6H_{15}O_6N$ σε συγκέντρωση 10 mg/l. Χρησιμοποιώντας τις παρακάτω αντιδράσεις:



- A) Να υπολογιστεί η θεωρητική ανθρακογενής απαίτηση σε οξυγόνο.
 B) Να υπολογιστεί η θεωρητική ολική (ανθρακογενής και νιτρογενής) απαίτηση σε οξυγόνο.
6. Μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων αποβάλλει 1 m³/s επεξεργασμένων αποβλήτων συγκέντρωσης BOD ίσης με 40 mg/l, σε χείμαρρο που ρέει με παροχή 10 m³/s. Η συγκέντρωση του BOD στον χείμαρρο σε σημείο ανάντη της θέσης αποβολής των λυμάτων είναι 3.0 mg/l. Η σταθερά αποξυγόνωσης k_d ισούται με 0.22/day.
- A) Υποθέτοντας πλήρη και άμεση μίξη νερού και λυμάτων, να υπολογιστεί η τιμή του BOD κατάντη του σημείου εκροής των αποβλήτων.
 B) Υποθέτοντας ότι η διατομή του ποταμού ισούται με 55 m², ποια συγκέντρωση BOD αναμένεται να ανιχνευτεί 10 km κατάντη του σημείου αποβολής των λυμάτων.
 Γ) Θεωρώντας ότι η συγκέντρωση του DO των αποβλήτων είναι 4.0 mg/l, ενώ η συγκέντρωση του DO του ποταμού 8.0 mg/l. Να υπολογιστεί το αρχικό έλλειμμα σε οξυγόνο του μίγματος νερού-λυμάτων. Η θερμοκρασία του νερού και των λυμάτων θεωρείται ότι είναι 15 °C.
7. Η μοναδική πηγή BOD σε ποτάμι είναι τα μη επεξεργασμένα απόβλητα παρακείμενης κονσερβοποιίας. Η συγκέντρωση του DO ακριβώς στο σημείο διάθεσης των αποβλήτων είναι 10 mg/l και ισούται με τη συγκέντρωση κορεσμού, ενώ στο κρίσιμο σημείο η συγκέντρωση του DO είναι 3 mg/l. Δεδομένου ότι η ταχύτητα ροής του ποταμού είναι 60 Km/day και οι σταθερές k_r και k_d 0.8/day και 0.2/day, αντίστοιχα.
- A) Σε τι ποσοστό θα πρέπει να μειωθεί η συγκέντρωση του BOD των αποβλήτων, ώστε η συγκέντρωση του DO σε κανένα σημείο του ποταμού να μην είναι χαμηλότερη των 5 mg/l.
 B) Σε ποια απόσταση από το σημείο εκβολής των λυμάτων αναμένεται η χαμηλότερη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου.
 Γ) Ποια συγκέντρωση ολικού BOD (L_0) του μίγματος ποταμού και αποβλήτων στο σημείο διάθεσης των λυμάτων προκαλεί συγκέντρωση DO στο κρίσιμο σημείο ίση με 5 mg/l.

- Δ) Να φτιαχτεί το γράφημα της μεταβολής του DO για τις περιπτώσεις διάθεσης ανεπεξέργαστων και επεξεργασμένων αποβλήτων.
8. Πόλη πληθυσμού 200.000 κατοίκων απορρίπτει 40000 m³ λυμάτων ανά ημέρα συγκέντρωσης BOD 28 mg/l και DO 1.8 mg/l σε ποτάμι που έχει παροχή 300000 m³ ανά ημέρα και ταχύτητα ροής ίση με 1.5 m/s. Ανάντη του σημείου διάθεσης των λυμάτων η συγκέντρωση BOD του ποταμού είναι 3.6 mg/l, ενώ η συγκέντρωση του DO ίση με 7.6 mg/l. Η συγκέντρωση κορεσμού του DO ισούται με 8.5 mg/l. Η σταθερά αποξυγόνωσης, k_d είναι ίση με 0.61/day, ενώ ο συντελεστής επαναερισμού, k_r 0.76/day. Υποθέτοντας πλήρη μίξη αποβλήτων και ποταμού να βρεθεί:
- A) Το αρχικό έλλειμμα σε οξυγόνο και η συγκέντρωση του BOD κατάντη του σημείου διάθεσης των λυμάτων.
- B) Ο απαιτούμενος χρόνος και η απόσταση για να επιτευχθεί η ελάχιστη συγκέντρωση DO.
- Γ) Η ελάχιστη συγκέντρωση του DO.
- Δ) Η συγκέντρωση του DO που αναμένεται 10 km κατάντη του σημείου διάθεσης των λυμάτων.
9. Θεωρείστε λίμνη με εμβαδόν επιφανείας 100×10^6 m² για την οποία η μοναδική πηγή φωσφόρου είναι τα επεξεργασμένα λύματα μονάδας επεξεργασίας αστικών αποβλήτων. Η παροχή των συγκεκριμένων λυμάτων είναι 0.4 m³/s και η συγκέντρωση του φωσφόρου σε αυτά 10 mg/l. Στη λίμνη καταλήγει επίσης χείμαρρος με παροχή 20 m³/s και μηδενική συγκέντρωση φωσφόρου. Αν ο ρυθμός καθίζησης του φωσφόρου εκτιμάται σε 10m/έτος, να υπολογιστεί η μέση συγκέντρωση του φωσφόρου στη λίμνη. Για να επιτευχθεί συγκέντρωση φωσφόρου στη λίμνη ίση με 0.01 mg/l, ποια ποσοστιαία απομάκρυνση φωσφόρου θα πρέπει να επιτυγχάνεται στη μονάδα επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων;
10. Μία ορθογωνική δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης σχεδιάζεται για να δέχεται απόβλητα με παροχή 2000 m³ ανά ημέρα. Το επιφανειακό της φορτίο ισούται με 32 m³/m²-ημέρα, το βάθος της και το πλάτος της 2,4 και 4 m, αντίστοιχα. Να υπολογιστεί το μήκος της δεξαμενής και ο υδραυλικός χρόνος παραμονής σε αυτή.
11. Σε μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων καταλήγουν λύματα με παροχή 39000 m³/d. Το BOD στην είσοδο και την έξοδο της μονάδας ισούται αντίστοιχα με 210 και 10 mg/l. Ο χρόνος παραμονής των λυμάτων στη δεξαμενή αερισμού ισούται με 8 ώρες, ο λόγος παροχής ανακυκλοφορούσας ιλύς προς παροχή εισερχόμενων λυμάτων με 0,3 και το φορτίο ιλύος με 0,25 mg BOD₅ ανά mg βιομάζας ανά ημέρα. Θεωρώντας ότι πριν τη

δεξαμενή αερισμού υπάρχει δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης, όπου απομακρύνεται το 30% του BOD_{in} να υπολογιστεί η απόδοση της δεξαμενής αερισμού ως προς BOD, ο όγκος της δεξαμενής αερισμού και η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών στη δεξαμενή αερισμού.

12. Σε πόλη με πληθυσμό 50000 κατοίκους πρόκειται να κατασκευαστεί μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Αν θεωρήσουμε ότι ο όγκος των παραγόμενων αποβλήτων ανά κάτοικο ισούται με 200 l/ημέρα, το BOD των αποβλήτων στο αποχετευτικό δίκτυο με 350 mg/l να υπολογιστούν ο όγκος και η επιφάνεια της ορθογωνικής ΔΠΚ, η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών στη δεξαμενή αερισμού, ο όγκος της ΔΑ, η ηλικία ιλύος και το φορτίο ιλύος. Δίνονται επιφανειακό φορτίο ΔΠΚ, 20 m³/ημέρα και m², υδραυλικός χρόνος παραμονής στη ΔΠΚ, 2 ώρες, απόδοση ΔΠΚ ως προς BOD, 40%, παροχή ανακυκλοφορούσας ιλύος, 0,5 Q_{in}, παροχή αποβαλλόμενης ιλύος, 0,05 Q_{in}, συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών στην ανακυκλοφορούσα και αποβαλλόμενη ιλύ, 7000 mg/l, συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών στα επεξεργασμένα απόβλητα, 20 mg/l, μηδενική συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών στα εισερχόμενα απόβλητα και υδραυλικός χρόνος παραμονής στη ΔΑ, 10 ώρες.

4. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

4.1 Εισαγωγή

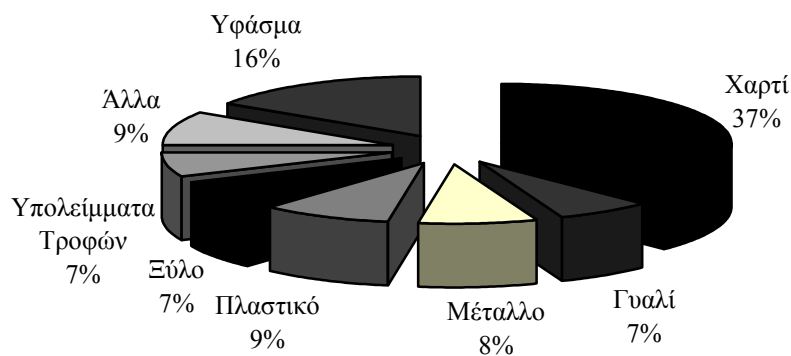
Ως στερεά αστικά απόβλητα ορίζονται τα στερεά απόβλητα που παράγονται από οικιστικές, εμπορικές και βιομηχανικές δραστηριότητες που πραγματοποιούνται εντός των ορίων μίας πόλης. Σε αυτά περιλαμβάνονται ζωικά και φυτικά υπολείμματα από την παρασκευή του φαγητού, μπουκάλια, πλαστικά, εφημερίδες, κουτιά αλουμινίου και υλικά συσκευασίας. Αντίθετα, δεν περιλαμβάνονται υλικά όπως υπολείμματα οικοδομικών εργασιών, λάσπες προερχόμενες από μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, τέφρα προερχόμενη από καύση υλικών και απόβλητα βιομηχανικών διεργασιών, ακόμη και αν τα συγκεκριμένα υλικά διατίθενται συχνά σε χώρους υγειονομικής ταφής αστικών απορριμμάτων.

Οι κατά άτομο παραγόμενες ποσότητες στερεών αστικών αποβλήτων διαφοροποιούνται ανάλογα με το βιοτικό επίπεδο και τις διατροφικές συνήθειες του πληθυσμού, τη συχνότητα συλλογής των απορριμμάτων, τη χρήση σκουπιδοφάγων, την ανάπτυξη προγραμμάτων ανακύκλωσης κ.α. Στις ευρωπαϊκές χώρες η ημερήσια παραγόμενη ποσότητα των στερεών αστικών αποβλήτων υπολογίζεται σε περίπου 1 Kg αποβλήτων ανά άτομο (Πίνακας 4.1). Στις Η.Π.Α. αντίθετα, η παραγωγή των στερεών αστικών αποβλήτων είναι σημαντικά υψηλότερη, προσεγγίζοντας τα 2 Kg αποβλήτων ανά άτομο και ημέρα.

Πίνακας 4.1 Παραγωγή και διάθεση στερεών αστικών αποβλήτων σε διάφορες χώρες (EPA, 1994; World Resources Institute, 1992).

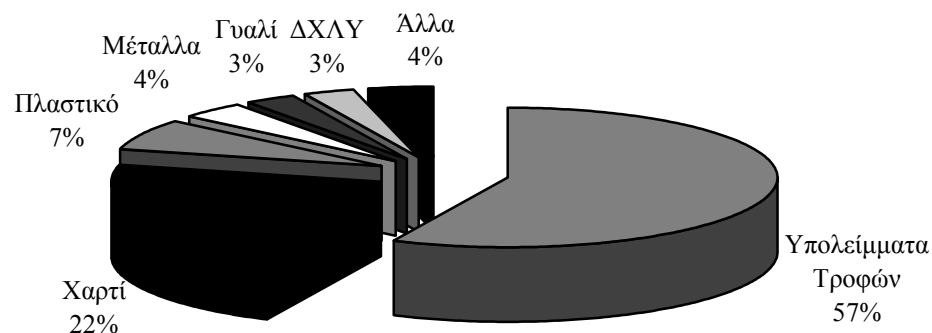
Χώρα	Έτος	Παραγωγή Απορριμμάτων (Kg/άτομο - ημέρα)	Χ.Υ.Τ.Α. (%)	Καύση (%)
Αυστρία	1988	0,97	68	8
Καναδάς	1989	1,71	84	9
Γαλλία	1989	0,83	45	41
Γερμανία	1987	0,87	66	30
Ιαπωνία	1988	1,08	33	64
Ισπανία	1988	0,88	77	5
Μ. Βρετανία	1989	0,98	78	14
Η.Π.Α.	1993	2,0	62	16

Παράλληλα με την παραγόμενη ποσότητα των απορριμμάτων διαφοροποίηση παρατηρείται από χώρα σε χώρα και ως προς τη σύσταση και τις μεθόδους διαχείρισης που εφαρμόζονται. Με τον όρο σύσταση περιγράφονται τα συστατικά από τα οποία αποτελείται το ρεύμα των στερεών αποβλήτων και η σχετική κατανομή τους (% κατά βάρος). Ο καθορισμός της σύστασης των απορριμμάτων έχει ιδιαίτερη σημασία σε περιπτώσεις διερεύνησης της δυνατότητας ανακύκλωσης κάποιου υλικού που περιέχεται στα απορρίμματα. Στις Η.Π.Α το κυρίαρχο υλικό στα απορρίμματα είναι το χαρτί με ποσοστό περίπου ίσο με 37%, ενώ μικρότερα είναι τα ποσοστά των υπολοίπων υλικών (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Σύσταση στερεών αστικών αποβλήτων στις Η.Π.Α. (EPA, 1994).

Σε αντίθεση στην Ελλάδα το μεγαλύτερο μέρος των απορριμμάτων αποτελείται από υπολείμματα τροφών, ενώ η συμμετοχή του χαρτιού είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτή που παρατηρήθηκε στις Η.Π.Α. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η σύσταση των στερεών αποβλήτων στο νομό Αττικής.



Σχήμα 4.2 Σύσταση στερεών αστικών αποβλήτων στην Αττική (Ε.Σ.Κ.Δ.Ν.Α., 1985). Με τον όρο ΔΧΛΥ χαρακτηρίζονται υλικά όπως υφάσματα, ξύλα, λάστιχα και δέρματα.

Σε ότι αφορά στις μεθόδους διαχείρισης των στερεών αστικών αποβλήτων, στις Η.Π.Α. το μεγαλύτερο μέρος των απορριμμάτων (62%) διατίθεται εδαφικά σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.), ενώ σημαντικό είναι το τμήμα των απορριμμάτων που ανακτάται μέσω ανακύκλωσης ή παραγωγής εδαφοβελτιωτικού υλικού (22%). Η εδαφική διάθεση των απορριμμάτων είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη και σε άλλες χώρες όπως ο Καναδάς, η Ισπανία και η Μεγάλη Βρετανία. Σε αντίθεση, χώρες όπως η Ιαπωνία και η Γαλλία εφαρμόζουν συστηματικά την αποτέφρωσή των απορριμμάτων τους (Πίνακας 4.1).

Για την καλύτερη διαχείριση των στερεών αποβλήτων τα τελευταία χρόνια υιοθετούνται συστήματα ολοκληρωμένης διαχείρισης που έχουν ως τελικό στόχο τη μείωση της ποσότητας των απορριμμάτων που θα πρέπει να αποτεφρωθούν ή να καταλήξουν στο Χ.Υ.Τ.Α και τη μείωση της ρύπανσης που συνδέεται με τις δραστηριότητες εξόρυξης, χρήσης και διάθεσης των πρώτων υλών. Για να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι προτείνονται μέτρα για τη μείωση των παραγόμενων απορριμμάτων και της τοξικότητάς τους (*μείωση στην πηγή*), για την οικονομικότερη μέθοδο συλλογής και μεταφοράς τους, για την ανακύκλωση μεγαλύτερου ποσοστού τους και για την τελική διάθεσή τους.

4.2 Μείωση στην Πηγή

Η μείωση της παραγόμενης ποσότητας απορριμμάτων αποτελεί σήμερα στόχο όλων των φορέων που σχετίζονται με τη διαχείρισή τους. Αν και ιδιαίτερα επιθυμητή, η μείωση των παραγόμενων αποβλήτων εφαρμόζεται σήμερα σε μικρή έκταση λόγω του υψηλού κόστους της. Σε ότι αφορά στους καταναλωτές η επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου προϋποθέτει αλλαγές στις καταναλωτικές τους συνήθειες. Κίνητρο για τη μείωση των παραγόμενων απορριμμάτων μπορεί να αποτελέσει επίσης η αντικατάσταση ξεπερασμένων τιμολογιακών πολιτικών (τιμολόγηση με βάση το εμβαδόν της κατοικίας) με πιο σύγχρονες (τιμολόγηση με βάση το βάρος των παραγόμενων απορριμμάτων).

Σε ότι αφορά στους παραγωγούς προϊόντων η μείωση των επιπτώσεων των παραγόμενων απορριμμάτων μπορεί να επιτευχθεί με μείωση του βάρους των προϊόντων, μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά την παραγωγή τους ή/και με αύξηση του χρόνου ζωής των παραγόμενων αγαθών. Προϊόντα που δεν φθείρονται γρήγορα δεν χρειάζεται να αντικατασταθούν με την ίδια συχνότητα, γεγονός που συμβάλλει στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων και στη μείωση των παραγόμενων απορριμμάτων. Αλλά και σε περιπτώσεις που ένα προϊόν έχει εξαντλήσει τη διάρκεια ζωής του, ορισμένα από τα υλικά από τα οποία αποτελείται εξακολουθούν να έχουν οικονομική αξία. Το σημείο κλειδί για την αύξηση των ορίων ζωής των συγκεκριμένων υλικών είναι η ευκολία με την οποία μπορούν να ανακυκλωθούν. Η επιλογή των υλικών είναι σήμερα πολύ πιο εύκολη για τους σχεδιαστές των προϊόντων σε σχέση με το παρελθόν.

Εκτός από τη μείωση του βάρους των προϊόντων, η επιλογή των υλικών θα πρέπει να επιδιώκει και τη μείωση της τοξικότητάς τους. Η χρήση τοξικών ουσιών είναι δυνατόν να προκαλέσει σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα όταν αυτά τα υλικά καταλήξουν σε Χ.Υ.Τ.Α. και αποτεφρωτήρες. Τέτοιου είδους μέτρα έχουν ληφθεί κατά το παρελθόν, ορίζοντας ανώτατα όρια συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων στα υλικά συσκευασίας, όρια για την περιεκτικότητα σε Hg των μπαταριών κ.α.

4.3 Συστήματα Αποθήκευσης, Συλλογής και Μεταφοράς Στερεών

Αποβλήτων

Η αποθήκευση των απορριμμάτων, από τη στιγμή που ο χρήστης τα μεταφέρει εκτός του χώρου παραγωγής τους μέχρι την ώρα συλλογής τους από το απορριμματοφόρο, είναι ένα

κρίσιμο στάδιο του συστήματος διαχείρισης γιατί σχετίζεται με θέματα υγιεινής και αισθητικής. Κατά την επιλογή του συστήματος αποθήκευσης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως το απαιτούμενο κόστος επένδυσης και η διευκόλυνση του έργου συλλογής.

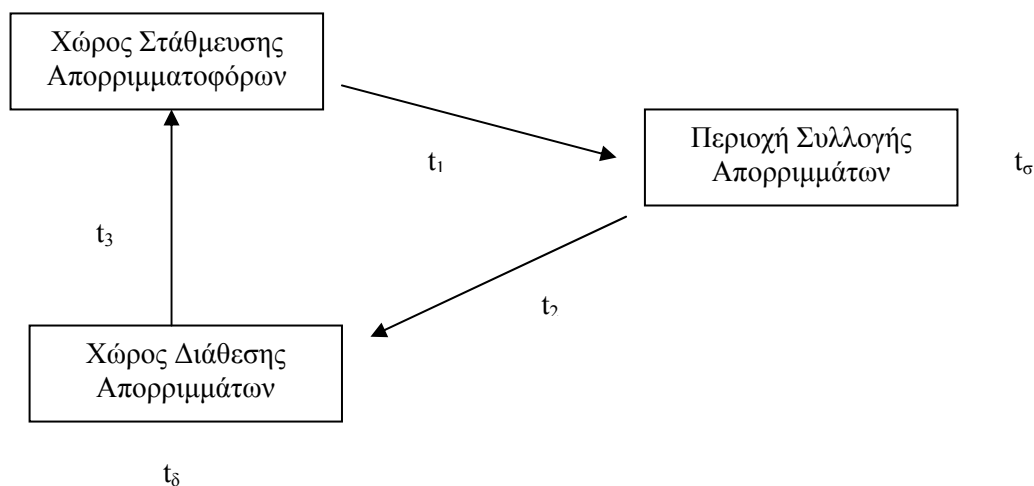
Για την αποθήκευση των απορριμμάτων συνήθως χρησιμοποιούνται κάδοι που διακρίνονται σε κυλιόμενους και σταθερούς. Οι κυλιόμενοι κάδοι τοποθετούνται σε θέσεις με εύκολη πρόσβαση για τα απορριμματοφόρα και αδειάζονται με τη βοήθεια ειδικού μηχανισμού. Συμβάλλουν στην εξασφάλιση καλών συνθηκών υγιεινής, στη διευκόλυνση του έργου των εργατών και στη μείωση του απαιτούμενου χρόνου συλλογής. Το υλικό κατασκευής τους είναι επιψευδαργυρωμένος χάλυβας ή πλαστικό και ο όγκος των απορριμμάτων που μπορεί να αποθηκευτεί κυμαίνεται μεταξύ 100 - 1000 l. Οι σταθεροί κάδοι χρησιμοποιούνται σε αστικές περιοχές με χαμηλή πυκνότητα δόμησης, όπου είναι δύσκολη η προσέγγιση του απορριμματοφόρου. Το άδειασμα τους γίνεται χειρωνακτικά, ενώ δεν είναι εφικτή η μηχανική πλύση τους.

Η συλλογή των στερεών αποβλήτων και η μεταφορά τους στους χώρους τελικής διάθεσης προϋποθέτει τη λήψη αποφάσεων που σχετίζονται με την επιλογή ικανοποιητικού αριθμού και μεγέθους απορριμματοφόρων, το σχεδιασμό των δρομολογίων τους και την επιλογή των θέσεων που θα τοποθετηθούν οι κάδοι συλλογής και οι σταθμοί μεταφόρτωσης των απορριμμάτων.

Τα σύγχρονα οχήματα συλλογής απορριμμάτων είναι κλειστού τύπου, εφοδιασμένα με σύστημα συμπίεσης των απορριμμάτων και σύστημα ανύψωσης κάδων. Απορριμματοφόρα ανοικτού τύπου χρησιμοποιούνται πλέον μόνο για τη συλλογή ογκωδών αντικειμένων που δεν μπορούν να φορτωθούν στα κλειστά οχήματα. Τα κλειστά οχήματα συλλογής απορριμμάτων κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον όγκο των απορριμμάτων που μπορούν να μεταφέρουν και το βαθμό συμπίεσης που επιτυγχάνουν. Ο όγκος των μεταφερόμενων απορριμμάτων κυμαίνεται μεταξύ 5 και 30 m³. Τα μεγαλύτερα οχήματα έχουν προφανώς υψηλότερο κόστος αγοράς. Εξαιτίας όμως του μεγαλύτερου όγκου απορριμμάτων που μπορούν να μεταφέρουν, δεν χρειάζεται να πραγματοποιούν τόσα πολλά δρομολόγια από την περιοχή συλλογής προς την περιοχή διάθεσης των απορριμμάτων, με συνέπεια να επιτυγχάνεται σημαντική μείωση των λειτουργικών εξόδων. Θα πρέπει βέβαια να ληφθεί υπόψη η αδυναμία χρήση μεγάλων οχημάτων σε πόλεις με στενό οδικό δίκτυο. Η πυκνότητα των στερεών αστικών αποβλήτων κυμαίνεται περίπου στα 120 Kg/m³. Η

χαμηλή πυκνότητα των απορριμμάτων έχει ως αποτέλεσμα τα οχήματα συλλογής να γεμίζουν πολύ γρήγορα, με συνέπεια την αύξηση του αριθμού των απαιτούμενων δρομολογίων. Στα σύγχρονα οχήματα επιδιώκεται η συμπίεση των απορριμμάτων με σκοπό να επιτευχθούν πυκνότητες έως 900 Kg/m^3 . Ο λόγος πυκνότητας των απορριμμάτων μέσα στο απορριμματοφόρο προς την αρχική πυκνότητα των απορριμμάτων ονομάζεται *συντελεστής συμπίεσης*. Στα παλιότερα απορριμματοφόρα, ο συντελεστής συμπίεσης κυμαινόταν μεταξύ 3 και 4, ενώ στα σύγχρονα προσεγγίζει την τιμή 8.

Αν θεωρήσουμε ένα σύστημα συλλογής που αποτελείται από το χώρο στάθμευσης των απορριμματοφόρων, την περιοχή συλλογής και την περιοχή διάθεσης των απορριμμάτων (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3 Σχηματικό διάγραμμα συστήματος συλλογής απορριμμάτων.

Αν με n οριστεί ο αριθμός των διαδρομών του απορριμματοφόρου από την περιοχή συλλογής προς το χώρο διάθεσης, τότε ο συνολικός χρόνος εργασίας του απορριμματοφόρου (T_t) μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της εξίσωσης 4.1:

$$T_t = t_1 + t_\sigma + [(2n-1) \times t_2] + (n \times t_\delta) + t_3 + t_\xi \quad (4.1)$$

Όπου:

- t_1 : ο χρόνος για τη μετακίνηση του οχήματος από το χώρο στάθμευσης στην περιοχή συλλογής
- t_2 : ο χρόνος για τη μετακίνηση του οχήματος από την περιοχή συλλογής στο χώρο διάθεσης
- t_3 : ο χρόνος για τη μετακίνηση του οχήματος από το χώρο διάθεσης στο χώρο στάθμευσης στο τέλος της ημέρας

- t_{σ} : ο καθαρός χρόνος συλλογής των απορριμμάτων στην περιοχή συλλογής
- t_{δ} : ο χρόνος για το άδειασμα ενός απορριμματοφόρου στο χώρο διάθεσης
- t_{ξ} : ο συνολικός χρόνος λοιπών καθυστερήσεων (διάλειμμα προσωπικού κ.α.)

Παράδειγμα 4.1

Αν υποθέσουμε ότι χρειάζονται 0,4 ώρες για τη μετακίνηση του απορριμματοφόρου από το χώρο στάθμευσης στην περιοχή συλλογής των απορριμμάτων, 0,4 ώρες από την περιοχή συλλογής έως την περιοχή διάθεσης και 0,25 ώρες από την περιοχή διάθεσης έως το χώρο στάθμευσης. Για την εκφόρτωση ενός απορριμματοφόρου στο χώρο διάθεσης απαιτούνται 0,2 ώρες, ενώ 1 ώρα καταναλώνεται σε άλλες καθυστερήσεις. Αν κάθε μέρα πραγματοποιούνται δύο διαδρομές προς το χώρο διάθεσης, πόσος χρόνος απομένει σε ένα οκτάωρο για τη συλλογή των απορριμμάτων.

Λύση:

Με τη βοήθεια της εξίσωσης 4.1 υπολογίζουμε τον καθαρό χρόνο συλλογής των απορριμμάτων, t_{σ} .

$$\begin{aligned}
 T_t &= t_1 + t_{\sigma} + [(2n-1) \times t_2] + (n \times t_{\delta}) + t_3 + t_{\xi} \quad \Rightarrow \\
 t_{\sigma} &= T_t - t_1 - [(2n-1) \times t_2] - (n \times t_{\delta}) - t_3 - t_{\xi} \quad \Rightarrow \\
 t_{\sigma} &= 8 - 0,4 - [((2 \times 2) - 1) \times 0,4] - (2 \times 0,2) - 0,25 - 1 \quad \Rightarrow \\
 &\quad \quad \quad \mathbf{t_{\sigma} = 4,75 \text{ ώρες}}
 \end{aligned}$$

Ο χρόνος που δαπανά ένα απορριμματοφόρο σε κάθε στάση του μέσα στην περιοχή συλλογής των απορριμμάτων υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης 4.2:

$$t_{\text{στάσης}} = \left(\frac{s}{u}\right) + (t_a \times n_k) \quad (4.2)$$

Όπου:

s = η απόσταση που πρέπει να διανύσει το απορριμματοφόρο μεταξύ δύο στάσεων (m)

u = η μέση ταχύτητα του απορριμματοφόρου (m/s)

t_a = ο χρόνος που απαιτείται για να αδειάσει ένας κάδος (s)

n_k = ο αριθμός των κάδων που πρέπει να αδειάσει σε κάθε στάση

Ο απαιτούμενος όγκος του απορριμματοφόρου υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης 4.3:

$$V_a = \frac{V_k \times N}{r} \quad (4.3)$$

Όπου:

V_a = ο όγκος του απορριμματοφόρου (m^3)

V_k = ο μέσος όγκος των απορριμμάτων σε κάθε στάση (m^3)

N = ο αριθμός των στάσεων

r = ο συντελεστής συμπίεσης των απορριμμάτων μέσα στο απορριμματοφόρο

Παράδειγμα 4.2

Σε μία περιοχή που εξυπηρετείται από ένα απορριμματοφόρο, κάθε πολυκατοικία τοποθετεί καθημερινά τα απορρίμματά της (όγκου $0,25 m^3$) σε έναν ατομικό κάδο που είναι τοποθετημένος στην είσοδό της. Αν σε μία ημέρα ο καθαρός χρόνος συλλογής των απορριμμάτων, t_σ από το απορριμματοφόρο ισούται με 4,75 ώρες και η μέση απόσταση μεταξύ των κάδων είναι 80 m, πόσες στάσεις θα πρέπει να κάνει ένα απορριμματοφόρο και τι μέγεθος θα πρέπει να έχει. Θεωρείστε ότι ο συντελεστής συμπίεσης των απορριμμάτων ισούται με 3,5, η μέση ταχύτητα του απορριμματοφόρου με 2 m/s και ο χρόνος αδειάσματος ενός κάδου με 10 sec.

Λύση:

Με τη βοήθεια της εξίσωσης 4.2 υπολογίζεται ότι ο χρόνος που απαιτείται σε κάθε στάση του απορριμματοφόρου, $t_{\text{στάσης}}$:

$$t_{\text{στάσης}} = \left(\frac{S}{u}\right) + (t_a \times n_k) \Rightarrow$$

$$t_{\text{στάσης}} = \left(\frac{80m}{2m/s}\right) + (10 \text{ sec/ κάδος} \times 1 \text{ κάδος}) \Rightarrow$$

$$t_{\text{στάσης}} = 50 \text{ s}$$

Εφόσον ο καθαρός χρόνος συλλογής ισούται με 4,75 ώρες την ημέρα, ο αριθμός των στάσεων που μπορούν να πραγματοποιηθούν ημερησίως ισούται με:

$$N = \frac{4,75 \text{ ώρες} / \text{ημέρα} \times 3600 \text{ sec} / \text{ώρα}}{50 \text{ sec} / \text{στάση}} \Rightarrow$$

$$N = 342 \text{ στάσεις}$$

Ο όγκος του απορριμματοφόρου υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης 4.3:

$$V_a = \frac{V_{\kappa} \times N}{r} = \frac{0,25m^3 / \sigma\acute{\tau}\alpha\sigma\eta \times 342\sigma\acute{\tau}\alpha\sigma\epsilon\iota\varsigma}{3,5} \Rightarrow$$

$$V=24,4 m^3$$

Για τον υπολογισμό του κόστους συλλογής των απορριμμάτων θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το κόστος λειτουργίας του οχήματος και το κόστος αμοιβής του προσωπικού.

Παράδειγμα 4.3

Υποθέστε ότι το ετήσιο κόστος αγοράς, συντήρησης και μετακίνησης ενός απορριματοφόρου δίνεται από την εξίσωση:

$$\text{Ετήσιο Κόστος (Ευρώ/έτος)} = 10000 + 4000 V$$

Όπου V ο όγκος του απορριματοφόρου σε m^3 . Αν θεωρήσουμε ότι το συγκεκριμένο όχημα επανδρώνεται από δύο άτομα με μισθό 15 Ευρώ ανά ώρα. Κάντε οικονομική ανάλυση του συστήματος συλλογής του Παραδείγματος 4.2 στο οποίο ένα όχημα όγκου $24,4 m^3$ συλλέγει τα απορρίμματα από 342 πολυκατοικίες κατά τη διάρκεια μίας ημέρας. Το όχημα και το προσωπικό εργάζονται πέντε ημέρες την εβδομάδα, ενώ τα απορρίμματα από κάθε πολυκατοικία συλλέγονται μία φορά εβδομαδιαίως. Ποιο είναι το κόστος ανά τόνο απορριμμάτων που συλλέγονται, αν υποθέσουμε ότι κάθε πολυκατοικία παράγει $0,25 m^3$ απορριμμάτων την εβδομάδα με πυκνότητα $120 Kg/m^3$.

Λύση:

Το ετήσιο κόστος ενός απορριματοφόρου όγκου $24,4 m^3$ υπολογίζεται σε:

$$\text{Ετήσιο Κόστος Απορ/φορου (Ευρώ/έτος)} = 10000 + (4000 \times 24,4) = 107.600 \text{ Ευρώ/έτος}$$

Το ετήσιο κόστος του προσωπικού ανέρχεται σε:

$$\text{Ετήσιο Κόστος (Ευρώ/έτος)} = 2 \times 15 \text{ Ευρώ/ώρα} \times 52 \text{ εβδομάδες/έτος} \times 5 \text{ ημέρες/εβδομάδα} \\ \times 8 \text{ ώρες/ημέρα}$$

$$\text{Ετήσιο Κόστος Προσωπικού} = 62.400 \text{ Ευρώ/έτος}$$

Κατά τη διάρκεια μίας ημέρας, το απορριματοφόρο εξυπηρετεί 342 πολυκατοικίες, δηλαδή σε διάστημα μίας εβδομάδας εξυπηρετεί $342 \times 5 = 1710$ πολυκατοικίες. Η

συνολική ποσότητα απορριμμάτων που συλλέγονται κατά τη διάρκεια ενός έτους από το απορριμματοφόρο είναι:

$$\text{Απορρίμματα} = (0,25 \text{ m}^3/\text{πολυκατοικία και εβδομάδα}) \times (120 \text{ Kg/m}^3) \times (1710 \text{ πολυκατοικίες} \times (52 \text{ εβδομάδες/έτος})) = 2.667.600 \text{ Kg} = 2668 \text{ τόνοι /έτος}$$

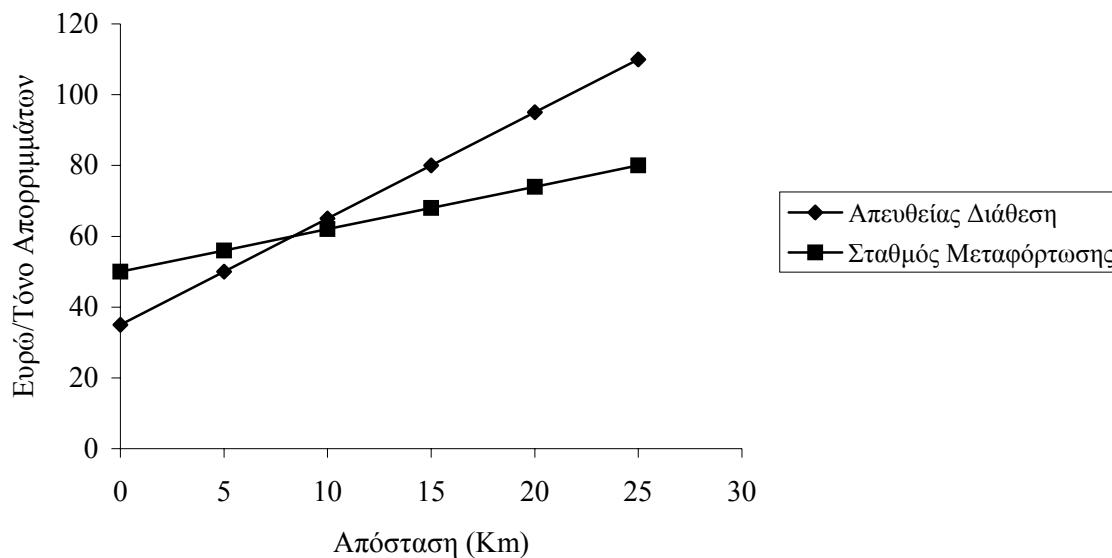
Το κόστος ανά τόνο απορριμμάτων που συλλέγονται ισούται με:

$$\text{Κόστος} = \frac{(62400 + 107600) \text{ Ευρώ / έτος}}{2668 \text{ τόνοι / έτος}} = \mathbf{63,72 \text{ Ευρώ /τόνο απορριμμάτων}}$$

Η πλήρωση των υφισταμένων χώρων διάθεσης απορριμμάτων συντελεί στην αναζήτηση νέων χώρων που συχνά απέχουν σημαντικά από τους οικισμούς που εξυπηρετούν. Καθώς η απόσταση από την περιοχή συλλογής αυξάνεται, το απορριμματοφόρο χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να διανύσει την απόσταση από το χώρο συλλογής στο χώρο διάθεσης με αποτέλεσμα ο καθαρός χρόνος συλλογής των απορριμμάτων να μειώνεται. Για το λόγο αυτό συχνά είναι προτιμότερη η κατασκευή σταθμών μεταφόρτωσης, σε σημεία που βρίσκονται μεταξύ του χώρου συλλογής και του χώρου διάθεσης των απορριμμάτων.

Οι συγκεκριμένοι σταθμοί λειτουργούν ως χώροι προσωρινής αποθήκευσης των απορριμμάτων, όπου παράλληλα πραγματοποιείται συμπίεσή τους με αποτέλεσμα η πυκνότητά τους να αυξάνεται σε 300-500 Kg/m³. Εκτός από τη συμπίεση στους σταθμούς μεταφόρτωσης μπορεί να γίνεται και μερική διαλογή των υλικών (κυρίως μετάλλων), εφόσον υπάρχει ο κατάλληλος εξοπλισμός. Για τη μεταφορά των απορριμμάτων από τους σταθμούς μεταφόρτωσης στους χώρους τελικής διάθεσης χρησιμοποιούνται ρυμουλκούμενα οχήματα με χωρητικότητα 30-100 m³.

Η επιλογή της κατασκευής ή όχι σταθμών μεταφόρτωσης καθώς και το σημείο χωροθέτησής τους προϋποθέτει κατάλληλη τεχνοοικονομική μελέτη στην οποία θα συναξιολογούνται οι πάγιες δαπάνες κατασκευής και το κόστος λειτουργίας του σταθμού, καθώς και τα οικονομικά πλεονεκτήματα από τις μειωμένες διαδρομές απορριμματοφόρων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4 στην περίπτωση απευθείας διάθεσης των απορριμμάτων το κόστος για μικρές αποστάσεις είναι χαμηλό, αλλά αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό καθώς αυξάνει η απόσταση. Σε αντίθεση, όταν υπάρχει σταθμός μεταφόρτωσης, το κόστος σε συνάρτηση με την απόσταση αυξάνεται με πολύ χαμηλότερο ρυθμό. Από κάποια απόσταση και μετά (σημείο τομής), η ύπαρξη σταθμού μεταφόρτωσης συντελεί σε χαμηλότερο κόστος μεταφοράς των απορριμμάτων.



Σχήμα 4.4 Μεταβολή κόστους διάθεσης απορριμμάτων (σε Ευρώ ανά τόνο απορριμμάτων) σε συνάρτηση με την απόσταση του χώρου διάθεσης από το χώρο συλλογής.

4.4 Ανακύκλωση

Μετά από τη μείωση των παραγόμενων απορριμμάτων στην πηγή, η ανάκτηση υλικών μέσω ανακύκλωσης και λιπασματοποίησης θεωρείται το πιο σημαντικό τμήμα ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης απορριμμάτων. Η διεργασία της ανακύκλωσης περιλαμβάνει τη συλλογή των ανακυκλώσιμων υλικών, το διαχωρισμό τους κατά είδος, την πώλησή τους στη βιομηχανία με σκοπό την επεξεργασία τους και την παραγωγή νέων ειδών που διατίθενται στην αγορά. Τα υλικά που ανακυκλώνονται συνήθως είναι χαρτί, πλαστικό, γυαλί, αλουμίνιο και άλλα μέταλλα.

Χαρτί

Το χαρτί παράγεται από ίνες ξύλου ή άλλων φυτικών υλών και σπανιότερα από συνθετικές ίνες. Οι ίνες συγκρατούνται με την πλοκή και την ικανότητα που έχουν για αυτοσυγκόλληση. Δεν χρησιμοποιούνται συγκολλητικές ουσίες, παρά μόνο διάφορα πρόσθετα για να βελτιώσουν μία ή περισσότερες ιδιότητές του χαρτιού, όπως είναι η αντοχή στην υγρασία, η διαφάνεια και το χρώμα. Οι κύριες κατηγορίες χαρτιού που ανακυκλώνονται είναι το χαρτόνι που χρησιμοποιείται για τη συσκευασία και μεταφορά αγαθών και το χαρτί που χρησιμοποιείται για την παραγωγή εφημερίδων. Στις Η.Π.Α. το ποσοστό των συγκεκριμένων τύπων χαρτιού που ανακυκλώνεται προσεγγίζει το 75%.

Πλαστικό

Ο όρος πλαστικά περιλαμβάνει μία μεγάλη ποικιλία ρητινών και πολυμερών με διαφορετικά χαρακτηριστικά και χρήσεις. Τα πλαστικά παράγονται με τη μετατροπή βασικών υδρογονανθράκων -όπως το μεθάνιο και το αιθάνιο- σε μεγαλομοριακές αλυσίδες που καλούνται πολυμερή. Στα απορρίμματα ανιχνεύονται πάνω από 60 είδη πλαστικών, η μεγάλη ποικιλία τους είναι υπεύθυνη σε μεγάλο βαθμό και για το χαμηλό ποσοστό ανακύκλωσής τους που δεν ξεπερνά το 3,5%. Κατά την ανακύκλωση των πλαστικών σημαντικός είναι ο διαχωρισμός τους ανάλογα με το είδος της ρητίνης και το χρώμα τους. Κάθε ρητίνη παρουσιάζει διαφορετικό σημείο ζέσεως, με συνέπεια η θέρμανση ενός μίγματος πλαστικών στην ίδια θερμοκρασία να οδηγήσει στην πλήρη τήξη κάποιων ρητινών και στη μερική τήξη κάποιων άλλων. Η ανακύκλωση των πλαστικών δυσχεραίνεται επίσης από τη πιθανότητα επιμόλυνσης τους από ουσίες με τις οποίες έρχονται σε επαφή (φυτοφάρμακα, πετρελαιοειδή).

Γυαλί

Με αυτό τον όρο ονομάζονται υλικά σε υαλώδη κατάσταση ή στερεά διαλύματα διαφόρων πυριτικών αλάτων, ανθεκτικά στα περισσότερα χημικά αντιδραστήρια. Το γυαλί είναι ένα από τα παλαιότερα υλικά συσκευασίας. Το μεγαλύτερο μέρος του γυαλιού που ανιχνεύεται στα στερεά απόβλητα είναι με τη μορφή μπουκαλιών και δοχείων για τη συσκευασία τροφίμων και ποτών. Το ποσοστό ανακύκλωσής του στις Η.Π.Α. προσεγγίζει το 22%. Κατά την ανακύκλωση των γυαλιών προαπαιτείται ο διαχωρισμός τους σύμφωνα με το χρώμα τους (διάφανο, πράσινο, καφέ) και η απομάκρυνση των μεταλλικών δακτυλίων και πωμάτων. Μετά την πραγματοποίηση των συγκεκριμένων διεργασιών και το θρυμματισμό των γυαλιών είναι εφικτή η ανακύκλωσή τους για την παραγωγή γυάλινων μπουκαλιών σε ποσοστό που φθάνει και το 100% του ανακυκλωμένου υλικού. Ένα μικρότερο μέρος των ριτισμάτων χρησιμοποιείται επίσης για την παραγωγή υαλοβάμβακα και σε μίξη με άσφαλτο για την παραγωγή υλικού για την ασφαλτόστρωση δρόμων (glasphalt).

Αλουμίνιο - Μέταλλα

Το αλουμίνιο ως υλικό είναι ελαφρύ, εύκαμπτο, ανθεκτικό στην ατμοσφαιρική διάβρωση, έχει καλή θερμική αγωγιμότητα και ανακυκλώνεται εύκολα. Αυτές οι ιδιότητές καθιστούν το αλουμίνιο ιδιαίτερα πολύτιμο υλικό προς ανακύκλωση. Είναι χαρακτηριστικό ότι η

ανακύκλωση ενός τόνου αλουμινίου δημιουργεί εικοσαπλάσια έσοδα από την ανακύκλωση ενός τόνου γυαλιού ή εφημερίδων. Το μεγαλύτερο ποσοστό του αλουμινίου που ανιχνεύεται στα αστικά απορρίμματα ($\approx 55\%$) είναι με τη μορφή κουτιών αλουμινίου που χρησιμοποιούνται για τη συσκευασία αλκοολούχων ποτών και αναψυκτικών. Η ανακύκλωση του αλουμινίου αφενός συμβάλει στη μείωση του όγκου των απορριμμάτων που καταλήγουν στους ΧΥΤΑ, αφετέρου εξοικονομεί μεγάλα ποσά ενέργειας. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι, με την παραγωγή ενός κιλού αλουμινίου που προέρχεται από ανακύκλωση, εξοικονομείται το 99% της απαιτούμενης ενέργειας και το 93% του καυσίμου που καταναλώνεται για την παραγωγή ίδιας ποσότητας νέου αλουμινίου. Στα αστικά απορρίμματα περιέχονται επίσης διάφορα σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέταλλα (χαλκός, μόλυβδος, ψευδάργυρος). Σε ότι αφορά στα μη σιδηρούχα μέταλλα, κυρίαρχος είναι ο ρόλος του μολύβδου που προέρχεται κυρίως από τις μπαταρίες των αυτοκινήτων και το ποσοστό ανακύκλωσής τους προσεγγίζει το 95%.

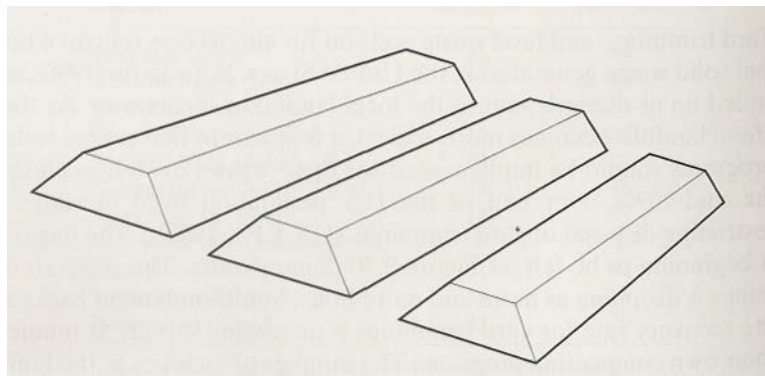
Καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχία ενός συστήματος ανακύκλωσης είναι το σύστημα διαλογής που υιοθετείται. Συχνά υιοθετείται διαχωρισμός των ανακυκλούμενων προϊόντων στην πηγή παραγωγής τους (*διαλογή στην πηγή*). Το συγκεκριμένο σύστημα περιλαμβάνει διάφορες παραλλαγές, όπως α) τη συλλογή των ανακυκλώσιμων προϊόντων από πόρτα σε πόρτα, β) τη συλλογή τους σε ειδικούς κάδους που διαφοροποιούνται ανάλογα με το ανακυκλώσιμο υλικό και γ) τη μεταφορά από τους κατοίκους των υλικών ανακύκλωσης σε συγκεκριμένους χώρους (κέντρα συλλογής). Είναι προφανές ότι στόχος ενός τέτοιου συστήματος ανακύκλωσης είναι η συμμετοχή όσο το δυνατό μεγαλύτερου μέρους των πολιτών. Σε περίπτωση χρήσης κάδων για τη συλλογή των ανακυκλώσιμων υλικών, η συμμετοχή των πολιτών επηρεάζεται από παράγοντες όπως η πυκνότητα των κάδων συλλογής σε μία περιοχή και η συχνότητα συλλογής τους. Μεγάλη πυκνότητα κάδων και μεγάλη συχνότητα συλλογής συμβάλλει σε μεγαλύτερη συμμετοχή των πολιτών, αλλά παράλληλα και σε υψηλότερο κόστος του συστήματος ανακύκλωσης. Ένα άλλο σύστημα διαλογής βασίζεται στη *μηχανική διαλογή* των ανακυκλώσιμων υλικών. Στο συγκεκριμένο σύστημα χρησιμοποιείται μηχανολογικός εξοπλισμός που έχει ως στόχο την κατάτμηση, το διαχωρισμό και τη συμπίεση των υλικών. Με αυτά τα μέσα διαχωρίζονται υλικά όπως χαρτί, μέταλλα, γυαλί και εξασφαλίζεται πρώτη ύλη για την παραγωγή εδαφοβελτιωτικού (λιπασματοποίηση).

4.5 Συστήματα Επεξεργασίας και Διάθεσης Στερεών Αποβλήτων

4.5.1 Λιπασματοποίηση

Ο όρος *λιπασματοποίηση* χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αερόβια αποδόμηση οργανικών υλικών υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Τελικό αποτέλεσμα της παραπάνω διεργασίας είναι η παραγωγή ενός σταθεροποιημένου οργανικού υλικού (*compost*) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό.

Στα απλούστερα συστήματα λιπασματοποίησης, το οργανικό υλικό διατάσσεται με μορφή σωρών ή σειραδίων (*windrows*) σε ανοικτό ή στεγασμένο χώρο (Σχήμα 4.5). Το ύψος κάθε σειραδίου μπορεί να φθάσει τα 2 m, το πλάτος του τα 3-4 m και το μήκος του τα μερικές δεκάδες μέτρα. Γύρω από το χώρο λιπασματοποίησης κατασκευάζεται στραγγιστικό σύστημα για τη συλλογή και απομάκρυνση των νερών της βροχής. Σε περιπτώσεις έλλειψης χώρου, η λιπασματοποίηση είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί σε κλειστές δεξαμενές (βιοαντιδραστήρες).



Σχήμα 4.5 Σειράδια (*windrows*) για τη λιπασματοποίηση του οργανικού κλάσματος των στερεών αποβλήτων.

Κατά τη λιπασματοποίηση διάφοροι οργανισμοί όπως τροχόζωα, νηματώδεις και γαιοσκώληκες διασπών το οργανικό υλικό σε μικρότερα μέρη, ενώ η αποδόμηση της οργανικής ύλης πραγματοποιείται κυρίως από αερόβια βακτήρια και μύκητες. Καθώς αερόβιοι μικροοργανισμοί αποδομούν τα απόβλητα, μέρος του οξυγόνου απομακρύνεται από τους σωρούς. Σε περιπτώσεις που η παροχή οξυγόνου είναι ανεπαρκής επικρατούν αναερόβιοι μικροοργανισμοί με συνέπεια την επιβράδυνση των διεργασιών αποδόμησης και την παραγωγή ανεπιθύμητων ουσιών. Ο απλούστερος τρόπος παροχής οξυγόνου στους

σωρούς είναι μέσω αναμόχλευσής τους. Η συχνή αναμόχλευση των σωρών επιτυγχάνει την παρεμπόδιση εμφάνισης αναερόβιων συνθηκών, αλλά δημιουργεί τον κίνδυνο ξήρανσης ή πτώσης της θερμοκρασίας του σωρού. Η διεργασία της λιπασματοποίησης μπορεί να επιταχυνθεί μέσω εμφύσησης αέρα με μηχανικά μέσα. Εκτός από τον αερισμό, μία σειρά άλλων παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, το pH και η συγκέντρωση των θρεπτικών επηρεάζουν τη διεργασία.

Κατά τα πρώτα στάδια της αποδόμησης μεσόφιλοι μικροοργανισμοί (βακτήρια και μύκητες που αναπτύσσονται καλύτερα σε θερμοκρασίες μεταξύ 25 - 45 °C) παράγουν θερμότητα και οργανικά οξέα, με συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας των σωρών και την πτώση του pH στην τιμή 5. Όταν η θερμοκρασία φθάσει τους 45 °C, η δραστηριότητα των μεσόφιλων μικροοργανισμών διακόπτεται και αναλαμβάνουν δραστηριότητα θερμοφίλοι μικροοργανισμοί (μικροοργανισμοί που αναπτύσσονται καλύτερα σε θερμοκρασίες μεταξύ 45 - 70 °C). Στο συγκεκριμένο στάδιο πραγματοποιείται κυρίως η αποδόμηση και η σταθεροποίηση των οργανικών ενώσεων. Η μείωση της συγκέντρωσης των θρεπτικών στους σωρούς έχει ως αποτέλεσμα τη θανάτωση των θερμοφίλων μικροοργανισμών, την πτώση της θερμοκρασίας και την επικράτηση πάλι των μεσόφιλων μικροοργανισμών. Σε αυτό το τελευταίο στάδιο της διεργασίας πραγματοποιείται περαιτέρω εξάτμιση του νερού, σταθεροποίηση του pH και σχηματισμός των χουμικών οξέων.

Τα σημαντικότερα θρεπτικά που είναι απαραίτητα για την αποδόμηση του οργανικού υλικού είναι ο άνθρακας για την παραγωγή της απαραίτητης ενέργειας, το άζωτο για τη σύνθεση των πρωτεϊνών και ο φώσφορος και το κάλιο για την κυτταρική αναπαραγωγή. Η ιδανική σχέση άνθρακα - αζώτου κυμαίνεται μεταξύ 25 - 35 μέρη C προς 1 μέρος N. Υψηλότεροι λόγοι C/N αναχαιτίζουν την αύξηση των μικροοργανισμών, επιβραδύνοντας την αποδόμηση, ενώ χαμηλότεροι λόγοι C/N επιταχύνουν την αποδόμηση, αλλά είναι πιθανόν να προκαλέσουν γρήγορη εξάντληση του διαθέσιμου οξυγόνου και επικράτηση αναερόβιων συνθηκών.

4.5.2 Καύση

Η καύση των απορριμμάτων αποτελεί μία μέθοδος επεξεργασίας αρκετά διαδεδομένη, ιδιαίτερα σε χώρες με υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα (Πίνακας 4.1). Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της καύσης είναι η μείωση του όγκου των απορριμμάτων, η άμεση επεξεργασία τους μέσω αποφυγής των χρονοβόρων βιολογικών διεργασιών, η απαίτηση

μικρότερης έκτασης γης και η δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας. Από την άλλη, η κακή λειτουργία των μονάδων αποτέφρωσης έχει ως συνέπεια την απελευθέρωση τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα, ενώ η τέφρα που παράγεται στο τέλος της διεργασίας είναι πιθανό να χρειάζεται ιδιαίτερη διαχείριση καθότι συχνά θεωρείται επικίνδυνο υλικό.

Το ενεργειακό περιεχόμενο των αστικών στερεών αποβλήτων εξαρτάται από το μίγμα των υλικών που περιέχονται σε αυτά και από το ποσοστό της υγρασίας τους. Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζεται η θερμογόνος δύναμη ορισμένων συστατικών των στερεών αποβλήτων και συγκρίνεται με τη θερμογόνο δύναμη διαφόρων φυσικών καυσίμων.

Πίνακας 4.2 Θερμογόνος δύναμη συστατικών στερεών αποβλήτων και φυσικών καυσίμων

Υλικό	Θερμογόνος Δύναμη (KJ/Kg)
Μίγμα χαρτιών	15.800
Μίγμα υπολειμμάτων τροφής	5.500
Μίγμα πλαστικών	32.800
Ελαστικά	26.100
Υπολείμματα ξύλων	16.000
Δέρματα	18.500
Υφάσματα	18.700
Πετρέλαιο Ν° 6	42.500
Φυσικό Αέριο	55.000
Κάρβουνο	28.500

Η σύνθεση των απορριμμάτων ποικίλει από χώρα σε χώρα. Ως αποτέλεσμα, το ενεργειακό περιεχόμενο των απορριμμάτων θα διαφοροποιείται και είναι θα μικρότερο σε χώρες με υψηλά ποσοστά υπολειμμάτων τροφής και μικρά ποσοστά χαρτιού στη συνολική σύσταση των απορριμμάτων.

Παράδειγμα 4.4

Να εκτιμηθεί το ενεργειακό περιεχόμενο 100 Kg αστικών στερεών αποβλήτων στις Η.Π.Α. και να συγκριθεί με το ενεργειακό περιεχόμενο της αντίστοιχης ποσότητας απορριμμάτων στην Ελλάδα. Η σύσταση των στερεών αποβλήτων στις Η.Π.Α και στην Ελλάδα δίνεται στα Σχήματα 4.1 και 4.2, αντίστοιχα.

Λύση:

Με τη βοήθεια των δεδομένων του Πίνακα 4.2 και των Σχημάτων 4.1 και 4.2 υπολογίζεται η ενέργεια που παράγεται από την καύση 100 Kg απορριμμάτων στις δύο χώρες (Πίνακας 4.3). Για το συγκεκριμένο υπολογισμό έγιναν οι παραδοχές ότι η θερμογόνος δύναμη των μετάλλων, των γυαλιών και των απορριμμάτων που χαρακτηρίζονται ως “άλλα” είναι μηδενική.

Πίνακας 4.3 Παραγόμενη ενέργεια από την καύση 100 Kg απορριμμάτων στις Η.Π.Α. και στην Ελλάδα.

Υλικό	Θερμογόνος Δύναμη (KJ/Kg)	ΗΠΑ		Ελλάδα	
		Βάρος Υλικού (Kg)	Παραγόμενη Ενέργεια (KJ)	Βάρος Υλικού (Kg)	Παραγόμενη Ενέργεια (KJ)
Χαρτί	15.800	37	584.600	22	347.600
Πλαστικό	32.800	9	295.200	7	229.600
Υπολ. Τροφής	5.500	7	38.500	57	313.500
Ξύλο	16.000	7	112.000	1,5	24.000
Ύφασμα	18.700	16	299.200	1,5	28.050
Μέταλλο	0	8	0	4	0
Γυαλί	0	7	0	3	0
Άλλα	0	9	0	4	0
Σύνολο	-	100	1.329.500	100	942.750

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι στις Η.Π.Α. η καύση 100 Kg απορριμμάτων έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή 1.329.500 KJ ενέργειας, ενώ στην Ελλάδα η καύση αντίστοιχης ποσότητας απορριμμάτων συντελεί στην παραγωγή μικρότερου ποσού ενέργειας (942.750 KJ).

Η καύση των απορριμμάτων πραγματοποιείται είτε με άμεση μεταφορά των στερεών αποβλήτων στον αποτεφρωτήρα, είτε μετά από προεπεξεργασία των απορριμμάτων και παραγωγή ενός πιο ομογενούς προϊόντος που καλείται RDF (refuge-derived fuel). Κατά την παραγωγή του RDF απομακρύνεται το μεγαλύτερο ποσοστό των άκαυστων υλικών (γυαλί, μέταλλα), ως συνέπεια το ενεργειακό περιεχόμενο του RDF είναι υψηλότερο (14.000-

18.000 KJ/Kg) από το ενεργειακό περιεχόμενο των μη-προεπεξεργασμένων απορριμμάτων (8.000-15.000 KJ/Kg).

Κατά την καύση των απορριμμάτων είναι πιθανή η επιβάρυνση του περιβάλλοντος εξαιτίας των στερεών και αέριων ρύπων που παράγονται. Οι στερεοί ρύποι είναι υπό τη μορφή τέφρας που αποτελείται από κομμάτια γυαλιών και μετάλλων, υπολείμματα ατελούς καύσης του άνθρακα και άλλα αδρανή υλικά. Η συγκράτηση της τέφρας πραγματοποιείται με τη βοήθεια συστημάτων ελέγχου των αιωρούμενων σωματιδίων (διαχωρισμός με κυκλώνα, ηλεκτροστατικός διαχωρισμός, φιλτράρισμα), ενώ η διάθεσή της γίνεται σε Χ.Υ.Τ.Α. ή σε χώρους διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων. Παράλληλα εκπέμπονται μία σειρά αέριων ρύπων όπως οξειδία του αζώτου, οξειδία του θείου, μονοοξείδιο του άνθρακα και αέρια οξέα (υδροχλωρικό οξύ, υδροφθορικό οξύ).

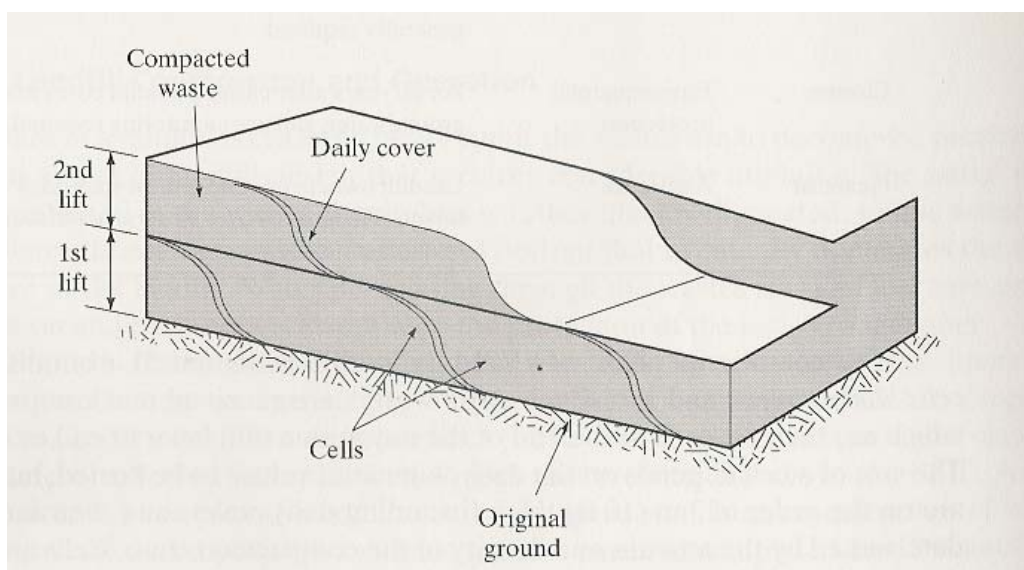
Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην εκπομπή τοξικών ουσιών όπως διοξίνες, φουράνια, πολυχλωριομένα διφαινύλια (PCBs), μετάλλων και αρωματικών υδρογονανθράκων (PAHs). Οι διοξίνες και τα φουράνια είναι χλωριωμένες ενώσεις με παρόμοια χημική δομή. Θεωρούνται πιθανές καρκινογόνες ενώσεις, ενώ παράλληλα δρουν στο αναπαραγωγικό και στο ανοσοποιητικό σύστημα. Υπάρχουν 76 πιθανά ισομερή των διοξινών και 136 πιθανά ισομερή των φουρανίων. Η πιο κοινή και τοξική ένωση που συγκαταλέγεται στις διοξίνες είναι η 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin (2,3,7,8-TCDD). Για τον περιορισμό της παραγωγής των συγκεκριμένων ενώσεων κατά την καύση των απορριμμάτων προτείνεται η αύξηση της θερμοκρασίας καύσης στους 900 °C και η διατήρησή της σε αυτά τα επίπεδα για 1-2 sec. Σε περίπτωση που οι πρόδρομες ενώσεις των διοξινών και των φουρανίων (υδροχλωρικό οξύ, φαινόλες, χλωροφαινόλες, αρωματικοί υδρογονάνθρακες) δεν καταστραφούν πλήρως κατά την καύση των απορριμμάτων είναι πιθανόν να αντιδράσουν παρουσία της ιπτάμενης τέφρας και να συμβάλλουν στο σχηματισμό νέων διοξινών και φουρανίων.

Τα μέταλλα που απελευθερώνονται συνήθως κατά την καύση των απορριμμάτων είναι ο μόλυβδος, ο ψευδάργυρος, το κάδμιο, το αρσενικό και ο υδράργυρος. Τα περισσότερα από αυτά προσροφούνται στην τέφρα σε ποσοστά που κυμαίνονται μεταξύ 60-100% και συγκρατούνται μέσω του συστήματος ελέγχου των αιωρούμενων σωματιδίων. Το πλέον προβληματικό μέταλλο είναι ο υδράργυρος που παρουσιάζει υψηλή πτητικότητα, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η συγκράτησή του στην τέφρα και να διαφεύγει με τους ατμούς.

4.5.3 Υγειονομική Ταφή

Μέχρι πρόσφατα το σύνολο των στερεών αποβλήτων στην Ελλάδα κατέληγε σε *χωματερές*, χωρίς να λαμβάνονται μέτρα για την ημερήσια κάλυψη των αποτιθέμενων απορριμμάτων και για την αποφυγή ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα. Η παραπάνω πρακτική της χωρίς στρατηγική διάθεση των απορριμμάτων στο περιβάλλον έχει εγκαταλειφθεί στις περισσότερες από τις αναπτυγμένες χώρες και επιβάλλεται πλέον νομοθετικά η κατασκευή σύγχρονων αποδεκτών των στερεών αποβλήτων που ονομάζονται Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.).

Σε ένα Χ.Υ.Τ.Α. καθημερινά γίνεται απόθεση και συμπίεση των απορριμμάτων σε κυψέλες (*cell*), οι οποίες καλύπτονται στο τέλος της ημέρας με ένα λεπτό στρώμα χώματος πάχους 0,15-0,30 m, με σκοπό την παρεμπόδιση διασποράς των απορριμμάτων από τον αέρα, τον έλεγχο των εκπεμπόμενων οσμών και τη μείωση της ποσότητας του νερού που μπορεί να κατεισχύσει στις κυψέλες. Το πάχος των κυψελών εξαρτάται από τον καθημερινό όγκο των απορριμμάτων που αποτίθενται, αλλά συνήθως φθάνει τα 3 m, συμπεριλαμβανομένου του εδαφικού καλύμματος. Όταν ένα επίπεδο του Χ.Υ.Τ.Α. πληρωθεί με κυψέλες, προστίθενται νέα επίπεδα που καλούνται ταμπάνια (*lift*) (Σχήμα 4.6). Κατά τη διαστασιολόγηση ενός Χ.Υ.Τ.Α. απαιτείται υπολογισμός της ημερήσιας διατιθέμενης ποσότητας των απορριμμάτων καθώς επίσης και εκτίμηση της τελικής τους πυκνότητας. Η πυκνότητα των αστικών στερεών αποβλήτων σε ένα Χ.Υ.Τ.Α. υπολογίζεται σε 325-700 Kg/m³.



Σχήμα 4.6 Απεικόνιση κυψελών (*cells*) και ταμπανίων (*lifts*) σε Χ.Υ.Τ.Α.

Παράδειγμα 4.5

Να εκτιμηθεί η επιφάνεια ενός Χ.Υ.Τ.Α. που απαιτείται για τη διάθεση των στερεών αποβλήτων μίας πόλης 100.000 κατοίκων κατά τη διάρκεια ενός έτους. Θεωρείστε ότι η ποσότητα των απορριμμάτων που παράγονται ανέρχεται σε 1Kg απορριμμάτων ανά άτομο και ότι η πυκνότητά τους στο Χ.Υ.Τ.Α. ανέρχεται σε 600 Kg/m³. Υποθέστε επίσης ότι υπάρχει ένα μόνο ταμπάνι και ότι το 20% του όγκου της κάθε κυψέλης αποτελείται από χώμα.

Λύση:

Ο όγκος που καταλαμβάνουν τα απορρίμματα κατά τη διάρκεια ενός έτους υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης 4.4:

$$V = \frac{\text{Πληθυσμός} \times \text{Ημερήσια Παραγωγή Απορριμμάτων} \times \text{Ημέρες} / \text{έτος}}{\text{Πυκνότητα}} \quad (4.4)$$

$$V = \frac{100.000 \text{ κάτοικοι} \times 1 \text{ Kg απορριμμάτων} / \text{κατοικο} - \text{ημέρα} \times 365 \text{ ημέρες} / \text{έτος}}{600 \text{ Kg} / \text{m}^3} \Rightarrow$$

$$V = 60833 \text{ m}^3 / \text{έτος}$$

Καθώς μόνο το 80% των κυψελών περιέχει απορρίμματα, ο απαιτούμενος όγκος των κυψελών ισούται με:

$$V_{\text{κυψελών}} = \frac{60833 \text{ m}^3}{0,8} = 76041 \text{ m}^3$$

Εφόσον το πάχος του ταμπανίου είναι 3m, το εμβαδόν του θα ισούται με:

$$A_{\text{ταμπανίου}} = \frac{76041 \text{ m}^3}{3 \text{ m}} \Rightarrow$$

$$A_{\text{ταμπανίου}} = 25.347 \text{ m}^2$$

Η αποδόμηση των απορριμμάτων σε ένα Χ.Υ.Τ.Α. ακολουθεί μία διαδικασία που αποτελείται από τέσσερα (4) στάδια. Κατά τη διάθεση των απορριμμάτων στο Χ.Υ.Τ.Α. υπάρχει αρκετή ποσότητα οξυγόνου που επιτρέπει την αερόβια αποδόμηση των οργανικών ενώσεων για τις πρώτες μέρες (*Αερόβια Φάση*). Με την επικράτηση αναερόβιων συνθηκών, αναερόβιοι μικροοργανισμοί παράγουν ένζυμα που διασπούν τις σύνθετες οργανικές ενώσεις σε απλούστερες και στη συνέχεια οξυγενή βακτήρια παράγουν οργανικά οξέα με

χαρακτηριστικότερο παράδειγμα το οξικό οξύ (*Οξική Φάση*). Στη συνέχεια μία άλλη ομάδα μικροοργανισμών (μεθανογενή βακτήρια) μετατρέπουν τα οργανικά οξέα σε CH_4 και CO_2 . Η συγκεκριμένη φάση μπορεί να διαρκέσει μερικούς μήνες (*Φάση Μη Σταθερής Μεθανογένεσης*). Συνήθως ένα χρόνο μετά το κλείσιμο μίας κυψέλης του Χ.Υ.Τ.Α., η παραγωγή CH_4 και CO_2 υποχωρεί σε κάποια σταθερά επίπεδα, ενώ αρκετά χρόνια αργότερα η διαδικασία της αποδόμησης και ο ρυθμός παραγωγής του μεθανίου μειώνεται σημαντικά (*Φάση Σταθερής Μεθανογένεσης*).

Η αποσύνθεση των οργανικών ενώσεων μέσα στο Χ.Υ.Τ.Α πραγματοποιείται παρουσία υγρασίας και κατάλληλης θερμοκρασίας. Η απαραίτητη υγρασία προέρχεται από τη φυσική υγρασία των απορριμμάτων, από την κατείδυση της βροχόπτωσης και από το νερό που παράγεται από τις χημικές αντιδράσεις της αποσύνθεσης. Το σύνολο του νερού που παράγεται από τις παραπάνω διεργασίες καλείται *στράγγισμα* (*leachate*) και παρουσιάζει την τάση να κινείται διαμέσου της μάζας των απορριμμάτων, διαλύοντας και παρασύροντας διάφορες ουσίες που αυξάνουν το ρυπαντικό του φορτίο. Αν ο πυθμένας του Χ.Υ.Τ.Α. δεν είναι στεγανός, τα στραγγίσματα διεισδύουν στο έδαφος με κίνδυνο ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα. Για το λόγο αυτό προβλέπεται η στεγάνωση του πυθμένα των Χ.Υ.Τ.Α. με τη χρήση στρώσεων συμπυκνωμένου αργίλου και συνθετικών μεμβρανών, καθώς επίσης και η κατασκευή συστήματος συλλογής των στραγγιδίων που αποτελείται από διάτρητους σωλήνες που τοποθετούνται επάνω από τις συνθετικές μεμβράνες.

Κατά την αποσύνθεση των απορριμμάτων παράγεται επίσης βιοαέριο που συνίσταται κατά 50-70% από μεθάνιο και κατά 30-40% από διοξείδιο του άνθρακα. Το βιοαέριο ανέρχεται προς την επιφάνεια των απορριμμάτων, εγκλωβίζεται κάτω από την επιφανειακή στρώση κάλυψης και τελικά διαφεύγει στην ατμόσφαιρα μέσω ρωγμών που προκαλεί στην επιφανειακή στρώση κάλυψης. Για την αποφυγή της ανεξέλεγκτης διαφυγής του βιοαερίου στην ατμόσφαιρα είναι απαραίτητη η κατασκευή συστημάτων συλλογής του βιοαερίου.

4.6 Εκτίμηση Κύκλου Ζωής Υλικών

Κατά τη διαχείριση των απορριμμάτων συνήθως εστιάζομαστε στην επιλογή μεθόδου διαχείρισής τους και αντιμετωπίζουμε το δίλημμα της καύσης ή της ταφής τους. Καθώς όμως παρουσιάζονται όλο και συχνότερα φαινόμενα διακοπής της λειτουργίας των αποτεφρωτήρων λόγω ανεπαρκούς απόδοσης τους ή πλήρωσης των Χ.Υ.Τ.Α., τότε γίνεται επιτακτική η απαίτηση για μία διαφορετική προσέγγιση του προβλήματος. Η συγκεκριμένη προσέγγιση βασίζεται στην εφαρμογή ισοζυγίων ύλης και ενέργειας σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής ενός προϊόντος. Ένα σχηματικό διάγραμμα εκτίμησης του κύκλου ζωής ενός προϊόντος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7 Κύκλος ζωής ενός προϊόντος (Masters, 1996).

Οι εισροές περιλαμβάνουν την ενέργεια και τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγή, χρήση και διάθεση του προϊόντος. Στο κέντρο του Σχήματος περιγράφονται τα διάφορα στάδια στον κύκλο ζωής του προϊόντος, που περιλαμβάνουν την απόκτηση και κατεργασία των πρώτων υλών, την κατασκευή του προϊόντος, τη συσκευασία και διανομή του, τη χρήση του και την τελική διάθεσή του. Ως εκροές του συστήματος ορίζονται τα υγρά, αέρια και στερεά απόβλητα που παράγονται σε κάθε στάδιο της παραγωγικής

διαδικασίας, η θερμότητα που απελευθερώνεται ως απόβλητο στο περιβάλλον, αλλά και η ενέργεια που μπορεί να ανακτηθεί κατά την τελική διάθεση του προϊόντος.

Με τον όρο *επαναχρησιμοποίηση* εννοούμε τη χρήση του προϊόντος για δεύτερη ή και τρίτη φορά σε κάποια δραστηριότητα που είναι η ίδια με αυτή για την οποία κατασκευάστηκε (π.χ. πλαστική σακούλα για μεταφορά αγαθών) ή τελείως διαφορετική (π.χ. γυάλινα βάζα για αποθήκευση μικροαντικειμένων). Ο όρος *επανακατασκευή* αναφέρεται στην πλήρη αποσυναρμολόγηση του προϊόντος, την επιδιόρθωση των επαναχρησιμοποιούμενων μερών του και τη συναρμολόγησή τους με νέα αντικείμενα με στόχο την κατασκευή ενός καινούργιου προϊόντος. Τέλος, με τον όρο *ανακύκλωση* αναφερόμαστε στην ανάκτηση υλικών από το ρεύμα των αποβλήτων και στην κατεργασία τους με στόχο να χρησιμοποιηθούν ως πρώτες ύλες κατά την κατασκευή νέων προϊόντων. Στον Πίνακα 4.4 εκτιμάται ο κύκλος ζωής δύο προϊόντων που έχουν παρόμοια χρήση.

Πίνακας 4.4 Εκτίμηση κύκλου ζωής για κύπελλα φτιαγμένα από χαρτί και πολυστυρένιο (ανά 1000 κύπελλα) (Hocking, 1991).

	Κύπελλο από χαρτί	Κύπελλο από πολυστυρένιο
<i>Πρώτες Ύλες</i>		
Ξύλο (Kg)	21	0
Πετρέλαιο (Kg)	0	2,4
Άλλα Χημικά (Kg)	1,2	0,08
<i>Απαιτούμενη Ενέργεια</i>		
Θερμότητα (Kg πετρελαίου)	1,8	1,9
Ηλεκτρικό Ρεύμα (Kg πετρελαίου)	2	0,15
<i>Υγρά Απόβλητα</i>		
Όγκος (m ³)	1	0,05
Αιωρούμενα Στερεά (g)	80	1
BOD (g)	90	0,4
Οργανοχλωριωμένα	20	0
Ανόργανα Άλατα	500	30
<i>Αέριες Εκπομπές</i>		
Cl (g)	2	0
ClO ₂ (g)	2	0
Αιωρούμενα Σωματίδια (g)	10	0

CO (g)	30	0,2
Οξείδια του Αζώτου (g)	50	0,8
SO ₂ (g)	100	7
Πεντάνιο (g)	0	80
Αίθυλ-βενζόλιο, Στυρένιο (g)	0	5
<i>Ανακύκλωση /</i>		
<i>Επαναχρησιμοποίηση</i>		
Επαναχρησιμοποίηση	Δύσκολη	Εύκολη
Ανακύκλωση	Λιγότερο Καλή	Καλή
<i>Τελική Διάθεση</i>		
Αποτέφρωση	Καθαρή	Καθαρή
Ανάκτηση Θερμότητας (MJ)	170	80
Μάζα σε Χ.Υ.Τ.Α. (Kg)	8,3	1,9
Όγκος σε Χ.Υ.Τ.Α. (m ³)	0,0175	0,0178
Βιοαποδόμηση σε Χ.Υ.Τ.Α.	Αργή Βιοαποδόμηση	Όχι

Ασκήσεις

1. Θεωρείστε ότι για τη συλλογή των απορριμμάτων σε μία πόλη χρειάζονται 20 min για τη μετακίνηση του απορριμματοφόρου από το χώρο στάθμευσης στο χώρο συλλογής, 20 min για τη μετακίνηση του απορριμματοφόρου από το χώρο συλλογής στο χώρο διάθεσης, 15 min για το άδειασμα του απορριμματοφόρου στο χώρο διάθεσης, 15 min για τη μετακίνηση του απορριμματοφόρου από το χώρο διάθεσης στο χώρο στάθμευσης, 40 min ημερησίως για διάλειμμα των εργαζομένων στο απορριμματοφόρο, 0,5 min για μετακίνηση του απορριμματοφόρου από το έναν κάδο στον επόμενο και 1 min για το άδειασμα του κάδου στο απορριμματοφόρο. Θεωρείστε επίσης ότι ο όγκος του απορριμματοφόρου είναι 25 m^3 , ο συντελεστής συμπίεσης των απορριμμάτων που επιτυγχάνεται ισούται με 4, ο όγκος των απορριμμάτων που αποτίθενται σε κάθε κάδο ισούται με $0,2 \text{ m}^3$ /δημότη, ενώ κάθε κάδος εξυπηρετεί 4 δημότες. α) Να υπολογίσετε πόσες ώρες την ημέρα θα πρέπει να εργάζεται το προσωπικό του απορριμματοφόρου εάν θεωρήσουμε ότι το απορριμματοφόρο γεμίζει δύο (2) φορές κατά τη διάρκεια της ημέρας. β) Αν το απορριμματοφόρο χρησιμοποιείται πέντε ημέρες την εβδομάδα και τα απορρίμματα κάθε δημότη συλλέγονται μία φορά εβδομαδιαίως πόσοι δημότες εξυπηρετούνται από το απορριμματοφόρο.
2. Υποθέστε ότι κάθε δημότης παράγει $0,25 \text{ m}^3$ απορριμμάτων εβδομαδιαίως. Το απορριμματοφόρο χρειάζεται 0,4 min για να συλλέξει τα απορρίμματα κάθε δημότη και ο συντελεστής συμπίεσης των απορριμμάτων που επιτυγχάνει ισούται με 4. Στη συγκεκριμένη πόλη είναι διαθέσιμα δύο απορριμματοφόρα που παρουσιάζουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Διαδρομές ανά ημέρα στο χώρο διάθεσης	2	3
Όγκος απορριμματοφόρου (m^3)	27	15
Λειτουργικό κόστος απορριμματοφόρου (Ευρώ/έτος)	120.000	70.000
Συνολικός χρόνος που απαιτείται για κίνηση απορριμματοφόρου, άδειασμα, διάλειμμα εργαζομένων (min/ημέρα)	160	215

- α) Αν θεωρήσουμε ότι το απορριμματοφόρο κινείται 5 ημέρες την εβδομάδα και η συλλογή των απορριμμάτων κάθε δημότη γίνεται μία φορά την εβδομάδα, πόσους δημότες θα εξυπηρετεί το κάθε απορριμματοφόρο.

- β) Πόσες ώρες την ημέρα θα πρέπει να εργάζεται το προσωπικό ώστε να γεμίζουν τα απορριμματοφόρα κάθε μέρα.
- γ) Αν το κόστος του προσωπικού είναι 40 Ευρώ την ώρα, ποιο θα είναι το συνολικό κόστος κάθε συστήματος (λειτουργικό + κόστος προσωπικού). Να υπολογίσετε το ετήσιο κόστος ανά δημότη και να πείτε η χρήση ποιου από τα δύο απορριμματοφόρα είναι η πλέον συμφέρουσα.
3. Υποθέστε ότι μία πόλη 50.000 κατοίκων παράγει 40.000 τόνους απορριμμάτων ανά έτος. Αν το ποσοστό ανακύκλωσης των απορριμμάτων είναι 22% και το υπόλοιπο καταλήγει σε Χ.Υ.Τ.Α. να υπολογίσετε την απαιτούμενη επιφάνεια του Χ.Υ.Τ.Α. ανά έτος. Θεωρείστε ότι η πυκνότητα των απορριμμάτων στο Χ.Υ.Τ.Α. ισούται με $0,6 \text{ τόνους/m}^3$, το ύψος κάθε κυψέλης με 3 m, το 80% της κάθε κυψέλης αποτελείται από απορρίμματα και στο Χ.Υ.Τ.Α υπάρχει μόνο ένα ταμπάνι.
4. Στην Ελλάδα παράγονται ετησίως $3,5 \times 10^6$ τόνοι απορριμμάτων. Αν υποθέσουμε ότι το σύνολο των απορριμμάτων θα πρέπει να οδηγείται σε Χ.Υ.Τ.Α., τι έκταση θα απαιτείται ετησίως αν θεωρήσουμε ότι η πυκνότητα των απορριμμάτων στο Χ.Υ.Τ.Α. ισούται με 600 Kg/m^3 , το ύψος κάθε κυψέλης με 3 m και το 20% της κάθε κυψέλης αποτελείται από χώμα. Διερευνήστε τις περιπτώσεις κατασκευής ενός και δύο ταμπανίων.

Βιβλιογραφία

- Bitton G. (1999) *Wastewater microbiology*, Wiley-Liss, New York, USA.
- Crites R. and Tchobanoglous G. (1998) *Small and decentralized wastewater management systems*. WCB Mc Graw-Hill, USA.
- EPA (1994) *Characterization of Municipal Solid Waste in the United States: 1994 Update*, Office of Solid Waste, Washington D.C.
- Gleick P.H. (1993) *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*, Oxford University Press, New York.
- Gray N.F. (1990) *Activated Sludge: Theory and Practise*. Oxford University Press, New York, USA.
- Hocking M.B. (1991) Relative merits of polystyrene foam and paper in hot drink cups: Implications for packaging. *Environmental Management*, 15(6), 731-747.
- Kiely G. (1996) *Environmental Engineering*, Irwin/McGraw-Hill, UK.
- Λέκκας Θ. (1996) *Περιβαλλοντική Μηχανική Ι - Διαχείριση Υδατικών Πόρων*, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.
- Λέκκας Θ. (2001) *Περιβαλλοντική Μηχανική ΙΙ - Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων*, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.
- Masters G.M. (1996) *Introduction to environmental engineering and science*. 2nd ed., Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Merian E. (1991) *Metals and their compounds in the environment: Occurrence, analysis and biological relevance*. VCH Publications, USA.
- Metcalf and Eddy, Inc. (1984) *Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse*, McGraw Hill, New York.
- Shiklomanov I.A. (1993) World fresh water resources in *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*, P.H. Gleick (ed.) Oxford University Press, New York, USA.
- Στασινάκης Α. (2002) Διερεύνηση τοξικότητας και μελέτη συμπεριφοράς χημικών μορφών μετάλλων σε συστήματα ενεργού ιλύος με έμφαση στο χρώμιο, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.
- Thomaidis N.S. and Lekkas T.D. (1999) *Metal speciation in the environment*. Post conference symposium proceedings, 6th conference on environmental science and technology, Samos, Greece.

- Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α., 1985, «Αναλύσεις Οικιακών Απορριμμάτων με Στατιστικά Παραδεκτές Μεθόδους στην Ευρύτερη Περιοχή της Αθήνας», Αθήνα.
- Χαλβαδάκης Κ. (2000) *Εισαγωγή στην Περιβαλλοντική Μηχανική*, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.
- Χαλβαδάκης Κ. (2002) *Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων*, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.
- Χριστούλας Δ., Ανδρεαδάκης Α., Αραβαντινός Α., Καββαδάς Μ., Σταθόπουλος Α., Στάμου Α. και Χατζημήτρος Κ. (2000) *Περιβαλλοντική Τεχνολογία*, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- World Resources Institute (1992) *World Resources 1992-1993*, Oxford University Press, New York.