



Πανεπιστήμιο Πειραιώς
Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης
& Τεχνολογίας



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Χημικών Μηχανικών

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΟΡΓΑΝΩΣΗ & ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: Συστήματα Διαχείρισης της Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος

Συγκριτική ανάλυση υποδειγμάτων ποιότητας αέρα, επιφανειακών και υπόγειων υδάτων

Διπλωματική Εργασία
Κωνσταντίνας Υφαντή

Επιβλέποντες Καθηγητές:
Φ. Μπατζιάς
Δ. Σιδηράς



ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2009

Συγκριτική ανάλυση υποδειγμάτων
ποιότητας αέρα, επιφανειακών
και υπόγειων υδάτων

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
Πρόλογος	1
Εισαγωγή	2
Κεφάλαιο 1. Αναλυτικά μοντέλα ποιότητας αέρα.....	5
Κεφάλαιο 2. Αναλυτικά μοντέλα ποιότητας επιφανειακού νερού.....	35
Κεφάλαιο 3. Αναλυτικά μοντέλα ποιότητας υπόγειου νερού	67
Κεφάλαιο 4. Δομή μοντέλου ποιότητας υπόγειου νερού	95
Κεφάλαιο 5. Δομή μοντέλου ποιότητας αέρα.....	101
Κεφάλαιο 6. Δομή μοντέλου ποιότητας ποταμού.....	109
Κεφάλαιο 7. Δομή μοντέλου ποιότητας θάλασσας.....	116
Κεφάλαιο 8. Δομή μοντέλου ποιότητας λίμνης	124
Κεφάλαιο 9. Σύγκριση μοντέλων ποιότητας φυσικών αποδεκτών	132
9.1 Δομή μοντέλου ποιότητας φυσικών αποδεκτών	132
9.2 Εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης στους φυσικούς αποδέκτες.....	135
9.2.1. Κατανάλωση-Αποικοδόμηση.....	137
9.2.2. Παραγωγή.....	138
9.2.3. Ρόφηση.....	139
Κεφάλαιο 10 Υπομοντέλο ροής ρευστού (μακρινής περιοχής) για τους φυσικούς αποδέκτες.....	141
10.1. Είδος ροής ρευστού	141
10.1.1 Ασυμπιεστή ροή	141
10.1.2. Μόνιμη ροή.....	141

10.1.3. Στρωτή ή Τυρβώδης ροή.....	142
10.1.4. Ομοιόμορφη ροή.....	143
10.1.5 Μεταφορά	145
10.1.5.1.Ελεύθερη (φυσική) μεταφορά.....	148
10.1.5.2. Ροή ταχύτητας (ορμής)	150
10.2. Διεύθυνση ροής.....	152
10.3. Χαρακτηριστικά επιφάνειας ροής.....	154
10.4. Μεταβολές επιφάνειας ροής.....	156
10.5. Καθαρές πλευρικές ροές.....	160
Κεφάλαιο 11. Υπομοντέλο ροής κοντινής περιοχής για τους φυσικούς αποδέκτες.....	161
11.1. Υπομοντέλο ροής κοντινής περιοχής	161
11.2. Είδος ροής	164
11.2.1. Καθαρό πλούμιο	164
11.2.2. Καθαρή εκτόξευση.....	165
11.2.3. Εξαναγκασμένο πλούμιο.....	166
11.3. Συνθήκες ροής αποδέκτη.....	167
11.4 Χαρακτηριστικά πηγής.....	169
11.4.1. Σημείο έκλυσης	169
11.4.2. Ανάντη διείδυση.....	171
11.4.3. Σταθερή	173
11.4.4. Συνεχής.....	173
Συμπεράσματα.....	174
Βιβλιογραφία.....	179

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία έγινε στα πλαίσια του διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών (ΜΠΣ) στην Οργάνωση & Διοίκηση Βιομηχανικών Συστημάτων, με ειδίκευση Ενέργεια & Περιβάλλον και τίτλο «Συστήματα Διαχείρισης της Ενέργειας και Προστασίας Περιβάλλοντος», του Τμήματος Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Πειραιώς (Π.Π.) και της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.).

Εκπονήθηκε κατά το μεγαλύτερο μέρος της στο Εργαστήριο Προσομοίωσης Βιομηχανικών Διεργασιών του Τμήματος Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Πειραιώς (Π.Π.) υπό την καθοδήγηση των επιβλεπόντων Καθηγητή Φ. Μπατζιά και Επίκουρου Καθηγητή Δ. Σιδηρά.

Αφορά σε συγκριτική ανάλυση υποδειγμάτων ποιότητας συνήθων φυσικών αποδεκτών αέρα, επιφανειακών και υπόγειων υδάτων (ατμόσφαιρα, θάλασσα, λίμνη, ποτάμι και υπόγειο νερό).



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία αποτελεί συγκριτική μελέτη αναλυτικών μοντέλων ποιότητας συνήθων φυσικών αποδεκτών (αέρα, επιφανειακών και υπόγειων υδάτων).

Στην παρούσα εργασία προτιμάται ο γενικότερος και ορθότερος όρος «μοντέλα ποιότητας φυσικών αποδεκτών» που επικεντρώνεται στο αποτέλεσμα, τη τελική ρύπανση στον αποδέκτη, από τον ειδικότερο όρο «μοντέλα μεταφοράς ρύπανσης σε φυσικούς αποδέκτες» που επικεντρώνεται στην κύρια αιτία της ρύπανσης (μεταφορά ρύπου από την πηγή). Σύμφωνα με το περιεχόμενο της Ενότητας 9.2 που αφορά την εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης, ο όρος «μοντέλα μεταφοράς» δεν είναι πλήρης, γιατί δεν συμπεριλαμβάνει άλλους παράγοντες διαμόρφωσης της τελικής ρύπανσης στον αποδέκτη εκτός της μεταφοράς (κατανάλωση, παραγωγή, ρόφηση, απόθεση κλπ).

Τα Κεφάλαια 1, 2 και 3 αποτελούν επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας. Οι εξισώσεις των κεφαλαίων αυτών είναι ουσιαστικά απλοποιήσεις πολυπλοκότερων εξισώσεων, κατόπιν απλουστευτικών παραδοχών. Οι απλοποιημένες εξισώσεις επιλύονται αναλυτικά (μαθηματικά) και οι λύσεις τους οι οποίες αποτελούν προσέγγιση της πραγματικότητας συμπεριλαμβάνονται στα Κεφάλαια 1, 2 και 3. Η παρούσα εργασία αφορά αποκλειστικά σε αναλυτικά/μαθηματικά μοντέλα ποιότητας αποδεκτών – και όχι σε αριθμητικά. Επίσης όλα τα αναλυτικά/μαθηματικά μοντέλα ποιότητας αποδεκτών είναι Eulerian γιατί χρησιμοποιούν το σταθερό τρισδιάστατο Καρτεσιανό σύστημα αξόνων. Τα μοντέλα κινητού συστήματος συντεταγμένων (Lagrangian) δεν συμπεριλαμβάνονται στην παρούσα εργασία.

Προσεκτική παρατήρηση, μελέτη και σύγκριση του περιεχομένου των Κεφαλαίων 1, 2 και 3 οδήγησε στο συμπέρασμα ότι τα αναλυτικά μοντέλα ποιότητας έχουν κοινή καθετοποιημένη δομή με οριζόντιες διαφοροποιήσεις για καθένα φυσικό αποδέκτη.

Η παρούσα εργασία προτείνει:

- μια κοινή καθετοποιημένη δομή του μοντέλου ποιότητας ανεξαρτήτως αποδέκτη
- οριζόντιες αναλυτικές διαφοροποιήσεις για τους φυσικούς αποδέκτες ανά επίπεδο της κάθετης δομής (οριζόντια δομή)



- την καθετοποιημένη δομή επιγραμματικά, όπως διαμορφώνεται σύμφωνα με τα παραπάνω, για καθένα αποδέκτη (ατμόσφαιρα, θάλασσα, λίμνη, ποτάμι, υπόγειο νερό)

Έτσι τεκμηριώνει πλήρως την ομοιότητα των αναλυτικών μοντέλων ποιότητας για τους φυσικούς αποδέκτες με τη δημιουργία οριζόντιων επιπέδων (γραμμών) της βέλτιστης κοινής καθετοποιημένης δομής, που διασταυρώνονται με τα κάθετα επίπεδα (στήλες) για κάθε φυσικό αποδέκτη (ατμόσφαιρα, λίμνη, θάλασσα, ποτάμι, υπόγειο νερό), αποφεύγοντας τις επαναλήψεις γραμμών και στηλών. Με όλα τα παραπάνω, τα αναλυτικά μοντέλα ποιότητας για όλους τους φυσικούς αποδέκτες γίνονται απόλυτα κατανοητά και εύχρηστα για τους αναγνώστες της παρούσας εργασίας, μέσα από πολλές οπτικές γωνίες (οριζόντια, κάθετα, γενικά, αναλυτικά).

Τα αναλυτικά μοντέλα ποιότητας φυσικών αποδεκτών, λόγω της πολύπλοκης μαθηματικής φύσης τους, αποτελούσαν και αποτελούν ένα μάθημα περιβαλλοντικής εκπαίδευσης προς αποφυγή. Συνήθως δε συμπεριλαμβάνονται στη διδακτέα ύλη των ελληνικών εκπαιδευτικών Τμημάτων Περιβάλλοντος και δε συναντώνται συχνά σε αντίστοιχες βιβλιογραφικές πηγές (βιβλία, συγγράμματα, σημειώσεις). Όταν σπανίως συμπεριλαμβάνονται σε διδακτικό υλικό δεν είναι συγκεντρωμένα για το σύνολο των συνήθων φυσικών αποδεκτών (ατμόσφαιρα, λίμνη, ποτάμι, θάλασσα και υπόγειο νερό), ούτε δομημένα.

Ο λόγος που δείχνουν απροσπέλαστα για το πλατύ ακαδημαϊκό κοινό είναι ότι δημιουργούνται, αναθεωρούνται και δημοσιεύονται από επιστημονικούς οργανισμούς διεθνούς κύρους και εμβέλειας με σκοπό την πώλησή τους ως έτοιμα ηλεκτρονικά προγράμματα. Οι εξισώσεις που υπάρχουν πίσω από τα προγράμματα αυτά συνήθως δεν αφορούν τον χρήστη, ο οποίος χρειάζεται μόνο τα παραγόμενα αποτελέσματα (συγκεντρώσεις ρύπων) τα οποία και αξιοποιεί.

Το υλικό των Κεφαλαίων 1, 2 και 3 της παρούσας εργασίας προέρχεται κυρίως από βοηθητικό συνοδευτικό υλικό ηλεκτρονικών εκδόσεων μοντέλων ποιότητας αποδεκτών από το μεγαλύτερο διεθνή οργανισμό που παράγει και εκδίδει μοντέλα εκτίμησης ρύπανσης φυσικού περιβάλλοντος, την Environmental Protection Agency των Η.Π.Α.



Σκοπός της παρούσας εργασίας πέρα από την όσο το δυνατό πληρέστερη επιστημονική παρουσίαση των αναλυτικών μοντέλων ποιότητας φυσικών αποδεκτών είναι:

- 1) η ανάδειξη της κοινής δομής των αναλυτικών μοντέλων ποιότητας, και πώς αυτά διαμορφώνονται για: διαφορετικούς αποδέκτες (ατμόσφαιρα, λίμνη, θάλασσα, ποτάμι, υπόγειο νερό), διαφορετικές πηγές ρύπανσης, διαφορετικά είδη ροής ρευστού (αέρα ή νερού) και αποβλήτων από την πηγή, διαφορετικές συνθήκες και τοπολογία ροής και διαφορετικούς ρύπους, δηλ. για διαφορετικές περιπτώσεις (case-studies), με τροποποίηση της μιας και μοναδικής εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης του αναλυτικού μοντέλου ποιότητας αποδέκτη
- 2) να καταστεί για τους σπουδαστές και φοιτητές ελληνικών Τμημάτων Περιβάλλοντος, καθώς και για τους διδάσκοντες στα αντίστοιχα Τμήματα εύχρηστο, έξυπνο εργαλείο υπολογισμού συγκεντρώσεων ενός ρύπου σε οποιονδήποτε φυσικό αποδέκτη για οποιαδήποτε περίπτωση ρύπανσης από εντοπισμένη πηγή (συνεχή και σταθερή) σε αυτόν
- 3) να αποτελέσει έναυσμα να γίνει η παρουσίαση της προτεινόμενης δομής σε πίνακα με γραμμές τα οριζόντια επίπεδα της καθετοποιημένης δομής και στήλες τους φυσικούς αποδέκτες (ατμόσφαιρα, λίμνη, θάλασσα, ποτάμια, υπόγειο νερό) ώστε να είναι ακόμα πιο εύχρηστη και εποπτική. Σε ένα τέτοιο πίνακα αναδεικνύονται ευκολότερα τα κενά των αναλυτικών μοντέλων για όλους τους παραπάνω αποδέκτες των Κεφαλαίων 1, 2 και 3 και μπορούν πιο εύκολα στο μέλλον να συμπληρωθούν
- 4) να καλύψει το διδακτικό κενό που υπάρχει στην ελληνική εκπαίδευση πάνω στα μοντέλα ποιότητας φυσικών αποδεκτών



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ

Ευστάθεια ατμόσφαιρας

Πίνακας 1.1. Συσχέτιση ταχύτητας ανέμου, καταστάσεων Ευστάθειας Pasquill-Gifford και ύψους (μήκους) Monin-Obukhov [3]

Περιγραφή	P-G Κατά- σταση Ευστάθειας	Ηλιοφάνεια	Ταχύτητα ανέμου U	Μήκος M-O L_{MO}
Πολύ σταθής	A	Ηλιόλουστη μέρα	<3 m/s	-10 m
Ασταθής	B ή C	↓	2-6 m/s	-50 m
Ουδέτερη	D	Συννεφιά ή αέρας	>3-4 m/s	$ L > 100$ m
Σταθερή	E	↓	2-4 m/s	+50 m
Πολύ Στα- θερή	F	Νύχτα με ξαστεριά	<3 m/s	+10 m

Ύψος Monin-Obukhov L , όπου η κατακόρυφη διάτμηση του αέρα ισούται με την άνωση λόγω μεταφοράς θερμότητας

$$L = -\frac{T_a \rho c_p u_*^3}{kgH} \quad (1.1)$$

u_* ταχύτητα τριβής (τυπικά 0,05–0,5m/s)

T_a απόλυτη θερμοκρασία επιφανειακού στρώματος αέρα ($^{\circ}\text{K}$)

k σταθερά Von Karman (=0,41)

g επιτάχυνση της βαρύτητας ($9,8\text{m/s}^2$)

c_p θερμοχωρητικότητα αέρα σε σταθερή πίεση ($287\text{J/kg}^{\circ}\text{K}$)

ρ πυκνότητα αέρα

H κατακόρυφη ροή θερμότητας από το έδαφος ($-50-200\text{W/m}^2$ τυπικά)

Ύψος Monin-Obukhov L και καταστάσεις ευστάθειας ατμόσφαιρας

➤ $L < 0 \Rightarrow$ ατμοσφαιρική αστάθεια

- $z < |L|$ επικρατεί η διάτμηση του ανέμου ή μηχανική παραγωγή διαταραχών ή τριβή



- $z > |L|$ επικρατεί η αύξηση της κατακόρυφης διαταραχής λόγω θετικής άνωσης
- $L > 0 \Rightarrow$ ατμοσφαιρική σταθερότητα ή συνθήκες θερμικής διαστρωμάτωσης
 - $z < L$ επικρατεί η μηχανική παραγωγή διαταραχών (δηλ. η τριβή)
 - $z > L$ επικρατεί η μείωση της κατακόρυφης διαταραχής λόγω αρνητικής άνωσης
- $L \rightarrow +\infty \Rightarrow$ ουδέτερες συνθήκες
 - $z < L$ επικρατεί η διάτμηση του ανέμου, δεδομένου ότι δεν υφίσταται καμία θερμική επίδραση
- $|L| < 1m$ σπάνια

[1,3,7]

Αριθμός Prandtl (περίπου 0,7-0,8 για τον αέρα και περίπου 7 για το νερό). Μικρός αριθμός Prandtl σημαίνει ότι το πάχος του οριακού στρώματος θερμότητας είναι μεγαλύτερο από το οριακό στρώμα ταχύτητας.

$$Pr = \frac{\text{ιξώδης διάχυση (λόγο ορμής)}}{\text{θερμική διάχυση}} = \frac{\text{πάχος οριακού στρώματος ταχύτητας}}{\text{πάχος οριακού στρώματος θερμότητας}} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k} \quad (1.2)$$

α θερμική διάχυση (m^2/s)

c_p ειδική θερμότητα ($J/(kg \cdot K)$)

k θερμική αγωγιμότητα ($W/(m \cdot K)$)

ν κινηματικό ιξώδες (m^2/s)

μ ιξώδες ($Pa \cdot s$)

Αριθμός Reynolds για ροή αέρα πάνω στη γήινη επιφάνεια (για $Re > 10^5 - 10^6$ τυρβώδης ροή)

$$Re = \frac{\text{δυνάμεις αδράνειας}}{\text{δυνάμεις τριβής}} = \frac{\rho u_s^2 / L}{\mu / L^2} = \frac{\rho u_s L}{\mu} = \frac{u_s L}{\nu} \quad (1.3)$$

u_s επιφανειακή ταχύτητα του αέρα χωρίς τριβές ή χαρακτηριστική ταχύτητα αέρα (ms^{-1})

L χαρακτηριστικό μήκος (ύψος) Monin-Obukhov (m)

μ δυναμικό ιξώδες ($Pa \cdot s$)

ν κινηματικό ιξώδες ($m^2 s^{-1}$)



Αριθμός Richardson

$$Ri = \frac{\text{δυναμική ενέργεια}}{\text{κινητική ενέργεια}} = \frac{gh}{u^2} \quad (1.4)$$

g επιτάχυνση της βαρύτητας

h αντιπροσωπευτικό κατακόρυφο ύψος

u αντιπροσωπευτική ταχύτητα

Πυκνομετρικός αριθμός Richardson για ατμοσφαιρικές και θαλάσσιες ροές

$Ri = 1$ στο ύψος Monin-Obukhov

$$Ri = \frac{g'h}{u^2} \quad (1.5)$$

$Ri \ll 1$ η άνωση δεν παίζει ρόλο στη ροή

$Ri \gg 1$ επικρατεί η άνωση στη ροή

g' μειωμένη βαρύτητα

[11]

Εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης

Eulerian μοντέλο τριών διαστάσεων για την μεταφορά αέριων ρύπων στον αέρα

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S + R \quad (1.6)$$

C συγκέντρωση του ρύπου

u, v, w συνιστώσες ταχύτητας ανέμου κατά x, y, z διευθύνσεις αντίστοιχα

K_x, K_y, K_z συντελεστές τυρβώδους διάχυσης (m^2/s)

$$-K_y \frac{dC}{dy} = \overline{v'c'}$$

$$-K_z \frac{dC}{dz} = \overline{w'c'}$$

C (g/m^3)

R απομάκρυνση ρύπου είτε με ξηρή / υγρή απόθεση είτε με χημική αντίδραση

S πηγή & παραγωγή ρύπου

Μονοδιάστατο eulerian μοντέλο για μόνιμες συνθήκες και σταθερούς συντελεστές διάχυσης

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + q\delta(x)\delta(y)\delta(z) \quad (1.7)$$

q πηγή ρύπου (g/s)



$\delta(\cdot)$ συνάρτηση δέλτα

Αναλυτική λύση της 1.7 για q σταθερό

$$C(x, y, z) = \frac{q}{2\pi(K_x K_y K_z)^{1/2} r} \exp\left\{\frac{ux}{2K_x} - \frac{ur}{2(K_x)^{1/2}}\right\} \quad (1.8)$$

$$r = \left(\frac{x^2}{K_x} + \frac{y^2}{K_y} + \frac{z^2}{K_z}\right)^{1/2}$$

Γκαουσιανό στατιστικό μοντέλο (τριδιάστατο ως προς τη διάχυση)

$$C(x, y, z) = \frac{qx}{\pi u \sigma_x \sigma_y \sigma_z s} \exp\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} - \frac{x}{\sigma_x} s\right) \quad (1.9)$$

$$K_x = \frac{u \sigma_x^2}{2x} \quad (1.9\alpha)$$

$$K_y = \frac{u \sigma_y^2}{2x} \quad (1.9\beta)$$

$$K_z = \frac{u \sigma_z^2}{2x} \quad (1.9\gamma)$$

$$s = \left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)^{1/2}$$

Εξίσωση μονοδιάστατης μεταφοράς και δισδιάστατης διάχυσης

$$\frac{dC}{dt} + U \frac{dC}{dx} = \frac{d}{dy} \left(K_y \frac{dC}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(K_z \frac{dC}{dz} \right) + S \quad (1.10)$$

Γκαουσιανό στατιστικό μοντέλο λεπτού πλουμίου για σημειακή επιφανειακή πηγή. Αναλυτική λύση της 1.10

$$C(x, y, z) = \frac{q}{4\pi(K_y K_z)^{1/2} x} \exp\left\{-\frac{U}{4x} \left(\frac{y^2}{K_y} + \frac{z^2}{K_z}\right)\right\}$$

ή

$$C(x, y, z) = \frac{q}{2\pi U \sigma_z \sigma_y} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (1.11)$$

K_y, K_z συντελεστές τυρβώδους διάχυσης που αυξάνονται με την απόσταση από την πηγή και επιπλέον ο K_y αυξάνεται και με το ύψος μέσα στο οριακό στρώμα αέρα

$K_y > K_z$ (στην ατμόσφαιρα) δηλ. το πλούμιο έχει ελλειπτικό σχήμα

C (g/m^3)

S πηγή/απομάκρυνση ρύπου ($\text{g}/(\text{m}^3\text{s})$)



U μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος της πηγής

Q πηγή ($\text{g}/(\text{m}^3\text{s})$)

Παραδοχές μοντέλου λεπτού πλουμίου:

- Οι συγκεντρώσεις του ρύπου δεν επηρεάζουν τη ροή (παθητική διάχυση)
- Η μοριακή διάχυση καθώς και η κατάντη διάχυση είναι αμελητέες $K_x = 0$
- Η ροή είναι ασυμπίεστη
- Μόνιμη ροή σε ιδανική επίπεδη επιφάνεια δηλ. μονοδιάστατη ροή ανέμου
- Η διάχυση των ρύπων στην ατμόσφαιρα ακολουθεί μια κανονική κατανομή Gauss τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση
- Η διάχυση του νέφους κατά μήκος του άξονα X είναι αμελητέα, επικρατεί η μεταφορά

Το μοντέλο εφαρμόζεται κάτω από τις ακόλουθες συνθήκες:

- Σταθερή μέση ταχύτητα ανέμου
- Επίπεδη τοπογραφία
- Συνεχής και ομοιόμορφος ρυθμός εκπομπής ρύπου
- Ο διαχεόμενος ρύπος είναι ένα χημικά αδρανές αέριο ή αεροζόλ (μικρότερο των 20μ σε διάμετρο)
- Ισχύει η εξίσωση συνέχειας μάζας

Γκαουσιανό μοντέλο ανυψωμένου πλουμίου, δηλ. για ανυψωμένη σημειακή πηγή

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{U} \cdot \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma_y} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma_z} \left\{ \exp\left(\frac{-(H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(H+z)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\} \quad (1.12)$$

H συνολική ανύψωση πλουμίου από το έδαφος (m)

U μέση ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πηγής (m/s)

Q πηγή ($\text{g}/(\text{m}^3\text{s})$)

$\exp\left(\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)$ παράμετρος κατακόρυφης διάχυσης

$\exp\left(\frac{-(H+z)^2}{2\sigma_z^2}\right)$ παράμετρος ανάκλασης πλουμίου στο έδαφος, που προκαλεί αύξηση συγκεντρώσεων σαν από φανταστική πηγή σε ύψος $z = -H$



τυπική απόκλιση κατανομής ρύπου κατά y ή RMS $\left(x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i^2}\right)$ των εγκάρσιων πλατών του πλουμίου (m)

$$\sigma_y = \sqrt{2K_y \frac{x}{U}} \quad (1.12\alpha)$$

τυπική απόκλιση κατανομής ρύπου κατά z ή RMS $\left(x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i^2}\right)$ των κατακόρυφων πλατών του πλουμίου (m)

$$\sigma_z = \sqrt{2K_z \frac{x}{U}} \quad (1.12\beta)$$

Συγκέντρωση ρύπου στο έδαφος από ανυψωμένη σημειακή πηγή

$$C(x, y, 0, H) = \frac{Q}{\pi U \sigma_z \sigma_y} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-H^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (1.13)$$

Συγκέντρωση ρύπου στο έδαφος από σημειακή πηγή εδάφους

$$C(x, y, 0, 0) = \frac{Q}{\pi U \sigma_z \sigma_y} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (1.14)$$

Μέγιστη συγκέντρωση του ρύπου (στον κεντρικό άξονα του πλουμίου)

$$C(x, 0, 0, H) = \frac{Q}{\pi U \sigma_z \sigma_y} \cdot \exp\left(\frac{-H^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (1.15)$$

[3,10,12]

Στατιστικοί συντελεστές διάχυσης

Pasquill-Gifford (P-G) καμπύλες. Ισχύουν για χαμηλές πηγές, για σχετικά λεία εδάφη (αγροτικά) και για αποστάσεις 100m-5km το πολύ από την πηγή.

$$\sigma_y = 465,11628(x) \tan (TH) \quad (1.16\alpha)$$

$$TH = 0,017453293[c - d \ln(x)] \quad (1.16\beta)$$

$$\sigma_z = ax^b \quad (1.16\gamma)$$

x κατάντη απόσταση (km)

σ_y, σ_z (m)



Πίνακας 1.2. Τιμές συντελεστών c , d της εξίσωσης (1.16β) για αγροτικά εδάφη [8,9,10,13,14]

Κατάσταση ευστάθειας Pasquill	c	d
A	24,1670	2,5334
B	18,3330	1,8096
C	12,5000	1,0857
D	8,3330	0,72382
E	6,2500	0,54287
F	4,1667	0,36191

Πίνακας 1.3. Τιμές συντελεστών a , b της εξίσωσης (1.16γ) για αγροτικά εδάφη [8,9,10,13,14]

Κατάσταση ευστάθειας Pasquill	$x(\text{km})$	a	b
	<0,10	122,800	0,94470
	0,10 – 0,15	158,080	1,05420
	0,16 – 0,20	170,220	1,09320
	0,21 – 0,25	179,520	1,12620
A*	0,26 – 0,30	217,410	1,26440
	0,31 – 0,40	258,890	1,40940
	0,41 – 0,50	346,750	1,72830
	0,51 – 3,11	453,850	2,11660
	>3,11	5000	5000
	<0,20	90,673	0,93198
B*	0,21 – 0,40	98,483	0,98332
	>0,40	109,300	1,09710
C*	ALL	61,141	0,91465
	0,30	34,459	0,86974
	0,31 – 1,00	32,093	0,81066
	1,01 – 3,00	32,093	0,64403
D	3,01 – 10,00	33,504	0,60486



	10,01 – 30,00	36,650	0,56589
	>30,00	44,053	0,51179
	<0,10	24,260	0,83660
	0,10 – 0,30	23,331	0,81956
	0,31 – 1,00	21,628	0,75660
	1,01 – 2,00	21,628	0,63077
E	2,01 – 4,00	22,534	0,57154
	4,01 – 10,00	24,703	0,50527
	10,01 – 20,00	26,970	0,46713
	20,01 – 40,00	35,420	0,37615
	>40,00	47,618	0,29592
	<0,20	15,209	0,81558
	0,21 – 0,70	14,457	0,78407
	0,71 – 1,00	13,953	0,68465
	1,01 – 2,00	13,953	0,63227
	2,01 – 3,00	14,823	0,54503
F	3,01 – 7,00	16,187	0,46490
	7,01 – 15,00	17,836	0,41507
	15,01 – 30,00	22,651	0,32681
	30,01 – 60,00	27,074	0,27436
	>60,00	34,219	0,21716

* Αν $\sigma_z > 5000$ τότε θέτουμε $\sigma_z = 5000$ (m)

Πίνακας 1.4. Καμπύλη Briggs για το σ_y για αστικά εδάφη, σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα των McElroy-Pooler.(x(m)). [8,9,10,13,14]

Pasquill	σ_y (m)
A	$0,32x(1,0+0,0004x)^{-1/2}$
B	$0,32x(1,0+0,0004x)^{-1/2}$
C	$0,22x(1,0+0,0004x)^{-1/2}$
D	$0,16x(1,0+0,0004x)^{-1/2}$
E	$0,11x(1,0+0,0004x)^{-1/2}$
F	$0,11x(1,0+0,0004x)^{-1/2}$



Πίνακας 1.5. Καμπύλη Briggs για το σ_z για αστικά εδάφη, σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα των McElroy-Pooler. (x(m)). [8,9,10,13,14]

	σ_z (m)
A	$0,24x(1,0+0,001x)^{1/2}$
B	$0,24x(1,0+0,001x)^{1/2}$
C	$0,20x$
D	$0,14x(1,0+0,0003x)^{-1/2}$
E	$0,08x(1,0+0,0015x)^{-1/2}$
F	$0,08x(1,0+0,0015x)^{-1/2}$

[8,9,10,13,14]

Πηγές όγκου

$$x_{y_0} = \left(\frac{\sigma_{y_0}}{p}\right)^{1/q} \quad (1.17)$$

x_{y_0} πλευρική απόσταση (km) φανταστικής ανάντη σημειακής πηγής από την πηγή όγκου κατά το αγροτικό μοντέλο

σ_{y_0} αρχικό ενεργό πλάτος πλουμίου πηγής όγκου (βλέπε Πίνακα 1.6)

$$x_{z_0} = \left(\frac{\sigma_{z_0}}{a}\right)^{1/b} \quad (1.18)$$

x_{z_0} κατακόρυφη απόσταση (km) φανταστικής ανάντη σημειακής πηγής από τη πηγή όγκου κατά το αγροτικό μοντέλο

σ_{z_0} αρχικό ενεργό ύψος πλουμίου πηγής όγκου (βλέπε πίνακα I.6)

a, b σταθερές καμπυλών P-G (βλέπε πίνακα I.3) για $x + x_{z_0}$

Απόσταση που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του σ_y της πηγής όγκου

$$x_y = x + x_{y_0} \quad (1.19)$$

Απόσταση που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του σ_z της πηγής όγκου

$$x_z = x + x_{z_0} \quad (1.20)$$

Εναλλακτικά το σ_y της πηγής όγκου



$$\sigma_y^2 = \sigma_{y_0}^2 + \sigma_{y,ps}^2 \quad (1.21)$$

$\sigma_{y,ps}$ συντελεστής εγκάρσιας διάχυσης σημειακής πηγής στη θέση της πηγής όγκου

Εναλλακτικά το σ_z της πηγής όγκου

$$\sigma_z^2 = \sigma_{z_0}^2 + \sigma_{z,ps}^2 \quad (1.22)$$

$\sigma_{z,ps}$ συντελεστής κατακόρυφης διάχυσης σημειακής πηγής στη θέση της πηγής όγκου

Πίνακας 1.6. Υπολογισμός αρχικού πλάτους και ύψους πλουμίου για πηγές όγκου και γραμμικές πηγές (ISC3 Model) [3,14]

Τύπος πηγής	Υπολογισμός σ_{y0}	Υπολογισμός σ_{z0}
Επιφανειακή πηγή όγκου	Μήκος πλευράς ÷ 4,3	Κάθετη διάσταση ÷ 2,15
Αनुψωμένη πηγή	Μήκος πλευράς ÷ 4,3	Κάθετη διάσταση ÷ 4,3
Γραμμική πηγή αποτελούμενη από πηγές όγκου σε σειρά	Μήκος πλευράς ÷ 2,15	Κάθετη διάσταση ÷ 2,15 για πηγές εδάφους Κάθετη διάσταση ÷ 4,3 για ανυψωμένες πηγές

Πίνακας 1.7. Συντελεστές για τον υπολογισμό πλευρικών φανταστικών αποστάσεων [9,14]

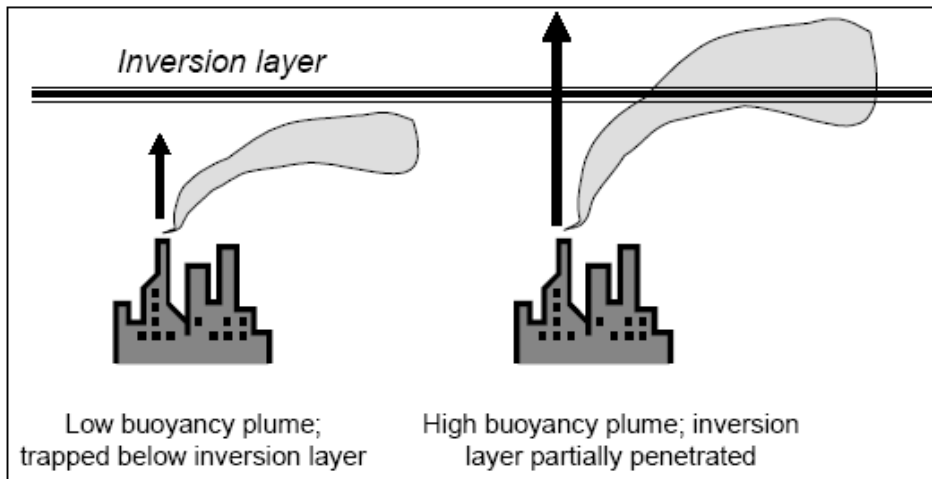
	p	q
A	209,14	0,890
B	154,46	0,902
C	103,26	0,917
D	68,26	0,919
E	51,06	0,921
F	33,92	0,919

Τέλος για τον υπολογισμό των φανταστικών αποστάσεων για το αστικό μοντέλο επιλύονται χωριστά οι εξισώσεις του Πίνακα αστικού μοντέλου 1.4 ως προς



x και έτσι βρίσκεται το x_y . Το x_z είναι αντίστοιχα αποτέλεσμα της επίλυσης χωριστά των εξισώσεων του Πίνακα 1.5.

[9,14]



Σχήμα 1.1. Επίδραση στρώματος αναστροφής σε πλούμια οφειλόμενα στη διαφορά πυκνότητας [5]

Μη γκαουσιανό γενικό μοντέλο για πηγές εδάφους

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{U} \cdot \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma_y} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot f(z) \quad (1.23)$$

$f(z)$ περιγράφει τη κατακόρυφη κατανομή της μάζας στο πλούμιο (αδιάστατο)

Ωριαίες συγκεντρώσεις, οι οποίες αθροίζονται για να δώσουν τη συνολική συγκέντρωση σε καθένα αποδέκτη από διάφορες πηγές ρύπανσης

$$C(x, y, z, H)_h = \frac{QKVD}{2\pi u_s \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-0,5 \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \quad (1.24)$$

$C(x, y, z, H)_h$ ωριαία συγκέντρωση σε κατάντη απόσταση x (m) και εγκάρσια y (m) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Q ρυθμός εκπομπής ρύπου (g/s)

K για μετατροπή μονάδων

V κατακόρυφη κατανομή πλουμίου Gauss (αδιάστατο)

D εκθετική αποδόμηση ρύπου (αδιάστατο)

u_s μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος της καμινάδας (m/s)



Κατακόρυφη κατανομή χωρίς καταβύθιση λόγω βαρύτητας ή ξηρή απόθεση για περιπτώσεις αναστροφής ύψους z_i (όταν $\sigma_z \geq z_i$)

$$V = \left[\exp\left(\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(H+z)^2}{2\sigma_z^2}\right) + E_r \right] \quad (1.25)$$

Παράγοντας επίδρασης θερμοκρασιακής αναστροφής

$$E_r = \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H-2mz_i)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H+2mz_i)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H-2mz_i)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z-H+2mz_i)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1.26)$$

z_i ύψος αναστροφής από το έδαφος ή ύψος ανάμιξης

m αριθμός ανακλάσεων (1,2,3,...)

z ή z_r υψόμετρο αποδέκτη από το έδαφος

H ή h_e ενεργό ύψος καμινάδας

Σε μακρινές κατάντη αποστάσεις η κατακόρυφη κατανομή συγκέντρωσης από γκαουσιανή μετατρέπεται σε παραλληλόγραμμη (ομοιόμορφη συγκέντρωση μέσα στο επιφανειακό στρώμα ανάμιξης)

$\exp\left(\frac{-(z-2z_i+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)$ αύξηση συγκεντρώσεων από αρχική ανάκλαση της αναστροφής που ισοδυναμεί με φανταστική πηγή σε ύψος $(2z_i - H)$

$\exp\left(\frac{-(z+2z_i-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)$ αύξηση συγκεντρώσεων από αρχική ανάκλαση εδάφους που ισοδυναμεί με φανταστική πηγή σε ύψος $(-2z_i + H)$

$\exp\left(\frac{-(z-2z_i-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)$ αύξηση συγκεντρώσεων από ανάκλαση αναστροφής του πλουμίου από τη πηγή $z = -H$ που ισοδυναμεί με φανταστική πηγή σε ύψος $(2z_i + H)$

$\exp\left(\frac{-(z+2z_i+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)$ αύξηση συγκεντρώσεων από ανάκλαση εδάφους του πλουμίου από τη πηγή $z = -H$ που ισοδυναμεί με φανταστική πηγή σε ύψος $-(2z_i + H)$

Κατακόρυφη κατανομή μάζας πλουμίου που αντικαθίσταται στην (1.24) για μακρινές κατάντη αποστάσεις όπου $\sigma_z \geq 1,6z_i$

$$V = \frac{\sqrt{2\pi}\sigma_z}{z_i} \quad (1.27)$$

$$D = \exp\left(-\frac{0,693}{T_{1/2}} \frac{x}{u_s}\right) \quad (1.28)$$

$T_{1/2}$ χρόνος ημίσειας ζωής ρύπου (sec) π.χ. για το SO_2 είναι 4hours



x κατάντη απόσταση (m)

[3,6,14]

Αθροιστική μέγιστη ρύπανση από πολλές μικρές σημειακές πηγές που βρίσκονται σε μια μεγάλη έκταση πλάτους L_y (κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου) και μήκους L_z (κατά τη διεύθυνση του ανέμου)

$$C(x, 0, z) = \frac{Q}{\pi U} \int_0^{L_z} \frac{1}{\sigma_z \sigma_y} \cdot \exp\left(\frac{-z^2}{2\sigma_z^2}\right) \cdot \left[\int_{-L_y/2}^{L_y/2} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) dy \right] dx$$

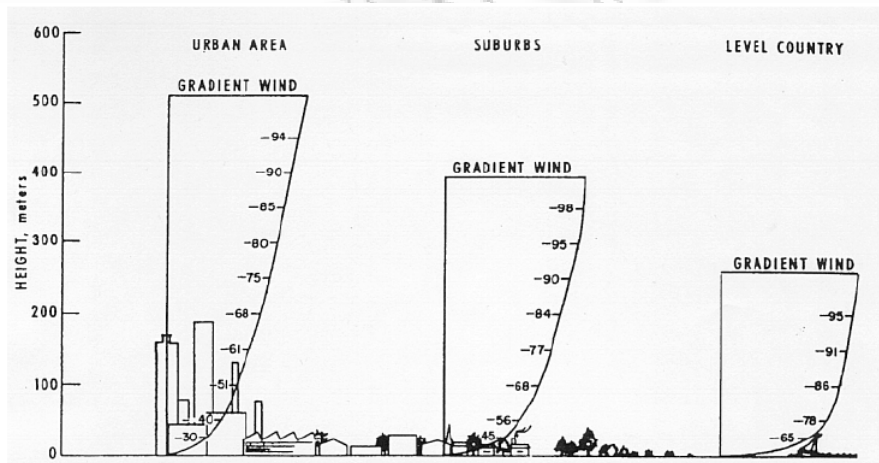
$$C(x, 0, z) = \sqrt{\frac{2Q}{\pi U}} \int_0^{L_z} \frac{1}{\sigma_z} \cdot \exp\left(\frac{-z^2}{2\sigma_z^2}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{L_y}{2\sqrt{2}\sigma_y}\right) dx \quad (1.29)$$

Αθροιστική μέγιστη ρύπανση εδάφους από περιοχή μικρών πηγών

$$C(x, 0, 0) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{L_z} \frac{1}{\sigma_z} dx \quad (1.30)$$

[3]

Προφίλ ταχύτητας αέρα



Σχήμα 1.2. Για όλες της καταστάσεις αστάθειας όπου επικρατεί τυρβώδης μεταφορά, το ύψος ανάγλυφου εδάφους αυξάνει την κατακόρυφη ανάμιξη και ανυψώνει το προφίλ ταχύτητας του ανέμου. Γενικά επιλέγεται το μικρότερο ύψος ανάγλυφου για συντηρητικά αποτελέσματα. Για χαμηλές σημειακές πηγές



υπολογίζεται το ύψος ανάγλυφου της επιφάνειας μέσα σε ακτίνα 200m και για ψηλές καμινάδες της περιοχής σε ακτίνα 10km από την πηγή [5]

Προφίλ ταχύτητας αέρα στο επιφανειακό στρώμα του οριακού στρώματος της γης για ομοιογενή εδάφη και ουδέτερη ευστάθεια

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1.31)$$

z_0 επιφανειακή τραχύτητα (3-10% του ύψους των εμποδίων) ή ύψος ανάγλυφου (m)

u_* ταχύτητα τριβής (συνήθως το 10% της ταχύτητας του ανέμου σε $z=10m$)

k σταθερά Von Karman (=0,41)

Πίνακας 1.8. Τιμές εκθέτη p για διάφορα εδάφη σε ουδέτερη κατάσταση ευστάθειας [3,6,14]

Τύπος Εδάφους	z_0 (m)	p
Λίμνη ή ήρεμη θάλασσα	10^{-4}	0,07
Αμμώδης έρημος	10^{-3}	0,10
Κοντό γρασίδι	0,005	0,13
Παγωμένη επιφάνεια	0,02	0,15
Σιτοκαλλιέργειες	0,1	0,2
Γεωργικές περιοχές	0,2-0,3	0,24-0,26
Αραιοκατοικημένες περιοχές	0,5	0,3
Μεγάλα δάση/Πόλεις	1,0	0,39

Προφίλ ταχύτητας ανέμου για πηγή εδάφους

$$U = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{0,6\sigma_z}{z_0}\right) \quad (1.32)$$

σ_z κατακόρυφη τυπική απόκλιση

Επίδραση ατμοσφαιρικής ευστάθειας (σταθερές ή σχεδόν ουδέτερες συνθήκες) στο προφίλ της ταχύτητας του ανέμου

$$U(z) = \frac{u_*}{0,4} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + 4,5 \frac{z}{L} \right] \quad (1.33)$$

L μήκος Monin-Obukhov (m)



[1,3]

$$u_s = u_{ref} \left(\frac{h_s}{z_{ref}} \right)^p \quad (1.34)$$

u_s ταχύτητα ανέμου στον κεντρικό άξονα πλουμίου σε ύψος h_s από το έδαφος
 u_{ref} ταχύτητα ανέμου που μετριέται σε ύψος z_{ref} από το έδαφος. Συνήθως
 $z_{ref} = 10m$

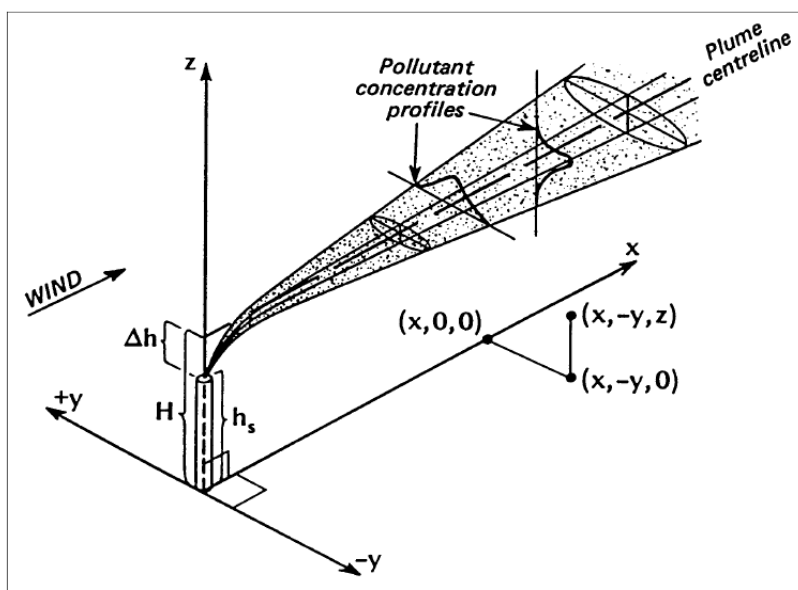
p εκθέτης που παίρνει τιμές σύμφωνα με τον πίνακα I.8

Πίνακας 1.9. Τιμές εκθέτη p εκθετικού προφίλ ταχύτητας αέρα [6]

Κατηγορία Ευστάθειας	Εκθέτης για α- γροτικό περι- βάλλον	Εκθέτης για αστικό περι- βάλλον
A	0,07	0,15
B	0,07	0,15
C	0,10	0,20
D	0,15	0,25
E	0,35	0,30
F	0,55	0,30

[3,6,14]

Ύψος άξονα πλουμίου



Σχήμα 1.3. Τυπικό πλούμιο από ανυψωμένη σημειακή πηγή [5,12]



$$H_e = H_s + \Delta h$$

(ύψος άξονα πλουμίου σε συγκεκριμένη απόσταση x) =

(ύψος καμινάδας) + (ανύψωση λόγω άνωσης) +

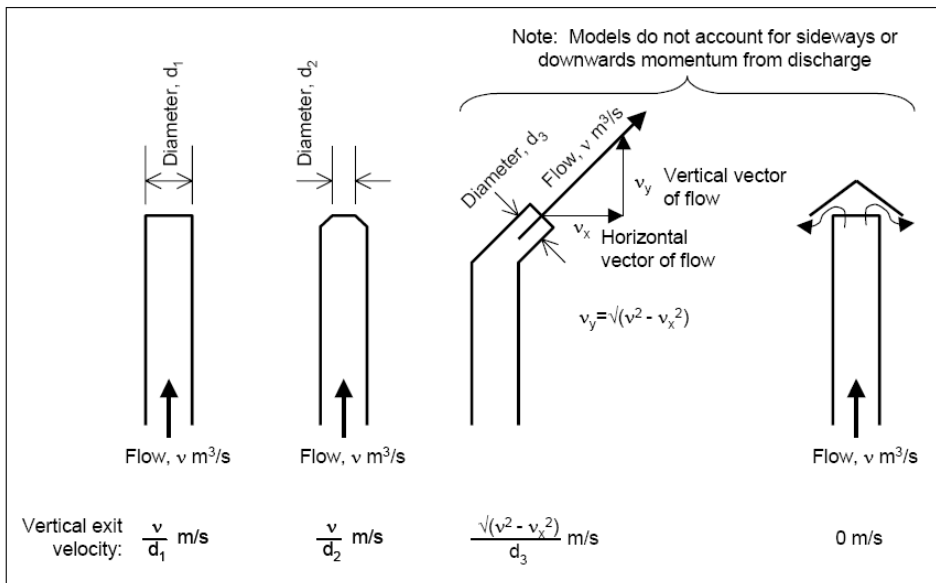
(ανύψωση λόγω ορμής) - (πτώση στο στόμιο της καμινάδας) -

(πτώση σε κατάντι επιφανειακά εμπόδια)

(1.35)

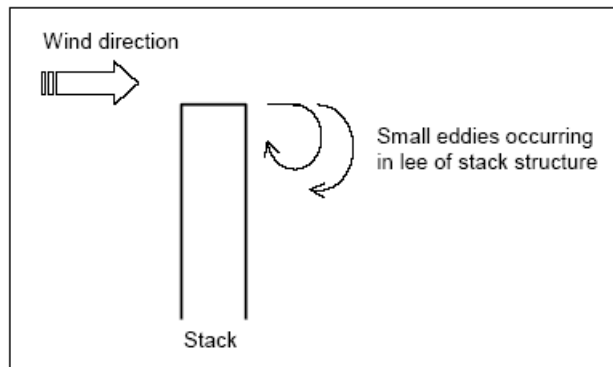
H_e ύψος κεντρικού άξονα πλουμίου (effective stack height)

H_s ύψος καμινάδας



Σχήμα 1.4. Για τον υπολογισμό της ταχύτητας εξόδου των καυσαερίων (ενδεικτικά) [5]

Πτώση στο στόμιο της καμινάδας



Σχήμα 1.5. Πτώση πλουμίου στο στόμιο της καμινάδας [5]



Πτώση άξονα πλουμίου στο στόμιο

$$h'_s = h_s + 2d_s \left[\frac{v_s}{u_s} - 1,5 \right] \text{ για } v_s < 1,5u_s \quad (1.36)$$

Διατήρηση ύψους άξονα πλουμίου στο στόμιο

$$h'_s = h_s \text{ για } v_s \geq 1,5u_s \quad (1.37)$$

h'_s ύψος άξονα πλουμίου

d_s διάμετρος στομίου καμινάδας

h_s φυσικό ύψος καμινάδας

v_s ταχύτητα εξόδου καυσαερίων

u_s μέση ταχύτητα ανέμου στη κορυφή της καμινάδας

Κριτήριο επικράτησης ορμής ή άνωσης

- $(T_s - T_\alpha) \geq (\Delta T)_c$ τότε επικρατεί η άνωση
- αν $(T_s - T_\alpha) < (\Delta T)_c$ ή αν $T_s \leq T_\alpha$ τότε επικρατεί η ορμή

Για ασταθείς ή ουδέτερες συνθήκες

$$(\Delta T)_c = 0,0297T_s \frac{w_s^{1/3}}{d_s^{2/3}} \text{ για } F_b < 55 \quad (1.38)$$

w_s ταχύτητα εξόδου καυσαερίων

Για ασταθείς ή ουδέτερες συνθήκες

$$(\Delta T)_c = 0,00575T_s \frac{w_s^{2/3}}{d_s^{1/3}} \text{ για } F_b \geq 55 \quad (1.39)$$

Για σταθερές συνθήκες

$$(\Delta T)_c = 0,019582T_s w_s \sqrt{s} \quad (1.40)$$

Ανύψωση θερμών απαερίων λόγω άνωσης

Παράγοντας ή ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας (m^4/s^3) για θερμά απαέρια

$$F_b = g w_s R_s^2 \left(\frac{T_s - T_\alpha}{T_s} \right) \quad (1.41)$$

w_s ταχύτητα καυσαερίων στην έξοδο της καμινάδας

R_s ακτίνα καμινάδας (d_s η διάμετρος)



T_a απόλυτη θερμοκρασία αέρα στη κορυφή της καμινάδας

T_s θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων

$$\text{Ασταθείς ή ουδέτερες συνθήκες, } \begin{cases} F_b < 55 \rightarrow x_f = 49F_b^{5/8} \rightarrow \Delta H = 21,425 \frac{F_b^{3/4}}{u_s} & (1.42) \\ F_b \geq 55 \rightarrow x_f = 119F_b^{2/5} \rightarrow \Delta H = 38,71 \frac{F_b^{3/5}}{u_s} & (1.43) \end{cases}$$

$$\text{Σταθερές συνθήκες, } x_f = 2,0715 \frac{u_s}{\sqrt{s}} \rightarrow \Delta H = 2,6 \left(\frac{F_b}{u_s s} \right)^{1/3} \quad (1.44)$$

u_s ταχύτητα αέρα στο ύψος της καμινάδας

x_f κατάντη απόσταση πηγής και σημείου τελικής ανύψωσης πλουμίου λόγω άνωσης

ΔH τελική ανύψωση πλουμίου λόγω άνωσης

Παράμετρος σταθερότητας συνθηκών (s^{-2}) που καθορίζει το σημείο όπου η εσωτερική θερμοκρασία του πλουμίου εξισώνεται με την ατμοσφαιρική (και σταματά η ανύψωση)

$$s = N^2 = g \frac{\partial \theta / \partial z}{T_a} \quad (1.45)$$

$\partial \theta / \partial z = 0,020K/m$ για Ε κατηγορία ευστάθειας και $\partial \theta / \partial z = 0,035K/m$ για F κατηγορία ευστάθειας

N συχνότητα Brunt-Vaisala

Ανύψωση ψυχρών αερίων λόγω ορμής

Παράγοντας ορμής ή ροή λόγω ορμής (m^4/s^2)

$$F_m = w_s^2 R_s^2 \left(\frac{T_a}{T_s} \right) \quad (1.46)$$

$$\text{Ασταθείς ή Ουδέτερες, } \left. \begin{cases} F_b = 0, & x_{max} = \frac{4d_s(w_s + 3u_s)^2}{w_s u_s} & (1.47) \\ F_b < 55, & x_f = 49F_b^{5/8} & (1.48) \\ F_b \geq 55, & x_f = 119F_b^{2/5} & (1.49) \end{cases} \right\} \Delta H = 6R_s \frac{w_s}{u_s}$$



$$\text{Σταθερές συνθήκες} \left\{ \begin{array}{l} F_b = 0 \rightarrow x_{max} = \frac{\pi u_s}{2\sqrt{s}} \\ F_b < 55 \rightarrow x_f = 49F_b^{5/8} \\ F_b \geq 55 \rightarrow x_f = 119F_b^{2/5} \end{array} \right\} \Delta H = 1,5 \left(\frac{F_m}{u_s \sqrt{s}} \right)^{1/3} \quad \begin{array}{l} (1.50) \\ (1.51) \\ (1.52) \end{array}$$

ΔH τελική ανύψωση πλουμίου λόγω ορμής

w_s ταχύτητα εξόδου καυσαερίων

u_s μέση ταχύτητα ανέμου στη κορυφή της καμινάδας

Σταδιακή ανύψωση πλουμίου (πριν τη συνολική)

Σταδιακή ανύψωση πλουμίου λόγω ορμής σε ασταθείς συνθήκες

$$\Delta H_m = \left(\frac{3}{\beta^2} \right)^{1/3} \frac{F_m^{1/3}}{u_s^{2/3}} x^{1/3} \quad (1.53)$$

Σταδιακή ανύψωση πλουμίου λόγω ορμής σε σταθερές συνθήκες

$$\Delta H_m = \left(\frac{3F_m}{\beta^2} \right)^{1/3} \left(\frac{\sin(x\sqrt{s}/u_s)}{u_s \sqrt{s}} \right)^{1/3} \quad (1.54)$$

$$\beta = \frac{1}{3} + \frac{u_s}{w_s}$$

Σταδιακή ανύψωση πλουμίου λόγω διαφοράς πυκνότητας για όλες τις συνθήκες

$$\Delta H_b = \left(\frac{3}{2\beta^2} \right)^{1/3} \frac{F_b^{1/3}}{u_s} x^{2/3} = 1,6 \frac{F_b^{1/3}}{u_s} x^{2/3} \quad (1.55)$$

[6,3,14,4]

Μέγεθος πλουμίου (ενεργή ακτίνα)

$$R_p = R_o + \beta \Delta H \quad (1.56)$$

R_o ενεργή ακτίνα πηγής (αρχική ενεργή ακτίνα)

β παράμετρος παράσυρσης αέρα (0,6)

$$R_o = \left(\frac{T_a w_s}{T_s u_s} \right)^{1/2} R_s \quad (1.57)$$

[3]

Μέθοδος Pasquill

$$\sigma_{ye} = \left[\sigma_y^2 + \left(\frac{\Delta H}{3,5} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.58)$$



σ_{ye} εγκάρσια ενεργή τυπική απόκλιση ή ενισχυμένη λόγω ανύψωσης

σ_y τυπική απόκλιση P-G sigma για ιδανική σημειακή πηγή στη καμινάδα ($x = 0$)

Δh ανύψωση πλουμίου γενικά εκτός από την περίπτωση Schulman-Scire

Μέθοδος Pasquill

$$\sigma_{ze} = \left[\sigma_z^2 + \left(\frac{\Delta H}{3,5} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.59)$$

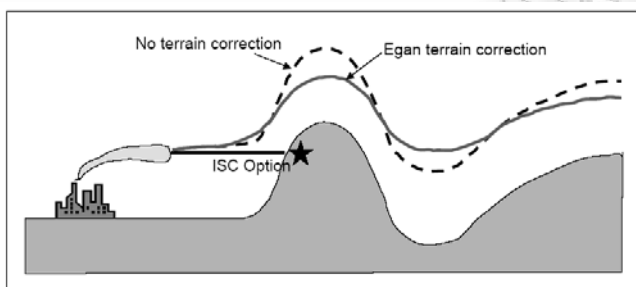
σ_{ze} κατακόρυφη ενεργή τυπική απόκλιση ή ενισχυμένη λόγω ανύψωσης

σ_z τυπική απόκλιση P-G sigma για ιδανική σημειακή πηγή στη καμινάδα ($x = 0$)

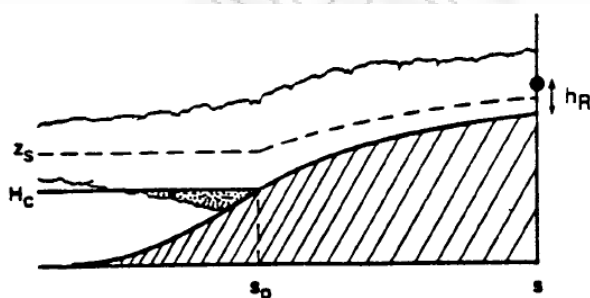
Δh ανύψωση πλουμίου γενικά εκτός από την περίπτωση Schulman-Scire

[3,14]

Επίδραση ανάγλυφου στο πλούμιο

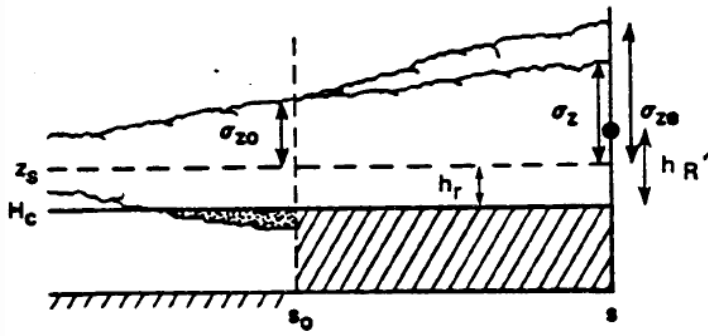


Σχήμα 1.6. Για ουδέτερες και ασταθείς ατμοσφαιρικές καταστάσεις το ύψος του πλουμίου προσαρμόζεται μερικώς στο ανάγλυφο του εδάφους [5]



Σχήμα 1.7. Πραγματική πορεία πλουμίου σε σταθερές/ουδέτερες συνθήκες [4]





Σχήμα 1.8. Αύξηση διάχυσης κατάντη του σημείου διαχωρισμού του πλουμίου s_0 σε σταθερές/ουδέτερες συνθήκες [4]

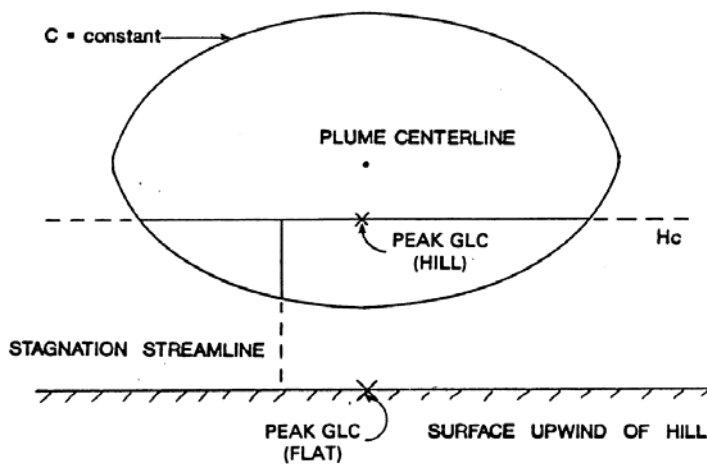
Συγκέντρωση σε ανυψωμένο αποδέκτη κατά το Gaussian μοντέλο (για $H_c = 0$)

$$C(s, y'_R, h'_R; s_0) =$$

$$\frac{Q}{2\pi U \sigma_{ye} \sigma_{ze}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y'_R - y_s}{\sigma_{ye}} \right)^2 \right] \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h'_R - z_s}{\sigma_{ze}} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h'_R + z_s}{\sigma_{ze}} \right)^2 \right] \right\} \quad (1.60)$$

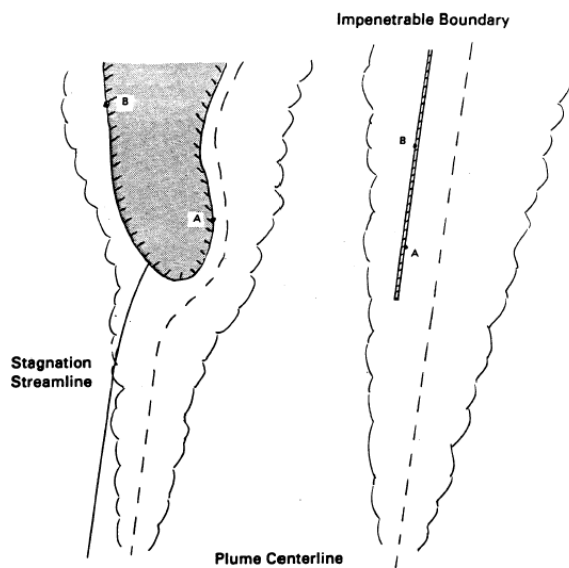
y'_R πλευρική απόσταση αποδέκτη από το νέο άξονα

y_s πλευρική απόσταση αποδέκτη από τον άξονα του αρχικού πλουμίου



Σχήμα 1.9. Οριζόντιο επίπεδο διαχωρισμού σε ύψος H_c και κατακόρυφο επίπεδο στασιμότητας (stagnation), τα οποία χωρίζουν το πλούμιο σε τρία εκτρεπόμενα τμήματα (άνω, κάτω δεξιά και κάτω αριστερά αντίστοιχα). Peak ground-level concentrations ή peak GLC είναι οι μέγιστες συγκεντρώσεις εδάφους [4]





Σχήμα 1.10. Κάτοψη , η γραμμή στασιμότητας χωρίζει το πλούμιο αριστερά και δεξιά του λόφου. Μόνο η γραμμή στασιμότητας απ' όλες της γραμμές ροής σφηνώνεται πάνω στο λόφο [4]

[4]

$$H'_p = H_p + z_s - z_r \quad (1.61)$$

H'_p ενεργό ύψος πλουμίου πάνω από τον αποδέκτη

$$H_p = h_s + \Delta H$$

h_s ύψος καμινάδας

ΔH ανύψωση πλουμίου μέχρι τον αποδέκτη

z_s ανύψωση βάσης καμινάδας από σημείο αναφοράς

z_r ανύψωση αποδέκτη από σημείο αναφοράς

$$H'_p = H_p + z_s - (1 - f)(z_r - z_s) \quad (1.62)$$

f συντελεστής που έχει να κάνει με την ευστάθεια της ατμόσφαιρας

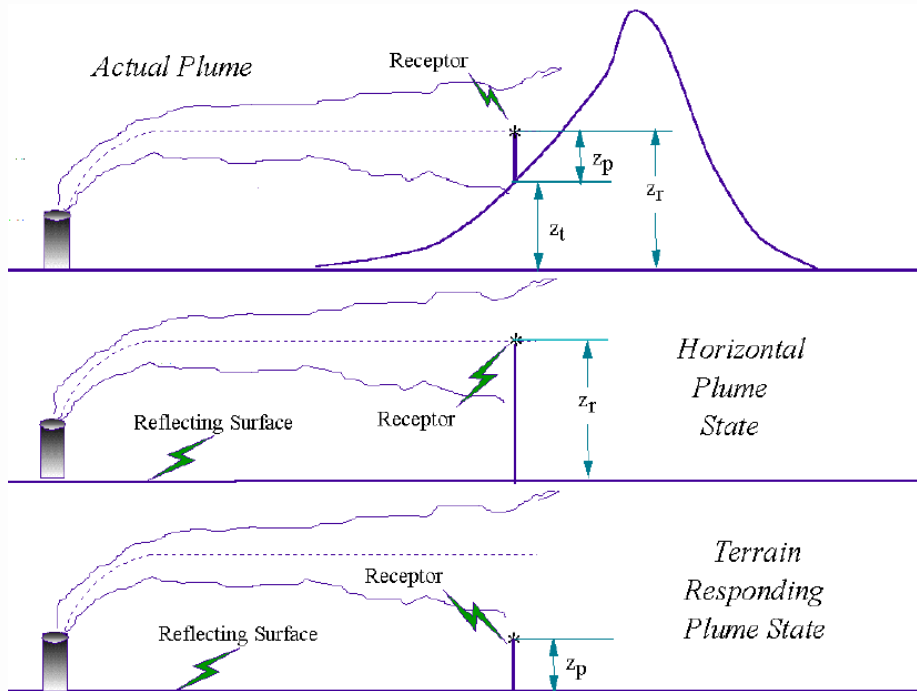
$f = 0,5$ για κατηγορίες ευστάθειας A-D

$f = 0$ για κατηγορίες ευστάθειας E,F

[3]

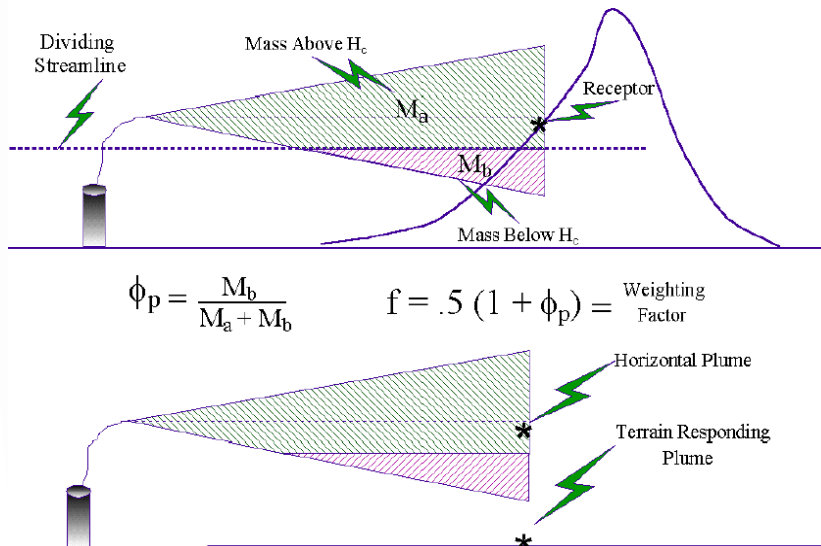


Συγκεντρώσεις σε ανυψωμένο αποδέκτη



Σχήμα 1.11α. Στάθμιση μεταξύ δυο ακραίων καταστάσεων πλουμίου για ανυψωμένο αποδέκτη συνολικού ύψους $z_r = z_p + z_t$ [7]

$$C_{Tot} = f C_{Horiz} + (1-f) C_{TerrRes}$$



Σχήμα 1.11β. Στάθμιση μεταξύ δυο ακραίων καταστάσεων πλουμίου για ανυψωμένο αποδέκτη συνολικού ύψους $z_r = z_t$ [7]

$$C_T(x_r, y_r, z_r) = f C_{c,s}(x_r, y_r, z_r) + (1 - f) C_{c,s}(x_r, y_r, z_p) \quad (1.63)$$



$C_T(x_r, y_r, z_r)$ συγκέντρωση ρύπου σε ανυψωμένο αποδέκτη

$C_{c,s}(x_r, y_r, z_r)$ συγκέντρωση στον αποδέκτη από πλούμιο σταθερών συνθηκών ή οριζόντιο πλούμιο

$C_{c,s}(x_r, y_r, z_p)$ συγκέντρωση εδάφους στον αποδέκτη από τέλεια εκτρεπόμενο πλούμιο (ολόκληρο πάνω από τον αποδέκτη)

c, s αφορούν σταθερές καταστάσεις και καταστάσεις μεταφοράς αντίστοιχα

$$z_p = z_r - z_t$$

$$\varphi_p = \frac{\int_0^{H_c} C_s(x_r, y_r, z_r) dz}{\int_0^{\infty} C_s(x_r, y_r, z_r) dz}$$
 ποσοστό μάζας πλουμίου κάτω από H_c

$f = 0,5(1 + \varphi_p)$ συνάρτηση (συντελεστής) βαρύτητας πλουμίου που εξαρτάται από την ευστάθεια

$f = [0,5 - 1)$ για κατηγορίες ευστάθειας A-D

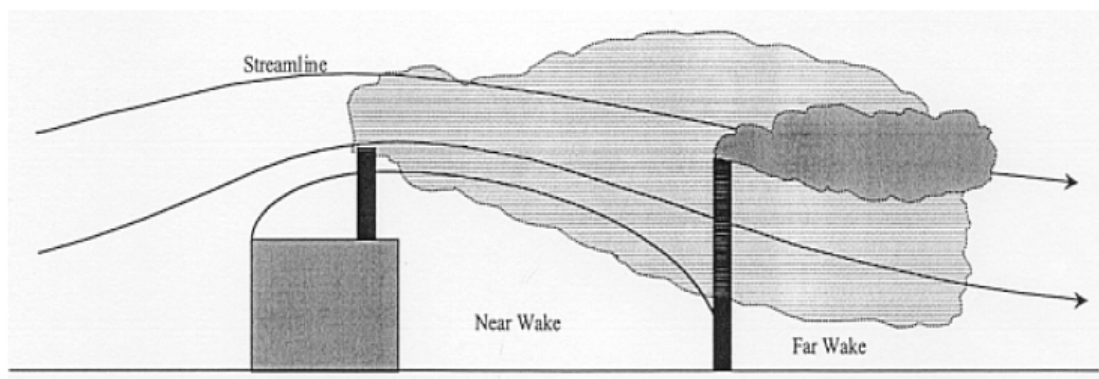
$f = 1$ για κατηγορίες ευστάθειας E,F (σταθερές συνθήκες)

$C_s(x_r, y_r, z_r)$ συγκέντρωση στον αποδέκτη για σταθερές συνθήκες ή απουσία λόφου

H_c κρίσιμος άξονας διαχωρισμού πλουμίου κάτω από τον οποίο η συγκέντρωση καθορίζεται από το οριζόντιο πλούμιο και πάνω από τον οποίο, και όταν η ατμόσφαιρα είναι ουδέτερη ή ασταθής, υπολογίζεται ως σταθμισμένο άθροισμα δυο ακραίων περιπτώσεων α) οριζόντιο πλούμιο ή πλούμιο σταθερών συνθηκών που σφηνώνεται στο λόφο και β) τέλεια εκτρεπόμενο πλούμιο.

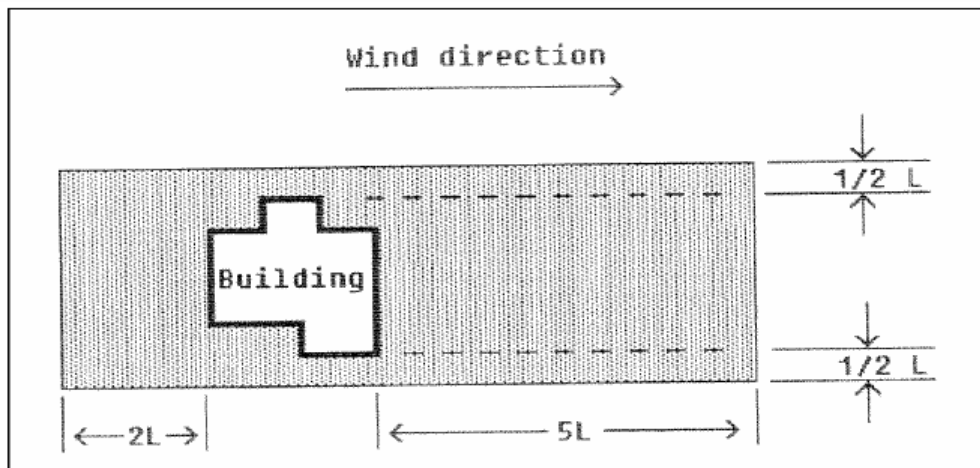
[3,7]

Πτώση πλουμίου στην υπήνεμη πλευρά κτιρίων



Σχήμα 1.12. Πτώση όμοιων πλουμίων από δυο διαφορετικές σημειακές πηγές [5]





Σχήμα 1.13. Υπάρχει επίδραση κτιρίου (πτώση) στο πλούμιο καμινάδας που βρίσκεται μέσα σε αυτή την έκταση [5,9,14]

Huber and Snyder μοντέλο

$$h_s \geq H + 0,5L$$

$$L = \min (H, W)$$

H ύψος κτιρίου (m)

W προβολή πλάτους του κτιρίου κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου (m)

$$\Delta H_m = \left(\frac{3}{\beta^2}\right)^{1/3} \frac{F_m^{1/3}}{U^{2/3}} x^{1/3} \text{ ανύψωση του πλουμίου μόνο λόγο ορμής}$$

$x = 2H$ κατάντη απόσταση από την καμινάδα

h_s ύψος καμινάδας

Αν $h_s + \Delta H_m > 2,5H$ ή $h_s + \Delta H_m > H + 1,5W$, το πλούμιο δεν επηρεάζεται

Αν $h_s + \Delta H_m \leq 1,2H$ τροποποιούνται τα σ_y, σ_z

Αν $1,2H < h_s + \Delta H_m < 2,5H$ τροποποιείται μόνο το σ_z

Τροποποιημένο σ_z για πλατιά/χαμηλά κτίρια ($W \gg H$)

$$\sigma'_z = 0,7H + 0,067(x - 3H) \quad \text{για } 3H \leq x < 10H \text{ κοντινή υπήνεμη περιοχή} \quad (1.64)$$

Τροποποιημένο σ_z για πλατιά/χαμηλά κτίρια ($W \gg H$)

$$\sigma'_z = \sigma_z(x + x_z) \quad \text{για } x \geq 10H \text{ μακρινή υπήνεμη περιοχή} \quad (1.65)$$



Τροποποιημένο σ_z για ψηλά κτίρια ($W \ll H$)

$$\sigma'_z = 0,7W + 0,067(x - 3W) \quad \text{για } 3W \leq x < 10W \quad (1.66)$$

Τροποποιημένο σ_z για ψηλά κτίρια ($W \ll H$)

$$\sigma'_z = \sigma_z(x + x_z) \quad \text{για } x \geq 10W \quad (1.67)$$

Τροποποιημένο σ_y για πλατιά/χαμηλά κτίρια $W/H \leq 5$

$$\sigma'_y = 0,35W + 0,067(x - 3H) \quad \text{για } 3H \leq x < 10H \quad (1.68)$$

Τροποποιημένο σ_y για πλατιά/χαμηλά κτίρια $W/H \leq 5$

$$\sigma'_y = \sigma_y(x + x_y) \quad \text{για } x \geq 10H \quad (1.69)$$

Τροποποιημένο σ_y για πλατιά/χαμηλά κτίρια $\frac{W}{H} > 5$ και καμινάδα στο κατάντη κέντρο του κτιρίου (δίνει τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, εφαρμόζεται για καμινάδα κοντά στο κέντρο του κτιρίου όταν ο αέρας είναι παραλληλεπίπεδος δύο διαστάσεων με τη μακριά πλευρά του κτιρίου)

$$\sigma'_y = 0,35H + 0,067(x - 3H) \quad \text{για } 3H \leq x < 10H \quad (1.70)$$

Τροποποιημένο σ_y για πλατιά/χαμηλά κτίρια $\frac{W}{H} > 5$ και καμινάδα στο κατάντη κέντρο του κτιρίου (δίνει τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, εφαρμόζεται για καμινάδα κοντά στο κέντρο του κτιρίου όταν ο αέρας είναι παραλληλεπίπεδος δύο διαστάσεων με τη μακριά πλευρά του κτιρίου)

$$\sigma'_y = \sigma_y(x + x_y) \quad \text{για } x \geq 10H \quad (1.71)$$

Τροποποιημένο σ_y για πλατιά/χαμηλά κτίρια $\frac{W}{H} > 5$ και καμινάδα σε απόσταση $2,5H$ από το άκρο του κτιρίου (δίνει τις μικρότερες δυνατές συγκεντρώσεις)

$$\sigma'_y = 1,75H + 0,067(x - 3H) \quad \text{για } 3H \leq x < 10H \quad (1.72)$$

Τροποποιημένο σ_y για πλατιά/χαμηλά κτίρια $\frac{W}{H} > 5$ και καμινάδα σε απόσταση $2,5H$ από το άκρο του κτιρίου (δίνει τις μικρότερες δυνατές συγκεντρώσεις)

$$\sigma'_y = \sigma_y(x + x_y) \quad \text{για } x \geq 10H \quad (1.73)$$



Τροποποιημένο σ_y για ψηλά κτίρια

$$\sigma'_y = 0,35W + 0,067(x - 3W) \quad \text{για } 3W \leq x < 10W \quad (1.74)$$

Τροποποιημένο σ_y για ψηλά κτίρια

$$\sigma'_y = \sigma_y(x + x_y) \quad \text{για } x \geq 10W \quad (1.75)$$

Παράδειγμα

Για πλατύ/χαμηλό κτίριο

$$\sigma'_z = 1,2H \text{ σε κατάντη απόσταση } 10H \text{ ή } 0,01H(km) \quad (1.76)$$

Για μη-αστικό έδαφος

$$\sigma_z(0,01H) = 1,2H = a(0,01H + x_z)^b \quad (1.77)$$

Κατακόρυφη φανταστική απόσταση για πλατύ/χαμηλό κτίριο

$$x_z = \left(\frac{1,2H}{a}\right)^{1/b} - 0,01H \quad (1.78)$$

Κατακόρυφη φανταστική απόσταση για ψηλό κτίριο

$$x_z = \left(\frac{1,2W}{a}\right)^{1/b} - 0,01W \quad (1.79)$$

Schulman and Scire

$$h_s < H + 0,5L$$

$$L = \min(H, W)$$

H ύψος κτιρίου (m)

W η μέγιστη των προβολών πλάτους του κτιρίου κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου (m)

$$\sigma''_z = A\sigma'_z \quad (1.80)$$

σ'_z από τους γενικούς τύπους για χαμηλά/πλατιά και ψηλά κτίρια

$$A = 1 \quad \text{για } h_e \leq H \quad (1.81)$$



$$A = \frac{H-h_e}{2L} + 1 \quad \text{για } H < h_e \leq H + 2L \quad (1.82)$$

$$A = 0 \quad \text{για } h_e > H + 2L \quad (1.83)$$

h_e ύψος πλουμίου μόνο λόγο ορμής στα $2H$

[9,13,14]

Υπάρχει και η εκδοχή της άθροισης των παραπάνω συντελεστών του μοντέλου Huber and Snyder στο $x = 10H$ ($\sigma'_{y,10H}, \sigma'_{z,10H}$) στους P-G συντελεστές διάχυσης για την πραγματική σημειακή πηγή (σ_y, σ_z) με αποτέλεσμα τους συνολικούς συντελεστές διάχυσης που ισχύουν κατάντη του κτιρίου

$$\sigma_{yT}^2 = \sigma_y^2 + \sigma_{y,10H}^2 \quad (1.84)$$

$$\sigma_{zT}^2 = \sigma_z^2 + \sigma_{z,10H}^2 \quad (1.85)$$

Όταν ένα πλούμιο μπει στη υπήνεμη πλευρά ενός κτιρίου ξεκινά με αρχικό μέγεθος περίπου όσο το εγκάρσιο εμβαδόν του κτιρίου A_f . Αυτή η ενισχυμένη διάχυση μπορεί να αποδοθεί σε φανταστική ανάντη πηγή μέσα από εμπειρικές σχέσεις. Κατά την απλούστερη εκδοχή (Turner) οι ενισχυμένοι συντελεστές διάχυσης σχετίζονται με τους συντελεστές διάχυσης P-G της σημειακής πηγής ως εξής

$$\sigma'_{y0} = \sigma_y(x + x_{y0}) \quad (1.86)$$

$$\sigma'_{z0} = \sigma_z(x + x_{z0}) \quad (1.87)$$

όπου η απόσταση της φανταστικής πηγής x_{y0}, x_{z0} επιλέγεται έτσι ώστε να σχετίζεται με τις διαστάσεις του κτιρίου

$$\sigma'_{y0} = \frac{W}{4,3} \quad (1.88)$$

$$\sigma'_{z0} = \frac{H}{2,15} \quad (1.89)$$

[3]

Κατά μια άλλη εκδοχή υπολογίζεται εμπειρικά φανταστική κατακόρυφη απόσταση από την εγκάρσια τομή του κτιρίου A με τον άνεμο και με τη βοήθεια παραμέτρων που εξαρτώνται από τις καταστάσεις ευστάθειας. Η απόσταση αυ-



τή στη συνέχεια προστίθεται στην κατάντη απόσταση και μπαίνει έτσι σε όλους τους υπολογισμούς των χαρακτηριστικών του πλουμίου.

$$x_z = bA^c \exp(A^d) \quad (1.90)$$

Πίνακας 1.10. Συντελεστές εξίσωσης 1.90 [3,5]

Ευστάθεια	B	c	d
A	1,95	0.504	0,754e-08
B	2,72	0,504	0,15799e-07
C	4,05	0,511	0,156395e-06
D	4,95	0,54	0,1039e-05
E	4,95	0,54	0,1039e-05
F	4,95	0,54	0,1039e-05

$$C_N = \frac{BfQ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_{yc}}\right)^2\right]}{U_H H_c W_B'} \quad (1.91)$$

f ποσοστό μάζας πλουμίου που εγκλωβίζεται στην ανακυκλοφορία

Q ρυθμός εκπομπής (M/T)

W_B' πλάτος ανάμιξης (πλάτος κτιρίου με άνω όριο $3H_B$ και κάτω όριο $H_B/3$)

$B = 3$

σ_{yc} συντελεστής οριζόντιας διάχυσης ανακυκλοφορίας

H_c ύψος ανακυκλοφορίας

U_H ταχύτητα αέρα στο ύψος του κτιρίου

Το ποσοστό μάζας στην ανακυκλοφορία f είναι ίσο με το μέγιστο γινόμενο $f_z f_y$ κατά τον άξονα x μέσα στην κοντινή υπήνεμη περιοχή

$$f_z(x) = \operatorname{erf}\left(\frac{H_c(x) - H_p(x)}{\sqrt{2}\sigma_z(x)}\right) \quad (1.92)$$

f_z κατακόρυφη κατανομή μάζας πλουμίου

f_y οριζόντια κατανομή μάζας πλουμίου

H_c ύψος ανακυκλοφορίας

H_p ύψος πλουμίου

Συγκέντρωση ρύπου στη μακρινή υπήνεμη περιοχή του κτιρίου που οφείλεται στη μάζα του ρύπου που έχει εγκλωβιστεί στην επανακυκλοφορία και προσο-



μοιάζεται με πηγή όγκου στο τέλος της κοντινής περιοχής προερχόμενη από σημειακή πηγή εδάφους στη βάση του υπήνεμου τοίχου του κτιρίου

$$C_F = \frac{fQ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]}{\pi U_s \sigma_{zc} \sigma_{yc}} \quad (1.93)$$

σ_y αρχική τιμή του σ_{yc} στον υπήνεμο τοίχο

σ_z αρχική τιμή του σ_{zc} στον υπήνεμο τοίχο που υπολογίζεται από την εξίσωση

$C_N = C_F$ για τον υπήνεμο τοίχο

σ_{zc} και σ_{yc} συντελεστές διάχυσης ανακυκλοφορίας

f ποσοστό μάζας πλουμίου που παγιδεύεται στην επανακυκλοφορία

Συγκέντρωση ρύπου στη μακρινή υπήνεμη περιοχή του κτιρίου που οφείλεται στο ποσοστό μάζας του ρύπου που δεν εγκλωβίστηκε στην επανακυκλοφορία (αθροίζεται στο αποτέλεσμα της I.93). Αυτή η δεύτερη πηγή ρυθμού εκπομπής $(1-f)Q$ ακολουθεί την κανονική κατανομή Gauss για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης C_p

$$C_p = \frac{(1-f)Q \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H_p}{\sigma_z}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]}{\pi U_s \sigma_z \sigma_y} \quad (1.94)$$

[2]



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΝΕΡΟΥ

Τρισδιάστατη εξίσωση συνέχειας σε ποτάμι σταθερού πλάτους W και βάθους $h(x, y, z)$ για μόνιμη ροή ($\frac{\partial h}{\partial t} = 0$)

$$\frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} + \frac{\partial(wh)}{\partial z} - \frac{q_s}{W} = 0 \quad (2.1)$$

Μονοδιάστατη εξίσωση συνέχειας για μόνιμη ροή

$$u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{q_s}{W} = 0 \quad (2.2)$$

q_s πλευρική εισροή, παροχή ανά μονάδα μήκους καναλιού (m^2/s)

W σταθερό πλάτος ποταμού

[45]

Εξίσωση Bernoulli για ασυμπίεστη χωρίς τριβή ροή

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{aV^2}{2g} + z = \text{σταθερό κατά μήκος του οριζόντιου άξονα } x$$

$$y + \frac{aV^2}{2g} + z = \text{σταθερό κατά μήκος του οριζόντιου άξονα } x$$

$$E_s + z = \text{σταθερό κατά μήκος του οριζόντιου άξονα } x$$

$$\alpha = \frac{\int u^3 dA}{\bar{V}^3 A} = \frac{V_1^3 A_1 + V_2^3 A_2 + V_3^3 A_3}{\bar{V}^3 (A_1 + A_2 + A_3)}$$

$$\bar{V} = \frac{Q}{A} = \frac{V_1 A_1 + V_2 A_2 + V_3 A_3}{A_1 + A_2 + A_3} \quad (2.3)$$

z ύψος κοίτης από κάποιο επίπεδο αναφοράς (π.χ. στάθμη θάλασσας) σε σημεία του άξονα x μεταξύ των οποίων εφαρμόζεται η εξίσωση

V μέση ταχύτητα ποταμού σε σημεία του άξονα x μεταξύ των οποίων εφαρμόζεται η εξίσωση

y βάθος ποταμού από την κοίτη ως την επιφάνεια του νερού σε σημεία του άξονα x μεταξύ των οποίων εφαρμόζεται η εξίσωση

E_s ειδική ενέργεια (m)



$$\frac{dH}{dx} = -S_f \quad (2.4)$$

S_f αντιπροσωπευτική κλίση τριβής

$$H = z + \frac{aV^2}{2g}$$

Εξίσωση Bernoulli με τριβή

$$\frac{d}{dx} \left(y + \frac{aV^2}{2g} \right) = -\frac{dz}{dx} - S_f$$

$$\frac{dE_s}{dx} = S_o - S_f \quad (2.5)$$

S_o κλίση κοίτης

[21,20]

Εξίσωση μεταφοράς – διάχυσης τριών διαστάσεων για τυρβώδη ροή με συντελεστές τυρβώδους ανάμιξης

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = 0 \quad (2.6)$$

$$D_x = \varepsilon_x + D$$

$$D_y = \varepsilon_y + D$$

$$D_z = \varepsilon_z + D$$

Δεδομένου ότι $\varepsilon_i \gg D$ οι συντελεστές τυρβώδους ανάμιξης είναι ίσοι με τους συντελεστές τυρβώδους διάχυσης (eddy diffusivity/diffusion coefficients)

[45]

Εξίσωση μεταφοράς – διάχυσης τριών διαστάσεων

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c - \nabla \cdot (c \mathbf{U}) \quad (2.7)$$

Δισδιάστατη μεταφοράς-διάχυσης για μόνιμες συνθήκες (διάχυση κατά x αμελητέα)

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (2.8)$$



Μονοδιάστατη ως προς τη διάχυση (λύση της παραπάνω) από γραμμική πεπερασμένου μήκους πηγή(κατά z)

$$C(y, t) = \frac{\dot{m}}{U(4\pi Dt)^{1/2}} \exp\left(\frac{-y^2}{4Dt}\right) \quad (2.9)$$

\dot{m} ροή μάζας ανά μήκος πηγής (kg/m/s)

\dot{m}/U ποσότητα ρύπου από την πηγή που παρασύρεται από τη ροή

D συντελεστής μοριακής διάχυσης

Δισδιάστατη ως προς τη διάχυση από γραμμική πεπερασμένου μήκους πηγή(κατά z)

$$C(x, y) = \frac{\dot{m}}{U(4\pi Dx/U)^{1/2}} \exp\left(\frac{-y^2 U}{4Dx}\right) \quad (2.10)$$

Τρισδιάστατη διάχυση από σημειακή πηγή

$$C(x, y, z) = \frac{\dot{m}}{4\pi Dx} \exp\left(-\frac{(y^2+z^2)U}{4Dx}\right) \quad (2.11)$$

[16]

Παραδοχές πλουμίων στην κοντινή περιοχή

- Η ταχύτητα παράσυρσης σε συγκεκριμένο ύψος στην άκρη του πλουμίου είναι απ' ευθείας ανάλογη της κατακόρυφης ταχύτητας στο ίδιο ύψος, με σταθερά αναλογίας τη σταθερά παράσυρσης a .
- Τα προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας και δύναμης λόγω διαφοράς πυκνότητας στις οριζόντιες τομές του πλουμίου είναι όμοια και Gaussian, $w = w_c \exp(-r^2/b^2)$ και $g' = g'_c \exp(-r^2/\lambda^2 b^2)$. Δηλ. ο λόγος διάδοσης $\lambda = 1$
- Ισχύει η προσέγγιση Boussinesq δηλ. οι διαφορές της πυκνότητας στο εσωτερικό του πλουμίου είναι αμελητέες σε σχέση με τις διαφορές πυκνότητας μέσα και έξω από το πλούμιο στο ίδιο πάντα επίπεδο.

Μεταβολή ροής όγκου κατά τον κατακόρυφο άξονα

$$\frac{dQ}{dz} = 2aM^{1/2} \quad (2.12)$$



Μεταβολή ροής ορμής κατά τον κατακόρυφο άξονα

$$\frac{dM}{dz} = \frac{FQ}{M} \quad (2.13)$$

Μεταβολή ροής λόγω διαφοράς πυκνότητας κατά τον κατακόρυφο άξονα

$$\frac{dF}{dz} = -QN^2 = Q \frac{gd\rho_o}{\rho_1 dz} \quad (2.14)$$

Q ροή όγκου (ή ειδική ροή μάζας)

M ροή ορμής

F ροή (λόγω διαφοράς πυκνότητας) θερμικής πηγής που συνδυάζεται με ροή μάζας. Στην περίπτωση $N = 0$ για ομοιόμορφο αποδέκτη, η ροή (λόγω διαφοράς πυκνότητας) μέσα στο πλούμιο είναι σταθερή σε όλα τα ύψη.

N συχνότητα μεταβολής της διαφοράς πυκνότητας αποδέκτη

$$b_{top} = \sqrt{2}b_G \quad (2.15)$$

$$w_{top} = \frac{w_G}{2} \quad (2.16)$$

$$g'_{top} = \frac{g'_G}{2} \quad (2.17)$$

$$a_{top} = \sqrt{2}a_G \quad (2.18)$$

top δείκτης που αφορά εγκάρσια ομοιόμορφη κατανομή τιμών (top-hat profiles)

G δείκτης που αφορά εγκάρσια γκαουσιανή κατανομή τιμών (Gaussian profiles)

b πλάτος πλουμίου

g' μειωμένη βαρύτητα

a σταθερά παράσυρσης

w κατακόρυφη ταχύτητα

Προσέγγιση Boussinesq ισχύει για $\Delta\rho/\rho \leq 0,1$

$$g' \equiv g \left(\frac{\rho_\infty - \rho}{\rho_o} \right) \quad (2.19)$$

ρ_∞ πυκνότητα αποδέκτη

ρ πυκνότητα μέσα στο πλούμιο

ρ_o πυκνότητα έξω από το πλούμιο στο ίδιο επίπεδο

Αριθμός Richardson πλουμίου (0,56 για καθαρό πλούμιο στη περιοχή πλήρους ανάπτυξης)



$$R_p = Q^2 F / M^{5/2} \quad (2.20)$$

Αριθμός Richardson στη πηγή ή αρχικός αριθμός Richardson πλούμιου

$$R_o = \frac{Q_o^2 F_o}{M_o^{5/2}} \quad (2.21)$$

Αριθμός Froude για καθαρό πλούμιο, σταθερός κατά το ύψος

$$Fr^2 = \frac{M^{5/2}}{Q^2 F_o} \quad (2.22)$$

Μήκος εκτόξευσης L_m καθορίζει αν η ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας είναι εκτόξευση ή πλούμιο.

$$L_m = 2^{-3/2} \alpha^{-1/2} \frac{M_o^{3/4}}{F_o^{1/2}} \quad (2.23)$$

Για $z/L_m > 5$ η ροή είναι πλούμιο

Τύποι πλούμιου

$$\Gamma = 2^{9/2} 5 \alpha^{-1} (1 + \lambda^2) F_o M_o^{-5} Q_o^2$$

$$c = 1 - 1/\Gamma$$

$$c \equiv 1 - \frac{8 \alpha M_o^{5/2}}{5 F_o Q_o^2}$$

$$c < 0, \quad 0 < \Gamma < 1 \quad \text{forced plume}$$

$$c = 0, \quad \Gamma = 1 \quad \text{pure plume}$$

$$c > 0, \quad \Gamma > 1 \quad \text{lazy plume}$$

(2.24)

c παράμετρος ροής σε ομοιόμορφο αποδέκτη

Γ παράμετρος πηγής

$$\lambda = 1$$

[15]



Πίνακας 2.1. Ροές από σημειακή κυκλική πηγή και γραμμική πηγή κυκλικών στομιών δισδιάστατης ροής συνολικού μήκους L και συνολικής παροχής Q_T

	Σημειακή πηγή	Γραμμική πηγή
Ροή όγκου	$Q_j = (\pi/4)d^2 u_j$	$q = Q_T/L = u_j B_o$
Ροή ορμής	$M = u_j Q_j$	$m = u_j q$
Ροή (λόγω διαφοράς πυκνότητας)	$B = g_o' Q_j$	$b = g_o' q$

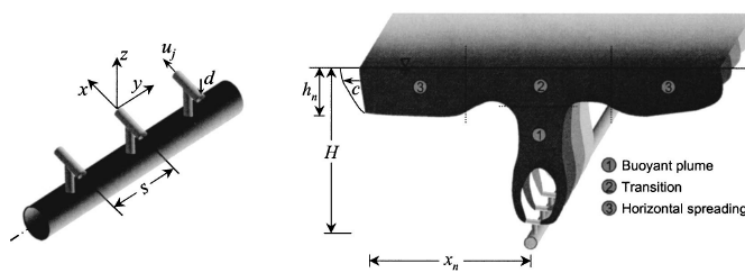
d διάμετρος (αρχικό πλάτος πλουμίου) κυκλικής σημειακής πηγής

u_j ταχύτητα εξόδου αποβλήτων

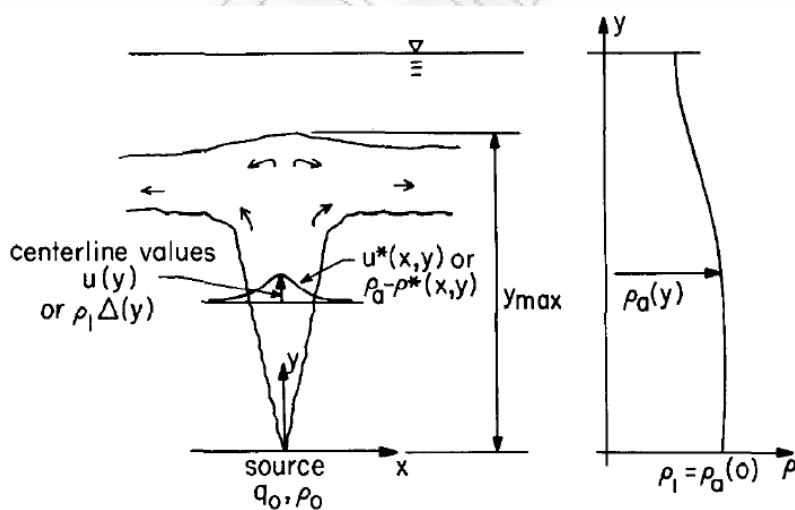
B_o αρχικό συνολικό πλάτος πλουμίου γραμμικής πηγής

[32]

Κατακόρυφο βυθισμένο εξαναγκασμένο πλούμιο (εκτόξευση άνωσης) σε βαθιά νερά



Σχήμα 2.1. Πλούμιο γραμμικής πηγής σε αποδέκτη με διαστρωμάτωση [32]



Σχήμα 2.2. Πλούμιο γραμμικής πηγής σε αποδέκτη με διαστρωμάτωση [31]



Εξίσωση διατήρησης μάζας για γραμμική πηγή σε ακίνητο υδάτινο αποδέκτη

$$\frac{d(ub)}{dy} = \frac{2a_s u}{\pi^{1/2}} \quad (2.25)$$

a_s συντελεστής παράσυρσης γραμμικής πηγής

b ακτίνα πλουμίου

u μέση κατακόρυφη ταχύτητα

Εξίσωση διατήρησης ορμής για γραμμική πηγή σε σταθερά διαστρωματωμένο ακίνητο υδάτινο αποδέκτη

$$\frac{d(u^2 b)}{dy} = 2^{1/2} g b \frac{\rho_1 - \rho_o}{\rho_1} \quad (2.26)$$

Εξίσωση διατήρησης διαφοράς πυκνότητας για γραμμική πηγή σε σταθερά διαστρωματωμένο ακίνητο υδάτινο αποδέκτη

$$g \frac{d}{dy} \left(u b \frac{\rho_1 - \rho_o}{\rho_1} \right) = -2^{1/2} u b \left(\frac{-g}{\rho_1} \frac{d\rho_\alpha}{dy} \right) \quad (2.27)$$

Γραμμική πηγή με αρχική διαφορά πυκνότητας μόνο, χωρίς αρχική ορμή ($m_o = 0$)

$$u = u_o = (\beta_o / a_s)^{1/3} \quad (2.28)$$

$\beta_o = q_o g_o'$ αρχική ροή (λόγω διαφοράς πυκνότητας) γραμμικής πηγής

Ολοκληρωμένη μορφή της 2.25 για πηγή

$$b = 2\pi^{-1/2} a_s y \quad (2.29)$$

Ολοκληρωμένη μορφή της 2.26 για πηγή σε ομοιόμορφο αποδέκτη όπου $\rho_1 = \rho_\alpha$

$$g \frac{\rho_1 - \rho_o}{\rho_1} = \frac{\beta_o}{2^{1/2} u_o a_s y} \quad (2.30)$$

Εξίσωση συνέχειας συντηρητικού ρύπου

$$\left(\frac{\pi}{2} \right)^{1/2} C u b = C_o q_o \quad (2.31)$$

Αραίωση σε ομοιόμορφο αποδέκτη

$$S = \frac{C_o}{C} = 2^{1/2} a_s^{2/3} g_o'^{1/3} q_o^{-2/3} y = 2^{1/2} a_s^{2/3} g_o'^{1/3} Q^{-2/3} L^{2/3} y \quad (2.32)$$

S αραίωση κατά μήκος του κεντρικού άξονα της εκτόξευσης



L μήκος γραμμικής πηγής (πολυσκεδαστήρα)

Q συνολική παροχή πολυσκεδαστήρα (diffuser)

Αραιώση (κεντρικού άξονα) σε αποδέκτη με ομοιόμορφη (σταθερή) διαστρωμάτωση

$$S_t = A g_o'^{1/3} q_o^{-2/3} y_{max} = A g_o'^{1/3} Q^{-2/3} L^{2/3} y_{max} \quad (2.33)$$

A σταθερά που εξαρτάται από την παράσυρση

Μέγιστο ύψος πλουμίου σε ομοιόμορφη διαστρωμάτωση

$$y_{max} = B (g_o' q_o)^{1/3} \left(\frac{-g}{\rho_1} \frac{d\rho_a}{dy} \right)^{-1/2} \quad (2.34)$$

B σταθερά που εξαρτάται από την παράσυρση

$\frac{-g}{\rho_1} \frac{d\rho_a}{dy} = \epsilon$ βαθμίδα διαφοράς πυκνότητας υδάτινου αποδέκτη (σταθερή τιμή)

Αραιώση (κεντρικού άξονα) για αποδέκτη με σταθερή διαστρωμάτωση και οριζόντια εκφόρτιση

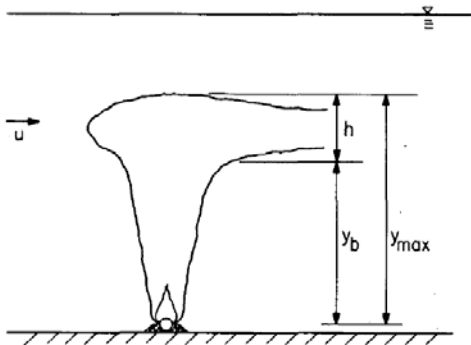
$$S_t = D g_o'^{1/3} q_o^{-2/3} y_{max} = D g_o'^{1/3} Q^{-2/3} L^{2/3} y_{max} \quad (2.35)$$

$D > A$ σταθερά που εξαρτάται από την παράσυρση

Μέγιστο ύψος πλουμίου σε ομοιόμορφη διαστρωμάτωση και οριζόντια εκφόρτιση

$$y_{max} = E (g_o' q_o)^{1/3} \left(\frac{-g}{\rho_1} \frac{d\rho_a}{dy} \right)^{-1/2} \quad (2.36)$$

$E < B$ σταθερά που εξαρτάται από την παράσυρση



Σχήμα 2.3. Ύψος πλουμίου ρύπανσης κάτω από το y_{max} [31]



Τοπικός πυκνομετρικός Froude

$$F^2 = m^{5/2} / \mu^2 \beta \tag{2.37}$$

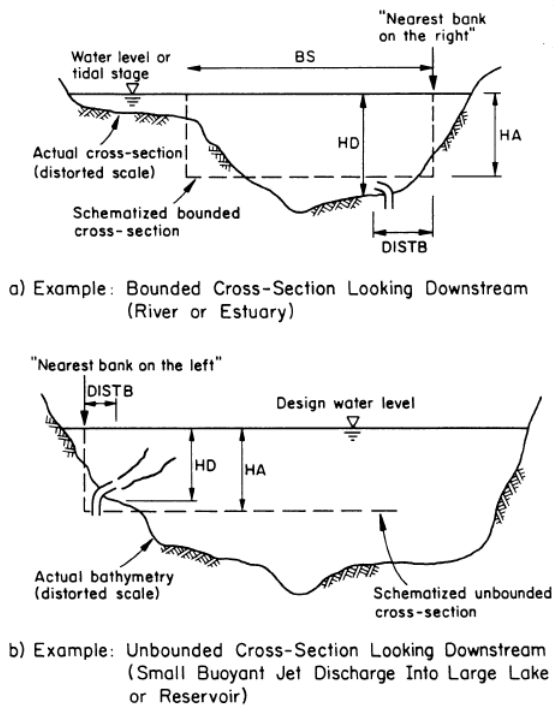
m κινηματική ροή ορμής

μ ροή όγκου

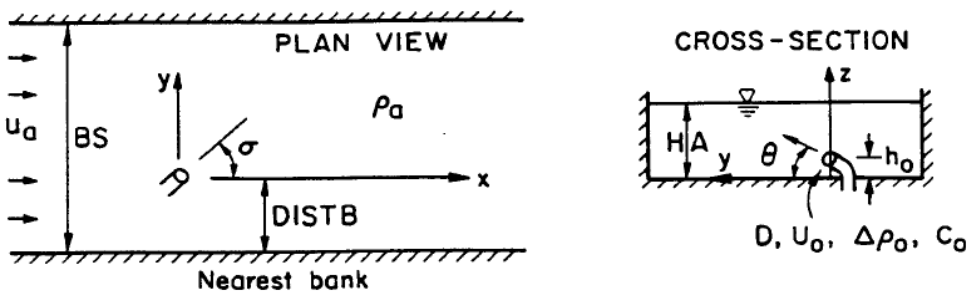
β ροή που περνά το τοπικό οριζόντιο επίπεδο

[31]

Σημειακή βυθισμένη πηγή (βαθιά νερά)



Σχήμα 2.4. Θέση σημειακής πηγής σε φυσικό αποδέκτη [24]



Σχήμα 2.5. Θέση σημειακής πηγής σε αποδέκτη σταθερής παραλ/μης εγκάρσιας διατομής [33,24]



DISTB απόσταση σημειακής πηγής από την εγγύτερη όχθη (αριστερή ή δεξιά)
R ακτίνα κυκλικού στομίου ή *A* εμβαδόν εγκάρσιας επιφάνειας για μη κυκλικά στόμια

h_o ύψος της σημειακής πηγής από το βυθό

θ κατακόρυφη γωνία εκφόρτισης μεταξύ του κεντρικού άξονα του αγωγού και του οριζοντίου επίπεδου ($-45^\circ-90^\circ$)

σ οριζόντια γωνία εκφόρτισης μετρημένη αντίθετα από τη φορά των δεικτών του ρολογιού από τον άξονα ροής x μέχρι την αντίστοιχη προβολή του κεντρικού άξονα του αγωγού ($0^\circ-360^\circ$)

Κλίμακα μήκους μετάβασης πλουμίου εκτόξευσης (jet plume). Είναι η απόσταση στην οποία πραγματοποιείται η μετάβαση από εκτόξευση λόγω διαφοράς πυκνότητας σε πλούμιο για στάσιμο ομοιόμορφο υδάτινο αποδέκτη

$$L_M = M_o^{3/4} / J_o^{1/2} \quad (2.38)$$

Κλίμακα μήκους εκτόξευσης σε εγκάρσια ροή νερού. Απόσταση μετά την οποία η εκτόξευση αποκλίνει έντονα (μεταφέρεται) λόγω εγκάρσιας ροής νερού. Για εκφόρτιση με $\theta = 0$ και $\sigma = 0$ είναι η απόσταση πέρα από την οποία υπάρχει μόνο μεταφορά ρύπου.

$$L_m = M_o^{1/2} / u_a \quad (2.39)$$

Κλίμακα μήκους πλουμίου σε εγκάρσια επιφανειακή ροή. Η κατακόρυφη προς τα πάνω ή προς τα κάτω απόσταση λόγω άνωσης πέρα από την οποία επικρατεί μεταφορά του πλουμίου λόγω εγκάρσιας ροής

$$L_b = J_o / u_a^3 \quad (2.40)$$

Κλίμακα μήκους εκτόξευσης σε διαστρωμάτωση. Σε στάσιμα με γραμμική διαστρωμάτωση ύδατα η απόσταση στην οποία μια εκτόξευση επηρεάζεται έντονα από τη διαστρωμάτωση με αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός τελικού στρώματος με οριζόντια διασπορά (δηλ. το μήκος συγκρίνεται με το ύψος της πυκνοκλίνης)

$$L'_m = M_o^{1/4} / \epsilon^{1/4} \quad (2.41)$$



Κλίμακα μήκους πλουμίου σε διαστρωμάτωση. Σε στάσιμα με γραμμική διαστρωμάτωση ύδατα η απόσταση στην οποία ένα πλούμιο επηρεάζεται έντονα από τη διαστρωμάτωση με αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός τελικού στρώματος με οριζόντια διασπορά (δηλ. το μήκος συγκρίνεται με το ύψος της πυκνοκλίνης)

$$L'_b = J_o^{1/4} / \epsilon^{3/8} \quad (2.42)$$

$M_o = U_o Q_o$ ροή κινηματικής ορμής

$J_o = g'_o Q_o$ κινηματική ροή (λόγω διαφοράς πυκνότητας)

$Q_o = U_o \alpha_o$ παροχή πηγής ρύπανσης

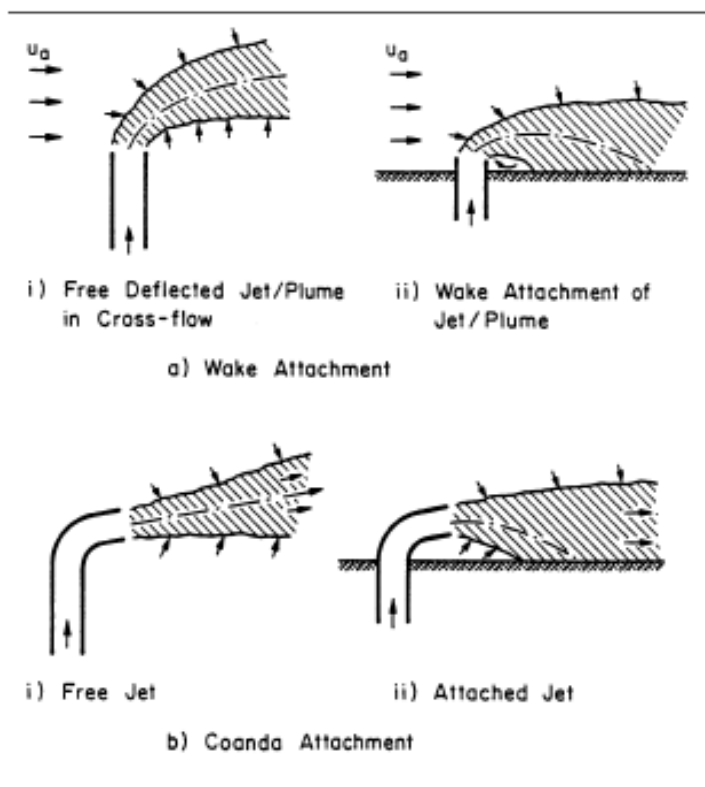
α_o εμβαδόν στομίου

u_a ταχύτητα υδάτων αποδέκτη

U_o ταχύτητα εκφόρτισης

ϵ βαθμίδα διαφοράς πυκνότητας υδάτινου αποδέκτη

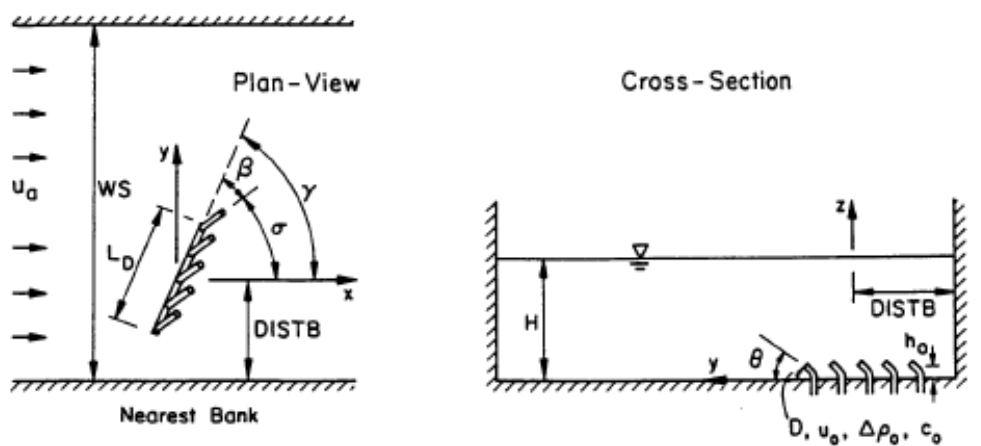
$g'_o = g(\rho_\alpha - \rho_o) / \rho_\alpha$ διαφορά πυκνότητα εκφόρτισης



Σχήμα 2.6 Εγκάρσια εκτόξευση κοντά στο βυθό [24,33]



Χαρακτηριστικά μήκη γραμμικής βυθισμένης πηγής πεπερασμένου μήκους και δισδιάστατης εκφόρτισης



Σχήμα 2.7. Θέση γραμμικής πηγής (πολυσκεδαστήρας) [24,33]

Κλίμακα μήκους μετάβασης εκτόξευσης αύλακα σε πλούμιο. Απόσταση στην οποία πραγματοποιείται η μετάβαση από εκτόξευση σε πλούμιο σε στάσιμο ομοιόμορφο υδάτινο αποδέκτη

$$\ell_M = m_o / J_o^{2/3} \quad (2.43)$$

Κλίμακα μήκους εκτόξευσης αύλακα σε εγκάρσια επιφανειακή ροή. Απόσταση μετά την οποία η εκτόξευση αποκλίνει έντονα (μεταφέρεται) λόγω εγκάρσιας ροής νερού. Για εκφόρτιση με $\theta = 0$ και $\sigma = 0$ είναι η απόσταση πέρα από την οποία υπάρχει μόνο μεταφορά ρύπου.

$$\ell_m = m_o / u_a^2 \quad (2.44)$$

Κλίμακα μήκους εκτόξευσης αύλακα σε διαστρωμάτωση. Σε στάσιμα με γραμμική διαστρωμάτωση ύδατα η απόσταση στην οποία μια εκτόξευση επηρεάζεται έντονα από τη διαστρωμάτωση με αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός τελικού στρώματος με οριζόντια διασπορά

$$\ell'_m = m_o^{1/3} / \epsilon^{1/3} \quad (2.45)$$



Κλίμακα μήκους πλουμίου αύλακα σε διαστρωμάτωση Σε στάσιμα με γραμμική διαστρωμάτωση ύδατα η απόσταση στην οποία ένα πλούμιο επηρεάζεται έντονα από τη διαστρωμάτωση με αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός τελικού στρώματος με οριζόντια διασπορά

$$\ell'_b = J_o^{1/3} / \epsilon^{1/2} \quad (2.46)$$

Κλίμακα μήκους πλουμίου σε εγκάρσια ροής με διαστρωμάτωση. Κατακόρυφη προς τα πάνω ή προς τα κάτω απόσταση λόγω άνωσης πέρα από την οποία το πλούμιο μεταφέρεται από την εγκάρσια ροή

$$\ell_a = u_a / \epsilon^{1/2} \quad (2.47)$$

$m_o = U_o q_o$ ροή κινηματικής ορμής ανά μονάδα μήκους

$j_o = g'_o q_o$ κινηματική ροή (λόγω διαφοράς πυκνότητας) ανά μονάδα μήκους

$q_o = U_o n \alpha_o / L_D$ παροχή πηγής εκφόρτισης (L^2/T)

α_o εμβαδόν στομίου

u_a ταχύτητα νερού αποδέκτη

U_o ταχύτητα εκφόρτισης

ϵ βαθμίδα διαφοράς πυκνότητας υδάτινου αποδέκτη

$g'_o = g(\rho_\alpha - \rho_o) / \rho_\alpha$ διαφορά πυκνότητα εκφόρτισης

n συνολικός αριθμός στομίων

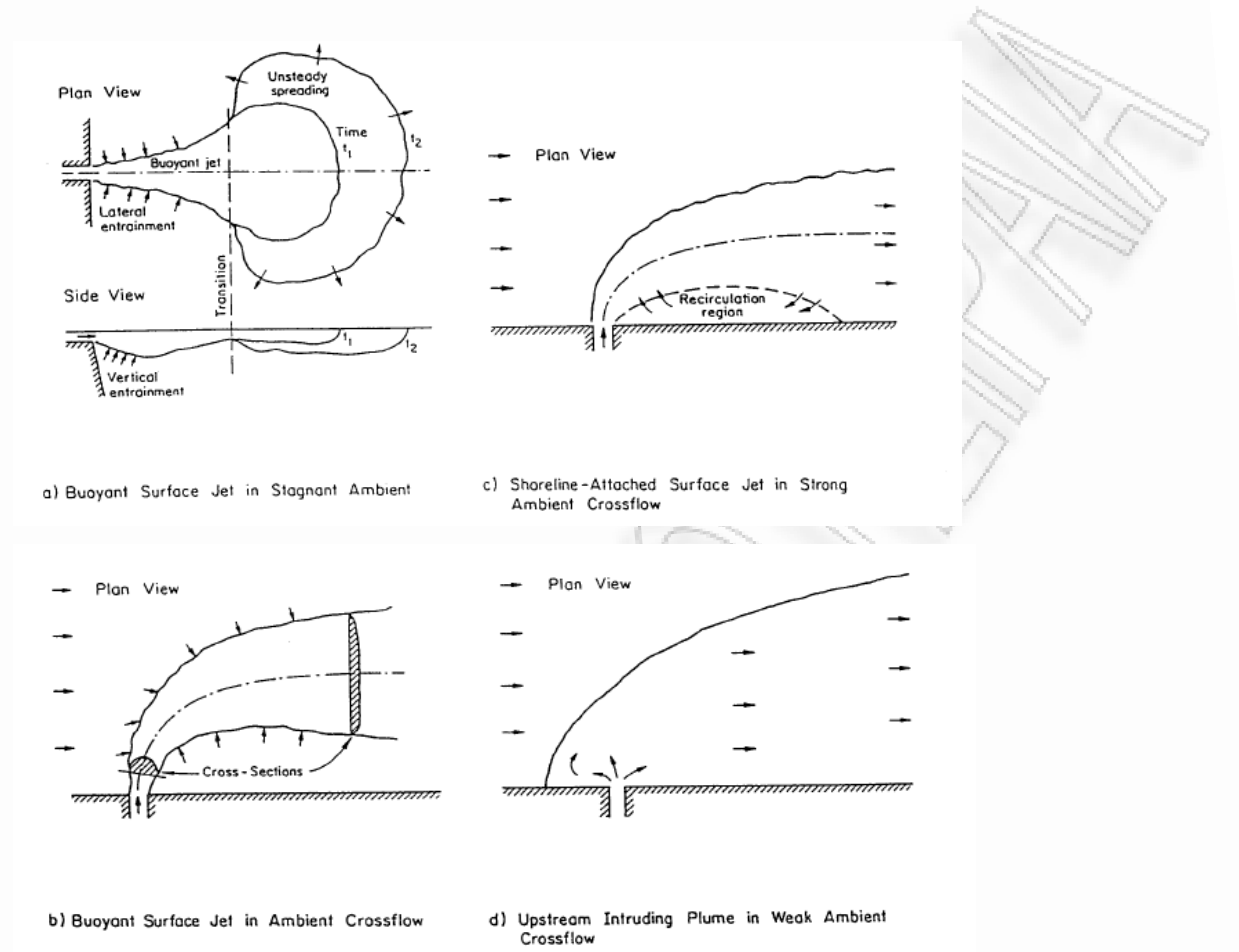
$L_D = s \left(\frac{n}{2} - 1 \right)$ μήκος πολυσκεδαστήρα

s απόσταση μεταξύ διαδοχικών στομίων τύπου T

Οι υπολογισμοί γίνονται με αφετηρία το κέντρο της γραμμής του πολυσκεδαστήρα και μόνο όταν αυτός ξεκινά από την όχθη η πηγή τοποθετείται στην όχθη.



Επιφανειακή πηγή (αβαθή νερά)



Σχήμα 2.8. Τυπική επιφανειακή εκτόξευση σε στάσιμα νερά ή ποτάμι [24]

Χαρακτηριστικά μήκη επιφανειακής πηγής σε μη-διαστρωματωμένα (αβαθή) νερά

Κλίμακα μήκους μετάβασης εκτόξευσης σε πλούμιο. Το μήκος της αρχικής περιοχής εκτόξευσης πριν την επιφανειακή διασπορά σε στάσιμο ομοιόμορφο υδάτινο αποδέκτη

$$L_M = M_o^{3/4} / J_o^{1/2} \quad (2.48)$$

Κλίμακα μήκους εκτόξευσης σε εγκάρσια ροή. Η απόσταση στην οποία μια εκτόξευση διεισδύει στην εγκάρσια ροή του νερού πριν εκτραπεί έντονα. Το μέγεθος L_m συγκρίνεται με το πλάτος του καναλιού και αν το υπερβεί τότε το πλούμιο αλληλεπιδρά με την αντίπερα όχθη



$$L_m = M_o^{1/2}/u_a \quad (2.49)$$

Κλίμακα μήκους πλουμίου σε εγκάρσια ροή. Μέτρο της τάσης για ανάντη διεύθυνση για μια έντονα εκφόρτιση

$$L_b = J_o/u_a^3 \quad (2.50)$$

$M_o = U_o Q_o$ ροή κινηματικής ορμής

$J_o = g'_o U_o$ κινηματική ροή

$Q_o = U_o \alpha_o$ παροχή πηγής ρύπανσης

α_o εμβαδόν εγκάρσιας τομής αγωγού

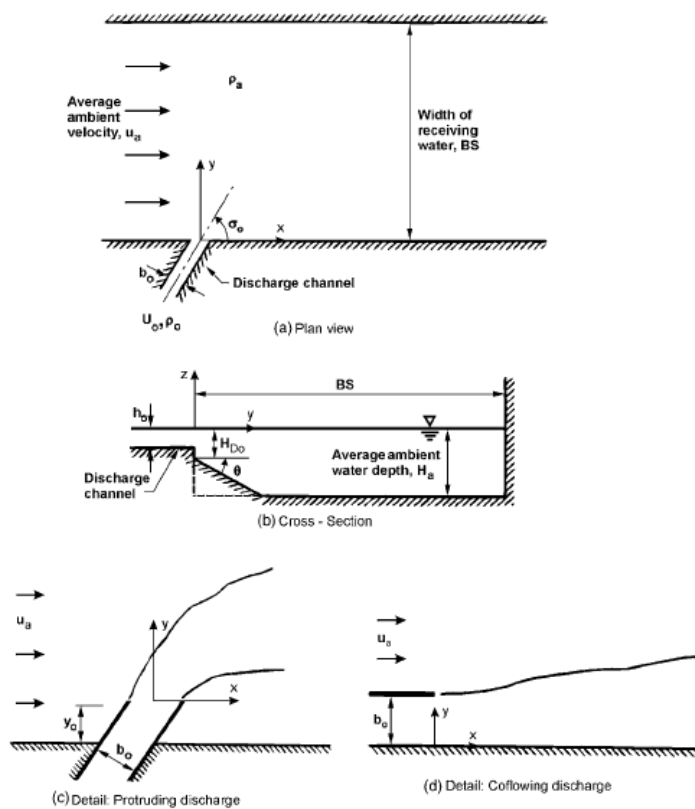
u_a ταχύτητα νερού αποδέκτη

U_o ταχύτητα εκφόρτισης αγωγού

ϵ βαθμίδα διαφοράς πυκνότητας υδάτινου αποδέκτη

$g'_o = g(\rho_\alpha - \rho_o)/\rho_\alpha$ διαφορά πυκνότητας εκφόρτισης

[24,33]



Σχήμα 2.9. Πλευρική επιφανειακή εκφόρτιση [30]



b_o πλάτος ορθογώνιου καναλιού εκφόρτισης. Στην περίπτωση επιφανειακού κυκλικού αγωγού είναι η διάμετρος του αγωγού.

h_o βάθος καναλιού εκφόρτισης. Στην περίπτωση επιφανειακού κυκλικού αγωγού είναι η απόσταση του πάτου του αγωγού από την επιφάνεια.

h_{D_o} πραγματικό βάθος νερού αποδέκτη στην είσοδο του καναλιού εκφόρτισης

θ κλίση βυθού αποδέκτη

σ_o γωνία οριζόντιου άξονα εκφόρτισης με τη ροή του νερού

$$g'_o = g(\rho_\alpha - \rho_o)/\rho_\alpha$$

$$Q_o = U_o b_o h_o$$

$$M_o = U_o Q_o$$

$$J_o = Q_o g'_o$$

$L_Q = Q_o/M_o^{1/2} = \alpha_o^{1/2} = (b_o h_o)^{1/2}$ κλίμακα μήκους εκφόρτισης (περιοχή έντονης επίδρασης επιφανειακής εκτόξευσης)

Αριθμός Froude καναλιού

$$F = \frac{U_o}{\left(g'_o \alpha_o^{1/2}\right)^{1/2}} \quad (2.51)$$

Αριθμός Froude που αντιστοιχεί στο πάτο του καναλιού

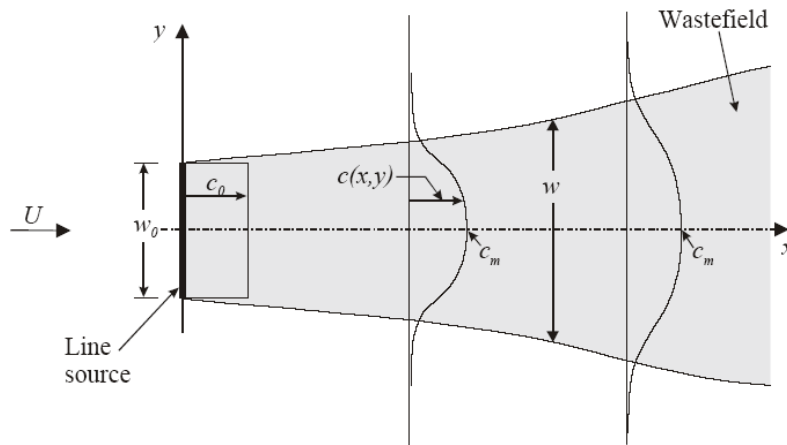
$F_{h_o} < 1$ υπάρχει ανάντη διείδυση και το h_o αντικαθίσταται από το h_c κρίσιμο βάθος στην έξοδο του καναλιού

$$F_{h_o} = \frac{U_o}{\left(g'_o h_o\right)^{1/2}} \quad (2.52)$$

[30]



Μακρινή περιοχή παθητικής διάχυσης και άνωσης (πλουμίου)



Σχήμα 2.10. Διάχυση από συνεχή γραμμική πηγή πεπερασμένου μήκους [16]

Νόμος 4/3 Ο οριζόντιος συντελεστής διάχυσης (εγκάρσια στη διεύθυνση της ροής) δεν επηρεάζεται από την ευστάθεια και το βάθος. Επίσης δεν επηρεάζεται από τον αριθμό Richardson

$$\varepsilon = \alpha L^{4/3} \quad (2.53)$$

L μέγεθος πλουμίου (cm)

ε συντελεστής διάχυσης κατά τη διεύθυνση της ροής (cm^2/s)

α σταθερά που εξαρτάται από το ρυθμό σκεδασμού ενέργειας

L_L μήκος Lagrange

Ο εκθετικός νόμος 4/3 σημαίνει ότι όταν $L < L_L$ το D αυξάνει, ενώ για $L > L_L$ το D μένει σταθερό

Εξίσωση μεταφοράς διάχυσης που εφαρμόζεται για θάλασσα και μεγάλες λίμνες (περιπτώσεις γραμμικής πηγής πεπερασμένου μήκους)

k σταθερά αποσύνθεσης

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) - kc \quad (2.54)$$

Λύση της 2.54

$$C(x, y) = \frac{C_0 e^{-kt}}{2\sqrt{\pi\varepsilon_0 t'}} \int_{-w_0/2}^{w_0/2} \exp \left[-\frac{(y-y')^2}{4\varepsilon_0 t'} \right] dy' \quad (2.55)$$



Κατά τον εκθετικό νόμο «4/3»

$$\frac{dx'}{dx} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \left(\frac{w}{w_0}\right)^{4/3} \quad (2.56)$$

$w = 12\sigma^2$ πλάτος πλουμίου ρύπανσης

w_0 μήκος πηγής

$$C_m(x) = C_0 e^{-kt} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{3/2}{\left(1 + \frac{2}{3}\beta \frac{x}{w_0}\right)^3 - 1}} \quad (2.57)$$

C_m μέγιστες συγκεντρώσεις στον άξονα του πλουμίου για $y = 0$

C_0 αρχική συγκέντρωση νερού κατά μήκος της γραμμικής πηγής

$\frac{C_0}{C_m} = S_f$ αραίωση μακρινού πεδίου (εξαρτάται από το χρόνο). Από το τύπο προκύπτει ότι για μικρού μήκους γραμμικές πηγές η διαταραχή της θάλασσας μπορεί να είναι αποτελεσματική στην αραίωση, ενώ για μεγάλους μήκους όχι.

$$\beta = \frac{12\varepsilon_0}{Uw_0}$$

Για μεγάλες αποστάσεις όπου $\beta \frac{x}{w_0} \gg 1$

$$C_m(x) \approx C_0 e^{-kt} \frac{9}{2\sqrt{\pi}} \left(\beta \frac{x}{w_0}\right)^{-3/2} \quad (2.58)$$

Διακύμανση πλάτος πλουμίου στη μακρινή περιοχή

$$\frac{w}{w_0} = \left(1 + \frac{2}{3}\beta \frac{x}{w_0}\right)^{3/2} \quad (2.59)$$

[16]

$$K_y = \frac{10^{-8}}{\left(\frac{1}{\rho_1} \frac{d\rho_1}{dy}\right)} \quad (2.60)$$

K_y κατακόρυφος συντελεστής διάχυσης. Μειώνεται όσο αυξάνεται ο Ri

$$K_{y0} = 0,02 H/T^2 \quad (2.61)$$

K_{y0} κατακόρυφος συντελεστής διάχυσης στην επιφάνεια του νερού (για επιφανειακές εκφορτίσεις)

H ύψος κύματος

T περίοδος κύματος

[31]



Υδροδυναμικά βαθών υδάτων

Προφίλ ταχύτητας νερού

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2.62)$$

$k = 0,41$ σταθερά Von Karman

Μήκος Monin-Obukhov (αρνητικό σε ασταθείς συνθήκες και θετικό σε σταθερές συνθήκες)

$$L = \frac{-u_*^3}{kB} \quad (2.63)$$

B διαφορά πυκνότητας

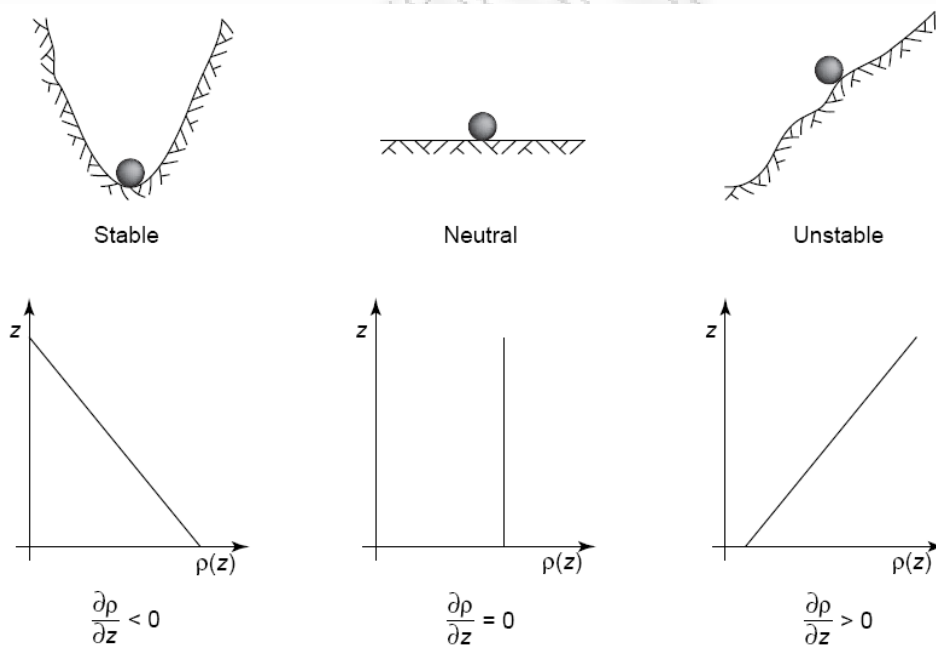
Προσέγγιση Boussinesq για μικρές μεταβολές πυκνότητας

$$g'_0 = g(\rho_a - \rho_0)/\rho_a \quad (2.64)$$

ρ_a πυκνότητα υδάτινου περιβάλλοντος (χωρίς διαστρωμάτωση)

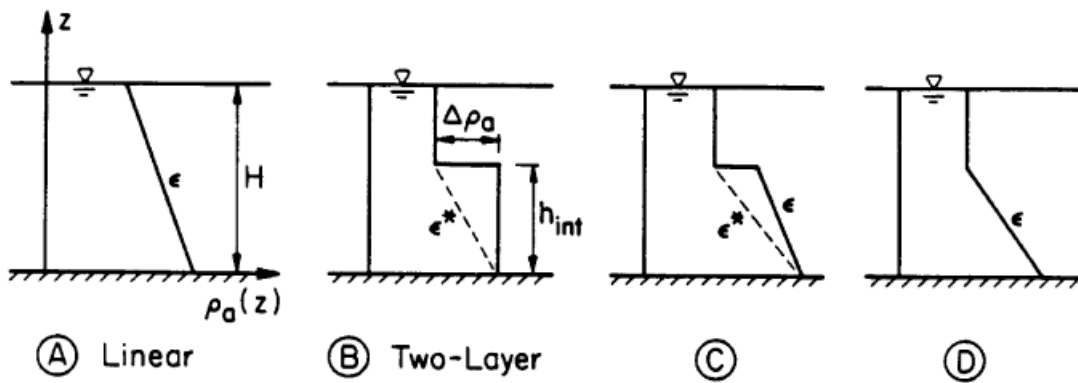
ρ_0 πυκνότητα εκροής (στη πηγή)

[28]

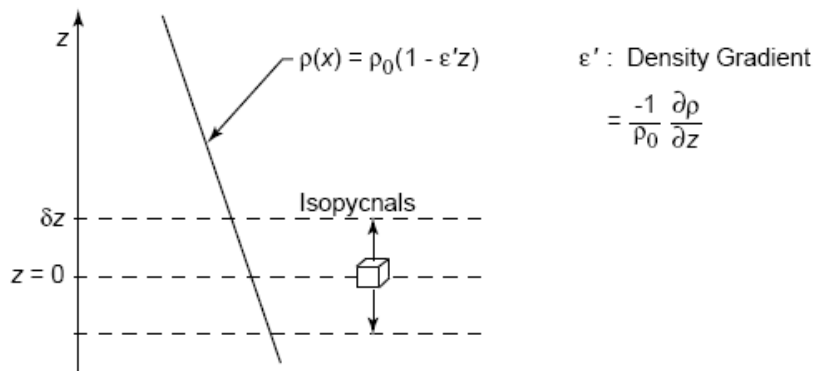


Σχήμα 2.11. Καταστάσεις ευστάθειας σύμφωνα με την κατανομή υδροστατικής πυκνότητας [26]





Σχήμα 2.12. Συνήθως οι εκροές καταλήγουν στη πυκνοκλίνη, περιοχή μεγάλης κατακόρυφης βαθμίδας πυκνότητας, κάτω από το επιφανειακό στρώμα. [33]



Σχήμα 2.13. Περιγραφή της φυσικής έννοιας συχνότητας μεταβολής διαφοράς πυκνότητας [26]

$$N = \pm \left(\frac{g}{\rho_0} \left| \frac{d\rho}{dz} \right| \right)^{1/2} \quad (2.65)$$

$N = \epsilon^{1/2}$ συχνότητα μεταβολής άνωσης ή συχνότητα Brunt-Vaisala (sec^{-1}), η οποία χαρακτηρίζει τη γραμμική διαστρωμάτωση άνωσης. Η συχνότητα της αρμονικής κίνησης περί της αρχικής θέσης μιας ποσότητας υγρού αρχικής πυκνότητας ρ_0 από την οποία μετατοπίστηκε κατά dz .

ϵ βαθμίδα διαφοράς πυκνότητας αποδέκτη

Αν $\Delta\rho/\Delta Z = 0 \Rightarrow$ ουδέτερα σταθερή (μετασταθερή)

Αν $\Delta\rho/\Delta Z < 0 \Rightarrow$ σταθερή

Αν $\Delta\rho/\Delta Z > 0 \Rightarrow$ ασταθής

$\Delta Z > 0$ μεταβολή ύψους από το βυθό προς την επιφάνεια

(Βλέπε σχήμα 2.12)



Αριθμός Reynolds

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (2.66)$$

L μέσο βάθος ροής

U μέση ταχύτητα νερού (χωρίς τριβές)

ν κινηματικό ιξώδες

Συνολικός αριθμός Richardson

$$Ri_o = g \frac{\Delta\rho}{\rho} d / u^2 \quad (2.67)$$

d μέσο βάθος

u μέση ταχύτητα

$\Delta\rho$ συνολική διαφορά πυκνότητας (βυθού – επιφάνειας)

ρ πυκνότητα αναφοράς 10^6 g/m^3

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Ο πυκνομετρικός αριθμός Richardson είναι ο πιο σημαντικός αριθμός για ροές με διαστρωμάτωση. Όταν $Ri < 1/4$ η ταχύτητα είναι αρκετή για να υπερνικήσει τη διαστρωμάτωση και επιτυγχάνεται κάποια ανάμιξη, ενώ όταν $Ri \gg 1$ η τυρβώδης ανάμιξη πέρα από τη διαστρωμάτωση περιορίζεται. Ο πυκνομετρικός αριθμός Richardson χρησιμοποιείται σε πυκνοκλίνες.

$$Ri = \frac{g'L}{U^2} = \frac{N^2}{\left(\frac{du}{dz}\right)^2} \quad (2.68)$$

Αριθμός Froude ποσοτικοποιεί την αντίσταση στην κίνηση ενός αντικειμένου μέσα στο νερό. Ο τύπος ισχύει για βαθιά νερά.

$$Fr = \frac{\text{δυνάμεις αδράνειας}}{\text{δυνάμεις βαρύτητας}} = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (2.69)$$

U ταχύτητα ροής (ή αντικειμένου)

L χαρακτηριστικό μήκος (βάθος που βρίσκεται το αντικείμενο)

Αριθμός Froude για ρηχά νερά

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g^A_B}} = \frac{U}{\sqrt{ga}} \quad (2.70)$$

U χαρακτηριστική μέση ταχύτητα ροής



A εμβαδόν εγκάρσιας τομής

B πλάτος ελεύθερης επιφάνειας

d ομοιόμορφο βάθος για παραλληλόγραμμη εγκάρσια τομή

$Fr < 1$ υποκρίσιμη ροή

$Fr > 1$ υπερκρίσιμη ροή

Μορφή του αριθμού Froude αμοιβαία με τον αριθμό Richardson

$$\widehat{Fr} = \frac{U^2}{gd} \quad (2.71)$$

Ο πυκνομετρικός αριθμός Froude χρησιμοποιείται σε γραμμική διαστρωμάτωση

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{gL}} = \frac{1}{\sqrt{Ri}} \quad (2.72)$$

L μπορεί να εκφραστεί με το βάθος της λίμνης

$$g' = \frac{\Delta\rho}{\rho} g$$

$\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$ διαφορά πυκνότητας επιφάνειας-βυθού λίμνης (g/m^3)

ρ πυκνότητα αναφοράς 10^6 g/m^3

$\Delta\rho/\rho > 0,01 \text{ g/m}^3 \Rightarrow$ έντονη διαστρωμάτωση

$Fr > 0,32 \Rightarrow$ δεν υπάρχει διαστρωμάτωση

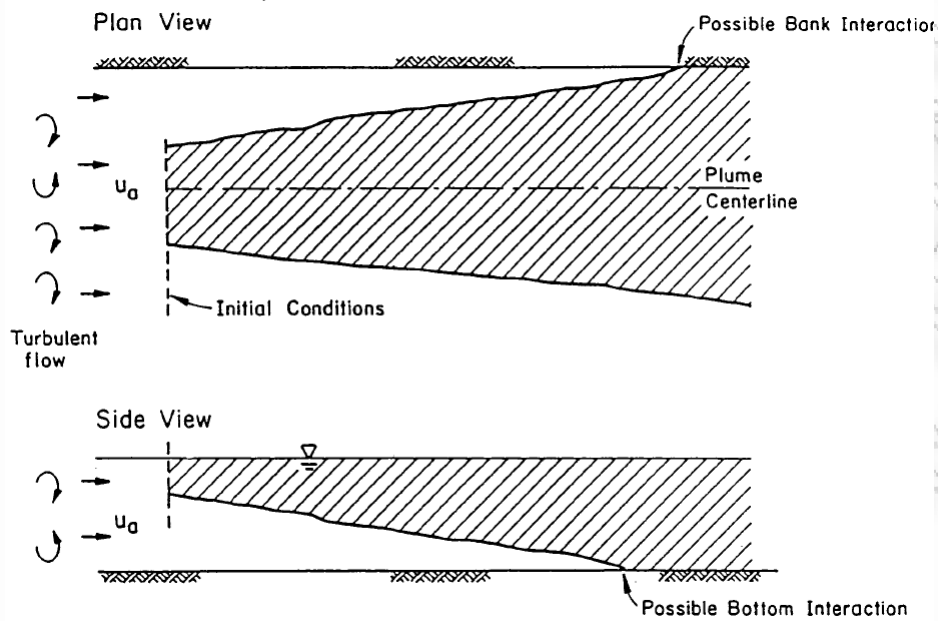
$0,1 < Fr < 0,32 \Rightarrow$ μέτρια διαστρωμάτωση

$Fr < 0,1 \Rightarrow$ έντονη διαστρωμάτωση

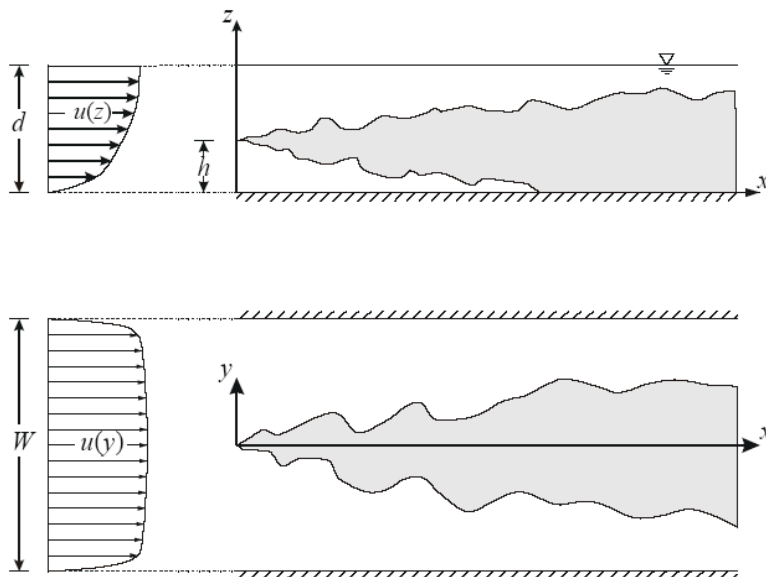
[26,45,11,28]



Ποτάμια



Σχήμα 2.14. Παθητική διάχυση με μεταφορά στη μακρινή περιοχή [24]



Σχήμα 2.15. Παθητική διάχυση με μεταφορά από σημειακή πηγή στη μέση ευθύ παραλληλόγραμμου καναλιού [16]

Μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης ρύπου

$$U \frac{\partial C}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (2.73)$$



K ταχύτητα αποδόμησης (1/day)

U κατάντη ταχύτητα ποταμού στο $x=0$

Αναλυτική λύση Thomann και Mueller για σημειακή πηγή σταθερής C_o , στη μέση ευθύ παραλληλόγραμμου καναλιού. Το μοντέλο υπολογίζει και την ανάντη ρύπανση

$$C(x) = C_o \exp \left[\left(\frac{u + \sqrt{u^2 + 4KD_x}}{2D_x} \right) x \right] \text{ ανάντη } x \leq 0$$

$$C(x) = C_o \exp \left[\left(\frac{u - \sqrt{u^2 + 4KD_x}}{2D_x} \right) x \right] \text{ κατάντη } x > 0 \quad (2.74)$$

[18]

$$C_o = \frac{M}{Q \sqrt{\frac{(u^2 + 4KD_x)}{u^2}}} \quad (2.75)$$

M μάζα μη συντηρητικού ρύπου που εισέρχεται (kg/s)

Q παροχή καθαρού νερού (m^3/s)

Σχέση Harleman

$$D_x = 63nU_T R^{5/6} \quad (2.76)$$

n συντελεστής τραχύτητας Manning

U_T μέγιστη παλιρροϊκή ταχύτητα

R υδραυλική ακτίνα

Μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης BOD

$$D \frac{d^2L}{dx^2} - U \frac{dL}{dx} - kL = 0 \quad (2.77)$$

L συγκέντρωση BOD (mg/L)

k ρυθμός βιοχημικής οξείδωσης οργανικού φορτίου BOD (day^{-1})

Μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης ελλείμματος (σε σχέση με την συγκέντρωση κορεσμού) διαλυμένου οξυγόνου DO

$$D \frac{d^2DO}{dx^2} - U \frac{dDO}{dx} - K_2DO + kL_x = 0 \quad (2.78)$$

$K_2 = \frac{3,9U^{1/2}}{H^{3/2}}$ σταθερά αερισμού (day^{-1})



H μέσο βάθος ποταμού (m)

L_x συγκέντρωση BOD στο σημείο x (mg/L)

Λύση Ο' Connor της 2.77

$$L = \frac{M}{Qm_1} \exp \left[\frac{U}{2D_x} (1 \pm m_1) x \right] \quad (2.79)$$

Λύση Ο' Connor της 2.78

$$DO = \frac{kM}{(K_2 - k)Q} \left\{ \frac{1}{m_1} \exp \left[\frac{U}{2D_x} (1 \pm m_1) x \right] - \frac{1}{m_2} \exp \left[\frac{U}{2D_x} (1 \pm m_1) x \right] \right\} \quad (2.80)$$

M μάζα εισερχόμενου BOD (kg/s)

$$m_1 = \sqrt{\frac{(U^2 + 4kD_x)}{U^2}}$$

$$m_2 = \sqrt{\frac{(U^2 + 4K_2D_x)}{U^2}}$$

[45]

Εξίσωση μονοδιάστατης μεταφοράς με διδιάστατη διάχυση για ποτάμια

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (2.81)$$

Για πλατύ ανοιχτό ποτάμι

$$\bar{\varepsilon}_z = 0,067du^* \quad (2.82)$$

$\bar{\varepsilon}_z$ σταθμισμένη κατά βάθος μέση τιμή του συντελεστή κατακόρυφης διάχυσης

d βάθος ποταμού

u^* ταχύτητα τριβής

Συντελεστής εγκάρσιας διάχυσης για στενά ποτάμια

$$\frac{\varepsilon_y}{au^*} = f \left(\frac{W}{d} \right) \quad (2.83)$$

W πλάτος καναλιού

f παράγοντας τριβής

Για πραγματικά ποτάμια

$$\frac{\varepsilon_y}{au^*} \cong (0,4 - 0,8) \quad (2.84)$$



Για ευθή ποτάμια

$$\frac{\varepsilon_y}{du^*} \cong (0,01 - 0,2) \quad (2.85)$$

Συντελεστής διάχυσης κατά τη διεύθυνση της ροής

$$\varepsilon_x > 0,15du^* \quad (2.86)$$

Ορισμός ταχύτητας τριβής

$$u^* = \sqrt{\tau_o/\rho} \quad (2.87)$$

u^* ταχύτητα τριβής

τ_o δύναμη διάτμησης πλευρικών τοιχωμάτων και κοίτης

ρ πυκνότητα νερού

Σχέση μόνο για μονάδες SI

$$u^* = n3,1UR_h^{-1/6} \quad (2.88)$$

R_h υδραυλική ακτίνα ισούται με το λόγο του εμβαδού εγκάρσιας τομής δια την αντίστοιχη περίμετρο υδάτινου όγκου (m)

n συντελεστής Manning

U (m/s)

Για ομοιόμορφη ροή

$$u^* = \sqrt{gR_hS} \quad (2.89)$$

g επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2)

S κλίση κοίτης ποταμού

[45,16]

Μονοδιάστατη εξίσωση που καλύπτει και τους τρεις άξονες γιατί επιλύεται θεωρώντας ότι η σημειακή πηγή είναι στο μέσο του ποταμού, η κατακόρυφη ανάμιξη είναι στιγμιαία δηλ. θεωρεί κατακόρυφη γραμμική πηγή στο μέσο του ποταμού μήκους όσο το βάθος του ποταμού.

$$U \frac{\partial c}{\partial x} = \varepsilon_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (2.90)$$

ε_y συντελεστής εγκάρσιας τυρβώδους διάχυσης



Λύση της 2.90 σύμφωνα με το νόμο Fick, που ισχύει σε κατάντη απόσταση $x \gg 2D/U$

$$C = \frac{\dot{m}}{Ud(4\pi\epsilon_y x/U)^{1/2}} \exp\left(\frac{-y^2}{4\epsilon_y x/U}\right) \quad (2.91)$$

$$\dot{m} = \frac{Qc_0}{d}$$

d βάθος ποταμού (μήκος πηγής)

C_0 αρχική συγκέντρωση δίπλα από τη γραμμική πηγή

Q παροχή πηγής

U μέση ταχύτητα ποταμού

$$C_m = \frac{Qc_0}{Ud} \frac{1}{\sqrt{4\pi\epsilon_y x/U}} \quad (2.92)$$

C_m μέγιστες συγκεντρώσεις στον άξονα

$$w = 4(2\epsilon_y x/U)^{1/2} \quad (2.93)$$

w πλάτος πλουμίου

$$x_1 = \frac{Uw^2}{32\epsilon_y} \quad (2.94)$$

x_1 κατάντη απόσταση στην οποία το πλούμιο φτάνει στην όχθη

W μισό πλάτος ποταμού

$$L_c = 0,1 \frac{Uw^2}{\epsilon_y} \quad (2.95)$$

L_c κατάντη απόσταση για την πλήρη ανάμιξη (το πλούμιο απλώνει ομοιόμορφα σε όλη την εγκάρσια τομή του ποταμού)

W μισό πλάτος ποταμού

$$L_s = 0,4 \frac{Uw^2}{\epsilon_y} \quad (2.96)$$

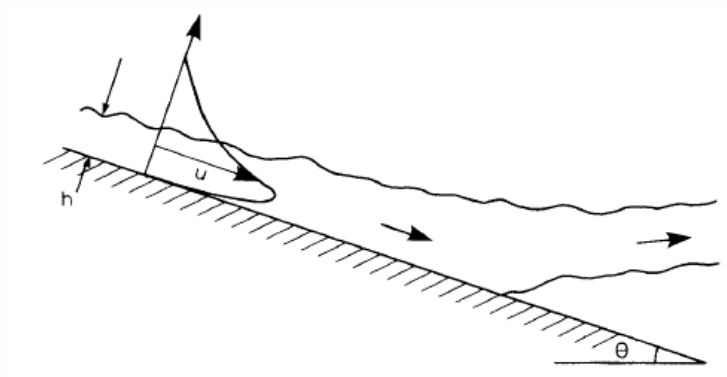
L_s κατάντη απόσταση για την πλήρη ανάμιξη όταν η πηγή είναι σε μια από τις όχθες

W μισό πλάτος ποταμού

[16]



Υδροδυναμικά ποταμών



Σχήμα 2.16. [28]

Συνολικός αριθμός Richardson για ποτάμι. Συνήθως τα ποτάμια δεν έχουν βαθμίδα μεταβολής πυκνότητας

$$Ri_o = \frac{g(\Delta\rho/\rho)hc\cos\theta}{u^2} \quad (2.97)$$

h πάχος στρώματος

θ γωνία κοίτης με το οριζόντιο επίπεδο

[28]

$$Re = \frac{\rho u R}{\mu} \quad (2.98)$$

$Re < 500$ στρωτή ροή

$Re > 2000$ τυρβώδης ροή

Re αριθμός Reynolds για ανοιχτά κανάλια

$R = A/P$ υδραυλική ακτίνα (εμβαδόν εγκάρσιας τομής/περίμετρο διαβροχής)

Darcy-Wiesbach για υδραυλική (m) απώλεια λόγο τριβής

$$h_f = \frac{fLV^2}{2gR} \quad (2.99)$$

V μέση ταχύτητα ποταμού

L μήκος τμήματος ποταμού

f παράγοντας τριβής Darcy-Wiesbach

Σχέση $f - Re$ για ανοιχτά κανάλια



$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log_{10} \left(\frac{k_s}{14,8R} + \frac{1,26}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (2.100)$$

k_s ενεργό ύψος τραχύτητας

Παραδοχές

- Κατά μήκος της ροής επικρατεί η υδροστατική πίεση και δεν υπάρχουν κατακόρυφες επιταχύνσεις
- Τα όρια ροής είναι σταθερά και δεν διαβρώνονται
- Οι κλίσεις ροής είναι μικρότερες από ~1:10

Δεδομένου ότι $S_o = S_f$, σύμφωνα με τις παραδοχές

$$S_o = L/h_f \quad (2.101)$$

S_f κλίση ενέργειας ή κλίση επιφάνειας νερού

S_o κλίση κοίτης

Για ομοιόμορφη ροή

$$\tau_o \propto V^2 \quad (2.102)$$

$\tau_o = \rho g R S_o$ δύναμη διάτμησης που ασκείται ομοιόμορφα στην κοίτη και στις πλευρές του καναλιού (Newton=kg m/s²)

Εξίσωση Chezy

$$V = 0,552 \cdot C \sqrt{R S_o} \quad (2.103)$$

R (m)

V μέση ταχύτητα ποταμού (m/s)

0,552 παράγοντας προσαρμογής μονάδων

C συντελεστής Chezy

Από εξίσωση Chezy (2.103) και Darcy-Wiesbach (2.99)

$$C = \sqrt{\frac{2g}{f}} \quad (2.104)$$

Εξίσωση Manning

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} \quad (2.105)$$



R (m)

V (m/s)

n συντελεστής Manning

Άλλη μορφή της εξίσωσης Manning με αντικατάσταση του C από την εξίσωση Chezy (2.103)

$$V = \frac{R^{2/3} S_0^{1/2}}{n} \quad (2.106)$$

V (m/s)

R (m)

[17,19,21,23]

Πίνακας 2.1. Συνήθως για μεγάλες λίμνες και παραθαλάσσιες περιοχές ο παράγοντας τριβής προσδιορίζεται κατευθείαν από πίνακες και όχι από την εξίσωση Manning.

Τύπος καναλιού	n Manning
Λείο χωρίς φύκια	0,020
Λίγες πέτρες και φύκια	0,025
Καθαρά και ευθύγραμμα φυσικά ποτάμια	0,025–0,030
Μη-ευθύγραμμα με βαθείς και αβαθείς περιοχές	0,033–0,040
Μη ευθύγραμμα με πολλά φύκια	0,050–0,150
Καθαρά ευθύγραμμα προσχωματικά (αμμώδη) ($d=75\%$ του μέσου μεγέθους των κόκκων του ιζήματος σε feet)	$0,031d^{1/6}$

Για σταθερή παροχή ποταμού

- Η ειδική ενέργεια είναι ελάχιστη E_{sc} σε βάθος y_c ή κρίσιμο (κατακόρυφο) βάθος

Για όλες τις άλλες τιμές της ειδικής ενέργειας υπάρχουν δύο βάθη.

$y > y_c$ υποκρίσιμη ροή

$y < y_c$ υπερκρίσιμη ροή

Για σταθερή ειδική ενέργεια

- Η παροχή είναι μέγιστη στο κρίσιμο (κατακόρυφο) βάθος y_c



Για όλες τις άλλες τιμές παροχής υπάρχουν δύο βάθη.

$y > y_c$ υποκρίσιμη ροή

$y < y_c$ υπερκρίσιμη ροή

Για κανάλι σταθερής παραλληλόγραμμης εγκάρσιας τομής

$$y_c = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3} \quad (2.107)$$

$$q = y_c V_c$$

$$Q = qb$$

$$A = by$$

b πλάτος ποταμού

$\alpha = 1$ στην εξίσωση Bernoulli

Για παραλληλεπίπεδο κανάλι

$$V_c = \sqrt{gy_c} \quad (2.108)$$

Για παραλληλεπίπεδο κανάλι

$$y_c = \frac{2}{3} E_{sc} \quad (2.109)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD_m}} = \frac{\text{εσωτερική δύναμη}}{\text{δύναμη βαρύτητας}} = \frac{\text{ταχύτητα νερού}}{\text{ταχύτητα κύματος}} \quad (2.110)$$

D_m υδραυλικό μέσο βάθος ποταμού

$Fr < 1$ στην υποκρίσιμη ροή δηλ. το νερό πάνω από το κρίσιμο βάθος δεν εκτρέπεται από εμπόδια. Αλλά στην υποκρίσιμη ροή υπάρχει ανάντη διείδυση.

$Fr = 1$ στο κρίσιμο (κατακόρυφο) βάθος

$Fr > 1$ στην υπερκρίσιμη ροή δηλ. το νερό κάτω από το κρίσιμο βάθος εκτρέπεται από εμπόδια. Αλλά στην υπερκρίσιμη ροή δεν υπάρχει ανάντη διείδυση.

Υπάρχει μόνο μια κρίσιμη κλίση κοίτης S_c που σε δεδομένο κανάλι ισχύει

$$D_m = y_c.$$

Για $S_o < S_c$ το κανονικό βάθος είναι μεγαλύτερο από το κρίσιμο και η ροή είναι υποκρίσιμη



Για $S_o > S_c$ το κανονικό βάθος είναι μικρότερο από το κρίσιμο και η ροή είναι υπερκρίσιμη

Απότομη μεταβολή ροής

$$y_2 = \frac{y_1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1) \quad (2.111)$$

y_2 βάθος μετά το εμπόδιο (γενικά τη μεταβολή της ροής)

y_1 βάθος πριν τη μεταβολή

Σταδιακή μεταβολή ροής

Κρίσιμη κλίση για παραλληλεπίπεδο κανάλι

$$S_c = \frac{gn^2}{y_c^{1/3}} \quad (2.112)$$

Όταν $S_o < S_c$ τότε $y > y_c$, η ροή είναι υποκρίσιμη (δύο περιοχών) και η κλίση χαρακτηρίζεται ήπια

Όταν $S_o > S_c$ τότε $y < y_c$, η ροή είναι υπερκρίσιμη (μιας περιοχής) και η κλίση χαρακτηρίζεται απότομη

Σταδιακή μετατροπή από υποκρίσιμη σε υπερκρίσιμη ροή και αντίστροφα

Όταν $S_o = S_f$ η ροή είναι ομοιόμορφη (S_f απώλειες λόγω τριβής) τότε $y = y_n$ κανονικό βάθος.

$$\frac{dE_s}{dy} = 1 + Fr^2 \quad (2.113)$$

Από Bernoulli και εξίσωση 2.113 για σταδιακή μεταβολή ροής

$$\frac{dx}{dy} = \frac{S_o - S_f}{1 - Fr^2} \quad (2.114)$$

$$y > y_n > y_c \quad S_f < S_o \quad Fr < 1 \quad \frac{dx}{dy} > 0 \quad \text{η επιφάνεια ανεβαίνει}$$

Ζώνη 1 (επιφάνεια)

$$y_n > y > y_c \quad S_f > S_o \quad Fr < 1 \quad \frac{dx}{dy} < 0 \quad \text{η επιφάνεια κατεβαίνει}$$

Ζώνη 2

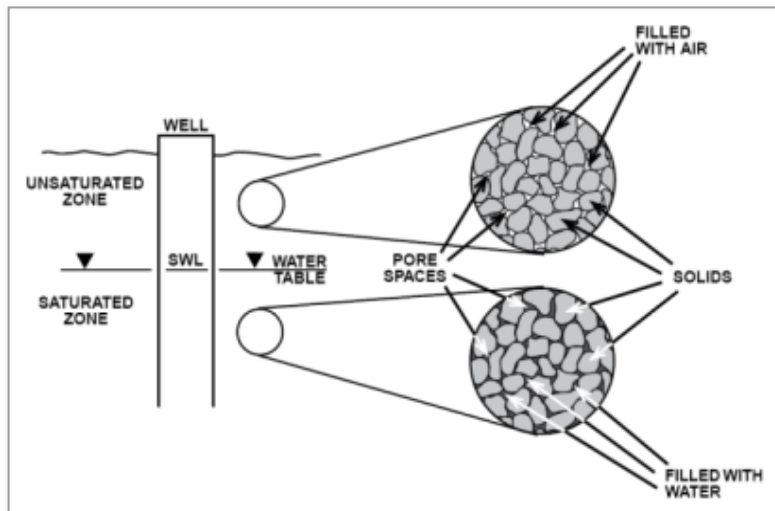
$$y_n > y_c > y \quad S_f > S_o \quad Fr > 1 \quad \frac{dx}{dy} > 0 \quad \text{η επιφάνεια ανεβαίνει}$$

Ζώνη 3

[21]



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ



Σχήμα 3.1. Ενεργή ζώνη επαναφόρτισης (ακόρεστη σε νερό ή vadose zone), και παθητική ζώνη επαναφόρτισης (κορεσμένη σε νερό ή saturated zone) [35]

Αριθμός Peclet για μάζα

$$Peclet = \frac{\text{μεταφορά μάζας}}{\text{διάχυση μάζας}} = \frac{LV}{D} = Re \cdot Sc \quad (3.1)$$

L χαρακτηριστικό μήκος

V ταχύτητα

D συντελεστής διάχυσης

[11]

$$Re = \frac{\rho du}{\mu} \quad (3.2)$$

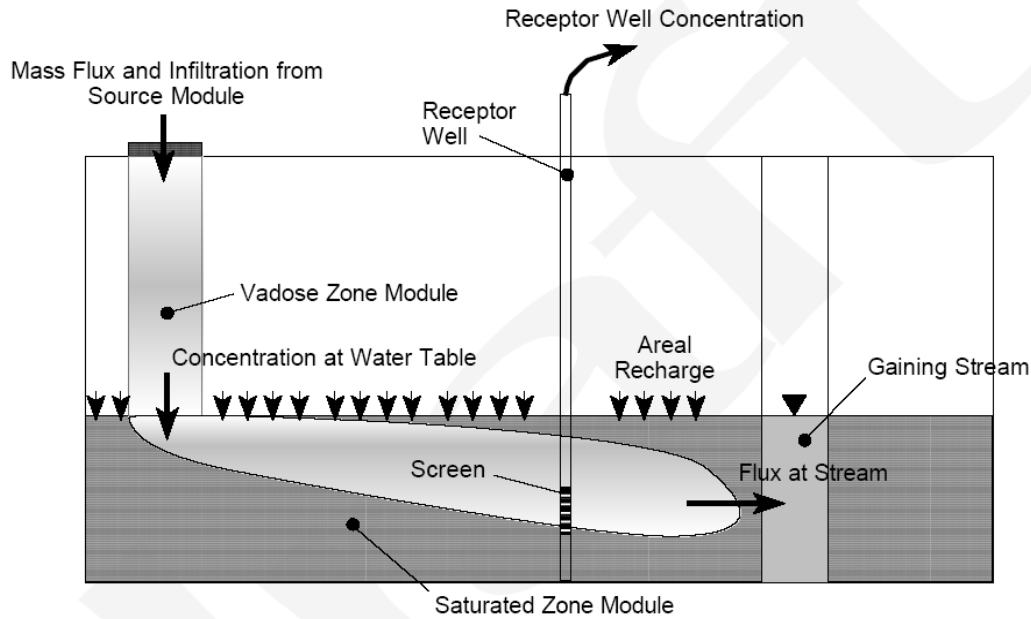
ρ πυκνότητα νερού

d διάμετρος υπόγειου περάσματος νερού

u ταχύτητα υπόγειου νερού

μ ιξώδες





Σχήμα 3.2 Διάγραμμα ακόρεστης (vadoze) και κορεσμένης ζώνης [40]

Νόμος Darcy για ανομοιογενή υπόγειο υδροφόρο στρώμα για Reynold's μεταξύ 1 και 10

$$Q_x = K_x A_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad Q_y = K_y A_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad Q_z = K_z A_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$q_x = K_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad q_y = K_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad q_z = K_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3.3)$$

Q_x, Q_y, Q_z ροές κατά τους τρεις άξονες (m^3/s)

q_x, q_y, q_z ειδικές εκφορτίσεις κατά τους τρεις άξονες (m/s)

K_x, K_y, K_z υδραυλικές αγωγιμότητες κατά τους τρεις άξονες (m/s)

A_x, A_y, A_z εγκάρσιες επιφάνειες προς τους τρεις άξονες (m^2)

h υδραυλικό ή πιεζομετρικό ύψος (m)

Εξίσωση συνέχειας ή συνολικό ισοζύγιο μάζας σε κορεσμένο υπόγειο υδροφόρο στρώμα για μόνιμες συνθήκες

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) = 0 \quad (3.4)$$

Εξίσωση συνέχειας ή ισοζύγιο μάζας σε κορεσμένο υπόγειο υδροφόρο στρώμα για μόνιμες συνθήκες σε συνδυασμό με το νόμο Darcy



$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.5)$$

Εξίσωση συνέχειας ή ισοζύγιο μάζας σε κορεσμένο υπόγειο υδροφόρο στρώμα για μόνιμες συνθήκες σε συνδυασμό με το νόμο Darcy για ισοτροπικό υδροφόρο στρώμα όπου ισχύει $K_x = K_y = K_z = K$.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (3.6)$$

[35,38,43,45]

Εξίσωση Dupuit για μονοδιάστατη υπόγεια ροή (χωρίς επαναφόρτιση) κατά τον οριζόντιο άξονα x

$$q = \frac{K}{2L} (h_L^2 - h_R^2) \quad (3.7)$$

L μήκος υδροφόρου στρώματος κατά τον άξονα ροής x (m)

h_L πιεζομετρικό ύψος στο $x = 0$ δηλ. ανάντη (m)

h_R πιεζομετρικό ύψος στο $x = L$ δηλ. κατάντη (m)

Παραβολή Dupuit για μονοδιάστατη υπόγεια ροή (χωρίς επαναφόρτιση) κατά τον οριζόντιο άξονα x

$$h^2 = h_L^2 - \frac{x}{L} (h_L^2 - h_R^2) \quad (3.8)$$

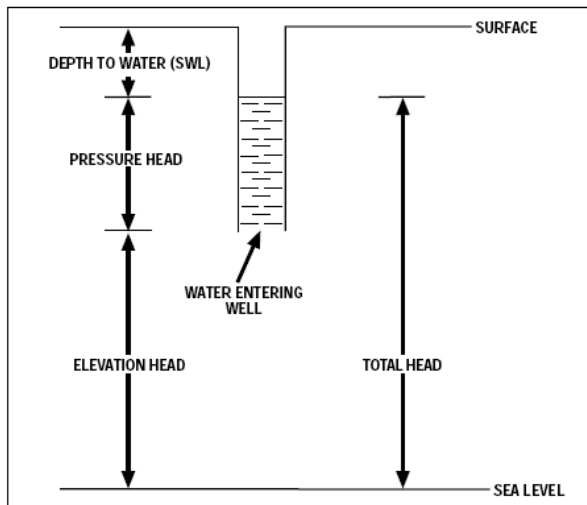
Εξίσωση Dupuit για μονοδιάστατη υπόγεια ροή με επαναφόρτιση κατά τον οριζόντιο άξονα x

$$q = \frac{K}{2L} (h_L^2 - h_R^2) - \frac{R}{2} (L - 2x) \quad (3.9)$$

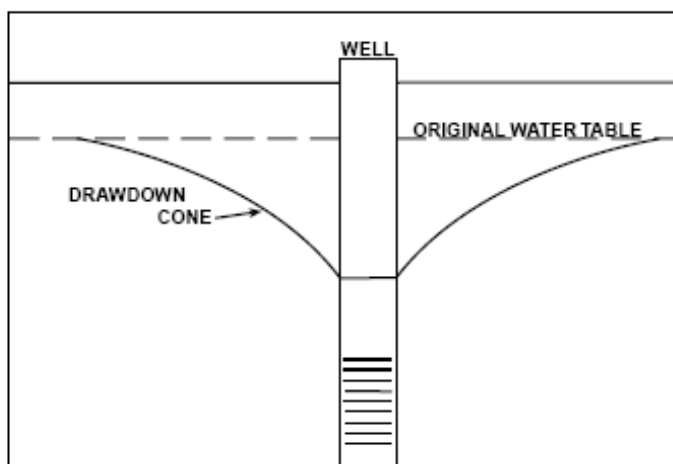
R επαναφόρτιση (m/s)

[45,38]





Σχήμα 3.3. Συνολικό πιεζομετρικό ύψος πάτου πηγαδιού [35]



Σχήμα 3.4. Υποχώρηση στάθμης υπόγειου ύδατος στη γειτνίαση πηγαδιού [35]

Ολοκλήρωση Νόμου Darcy για μονοδιάστατη οριζόντια ροή από διαδοχικές στην ίδια διεύθυνση x ακτινικές αποστάσεις προς το κέντρο αρτεσιανού πηγαδιού, από περιορισμένο ισοτροπικό υπόγειο υδροφόρο στρώμα

$$Q = \pi K \frac{h_2^2 - h_1^2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

$$K = \frac{Q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (3.10)$$

Q παροχή πηγαδιού (m^3/s)

h_1 ύψος στάθμης υπόγειου νερού ή πιεζομετρικής επιφάνειας (water table) σε ακτινική απόσταση r_1 (από 1^ο πηγάδι παρατήρησης)



h_2 ύψος στάθμης υπόγειου νερού ή πιεζομετρικής επιφάνειας (water table) σε ακτινική απόσταση $r_2 > r_1$ (από 2^ο πηγάδι παρατήρησης)

[45]

Πλήρης τρισδιάστατη εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης ρύπου σε υπόγειο υδροφόρο στρώμα για ένα συστατικό/ρύπο (βλέπε Σχήμα 3.7)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C_\ell}{\partial x_j} \right) - V_i \frac{\partial C_\ell}{\partial x_i} = \phi_e Q_\ell \lambda_{\ell,s} C_\ell + \phi_e R_{\ell,s} \frac{\partial C_\ell}{\partial t} - \phi_e \sum_{m=1}^M \xi_{\ell m} Q_m \lambda_{m,s} C_m \quad \begin{matrix} \ell=1,n_c \\ i,j=1,2,3 \end{matrix} \quad (3.11)$$

Αρχική συνθήκη

$$C_\ell(x, y, z, t = 0) = 0$$

Ανάντη όριο

$$x = 0$$

$$-y_L/2 \leq y \leq y_L/2$$

$$0 \leq z \leq B$$

$$C_\ell = 0$$

Ανω όριο με οριακή συνθήκη τη διατήρηση ροής μάζας στη στάθμη υπόγειου νερού

$$C_\ell(x, y, B, t) = C_{\ell,o}(t)$$

$$x_u \leq x \leq x_d$$

$$-y_L/2 \leq y \leq y_L/2$$

$$\left[-D_{zz} \frac{\partial C_\ell}{\partial z} + V_z C_\ell \right]_{z=B} = C_{\ell,o}(t) l$$

Κατάντη όριο

$$\frac{\partial C_\ell}{\partial x} = 0$$

$$x = x_L$$

$$-y_L/2 \leq y \leq y_L/2$$

$$0 \leq z \leq B$$

Αριστερό όριο

$$\frac{\partial C_\ell}{\partial y} = 0$$

$$0 \leq x \leq x_L$$

$$y = -y_L/2$$

$$0 \leq z \leq B$$



Δεξιό όριο

$$\frac{\partial C_\ell}{\partial y} = 0$$

$$0 \leq x \leq x_L$$

$$y = +y_L/2$$

$$0 \leq z \leq B$$

Κάτω όριο

$$\frac{\partial C_\ell}{\partial z} = 0$$

$$0 < x \leq x_L$$

$$-y_L/2 \leq y \leq y_L/2$$

$$z = 0$$

V_i ταχύτητες Darcy (m/s)

D_{ij} συντελεστές τυρβώδους διάχυσης (m^2/s)

ℓ δείκτης συστατικού

n_c αριθμός συστατικών

λ σταθερά αποικοδόμησης πρώτης τάξης (s^{-1})

R παράγοντας καθυστέρησης (αδιάστατο)

Q, Q_m παράγοντες διόρθωσης για το συγκεκριμένο ρύπο και το πατρικό του συστατικό αντίστοιχα, που λαμβάνουν υπόψη τη ροφημένη φάση

ϕ ή n ενεργό πορώδες

ξ_m συντελεστής που έχει να κάνει με τη στοιχειομετρία της παραγωγής του ρύπου από το πατρικό του συστατικό

$$D_{xx} = \alpha_L \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_V \frac{v_z^2}{|v|} + D_m n \quad (3.12)$$

$$D_{yy} = \alpha_L \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_V \frac{v_z^2}{|v|} + D_m n \quad (3.13)$$

$$D_{zz} = \alpha_L \frac{v_z^2}{|v|} + \alpha_V \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_x^2}{|v|} + D_m n \quad (3.14)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_x v_y}{|v|} \quad (3.15)$$

$$D_{xz} = D_{zx} = (\alpha_L - \alpha_V) \frac{v_x v_z}{|v|} \quad (3.16)$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_V) \frac{v_y v_z}{|v|} \quad (3.17)$$

α_L διαμήκης διαπερατότητα (m)



a_T εγκάρσια διαπερατότητα (m)

a_V κατακόρυφη διαπερατότητα (m)

$$|V| = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

D_m ενεργός συντελεστής μοριακής διάχυσης (m^2/s)

Παράγοντας καθυστέρησης που αντιπροσωπεύει το μοντέλο γρήγορης προσρόφησης – γραμμική ισοθερμική ρόφηση και στιγμιαίες αντιδράσεις

$$R = 1 + \frac{K_d \rho_b}{n} = 1 + \frac{K_d \rho_s (1-n)}{n} \quad (3.18)$$

K_d συντελεστής διανομής (ml(νερού)/g(στερεού))

n ενεργό πορώδες υδροφόρου (αδιάστατο)

ρ_b φαινόμενο ειδικό βάρος πορώδους υλικού (g/ml)

ρ_s πυκνότητα στερεού(g/ml)

[40,43]

Δεύτερος ($2^{ος}$) νόμος του Fick

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C) = D \nabla^2 C \quad (3.19)$$

D συντελεστής τυρβώδους διάχυσης

Όταν το D είναι μέσα στο ανάδελτα ο συντελεστής δεν είναι σταθερός κατά τις τρεις διευθύνσεις, ενώ όταν είναι έξω από το ανάδελτα θεωρείται σταθερός κατά τις τρεις διευθύνσεις

[11]

Μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς – διάχυσης χωρίς παρεμπόδιση

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - V_x \frac{\partial c}{\partial x} \quad (3.20)$$

Λύση Ogata-Banks της 3.20 για συνεχή είσοδο του ρύπου με σταθερή αρχική συγκέντρωση C_o σε καθαρό υδροφόρο στρώμα (χωρίς προϋπάρχουσα συγκέντρωση του ρύπου)

$$\frac{c_t}{c_o} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - \bar{V}t}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left(\frac{\bar{V}x}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + \bar{V}t}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (3.21)$$

\bar{V} μέση οριζόντια κατά x ταχύτητα Darcy



Μονοδιάστατη εξίσωση διάχυσης (για πολύ μικρό αριθμό Peclet)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (3.22)$$

Λύση της 3.22

$$\frac{c_t}{c_o} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{x - \bar{v}t}{2\sqrt{Dt}} \quad (3.23)$$

[41,45]

$$n \frac{\partial c}{\partial t} + (1-n)\rho \frac{\partial S}{\partial t} = Dn \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - Vn \frac{\partial c}{\partial x} - \lambda[nC + (1-n)\rho S] \quad (3.24)$$

S μάζα ρύπου που προσροφάται στο βράχο

V ταχύτητα Darcy

D συντελεστής τυρβώδους διάχυσης

ρ πυκνότητα στερεού (g/ml)

$$D = D_o + \frac{Ka\Delta h}{n\Delta l} \quad (3.25)$$

D_o συντελεστής μοριακής διάχυσης [L^2T^{-1}]

K υδραυλική αγωγιμότητα [LT^{-1}]

a μήκος διάχυσης [L]

$\frac{\Delta h}{\Delta l}$ μεταβολή του υδραυλικού ύψους με την απόσταση (αδιάστατο)

Μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης που λαμβάνει υπόψη πρώτης τάξης αντίδραση του συστατικού τόσο στην υγρή όσο και στη στερεή (ροφημένη) φάση καθώς και καθυστέρηση που οφείλεται σε ισοθερμική γραμμική ρόφηση

$$R \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - V \frac{\partial c}{\partial x} - \lambda RC \quad (3.26)$$

λ σταθερά αποικοδόμησης ρύπου

R παράγοντας καθυστέρησης

Αναλυτική λύση της 3.26

$C =$

$$C_o e^{-\lambda t} \frac{V}{V+U} e^{\frac{x(V-U)}{2D}} \operatorname{erfc} \left(\frac{Rx-Ut}{2\sqrt{DtR}} \right) + \frac{V}{V-U} e^{\frac{x(V+U)}{2D}} \operatorname{erfc} \left(\frac{Rx+Ut}{2\sqrt{DtR}} \right) +$$



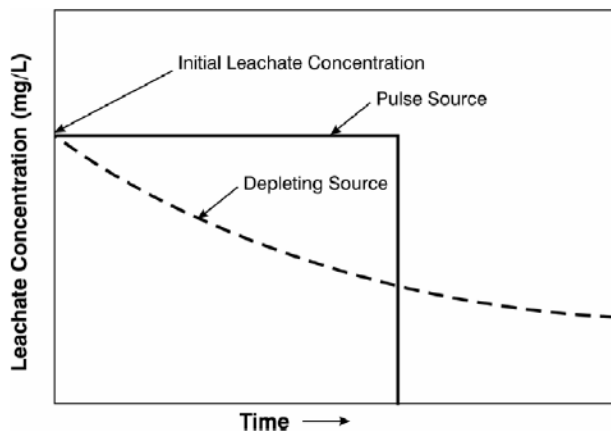
$$\frac{V^2}{2DR(\lambda-\Lambda)} e^{\frac{Vx}{D}+(\Lambda-\lambda)t} \operatorname{erfc}\left(\frac{Rx+Vt}{2\sqrt{DtR}}\right) - C_o e^{-\Lambda(t-t_o)} \frac{V}{V+U} e^{\frac{x(V-U)}{2D}} \operatorname{erfc}\left(\frac{Rx-Ut}{2\sqrt{DtR}}\right) + \frac{V}{V-U} e^{\frac{x(V+U)}{2D}} \operatorname{erfc}\left(\frac{Rx+Vt}{2\sqrt{DtR}}\right) + \frac{V^2}{2DR(\lambda-\Lambda)} e^{\frac{Vx}{D}+(\Lambda-\lambda)t} \operatorname{erfc}\left(\frac{Rx+Vt}{2\sqrt{DtR}}\right) \quad (3.27)$$

$$U = \sqrt{V^2 + 4DR(\lambda - \Lambda)}$$

Λ ταχύτητα αποστράγγισης (σταθερά)

C_o αρχική συγκέντρωση ρύπου

[34,46]



Σχήμα 3.5. Συγκέντρωση στραγγισμάτων σε συνάρτηση με το χρόνο για σταθερή και φθίνουσα πηγή [43]

Πεπερασμένη σταθερή πηγή (finite pulse source)

$$M_c = C_w \times A_w \times D_{LF} \times F_h \times \rho_{hw} \times 1000 \quad (3.28)$$

M_c συνολική μάζα συστατικού/ρύπου στο ΧΥΤΑ (mg), τη στιγμή που κλείνει ο ΧΥΤΑ πλήρους δυναμικότητας και αρχίζει η παραγωγή στραγγισμάτων $t = 0$

C_w συγκέντρωση συστατικού στα εναποτεθέντα απορρίμματα (mg/kg)

A_w επιφάνεια χώρου εναπόθεσης (m^2)

D_{LF} μέσο βάθος χώρου εναπόθεσης (m)

F_h κλάσμα όγκου απορριμμάτων στο χώρο εναπόθεσης τη στιγμή περάτωσης (κλεισίματος) (m^3/m^3 , αδιάστατο)

ρ_{hw} πυκνότητα απορριμμάτων (g/cm^3)

Κατανομή ποσότητας ρύπου στο χρόνο ζωής του ΧΥΤΑ

$$M_c = C_w \times \dot{m}_w \times t_A \quad (3.29)$$



\dot{m}_w ετήσιο φορτίο απορριμμάτων κατά τη διάρκεια της ενεργού ζωής (kg/y)

t_A ενεργός χρόνος ζωής ΧΥΤΑ (y)

Από τις 3.28 και 3.29

$$F_h = \frac{\dot{m}_w \times t_A}{A_w \times D_{LF} \times \rho_{hw} \times 1000} \quad (3.30)$$

ρ_{hw} όταν είναι άγνωστη μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τιμή 1,0

$$\dot{m}_{cL} = C_L(t) \times A_w \times I \times 1000 \quad (3.31)$$

\dot{m}_{cL} ετήσια ποσότητα συστατικού που στραγγίζεται (mg/y)

C_L συγκέντρωση συστατικού στα στραγγίσματα (mg/L)

t χρόνος από τη περάτωση (κλείσιμο) χώρου εναπόθεσης (y)

I ετήσια τοπική ταχύτητα διήθησης (m/y)

Διάρκεια σταθερής πηγής

$$t_p = M_c / \dot{m}_{cL} \quad (3.32)$$

$$t_p = \frac{C_w \times D_{LF} \times F_h \times \rho_{hw}}{C_L \times I} \quad (3.33)$$

Πεπερασμένη φθίνουσα πηγή

$$C_L(t) = K_w C_w(t) \quad (3.34)$$

C_L συγκέντρωση στραγγισμάτων (mg/L)

t χρόνος από την περάτωση (κλείσιμο) του ΧΥΤΑ (y)

K_w λόγος συγκέντρωσης απορριμμάτων προς συγκέντρωση στραγγισμάτων (L/kg)

C_w συγκέντρωση συστατικού στα απορρίμματα (mg/kg)

Γενικό ισοζύγιο μάζας ρύπου στον ΧΥΤΑ

$$A_w \times D_{LF} \times F_h \times \rho_{hw} \times (C_{w,0} - C_w(t)) = A_w \times I \int_0^t C_L(t) dt \quad (3.35)$$

$C_{w,0}$ αρχική συγκέντρωση ρύπου στα απορρίμματα (mg/L), τη στιγμή έναρξης στραγγίσης δηλ. περάτωσης (κλεισίματος) ΧΥΤΑ

I ετήσια τοπική ταχύτητα διήθησης (m/y)



Εναλλακτική μορφή της 3.35

$$A_w \times D_{LF} \times F_h \times \rho_{hw} \times \frac{dC_w}{dt} = A_w \times I \times C_L(t) \quad (3.36)$$

Από τις 3.34 και 3.36

$$\frac{dC_L}{dt} = \frac{-I \times C_L}{D_{LF} \times F_h \times \rho_{hw} \times K_w} \quad (3.37)$$

Ολοκληρωμένη μορφή της 3.37

$$C_L(t) = C_{L,0} \exp \left\{ \left(\frac{-I}{D_{LF} \times F_h \times \rho_{hw} \times K_w} \right) t \right\} \quad (3.38)$$

C_L συγκέντρωση στραγγισμάτων (mg/L)

$C_{L,0}$ συγκέντρωση στραγγισμάτων (mg/L), τη στιγμή έναρξης στράγγισης δηλ. περάτωσης (κλεισίματος) ΧΥΤΑ

t χρόνος από τη περάτωση/κλείσιμο του ΧΥΤΑ (y)

D_{LF} μέσο βάθος χώρου εναπόθεσης (m)

F_h κλάσμα όγκου απορριμμάτων στο χώρο εναπόθεσης τη στιγμή περάτωσης (κλεισίματος) (m^3/m^3 , αδιάστατο)

ρ_{hw} πυκνότητα απορριμμάτων (g/cm^3)

K_w λόγος συγκέντρωσης απορριμμάτων προς συγκέντρωση στραγγισμάτων (L/kg)

I ετήσια τοπική ταχύτητα διήθησης (m/y)

Επιφανειακοί σωροί απορριμμάτων

$$C_L = \frac{C_w}{K_w + \frac{\theta_w}{\rho_{hw}}} \quad (3.39)$$

C_L συγκέντρωση στραγγισμάτων (mg/L)

C_w συνολική συγκέντρωση συστατικού στα απορρίμματα (mg/kg)

K_w συντελεστής κατανομής ρύπου σε απορρίμματα και στραγγίσματα (cm^3/g)

θ_w περιεχόμενο κατ' όγκο νερό στα απορρίμματα (αδιάστατο)

ρ_{hw} πυκνότητα απορριμμάτων (g/cm^3)

Σταθερή C_L από επιφανειακό σωρό για καθορισμένη περίοδο στράγγισης



$$M_{LWP} = t_p \times I \times A_w \times C_L \times 1000 \quad (3.40)$$

M_{LWP} συνολική μάζα συστατικού που στραγγίζεται από τα απορρίμματα (mg)

C_L συγκέντρωση στραγγισμάτων (mg/L)

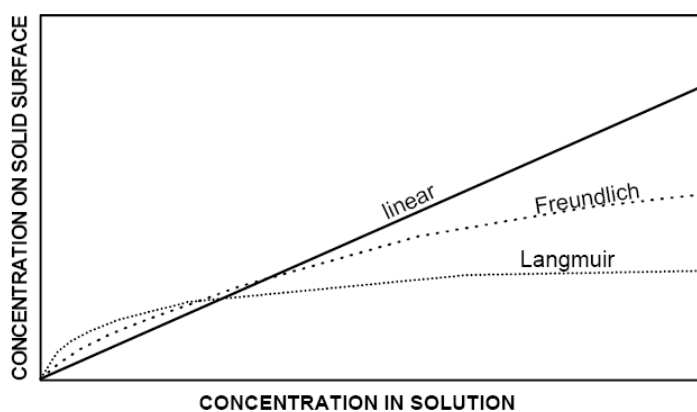
I τοπική ταχύτητα διήθησης (m/y)

A_w επιφάνεια χώρου εναπόθεσης (m²)

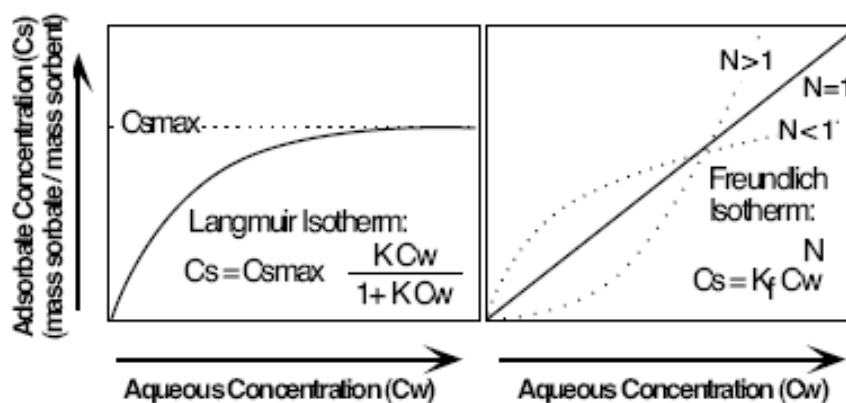
t_p περίοδος στράγγισης (y)

Βλέπε 3.29–3.33

[43]



Σχήμα 3.6. Ισοθερμικό διάγραμμα ισορροπίας συγκέντρωσης ροφημένου συστατικού στη στερεή φάση και συγκέντρωσης στο διάλυμα α) γραμμικό β) κατά Freundlich και γ) κατά Langmuir [11]



Σχήμα 3.7. Ισοθερμική προσρόφηση κατά Langmuir και Freundlich [39]

Γραμμική ισοθερμική

$$K_d = \frac{C_s}{C_w} \quad (3.41)$$



K_d συντελεστής κατανομής ρύπου σε έδαφος και νερό

C_s συγκέντρωση συστατικού (ροφημένου) στη στερεή φάση (mg/kg)

C_w συγκέντρωση συστατικού (διαλυμένου) στο νερό (mg/L)

Ισοθερμική Langmuir

$$C_s = C_{smax} \frac{KC_w}{1+KC_w} \quad (3.42)$$

Ισοθερμική Freundlich

$$C_s = K_f C_w^N \quad (3.43)$$

Όταν $N = 1$ ταυτίζεται με τη γραμμική ισόθερμη

[39]

Παράγοντας καθυστέρησης για σταθερή θερμοκρασία

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\phi} \frac{\partial C_s}{\partial C_w} \quad (3.44)$$

$$\rho_b = (1 - \phi)\rho_s$$

ϕ ενεργό πορώδες

Παράγοντας καθυστέρησης σύμφωνα με την ισοθερμική Freundlich (3.42). Μη γραμμική συνάρτηση της συγκέντρωσης

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\phi} K_f N C^{N-1} \quad (3.45)$$

Για $N = 1$, δηλ γραμμική ισόθερμη προσρόφηση ο παράγοντας καθυστέρησης γίνεται ίσος με το συντελεστή Q

$$Q = R = 1 + \frac{K_d \rho_b}{\phi_e} \quad (3.46)$$

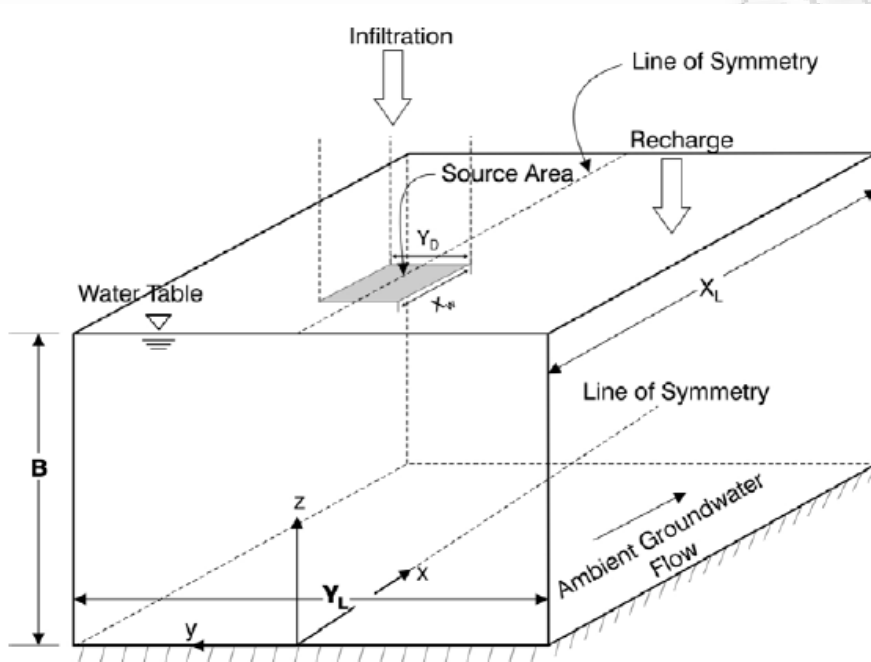
$Q = 1 + \frac{\rho_b}{\phi} \frac{C_s}{C_w}$ συντελεστής της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης 3.11

[40]



Μοντέλο κορεσμένης υπόγειας ροής

- Ομοιογενές υδροφόρο στρώμα
- Μόνιμη ροή
- Ροή μιας φάσης, ισόθερμη και με ισχύ του Νόμου Darcy
- Το υγρό είναι ομοιογενές και ελαφρά συμπιεστό



Σχήμα 3.9. Σύστημα κορεσμένης τρισδιάστατης υπόγειας ροής [40,43,44]

Πίνακας 3.1. Ενεργό πορώδες/ολικό πορώδες σε συνάρτηση της διαμέτρου σωματιδίων στερεού [43,44]

Mean Particle Diameter (cm)	Range of Ratio ϕ_e/ϕ
$\leq 6.25 \times 10^{-3}$	0.03 to 0.77
6.25×10^{-3} to 2.5×10^{-2}	0.04 to 0.87
2.5×10^{-2} to 5.0×10^{-2}	0.31 to 0.91
5.0×10^{-2} to 1.0×10^{-1}	0.58 to 0.94
$> 1.0 \times 10^{-1}$	0.52 to 0.95

$$\rho_b = 2,65(1 - \phi) \quad (3.47)$$

ρ_b φαινόμενο ειδικό βάρος (bulk density) εδάφους (g/cm^3)

$\rho_p = 2,65\text{g}/\text{cm}^3$ πυκνότητα σωματιδίων στερεού υλικού

ϕ ολικό πορώδες (αδιάστατο)



Εξίσωση Kozeny-Carman (1979)

$$K = \frac{\rho g}{\mu} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \frac{d^2}{1.8} \quad (3.48)$$

K υδραυλική αγωγιμότητα (cm/s)

$\rho = 1000$ πυκνότητα νερού (kg/m³)

g επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s²)

μ δυναμικό ιξώδες νερού (N·s/m²)

d μέση διάμετρος σωματιδίων (m)

ϕ ολικό πορώδες

Ταχύτητα Darcy κατά x

$$V_x = \frac{K_x}{\phi_e} r \quad (3.49)$$

K_x υδραυλική αγωγιμότητα κατά τον x άξονα (m/y)

ϕ_e ενεργό πορώδες (αδιάστατο)

r τοπική υδραυλική βαθμίδα (αδιάστατο)

Εξίσωση συνέχειας τριών διαστάσεων για μόνιμη ροή και οριακές συνθήκες

$$K_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \quad (3.50)$$

$$H(0, y, z) = H_1$$

$$H(x_L, y, z) = H_2$$

$$-K_z \frac{\partial H}{\partial z}(x, y, B) = \begin{cases} I & x_u \leq x \leq x_d, -y_D/2 \leq y \leq y_D/2 \\ I_r & \text{αλλού} \end{cases}$$

$$\frac{\partial H}{\partial y}(x, 0, z) = 0$$

$$\frac{\partial H}{\partial y}(x, \pm y_L/2, z) = 0$$

$$\frac{\partial H}{\partial z}(x, y, 0) = 0$$

H υδραυλικό ύψος (m)

$H(0, y, z)$ υδραυλικό ύψος σε $x = 0$ (m)

$H(x_L, y, z)$ υδραυλικό ύψος σε $x = x_L$ (m)

x_L μήκος υδροφόρου συστήματος κατά x (m)

B πάχος (ύψος) κορεσμένου συστήματος (m)

I ρυθμός διήθησης στη διαπερατή περιοχή συστήματος (m/y)



x_u ανάντη κατά x συντεταγμένη διαπερατής περιοχής (m)

x_d κατάντη κατά x συντεταγμένη διαπερατής περιοχής (m)

y_D πλάτος διαπερατής περιοχής κατά y (m)

I_r ρυθμός επαναφόρτισης έξω από τη διαπερατή περιοχή του συστήματος (m/y)

Δισδιάστατη (x, z) εξίσωση συνέχειας που επιλύεται σε μονοδιάστατη με τη βοήθεια του μέσου ενεργού ρυθμού διήθησης

$$K_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + K_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \quad (3.51)$$

Ανάντη όριο κατά τον άξονα x $H(0, z) = H_1$

Κατάντη όριο κατά τον άξονα x $H(x_L, z) = H_2$

Άνω όριο (κατά τον άξονα z) $-K_z \frac{\partial H}{\partial z}(x, B) = \begin{cases} I_{EFF} & x_u \leq x \leq x_d \\ I_r & \text{αλλού} \end{cases}$

Κάτω όριο (κατά τον άξονα z) $-K_z \frac{\partial H}{\partial z}(x, 0) = 0$

$H(0, z)$ υδραυλικό ύψος σε $x = 0$ (m)

$H(x_L, z)$ υδραυλικό ύψος σε $x = x_L$ (m)

I_{EFF} ενεργός ρυθμός διήθησης από διαπερατή περιοχή συστήματος (m/y)

I_r ενεργός ρυθμός επαναφόρτισης έξω από τη διαπερατή περιοχή του συστήματος (m/y)

Μέση κατά πλάτος y ταχύτητα διήθησης νερού στη διαπερατή περιοχή

I ταχύτητα διήθησης μέσα από την παραλληλόγραμμη περιοχή (m/y)

$$I_{EFF} = \frac{I y_D + I_r (y_L - y_D)}{y_L} \quad (3.52)$$

I_r ταχύτητα επαναφόρτισης έξω από την παραλ/μη περιοχή (m/y)

y_D πλάτος διαπερατής περιοχής κατά τον y (m)

y_L πλάτος κορεσμένου υδροφόρου συστήματος κατά y (m)

Μονοδιάστατη μορφή της δισδιάστατης κατά την υπόθεση Dupuit-Forchheimer

$$-K_x B \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = I_{EFF} \quad (3.53)$$

Λύση της 3.53 για $0 \leq x \leq x_u$

$$H(x) = \frac{-I_r}{2K_x B} x^2 + \left[\frac{I_r - I}{2K_x B} \left(\frac{x_d^2 - x_u^2}{x_L} \right) + \frac{I_r - I_{EFF}}{K_x B} (x_u - x_d) + \frac{I_r}{2K_x B} x_L + \frac{H_2 - H_1}{x_L} \right] x + H_1 \quad (3.54)$$



Λύση της 3.53 για $x \leq x_d$

$$H(x) = \frac{-I_{EFF}}{2K_x B} x^2 + \left[\frac{I_r - I}{2K_x B} \left(\frac{x_d^2 - x_u^2}{x_L} \right) - \frac{I_r - I_{EFF}}{K_x B} x_d + \frac{I_r}{2K_x B} x_L + \frac{H_2 - H_1}{x_L} \right] x + \frac{I_r - I_{EFF}}{2K_x B} x_u^2 + H_1 \quad (3.55)$$

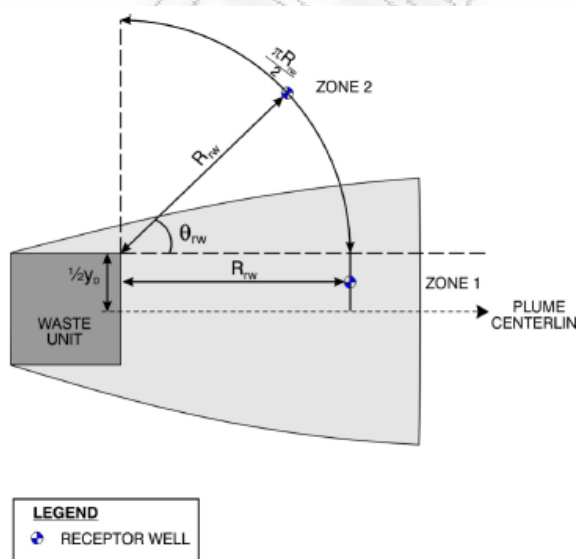
Λύση της 3.53 για $x_d \leq x \leq x_L$

$$H(x) = \frac{-I_r}{2K_x B} x^2 + \left[\frac{I_r - I_{EFF}}{2K_x B} \left(\frac{x_d^2 - x_u^2}{x_L} \right) + \frac{I_r}{2K_x B} x_L + \frac{H_2 - H_1}{x_L} \right] x - \frac{I_r - I_{EFF}}{2K_x B} (x_d^2 - x_u^2) + H_1 \quad (3.56)$$

Μεταφορά-διάχυση στην κορεσμένη ζώνη

Παραδοχές

- Μόνιμη ροή μιας φάσης
- Ομοιογενές υδροφόρο στρώμα και αρχικά καθαρό από το συστατικό
- Προσρόφηση στη στερεή φάση σύμφωνα με την Freundlich ισόθερμη ισοροπία
- Η χημική και/ή βιοχημική αποδόμηση του συστατικού μπορεί να θεωρηθεί πρώτης τάξης
- Το συστατικό είναι διαλυμένο και παρόν μόνο στο διάλυμα ή προσροφημένο στο έδαφος
- Η υδροδυναμική διάχυση μπορεί να θεωρηθεί ότι ακολουθεί το νόμο του Fick
- Η κορεσμένη ζώνη έχει σταθερά και ομοιόμορφα γεωχημικά χαρακτηριστικά



Σχήμα 3.10. Πιθανές θέσεις αποδέκτη-πηγάδι στη ζώνη 1 και 2 [43]



$$x_{rw} = R_{rw} \cos \theta_{rw} \quad (3.57)$$

x_{rw} απόσταση από την πηγή (m)

R_{rw} ακτινική απόσταση αποδέκτη από το κέντρο της κατάντη πλευράς της πηγής (m)

θ_{rw} γωνία αντίθετα από τους δείκτες του ρολογιού από τον άξονα του πλουμίου (degrees)

$$y_{rw} = R_{rw} \sin \theta_{rw} \quad (3.58)$$

y_{rw} κάθετη απόσταση από τον άξονα του πλουμίου (m)

Μέγιστο πλάτος πλουμίου ρύπανσης

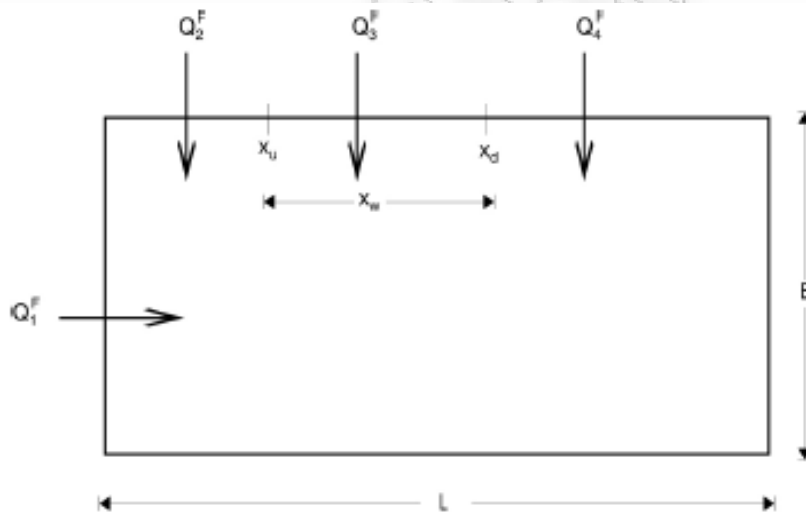
$$y_{max} = \frac{1}{2} y_D + 3[2a_T(x_w + x_{rw})]^{1/2} \quad (3.59)$$

y_D πλάτος πηγής (m)

a_T οριζόντια εγκάρσια διαπερατότητα (m)

x_w μήκος πηγής (m)

x_{rw} απόσταση από την πηγή (m)



Σχήμα 3.11. Εγκάρσια τομή υδροφόρου στρώματος [43]

Μέγιστο βάθος πλουμίου ρύπανσης στη κορεσμένη ζώνη

$$z_{rw}^* \leq z_{rwmax}^* = 2,5 \left\{ \frac{Q_{3,F} + Q_{4,F}}{Q_{1,F}} B + \left[a_v(x_w + x_{rw}) + a_L \left(\frac{Q_{3,F} + Q_{4,F}}{Q_{1,F}} B \right) + \phi_e D^{s*} \right]^{1/2} \right\} \quad (3.60)$$



z_{rw}^* κατακόρυφη συντεταγμένη από τη στάθμη υπόγειου νερού και θετικό πρόσημο προς τα κάτω μέσα στο κορεσμένο υδροφόρο στρώμα

$Q_{1,F} - Q_{4,F}$ ροές στο υπόγειο κορεσμένο σύστημα (m^2/y)

B πάχος κορεσμένης ζώνης (m)

x_w μήκος πηγής (m)

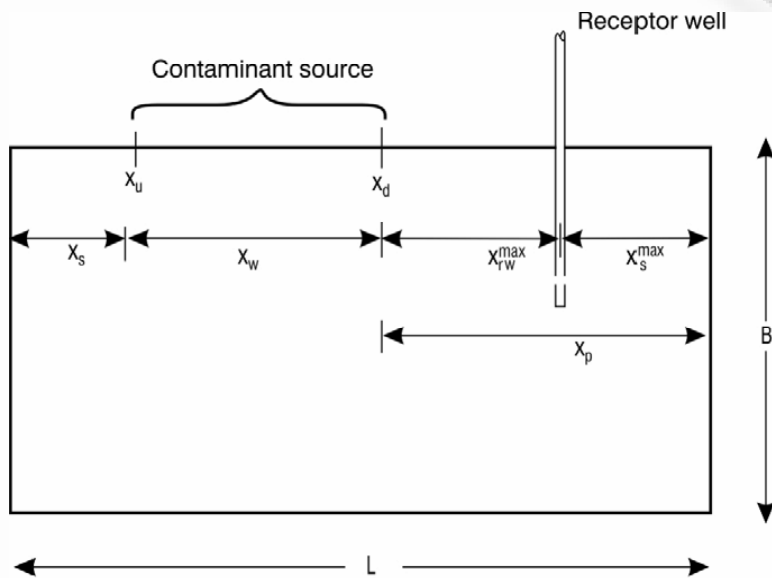
x_{rw} απόσταση από την πηγή (m)

a_v κατακόρυφη διαπερατότητα (m)

a_L διαμήκης διαπερατότητα (m)

D^{s*} συντελεστής ενεργής μοριακής διάχυσης στο υδροφόρο στρώμα (m^2/y)

ϕ_e ενεργό πορώδες (αδιάστατο)



Σχήμα 3.12. Εγκάρσια τομή υδροφόρου για τον καθορισμό της διάστασης κατά x του συστήματος

Αν $Q_r \leq 0,02$ εφαρμόζεται η αναλυτική λύση του μοντέλου μεταφοράς ενώ αν είναι $Q_r > 0,02$ εφαρμόζεται η αριθμητική λύση.

$$Q_{r,F} = \frac{Q_{2,F} \frac{x_u}{L} + Q_{3,F} \frac{x_d - x_u}{L} + Q_{4,F} \frac{L - x_d}{L}}{Q_{1,F}} \quad (3.61)$$

L συνολικό μήκος μοντέλου στη x διεύθυνση

x_u ανάντη συντεταγμένη πηγής

x_d κατάντη συντεταγμένη πηγής

$Q_{2,F}$ επαναφόρτιση ανάντη της πηγής (m^2/y)

$Q_{3,F}$ ροή διήθησης μέσα από την πηγή (m^2/y)



$Q_{4,F}$ επαναφόρτιση κατάντη της πηγής (m^2/y)

$Q_{1,F}$ υπόγεια ροή (m^2/y)

Συντελεστές τυρβώδους διάχυσης στη περίπτωση μονοδιάστατης (κατά x) υπόγειας ροής

$$D_{xx} = a_L \bar{V}_x + \phi_e D_{l,s*}$$

$$D_{yy} = a_T \bar{V}_x + \phi_e D_{l,s*}$$

$$D_{zz} = a_V \bar{V}_x + \phi_e D_{l,s*} \quad (3.62)$$

a_L διαμήκης διαπερατότητα (m)

a_T εγκάρσια διαπερατότητα (m)

a_V κατακόρυφη διαπερατότητα (m)

ϕ_e ενεργό πορώδες (αδιάστατο)

$D_{l,s*}$ συντελεστής ενεργής μοριακής διάχυσης (m^2/y)

$$t' = \frac{d_c}{\bar{V}_x} \quad (3.63)$$

d_c κατάντη απόσταση από την ανάντη συντεταγμένη της πηγής x_u έως τη κατάντη συντεταγμένη x_c

t' χρόνος διαδρομής από x_u σε x_c (y)

\bar{V}_x μέση ταχύτητα Darcy κατά x (m/y)

Μονοδιάστατη ροή κατά x και μονοδιάστατη εγκάρσια διασπορά. Ενδείκνυται για παχιά υδροφόρα στρώματα

$$D_{yy} \frac{\partial^2 C_\ell}{\partial y^2} = R_{\ell,s} \frac{\partial C_\ell}{\partial t'} \quad (3.64)$$

t' χρόνος διαδρομής από x_u σε x_c (y)

D_{yy} συντελεστής οριζόντιας εγκάρσιας διασποράς (m^2/y)

C_ℓ συγκέντρωση ρύπου ℓ (mg/L)

$R_{\ell,s}$ παράγοντας καθυστέρησης κορεσμένης ζώνης του ρύπου ℓ (αδιάστατος)

$$D_{yy} = a_T \bar{V}_x + \phi_e D_{l,s*} \quad (3.65)$$

$D_{l,s*}$ συντελεστής αποτελεσματικής μοριακής διάχυσης (m^2/y)

ϕ_e ενεργό πορώδες (αδιάστατο)



a_T οριζόντια εγκάρσια διασπορά (m)

Τρισδιάστατη λύση που προκύπτει από πολλαπλασιασμό λύσεων για δισδιάστατη και μονοδιάστατη διάχυση σε μονοδιάστατη υπόγεια ροή

$$C_\ell(x, y, z, t) = C_\ell(x, z, t) \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left\{ \frac{y-y_o}{2 \left(\frac{D_y y t'}{R_{\ell, s}} \right)^{1/2}} \right\} - \operatorname{erfc} \left\{ \frac{y+y_o}{2 \left(\frac{D_y y t'}{R_{\ell, s}} \right)^{1/2}} \right\} \right] \quad (3.66)$$

$C_\ell(x, y, z, t)$ συγκέντρωση συστατικού ℓ στο νερό σε x, y, z, t (mg/L)

$C_\ell(x, z, t)$ συγκέντρωση συστατικού ℓ στο νερό σε x, z, t πάνω σε κατακόρυφο επίπεδο στο $y=0$ (mg/L)

$y_o = \frac{1}{2} y_D$ μισό πλάτος πηγής

Εκτίμηση του βάθους πλουμίου B' σε συνδυασμό με δισδιάστατη οριζόντια μεταφορά/ροή. Ενδείκνυται για λεπτά υδροφόρα στρώματα.

$$B' = \delta_{ad} \left\{ \frac{Q_{3,F} + Q_{4,F}}{Q_{1,F}} B + \left[a_v (x_w + x_{rw}) + a_L \left(\frac{Q_{3,F} + Q_{4,F}}{Q_{1,F}} B \right) \right]^{1/2} \right\} \quad (3.67)$$

δ_{ad} παράγοντας εμπειρικής προσαρμογής (αδιάστατος)

B πάχος υδροφόρου στρώματος (m)

Ψευδο-τρειςδιάστατη διάχυση

Παραδοχές

- Ομοιόμορφη ταχύτητα Darcy κατά x
- Μονοδιάστατη υπόγεια ροή κατά x
- Ο ρύπος μπαίνει στην επιφάνεια της κορεσμένης ζώνης θεωρώντας αυτόματη κατακόρυφη μεταφορά μέσα από την ακόρεστη ζώνη
- Η έκταση της ισοδύναμης πηγής στην επιφάνεια κορεσμένης ζώνης προκύπτει από ισοζύγιο μάζας

$$\phi_e R_{\ell, s} \frac{\partial C_\ell}{\partial t} + \bar{V}_x \frac{\partial C_\ell}{\partial x} - D_{xx} \frac{\partial^2 C_\ell}{\partial x^2} - D_{yy} \frac{\partial^2 C_\ell}{\partial y^2} - D_{zz} \frac{\partial^2 C_\ell}{\partial z^2} + \lambda_{\ell, s} C_\ell \phi_e Q_\ell - \sum_{m=1}^M \lambda_{m, s} C_m \phi_e Q_m \xi_{\ell m} = 0$$

(3.68)

ℓ δείκτης συστατικού στο νερό



m δείκτης πατρικού συστατικού του συστατικού ℓ

M αριθμός συστατικών που παράγουν το ℓ

\bar{V}_x μέση ταχύτητα Darcy κατά x

$\lambda_{m,s}$ σταθερά αποδόμησης του συστατικού m (1/y)

$\lambda_{\ell,s}$ σταθερά αποδόμησης του συστατικού ℓ (1/y)

Q_ℓ συντελεστής για την αποδόμηση του ροφημένου συστατικού ℓ (αδιάστατος)

Q_m συντελεστής για την αποδόμηση του ροφημένου συστατικού m (αδιάστατος)

$\xi_{\ell m}$ σταθερά που σχετίζεται με τη στοιχειομετρία της αντίδρασης του m προς ℓ

Αδιάστατος συντελεστής καθυστέρησης

$$R_{\ell,s} = 1 + \frac{(1-\phi_e)\rho_s}{\phi_e} \frac{\partial S_\ell}{\partial c_\ell} \quad (3.69)$$

ρ_s πυκνότητα στερεής φάσης (g/cm^3)

ϕ_e ενεργό πορώδες (αδιάστατο)

$$Q_\ell = 1 + \frac{(1-\phi_e)\rho_s}{\phi_e} \frac{S_\ell}{c_\ell} \quad (3.70)$$

S_ℓ συγκέντρωση συστατικού ℓ στο στερεή φάση (ροφημένη) (mg/kg)

S_m συγκέντρωση συστατικού m στο στερεή φάση (ροφημένη) (mg/kg)

$$\bar{q}_x = \frac{\int_{x_d}^x -K_x \frac{\partial H}{\partial x} dx}{x-x_d}, \quad x > x_d \quad (3.71)$$

\bar{q}_x μέση ταχύτητα Darcy στη διεύθυνση x μεταξύ κατάντη άκρου πηγής και σημείου αποδέκτη (m/y)

K_x υδραυλική αγωγιμότητα στη διεύθυνση x (m/y)

H υδραυλικό ύψος (m)

x_d κατάντη συντεταγμένη πηγής (m)

$$D_R = \int_x^{x_d + \frac{x-x_d}{2}} \frac{I_r}{\bar{q}_x} dx \quad (3.72)$$

D_R μέση σε βάθος διείδυση της επαναφόρτισης (m)

I_r ταχύτητα επαναφόρτισης έξω από την πηγή (m/y)



Διαστάσεις πηγής

$$C_\ell(x_d, y, z, t) = C_\ell^0(t)$$

$$x_u \leq x \leq \max(x_d, x_{crest})$$

$$-\frac{1}{2}y_s \leq y \leq \frac{1}{2}y_s$$

$$B - z_s - D_R \leq z \leq B - D_R \quad (3.73)$$

B πάχος υδροφόρου στρώματος

x_d κατάντη συντεταγμένη πηγής

y_s ισοδύναμο πλάτος πηγής στο κατάντη άκρο της

D_R μέση διείσδυση σε βάθος λόγω της επαναφόρτισης μεταξύ κατάντη άκρου πηγής και αποδέκτη

Προσέγγιση κατακόρυφης διάστασης πηγής (ισοδύναμου ύψους πηγής)

α_v κατακόρυφη εγκάρσια διαπερατότητα (m)

$$z_s = \sqrt{2\alpha_v f(x_d - x_u)} + B \left[1 - \exp\left(\frac{-f(x_d - x_u)I}{B\bar{q}_x}\right) \right] \quad (3.74)$$

f ποσοστό της πηγής που μεταναστεύει κατάντη λόγω ύπαρξης κορυφής στο επίπεδο (στάθμη) υπογείου ύδατος μέσα στην περιοχή της πηγής (αδιάστατο)

I ταχύτητα διήθησης (m/y)

B πάχος υδροφόρου στρώματος (m)

x_d κατάντη συντεταγμένη πηγής (m)

x_u ανάντη συντεταγμένη πηγής (m)

\bar{q}_x μέση ταχύτητα Darcy κατά x (m/y)

Σημείο μεγιστοποίησης στη στάθμη υπόγειου ύδατος (από μηδενισμό διαφορικού της III.74 ως προς x)

$$x_{crest} = \frac{K_x B}{I} \left[\frac{I_r - I}{2K_x B} \left(\frac{x_d^2 - x_u^2}{x_L} \right) - \frac{I_r - I}{K_x B} x_d + \frac{I_r}{2K_x B} x_L + \frac{H_2 - H_1}{x_L} \right] \quad (3.75)$$

x_{crest} συντεταγμένη της κορυφής της στάθμης υπόγειου ύδατος (m)

I_r ταχύτητα επαναφόρτισης (m/y)

I ταχύτητα διήθησης (m/y)

x_L συντεταγμένη κατάντη άκρου συστήματος (m)

H_2 υδραυλικό ύψος κατάντη άκρου συστήματος (m)

H_1 υδραυλικό ύψος ανάντη άκρου συστήματος (m)



Κλάσμα πηγής (κατάντη) δεδομένου ότι η κορυφή της στάθμης υπόγειου νερού είναι μέσα στην έκταση της πηγής

$$f = \frac{x_d - x_{crest}}{x_d - x_u} \quad (3.76)$$

$0 \leq f \leq 1$ μέσα στη πηγή

$f < 0 \Rightarrow$ η κορυφή λαμβάνει χώρα σε $x > x_d$ και όλη η μάζα του ρύπου μεταφέρεται ανάντη και η συγκέντρωση στον αποδέκτη είναι 0

$f > 1 \Rightarrow$ η κορυφή λαμβάνει χώρα σε $x < x_u$ και όλη η μάζα του ρύπου μεταφέρεται κατάντη, η πηγή δε επιμερίζεται και θέτουμε $f = 1$

Αν $x_u \leq x_{crest} \leq x_d$ η θέση απελευθέρωσης είναι $(x_{crest}, \frac{1}{2}y_D)$

Αν $x_{crest} < x_u$ η θέση απελευθέρωσης είναι $(x_u, \frac{1}{2}y_D)$

Ισοζύγιο μάζας

$$C_{k,o}(t)Ifx_w y_D = C_{k,s}(t)\bar{V}_x z_s y_s \quad (3.77)$$

$C_{k,o}(t)$ συγκέντρωση είδους k στο νερό μέσα στη πηγή (mg/L)

$C_{k,s}(t)$ ισοδύναμη συγκέντρωση στο νερό είδους k στο κατακόρυφο επίπεδο στο κατάντη άκρο της πηγής (mg/L)

x_w μήκος πηγής

f κλάσμα πηγής όταν υπάρχει κορύφωση στάθμης υπόγειου νερού μέσα στα όρια της πηγής (αδιάστατο)

y_D πλάτος πηγής

z_s ισοδύναμο ύψος πηγής

y_s ισοδύναμο πλάτος πηγής στο κατάντη άκρο της (υπολογίζεται αρχικά από μοντέλο μεταφοράς που εφαρμόζεται από το x_u)

$$\frac{C_{k,s}(t)}{C_{k,o}(t)} = \frac{Ifx_w y_D}{\bar{V}_x z_s y_s} = F_c \quad (3.78)$$

F_c αναλογία συγκέντρωσης (αδιάστατο)

$$\text{Αν } z_s + D_R > B \quad z_{s,new} = B - D_R \quad (3.79)$$

$$\text{Αν } z_s + D_R > B \quad y_{s,new} = \frac{y_s z_s}{z_{s,new}} \quad (3.80)$$



Μετασχηματισμός των συντεταγμένων για απλοποίηση των εξισώσεων

$$x' = x - x_d$$

$$y' = y$$

$$z' = B - z - \frac{z_s}{2} - D_R \quad (3.81)$$

$$\bar{V}_x \frac{\partial Y_\ell}{\partial x'} - D_{yy} \frac{\partial^2 Y_\ell}{\partial y'^2} = 0 \quad (3.82)$$

X_ℓ συστατικό της λύσης κατά x για το είδος ℓ

Y_ℓ συστατικό της λύσης κατά y για το είδος ℓ

Z_ℓ συστατικό της λύσης κατά z για το είδος ℓ

Λύση της 3.82

$$Y_\ell = \frac{1}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{0,5y_s - y'}{2\sqrt{D_{yy}\bar{V}_x}} + \operatorname{erf} \frac{0,5y_s + y'}{2\sqrt{D_{yy}\bar{V}_x}} \right) \quad (3.83)$$

$$\bar{V}_x \frac{\partial Z'_\ell}{\partial x'} - D_{zz} \frac{\partial^2 Z'_\ell}{\partial z'^2} = 0 \quad (3.84)$$

Λύση για 3.84

$$Z_\ell = \frac{1}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{0,5z_s - z'}{2\sqrt{D_{zz}\bar{V}_x}} + \operatorname{erf} \frac{0,5z_s + z'}{2\sqrt{D_{zz}\bar{V}_x}} \right) \quad (3.85)$$

$$Z_\ell(x', z'_{rw}) = Z'_\ell(x', z'_{rw}) + Z'_\ell(x', z'_1) + Z'_\ell(x', z'_2) \quad (3.86)$$

Z_ℓ συστατικό της λύσης κατά z για το είδος ℓ

x' μετασχηματισμένη συντεταγμένη

z'_{rw} μετασχηματισμένο βάθος πηγαδιού αποδέκτη

Z'_ℓ συστατικό της εικόνας του Z_ℓ

z'_1 μετασχηματισμένο βάθος πηγαδιού στην εικόνα 1

z'_2 μετασχηματισμένο βάθος πηγαδιού στην εικόνα 2



$$z_{rw}' = z_{rw}^* - \frac{z_s}{2} - D_R \quad (3.87)$$

z_s ισοδύναμο ύψος πηγής στο κατάντη άκρο της

D_R μέσο βάθος διείσδυσης λόγω επαναφόρτισης από το κατάντη άκρο της πηγής

$$z_1' = 2B - \frac{z_s}{2} - D_R - z_{rw}^* \quad (3.88)$$

B πάχος υδροφόρου στρώματος

$$z_2' = z_{rw}^* + \frac{z_s}{2} + D_R \quad (3.89)$$

Συντελεστές τυρβώδους διάχυσης (διασποράς) κορεσμένης ζώνης

$$D_{xx} = a_L \bar{q}_x$$

$$D_{yy} = a_T \bar{q}_x$$

$$D_{zz} = a_V \bar{q}_x \quad (3.90)$$

Ροή μάζας από υπόγειο σε επιφανειακό νερό

$$M_{flux} = i \cdot K_H \cdot C_{net} \quad (3.91)$$

M_{flux} συνολική ροή μάζας ρύπου (mg/year)

K_H υδραυλική αγωγιμότητα (m/year)

i υδραυλική βαθμίδα

C_{net} καθαρή μάζα ρύπου εγκάρσιας τομής πλουμίου, κάθετα στην υπόγεια ροή (mg/meter)

Η συγκέντρωση σε συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης από τον άξονα του πλουμίου. Άλλη διατύπωση της 3.66

$$C(y) = \frac{C_{z0}}{2} \left[erf \left\{ \frac{y+y_s}{2\sqrt{a_T x}} \right\} - erf \left\{ \frac{y-y_s}{2\sqrt{a_T x}} \right\} \right] \quad (3.92)$$

C_{z0} κατακόρυφα ολοκληρωμένη συγκέντρωση στο κέντρο του πλουμίου (mg·m/L)

y_s πλάτος πηγής (m)

a_T εγκάρσια διαπερατότητα (m)

x κατάντη απόσταση από τη πηγή (m)



Αριθμητική ολοκλήρωση της 3.92 από τον άξονα έως το όριο/άκρη του πλουμίου

$$C_{net} = 1000C_{zo} \int_{y=0}^{y_{plume}} \left[erf\left(\frac{y+y_s}{2\sqrt{a_T x}}\right) - erf\left(\frac{y-y_s}{2\sqrt{a_T x}}\right) \right] dy \quad (3.93)$$

Πλάτος πλουμίου

$$y_{plume} = \frac{y_s}{2} + 3\sqrt{a_T x} \quad (3.94)$$

[43,40]

Ανάντη διείσδυση πλουμίου από ανάντη όριο πηγής μεγάλης ταχύτητας διήθησης (μέσο πηγής), σα να ήταν σημειακή πηγή στο κατάντη όριό της x_d , όταν υπάρχει ανάντη (του x_d) σημείο στασιμότητας.

$$x'' = -\frac{Q'}{2\pi q_0}, \quad y = 0 \quad (3.95)$$

$$x'' = x - \frac{1}{2}(x_d + x_u) \quad (3.96)$$

$$q_0 = -K_x \frac{H_2 - H_1}{x_L} \quad (3.97)$$

x_L μήκος συστήματος (m)

$$Q' = I(x_d - x_u) y_D \frac{1}{B} \quad (3.98)$$

Όταν ισχύουν τα παρακάτω λαμβάνεται υπόψη η ανάντη διείσδυση του πλουμίου

$$-\frac{Q'}{2\pi q_0} \leq -(x_d - x_u) \quad (3.99)$$

$$y_{st} \geq \frac{1}{4}(y_s(x_d) + y_D)$$

y_{st} συντεταγμένη διαχωρισμού ρεύματος στη y διεύθυνση

$y_s(x_d)$ ισοδύναμο πλάτος πηγής στο x_d

Συγκέντρωση συστατικού k στο $x = x_d$ σε χρόνο t

$$C_k(x, y, z, t) = C_k^s(t) \quad (3.100)$$

C_k^s συγκέντρωση συστατικού k στη στερεή φάση (αδιάλυτο) σε χρόνο t



Ανάντη του x_d θέσεις αποδέκτη χωρίς ανάντη σημείο στασιμότητας

$$x_u \leq x \leq x_d$$

$$-\frac{1}{2}y_s(x) \leq y \leq \frac{1}{2}y_s(x) \quad (3.101)$$

Ανάντη του x_d θέσεις αποδέκτη με σημείο στασιμότητας, όπου ισχύει η 3.99

$$\frac{1}{2}(x_d + x_u) - \frac{q'}{2\pi q_0} \leq x \leq x_d$$

$$-|y_{st}| \leq y \leq |y_{st}|$$

$$0 \leq z \leq z_s(x_d) \quad (3.102)$$

Κατάντη του x_d έκταση πλουμίου, με σημείο στασιμότητας

$$x'' \geq \frac{1}{2}(x_d - x_u)$$

$$|y| \leq |y_{st}| + 3\sqrt{a_T x}$$

$$x_T = x - \frac{1}{2}(x_d + x_u) + \frac{q'}{2\pi q_0} \quad (3.103)$$

[40]



ΚΕΦΑΛΙΑΙΟ 4. ΔΟΜΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

- Μοντέλο ποιότητας υπόγειου νερού: εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης (γενική μορφή 3.11)



- Υπομοντέλο υπόγειας ροής (μακρινής περιοχής):
 - ❖ εξίσωση ορμής ή νόμος Darcy (γενική μορφή 3.3)
 - ❖ εξίσωση συνέχειας υπόγειου νερού (γενική μορφή 3.4)
 - ❖ η εξίσωση ενέργειας δε συμπεριλαμβάνεται στο Κεφάλαιο 3

Επιπλέον στο Κεφάλαιο 3 συμπεριλαμβάνεται:

- ❖ συνδυασμός των εξισώσεων ορμής και συνέχειας (γενική μορφή 3.5)

Χαρακτηριστικά που επιδρούν άμεσα στο υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής ή/και έμμεσα στο μοντέλο ποιότητας υπόγειου νερού:

- Είδος ροής υπόγειου νερού
 - Κορεσμένη ροή. Κριτήριο: η ροή που υφίσταται σε βάθος μέσα στο έδαφος, κάτω από τη λεγόμενη πιεζομετρική γραμμή ή στάθμη υπόγειου νερού
 - Ασυμπίεστη ροή. Κριτήριο: $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, όπου ρ πυκνότητα νερού και t χρόνος
Οι εξισώσεις του υπομοντέλου ροής και η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης υπόγειου νερού αφορούν ασυμπίεστη ροή
 - Στρωτή ροή. Κριτήριο: $1 < Re < 10$, όπου ο αριθμός Reynolds Re υπολογίζεται από την εξίσωση 3.2
Η στρωτή ροή είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την ισχύ του Νόμου Darcy του υπομοντέλου ροής υπόγειου νερού (γενική μορφή 3.3)
 - Μόνιμη ροή. Κριτήριο: $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$, όπου u ταχύτητα νερού και t χρόνος
Οι εξισώσεις του υπομοντέλου ροής υπόγειου νερού αφορούν μόνιμη ροή. Στην εξίσωση συνέχειας μόνιμης ροής 3.4 και 3.5 έχει γίνει η αντικατάσταση $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$, όπου h το ύψος του συστήματος



Στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης (μονίμων συνθηκών) γίνεται η αντικατάσταση $\frac{\partial c}{\partial t} = 0$

- Μη ιξώδης ροή. Κριτήριο: δε λαμβάνονται υπόψη απώλειες λόγω τριβής

Δεν αναφέρεται εξίσωση ενέργειας υπομοντέλου υπόγειας ροής στο Κεφάλαιο 3

- Ομοιόμορφη ροή. Κριτήρια: μη ιξώδης ροή, σταθερής εγκάρσιας διατομής, χωρίς πλευρικές εισροές – η διήθηση μέσα από την υπερκείμενη επιφάνεια του συστήματος στο ύψος της στάθμης υπόγειου νερού ενσωματώνεται εξ' αρχής στην υπόγεια ροή (βλέπε καθαρές πλευρικές ροές παρακάτω στη δομή). Επιλέγεται σύστημα μοντέλου ποιότητας υπόγειου νερού σύμφωνα με τα κριτήρια ομοιόμορφης ροής (Σχήμα 3.9)

Στις εξισώσεις του υπομοντέλου υπόγειας ροής και στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης οι συνιστώσες ταχύτητας υπόγειου νερού είναι σταθερές ($\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial z} = 0$)

- Ροή ταχύτητας (ορμής). Κριτήριο: $Pr \gg 1$, όπου Pr ο αριθμός Prandtl υπόγειου νερού ($Pr = 7$ για νερό στρωτής ροής)

Στο υπομοντέλο ροής υπόγειου νερού δεν λαμβάνεται υπόψη μεταφορά θερμότητας (δεν αναφέρεται εξίσωση ενέργειας στο Κεφάλαιο 3)

Επίσης, στο Κεφάλαιο 3 δεν γίνεται καμία αναφορά στο είδος ροής ταχύτητας υπόγειου νερού (υποκρίσιμη ή υπερκρίσιμη ροή)

□ Διεύθυνση υπόγειας ροής

- Μονοδιάστατη μετατόπιση και μονοδιάστατη διάχυση

Η διεύθυνση μετατόπισης ταυτίζεται με την τοπογραφική κλίση του υπόγειου υδροφόρου στρώματος

Το υπομοντέλο υπόγειας ροής αποτελείται από το μονοδιάστατο νόμο Darcy (εξίσωση 3.46) και τη μονοδιάστατη εξίσωση συνέχειας σε συνδυασμό με το νόμο Darcy με αναλυτικές λύσεις τις εξισώσεις Dupuit 3.7 και 3.10 και τις εξισώσεις 3.54–3.56 κατά την υπόθεση Dupuit-Forchheimer

- Μονοδιάστατη μετατόπιση και διαμήκης διάχυση



Η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης παίρνει τη μορφή 3.20 με αναλυτική λύση την εξίσωση 3.21 ή τη μορφή 3.26 με αναλυτική λύση την εξίσωση 3.27 και χρησιμοποιείται όταν ο αποδέκτης βρίσκεται κατάντη μέσα στην προβολή της πηγής κατά τον άξονα υπόγειας ροής (x), σύμφωνα με το Σχήμα 3.10

- Μονοδιάστατη μετατόπιση και εγκάρσια διάχυση

Η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης παίρνει τη μορφή 3.82 με αναλυτική λύση την εξίσωση 3.83 και χρησιμοποιείται όταν ο αποδέκτης βρίσκεται έξω (κατά τον εγκάρσιο άξονα y) από την προβολή της πηγής κατά τον άξονα υπόγειας ροής (x), με αποστάσεις αποδέκτη από την πηγή που υπολογίζονται από τις εξισώσεις 3.57 και 3.58 σύμφωνα με το σχήμα 3.10

- Μονοδιάστατη μετατόπιση και κατακόρυφη διάχυση

Έμμεση επίδραση στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης είναι η μορφή 3.84 με αναλυτική λύση την εξίσωση 3.85 και χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με μια από τις παραπάνω εξισώσεις μεταφοράς-διάχυσης δεδομένου ότι ο αποδέκτης βρίσκεται σε βάθος στο έδαφος κάτω από το ύψος του κατάντη άκρου της πηγής

- Καθαρές πλευρικές ροές

- Η μόνη πλευρική ροή που λαμβάνεται υπόψη είναι η τοπική ταχύτητα διήθησης ή επαναφόρτιση I_r (m/y) έξω από την έκταση της πηγής στην υπερκείμενη πλευρά του συστήματος που εφάπτεται με τη στάθμη υπόγειου νερού

Η επαναφόρτιση I_r συμπεριλαμβάνεται στην εξίσωση Dupuit 3.9 και στις εξισώσεις 3.53–3.55 Dupuit-Forchheimer του υπομοντέλου ροής υπόγειου νερού

- Χαρακτηριστικά υπόγειου υδροφόρου στρώματος

- Ισοτροπικό. Κριτήριο: $K_x = K_y = K_z = K$ ή ισοδύναμα $a_L = a_T = a_V = a$ όπου K (m/s) υδραυλική αγωγιμότητα και a (m) ολοκληρωμένη κατά μια διεύθυνση εγγενής διαπερατότητα για τις τρεις διευθύνσεις

Στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης μηδενίζονται οι ενδιάμεσοι συντελεστές τυρβώδους διάχυσης $D_{xy} = D_{yx} = D_{xz} = D_{zx} = D_{yz} = D_{zy} = 0$



(εξισώσεις 3.15, 3.16 και 3.17) και εξισώνονται οι συντελεστές τυρβώδους διάχυσης κατά τις τρεις διευθύνσεις $D_{xx} = D_{yy} = D_{zz}$ (εξισώσεις 3.12, 3.13 και 3.14)

- Ομοιογενές υπόγειο υδροφόρο στρώμα. Κριτήριο: $\frac{\partial K_z}{\partial z} = \frac{\partial K_x}{\partial x} = \frac{\partial K_y}{\partial y} = 0$
ή ισοδύναμα $\frac{\partial a_V}{\partial z} = \frac{\partial a_L}{\partial x} = \frac{\partial a_T}{\partial y} = 0$

Στην εξίσωση συνέχειας σε συνδυασμό με το νόμο Darcy (3.5) οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι σταθερές

- Ισοτροπικό και ομοιογενές υπόγειο υδροφόρο στρώμα (αντίστοιχα κριτήρια)

Στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης γίνεται η αντικατάσταση $D_{xy} = D_{yx} = D_{xz} = D_{zx} = D_{yz} = D_{zy} = 0$ και οι συντελεστές τυρβώδους διάχυσης $D_{xx} = D_{yy} = D_{zz}$ είναι σταθεροί κατά τις τρεις διευθύνσεις

- Μεταβολές επιφάνειας ροής. Κριτήριο: ο διαχωρισμός της υπόγειας ροής στο σημείο (x_{crest}, y_{st}) σύμφωνα με το Σχήμα 1.9

x_{crest} η συντεταγμένη κατά τον άξονα ροής κορυφής στάθμης υπόγειου νερού που υπολογίζεται από τη σχέση 3.75, y_{st} η συντεταγμένη κατά τον εγκάρσιο άξονα y της γραμμής στασιμότητας, x_u είναι η συντεταγμένη του ανάντη άκρου (πλευράς) της πηγής και x_d είναι η συντεταγμένη του κατόντη άκρου (πλευράς) της πηγής

- Αν $x_{crest} > x_d$ όλη η μάζα του ρύπου μεταφέρεται ανάντη της πηγής με σημείο έκλυσης $(x_d, \frac{1}{2}y_D)$
- Αν $x_{crest} < x_u$ το πλούμιο αναπτύσσεται κατόντη (κανονικά) με σημείο έκλυσης $(x_u, \frac{1}{2}y_D)$
- Αν $x_u \leq x_{crest} \leq x_d$ και $y_{st} \geq \frac{1}{4}(y_s(x_d) + y_D)$, όπου $y_s(x_d)$ πλάτος πηγής στο x_d και y_D πλάτος πηγής στο x_u , με άλλα λόγια αν ο διαχωρισμός υπόγειας ροής γίνεται μέσα στην έκταση της πηγής, λαμβάνεται υπόψη ανάντη διείδυση (βλέπε παρακάτω στη δομή χαρακτηριστικά πηγής – ανάντη διείδυση)

Στο Κεφάλαιο 3 δεν αναφέρεται υπομοντέλο υπόγειας ροής κοντινής περιοχής. Εφαρμόζεται κατ' ευθείαν το μοντέλο ποιότητας υπόγειου νερού.



Χαρακτηριστικά που αφορούν το υπομοντέλο ροής κοντινής περιοχής και επιδρούν έμμεσα στο μοντέλο ποιότητας υπόγειου νερού:

□ Χαρακτηριστικά πηγής

▪ Σημείο έκλυσης

Το κανονικό σημείο έκλυσης σύμφωνα με το Σχήμα 3.10 έχει συντεταγμένες $(x_w, \frac{1}{2}y_D, B)$ (αλλάζει στη περίπτωση ανάντη διείδυσης)

- Ανάντη διείδυση. Κριτήριο 1^ο: Διαχωρισμός υπόγειας ροής μέσα στην έκταση της πηγής ($x_u \leq x_{crest} \leq x_d$ και $y_{st} \geq \frac{1}{4}(y_s(x_d) + y_D)$). Κριτήριο 2^ο: Η υπόγεια ροή ως προς τη ροή στραγγισμάτων είναι υποκρίσιμη δηλ. η ταχύτητα διήθησης στην έκταση της πηγής είναι μεγάλη δηλ. $\frac{2\pi B q_0}{I y_D} \leq 1$, όπου q_0 η μέση ταχύτητα Darcy κατά τον κύριο άξονα ροής (m/y), B πάχος υδροφόρου στρώματος, y_D πλάτος πηγής και I ταχύτητα διήθησης (m/y). Τα δυο κριτήρια πρέπει να ισχύουν μαζί για να ληφθεί υπόψη ανάντη διείδυση.

Στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης οι συντεταγμένες του σημείου έκλυσης γίνονται $(x_d, \frac{y_s}{2}, B - \frac{z_s}{2})$ όταν δε υπάρχει καθαρή επαναφόρτιση

και $(x_d, \frac{y_s}{2}, B - \frac{z_s}{2} - D_R)$ όταν υπάρχει καθαρή επαναφόρτιση I_r (m/y)

z_s ισοδύναμο ύψος πηγής στο x_d που υπολογίζεται από την 3.74, y_s ισοδύναμο πλάτος πηγής στο x_d , B πάχος συστήματος, D_R μέση σε βάθος διείδυση της επαναφόρτισης που υπολογίζεται από την 3.72

- Συνεχής (μη πεπερασμένη) πηγή. Κριτήριο: η πηγή εκλύει συνεχώς (για πάντα) ρύπο
- Σταθερή πηγή. Κριτήριο: η συγκέντρωση έκλυσης του ρύπου (C_0) είναι σταθερή



Χαρακτηριστικά που επιδρούν άμεσα στο μοντέλο ποιότητας υπόγειου νερού:

□ Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά ρύπου

- Κατανάλωση-αποικοδόμηση πρώτης τάξης. Κριτήριο: $\frac{dC}{dt} = -kC$ όπου k σταθερά αποικοδόμησης πρώτης τάξης (s^{-1}) και C η συγκέντρωση του ρύπου



Στο δεξιό σκέλος της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης μπαίνει ο όρος $-\phi_e R_{\ell,s} \lambda_{\ell,s} C_\ell$, όπου ϕ_e ενεργό πορώδες υπόγειου υδροφόρου στρώματος (αδιάστατο), $R_{\ell,s}$ αδιάστατος παράγοντας καθυστέρησης για τη ροφημένη φάση του ρύπου (γραμμική ισόθερμη ρόφηση), $\lambda_{\ell,s}$ σταθερά αποικοδόμησης (πρώτης τάξης) του ℓ (s⁻¹) και C_ℓ συγκέντρωση συστατικού ℓ (mg/L)

- Παραγωγή πρώτης τάξης. Κριτήριο: $\frac{dc}{dt} = k_m C_m$ όπου k_m σταθερά παραγωγής πρώτης τάξης (s⁻¹) και C_m συγκέντρωση του πατρικού συστατικού του ρύπου

Στο δεξιό σκέλος της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης μπαίνει ο όρος $\phi_e \sum_{m=1}^M \xi_{\ell m} R_{m,s} \lambda_{m,s} C_m$ όπου M το πλήθος πατρικών συστατικών m του ρύπου, $\xi_{\ell m}$ σταθερά αντίδρασης του m προς παραγωγή ℓ , $R_{m,s}$ αδιάστατος παράγοντας καθυστέρησης για τη ροφημένη φάση του πατρικού συστατικού (γραμμική ισόθερμη ρόφηση), ϕ_e ενεργό πορώδες του υπόγειου υδροφόρου στρώματος (αδιάστατο), $\lambda_{m,s}$ σταθερά αποικοδόμησης (πρώτης τάξης) του πατρικού συστατικού του ρύπου και C_m συγκέντρωση συστατικού m (mg/L)

- Γραμμική ισόθερμη ρόφηση. Κριτήριο: $K_d = \frac{C_s}{C_w}$, όπου K_d συντελεστής κατανομής ρύπου σε έδαφος και νερό, C_s συγκέντρωση συστατικού (ροφημένου) στη στερεή φάση (mg/kg) και C_w συγκέντρωση συστατικού (διαλυμένου) στο νερό (mg/L), σύμφωνα με το Σχήμα 3.7

Στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης συμπεριλαμβάνεται ο παράγοντας καθυστέρησης $R_{\ell,s}$ του ρύπου που υπολογίζεται από τις ισοδύναμες εξισώσεις 3.18, 3.46 και 3.69. Συγκεκριμένα ο παράγοντας καθυστέρησης $R = \phi_e R_{\ell,s}$, όπου ϕ_e το ενεργό πορώδες πολλαπλασιάζεται με τους όρους κατανάλωσης, παραγωγής και $\frac{\partial c}{\partial t}$ της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΔΟΜΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ

➤ Μοντέλο ποιότητας αέρα: εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης (γενική μορφή 1.6)



➤ Υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής:

- ❖ η εξίσωση συνέχειας αέρα δεν αναφέρεται στο Κεφάλαιο 1
- ❖ η εξίσωση ενέργειας αέρα δεν αναφέρεται στο Κεφάλαιο 1
- ❖ η εξίσωση ορμής αέρα δεν αναφέρεται στο Κεφάλαιο 1

Χαρακτηριστικά που επιδρούν άμεσα στο υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής ή/και έμμεσα στο μοντέλο ποιότητας αέρα:

□ Είδος ροής αέρα

- Ασυμπίεστη ροή. Κριτήριο: $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, όπου ρ πυκνότητα νερού και t χρόνος

Οι εξισώσεις του υπομοντέλου ροής αέρα (που δεν αναφέρονται στο Κεφάλαιο 1) και η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης αφορούν ασυμπιεστη ροή

- Μόνιμη ροή. Κριτήριο: $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$, όπου u ταχύτητα νερού και t χρόνος

Οι εξισώσεις του υπομοντέλου ροής αέρα (που δεν αναφέρονται στο Κεφάλαιο 1) αφορούν μόνιμη ροή

Στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης (μονίμων συνθηκών) γίνεται η αντικατάσταση $\frac{\partial c}{\partial t} = 0$

- Τυρβώδης ροή. Κριτήριο: $Re > 5 \cdot 10^5$, όπου Re ο αριθμός Reynolds ο οποίος υπολογίζεται από την εξίσωση 1.3

Στο υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής και στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης χρησιμοποιείται η μέση ως προς τη διακύμανση (λόγω τύρβων) ταχύτητα ροής ρευστού \bar{u} και οι συντελεστές διάχυσης της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης γίνονται συντελεστές τυρβώδους διάχυσης

- Μη Ιξώδης ροή. Κριτήριο: δε λαμβάνονται υπόψη απώλειες λόγω τριβής



Στο υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής δε λαμβάνεται υπόψη οριακό στρώμα ταχύτητας αέρα

- Ομοιόμορφη ροή. Κριτήρια: μη ιξώδης ροή, σταθερής εγκάρσιας διατομής, χωρίς πλευρικές ροές. Επιλέγεται σύστημα μοντέλου ποιότητας αέρα σύμφωνα με τα κριτήρια ομοιόμορφης ροής
Στο υπομοντέλο μακρινής περιοχής και στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης η ταχύτητα (μονοδιάστατης ροής) αέρα είναι σταθερή ($\frac{\partial u}{\partial x} = 0$)
- Μεταφορά. Κριτήριο: $Pr \cong 1$ όπου Pr ο αριθμός Prandtl του αέρα (κυμαίνεται μεταξύ 0,7–0,9) είτε για στρωτή, είτε για τυρβώδη ροή ή κριτήριο: $Ri > 1$ όπου Ri ο πυκνομετρικός αριθμός Richardson ολόκληρου του αποδέκτη που δίνεται από την εξίσωση 1.5
- Υποκρίσιμη ροή ταχύτητας. Κριτήριο ροής ταχύτητας κατά τη Monin-Obukhov θεωρία ομοιότητας (similarity theory): $Ri < 1$ όπου Ri ο πυκνομετρικός αριθμός Richardson σε διαφορετικά ύψη που δίνεται από την εξίσωση 1.5. Κριτήριο υποκρίσιμης ροής ταχύτητας: $V < V_c$ όπου $V_c = 1Mach$.
 - σε ουδέτερες και ασταθείς συνθήκες ατμόσφαιρας υφίσταται σε όλα τα ύψη ροής αέρα
 - σε συνθήκες διαστρωμάτωσης λόγω αδιαβατικής βαθμίδας θερμοκρασίας ($\frac{\partial T}{\partial z} = \text{σταθερό} < 0$) υφίσταται σε ύψη κάτω από το χαρακτηριστικό ύψος L Monin-Obukhov ή αναστροφή, που υπολογίζεται με την εξίσωση 1.1. Σε αυτή την περίπτωση η αναλυτική λύση της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης παίρνει τη μορφή 1.24, η οποία συμπεριλαμβάνει τον αδιάστατο όρο V κατακόρυφης κατανομής πλουμίου ο οποίος λαμβάνει υπόψη την αναστροφή (εξισώσεις 1.25 και 1.26)
- Ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας ή ελεύθερη ή φυσική μεταφορά. Κριτήριο κατά τη Monin-Obukhov θεωρία ομοιότητας (similarity theory): $Ri > 1$ όπου Ri ο πυκνομετρικός αριθμός Richardson σε διαφορετικά ύψη που δίνεται από την εξίσωση 1.5



- σε σταθερές συνθήκες ή θερμική διαστρωμάτωση ή αναστροφή ($\frac{\partial \rho}{\partial z} > 0$ λόγω $\frac{\partial T}{\partial z} < 0$) υφίσταται σε ύψη πάνω από το ύψος της αναστροφής που υπολογίζεται με την εξίσωση 1.1
Εξίσωση ενέργειας υπομοντέλου ροής μακρινής περιοχής δεν αναφέρεται στο Κεφάλαιο 1
- Διεύθυνση ροής
 - Μονοδιάστατη μετατόπιση και δισδιάστατη διάχυση
Η διάχυση υφίσταται στο κάθετο στη ροή επίπεδο (εγκάρσια και κατακόρυφα)
Η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης επιλύεται αναλυτικά βάσει των παραδοχών λεπτού πλουμίου του Κεφαλαίου 1 σελ. 9 με κυριότερη παραδοχή ότι η εγκάρσια και κατακόρυφη διάχυση ακολουθεί την κανονική κατανομή Gauss, με χαρακτηριστικές αναλυτικές λύσεις την 1.11 για σημειακή πηγή εδάφους και 1.12 για ανυψωμένη σημειακή πηγή
- Χαρακτηριστικά επιφάνειας ροής
 - Η τραχύτητα εκφράζεται με το λεγόμενο ύψος ανάγλυφου z_0 (m) της επιφάνειας ροής
Το ύψος ανάγλυφου επηρεάζει τη τιμή της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος της καμινάδας, μέσα από τον εκθέτη της εξίσωσης υπολογισμού της ταχύτητας αέρα 1.34 και τον Πίνακα 1.8.
Στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης υπολογίζονται οι τιμές των στατιστικών συντελεστών εγκάρσιας και κατακόρυφης διάχυσης για δυο περιπτώσεις ύψους ανάγλυφου: αγροτικό και αστικό μέσα από τις καμπύλες Pasquill-Gifford (εξισώσεις 1.16) και τους Πίνακες 1.2–1.5
- Μεταβολές επιφάνειας ροής. Κριτήριο: ο διαχωρισμός της ροής του αέρα σε τρία εκτρεπόμενα τμήματα (Σχήμα 1.9) με επαναφορά της υποκρίσιμης ροής κατάντη του εμποδίου
 - Η επίδραση μεγάλου εμποδίου (λόφου) στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης είναι ότι σε ανυψωμένο κατάντη του εμποδίου αποδέκτη φτάνει η συγκέντρωση από στάθμιση μεταξύ της συγκέντρωσης πραγματικού πλουμίου στο πραγματικό ύψος του αποδέκτη και της συγκέντρωσης στον αποδέκτη τέλεια εκτρεπόμενου πλουμίου με $z = 0$



στο ύψος διαχωρισμού της ροής του αέρα (H_c) (βλέπε Σχήμα 1.11) σύμφωνα με τη σχέση 1.63

- Η επίδραση μικρού εμποδίου (κτιρίου) στους συντελεστές κατακόρυφης και εγκάρσιας διάχυσης σ_z και σ_y αντίστοιχα ή μόνο στο συντελεστή κατακόρυφης διάχυσης σ_z του στατιστικού μοντέλου λεπτού πλουμίου από ανάντη σημειακή πηγή δεν είναι πάντα δεδομένη. Πρέπει να γίνονται οι έλεγχοι του μοντέλου Huber & Snyder σελ. 29.

Σύμφωνα με το μοντέλο Huber & Snyder οι ενισχυμένοι συντελεστές διάχυσης μακρινής υπήνεμης περιοχής (κατάντη του εμποδίου) υπολογίζονται από τις αντίστοιχες καμπύλες Pasquill-Gifford (P-G) (εξισώσεις 1.16) με την κατάντη της πηγής απόσταση προσαυξημένη κατά τις αντίστοιχες αποστάσεις για αρχικές τιμές ενισχυμένων συντελεστών διάχυσης σε κατάντη της πηγής απόσταση $0,01L$ (km), όπου $L = \min(H, W)$ (m), H ύψος κτιρίου, W προβολή πλάτους κτιρίου κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου.

Οι αρχικές τιμές ενισχυμένων συντελεστών διάχυσης υπολογίζονται από τις σχέσεις κοντινής υπήνεμης περιοχής του μοντέλου Huber & Snyder, οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με τη σχέση H και W του κτιρίου.

Οι διαφοροποιήσεις του συντελεστή κατακόρυφης διάχυσης κοντινής υπήνεμης περιοχής συνοψίζονται καλύτερα στο μοντέλο Schulman & Scire.

Κατά παρόμοιο τρόπο με το μοντέλο Huber & Snyder, στην περίπτωση που το κτίριο θεωρηθεί μια πηγή όγκου, οι ενισχυμένοι συντελεστές εγκάρσιας και κατακόρυφης διάχυσης στη μακρινή υπήνεμη περιοχή (κατάντη του κτιρίου) υπολογίζονται από τις αντίστοιχες καμπύλες Pasquill-Gifford (P-G) (εξισώσεις 1.16) με την κατάντη της πηγής απόσταση προσαυξημένη κατά τις αποστάσεις που αντιστοιχούν σε αρχικές τιμές ενισχυμένων συντελεστών $W/4,3$ και $H/2,15$ αντίστοιχα (εξισώσεις 1.17 & 1.18 και Πίνακες 1.6 & 1.7).

- Καθαρές πλευρικές ροές δεν αναφέρονται στο Κεφάλαιο 1



- Υπομοντέλο ροής αέρα κοντινής περιοχής:
 - ❖ η εξίσωση συνέχειας καυσαερίων δεν αναφέρεται στο Κεφάλαιο 1
 - ❖ η εξίσωση ενέργειας καυσαερίων δεν αναφέρεται στο Κεφάλαιο 1
 - ❖ η εξίσωση ορμής καυσαερίων δεν αναφέρεται στο Κεφάλαιο 1
 - ❖ εξίσωση συνέχειας ρύπου κοντινής περιοχής δεν αναφέρεται στο Κεφάλαιο 1

Χαρακτηριστικά που επιδρούν άμεσα στο υπομοντέλο ροής κοντινής περιοχής και έμμεσα στο μοντέλο ποιότητας αέρα:

- Είδος πλουμίου κοντινής περιοχής:
 - Ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας ή πλούμιο. Κριτήριο: $(T_s - T_a) \geq (\Delta T)_c$, όπου T_s θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων και T_a απόλυτη θερμοκρασία αέρα στη κορυφή της καμινάδας
 - σε ασταθείς ή ουδέτερες ατμοσφαιρικές συνθήκες και για $F_b < 55$, όπου F_b ο παράγοντας μεταβολής πυκνότητας πηγής που δίνεται από την εξίσωση 1.41, η τελική ανύψωση και η κατάντη απόσταση στην οποία αντιστοιχεί δίνονται από τις εξισώσεις 1.42. Στην περίπτωση αυτή το $(\Delta T)_c$ υπολογίζεται από την εξίσωση 1.38
 - σε ασταθείς ή ουδέτερες ατμοσφαιρικές συνθήκες και $F_b \geq 55$ η τελική ανύψωση και η κατάντη απόσταση στην οποία αντιστοιχεί δίνονται από τις εξισώσεις 1.43. Στην περίπτωση αυτή το $(\Delta T)_c$ υπολογίζεται από την εξίσωση 1.39
 - σε σταθερές ατμοσφαιρικές συνθήκες η τελική ανύψωση και η κατάντη απόσταση στην οποία αντιστοιχεί δίνεται από την εξίσωση 1.44. Στην περίπτωση αυτή το $(\Delta T)_c$ υπολογίζεται από την εξίσωση 1.40 όπου συμπεριλαμβάνεται και η παράμετρος σταθερότητας συνθηκών (η οποία υπολογίζεται από την 1.45)
 - Καθαρή εκτόξευση. Κριτήριο: $F_b = 0$, όπου F_b ο παράγοντας μεταβολής πυκνότητας πηγής που δίνεται από το τύπο 1.41
 - σε ασταθείς ή ουδέτερες ατμοσφαιρικές συνθήκες και $F_b = 0$ η τελική ανύψωση και η κατάντη απόσταση στην οποία αντιστοιχεί δίνονται από τις εξισώσεις 1.47



- σε σταθερές ατμοσφαιρικές συνθήκες και $F_b = 0$ η τελική ανύψωση και η κατάντη απόσταση στην οποία αντιστοιχεί δίνονται από τις εξισώσεις 1.50
- Εξαναγκασμένο πλούμιο. Κριτήριο: όταν $(T_s - T_a) < (\Delta T)_c$ και $F_b \neq 0$
 - σε ασταθείς ή ουδέτερες ατμοσφαιρικές συνθήκες και $F_b < 55$ η τελική ανύψωση και η κατάντη απόσταση στην οποία αντιστοιχεί δίνονται από τις εξισώσεις 1.48
 - σε ασταθείς ή ουδέτερες ατμοσφαιρικές συνθήκες και $F_b \geq 55$ η τελική ανύψωση και η κατάντη απόσταση στην οποία αντιστοιχεί δίνονται από τις εξισώσεις 1.49
 - Για σταθερές συνθήκες και $F_b < 55$ η τελική ανύψωση και η κατάντη απόσταση στην οποία αντιστοιχεί δίνονται από τις εξισώσεις 1.51
 - Για σταθερές συνθήκες και $F_b \geq 55$ η τελική ανύψωση και η κατάντη απόσταση στην οποία αντιστοιχεί δίνονται από τις εξισώσεις 1.52
- Συνθήκες ροής αέρα
 - σε ατμόσφαιρα με γραμμική θερμική διαστρωμάτωση $\frac{\partial T}{\partial z} < 0$ (σταθερές συνθήκες) η παράμετρος σταθερότητας συνθηκών $s = g \frac{\partial \theta / \partial z}{T_a}$ συμπεριλαμβάνεται στις εξισώσεις τελικής ανύψωσης και λόγο άνωσης (1.44) και λόγο ορμής (1.50–1.52)
 - σε ουδέτερες ή ασταθείς ατμοσφαιρικές συνθήκες η παράμετρος σταθερότητας συνθηκών s μηδενίζεται
- Τα παραπάνω τρία (3) είδη ροής κοντινής περιοχής επιδρούν στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης με δύο τρόπους: α) με μία τελική ανύψωση της κατακόρυφης συντεταγμένης της σημειακής πηγής (ανύψωση πλουμίου) και β) με ενίσχυση των στατιστικών συντελεστών εγκάρσιας και κατακόρυφης διάχυσης σύμφωνα με τις εξισώσεις 1.58 και 1.59 της μεθόδου Pasquill αντίστοιχα
- Χαρακτηριστικά πηγής
 - Σημείο έκλυσης



- όλοι οι τύποι καμινάδων θεωρούνται σημειακές πηγές και το σημείο έκλυσης (release) βρίσκεται στο μέσο της διατομής του στομίου της καμινάδας
- η πηγή όγκου ισοδυναμεί και αυτή με σημειακή πηγή στο κατώτατο μέσο της κατάντη πλευράς της πηγής όγκου (π.χ. κτίριο)
- Ανάντη διείδυση. Κριτήριο: $M < 1$ ή $v_s < 1,5u_s$ όπου M ή Ma ο σχετικός αριθμός Mach της υποκρίσιμης ροής καυσαερίων ως προς τη ροή του αέρα, v_s ταχύτητα εξόδου καυσαερίων και u_s μέση ταχύτητα ανέμου στη κορυφή της καμινάδας
Επιδρά στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης με πτώση πλουμίου δηλ. με μείωση της κατακόρυφης συντεταγμένης της σημειακής πηγής κατά ύψος που δίνεται από την εξίσωση 1.36. Η πτώση πλουμίου συμπεριλαμβάνεται στη συνολική ανύψωση που συντελεί στην ενίσχυση των στατιστικών συντελεστών εγκάρσιας και κατακόρυφης διάχυσης σύμφωνα με τις εξισώσεις 1.58 και 1.59 της μεθόδου Pasquill αντίστοιχα.
- Συνεχής (μη πεπερασμένη). Κριτήριο: η πηγή εκλύει συνεχώς (για πάντα) ρύπο
- Σταθερή πηγή. Κριτήριο: η συγκέντρωση έκλυσης του ρύπου (C_0) είναι σταθερή



Χαρακτηριστικά που επιδρούν άμεσα στο μοντέλο ποιότητας αέρα:

- Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του ρύπου
 - Κατανάλωση-αποικοδόμηση πρώτης τάξης. Κριτήριο: $\frac{dC}{dt} = -kC$ όπου k σταθερά αποικοδόμησης πρώτης τάξης (s^{-1}) και C η συγκέντρωση του ρύπου

Στο δεξιό σκέλος της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης μπαίνει ο όρος $-kC$ (εξισώσεις 1.6 και 1.10)

Στην αναλυτική λύση της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης η αποικοδόμηση πρώτης τάξης του ρύπου λαμβάνεται υπόψη με τον αδιάστατο όρο $D = e^{-kt}$ που πολλαπλασιάζεται με το ρυθμό εκπομπής ρύπου Q (g/s) όπως φαίνεται στην αναλυτική λύση 1.24



- Παραγωγή πρώτης τάξης. Κριτήριο: $\frac{dC}{dt} = k_m C_m$ όπου k_m σταθερά παραγωγής πρώτης τάξης (s^{-1}) και C_m συγκέντρωση του πατρικού συστατικού του ρύπου.

Στο δεξιό σκέλος της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης μπαίνει ο όρος $+k_m C_m$ (εξίσωση 1.6 και 1.10)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΔΟΜΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΠΟΤΑΜΟΥ

- Μοντέλο ποιότητας ποταμού: εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης (γενική μορφή 2.6)



- Υπομοντέλο ροής ποταμού μακρινής περιοχής:
 - ❖ εξίσωση συνέχειας νερού (2.1 γενική μορφή)
 - ❖ εξίσωση ενέργειας ή Bernoulli (2.3 γενική μορφή)
 - ❖ η εξίσωση ορμής δεν αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2

Χαρακτηριστικά που επιδρούν άμεσα στο υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής και έμμεσα στο μοντέλο ποιότητας ποταμού:

□ Είδος ροής νερού

- Ασυμπίεστη ροή. Κριτήριο: $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ όπου ρ πυκνότητα νερού και t χρόνος

Οι εξισώσεις του υπομοντέλου ροής ποταμού και η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης αφορούν ασυμπίεστη ροή

- Τυρβώδης ροή. Κριτήριο τυρβώδους ροής σε ανοιχτό κανάλι: $Re > 2000$ όπου Re ο αριθμός Reynolds που δίνεται από τις ισοδύναμες εξισώσεις 2.66 και 2.98

Στο υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής και στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης χρησιμοποιείται η μέση ως προς τη διακύμανση (λόγω τύρβων) ταχύτητα ροής ρευστού \bar{u} και οι συντελεστές διάχυσης της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης γίνονται συντελεστές τυρβώδους διάχυσης

- Μόνιμη ροή. Κριτήριο: $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$, όπου u ταχύτητα νερού και t χρόνος

Οι εξισώσεις του υπομοντέλου ροής ποταμού αφορούν μόνιμη ροή. Στην εξίσωση συνέχειας μόνιμης ροής 2.1 και 2.2 έχει γίνει η αντικατάσταση $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$, όπου h το ύψος του συστήματος. Στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης (μονίμων συνθηκών) γίνεται η αντικατάσταση

$$\frac{\partial c}{\partial t} = 0$$



- **Ιξώδης ροή.** Κριτήριο: Λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες λόγω τριβής. Η εξίσωση ενέργειας Bernoulli (του υπομοντέλου ροής) ποταμού της μορφής 2.3 συμπεριλαμβάνει την υδραυλική απώλεια h_f (m) και η εξίσωση Bernoulli της μορφής 2.4 και 2.5 συμπεριλαμβάνει την αντιπροσωπευτική κλίση τριβής ή κλίση επιφάνειας νερού S_f . Η υδραυλική απώλεια h_f (m) λόγω τριβής υπολογίζεται με την εξίσωση Darcy-Wiesbach (2.99)

Ο παράγοντας τριβής Darcy-Wiesbach f μπορεί να επηρεάσει το συντελεστή εγκάρσιας διάχυσης της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης ποταμού μέσα από τη σχέση 2.83

- **Ομοιόμορφη ροή.** Κριτήρια: $S_o = S_f$ όπου S_o η κλίση της κοίτης του ποταμού και S_f αντιπροσωπευτική κλίση τριβής ή κλίση επιφάνειας νερού, δεδομένου ότι η ιξώδης ροή είναι σταθερής εγκάρσιας διατομής χωρίς πλευρικές ροές – οι πιθανές πλευρικές ροές ενσωματώνονται εξ' αρχής στην επιφανειακή ροή (βλέπε καθαρές πλευρικές ροές παρακάτω στη δομή). Επιλέγεται σύστημα μοντέλου ποιότητας ποταμού σύμφωνα με τα κριτήρια ομοιόμορφης ροής.

Στις εξισώσεις του υπομοντέλου μακρινής περιοχής και στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης η ταχύτητα (μονοδιάστατης ροής) ποταμού είναι σταθερή $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$

Επιπλέον στο υπομοντέλο ροής ποταμού μακρινής περιοχής:

- η μονοδιάστατη εξίσωση ενέργειας για ανοιχτά κανάλια ή εξίσωση Bernoulli παίρνει τη μορφή $\frac{dE_s}{dx} = 0$ όπου E_s ειδική ενέργεια (m)
- το βάθος του ποταμού είναι το κανονικό δηλ. $y = y_n$
- η ταχύτητα νερού υπολογίζεται από τις εξισώσεις Chezy (2.103) και Manning (2.106) (εξίσωση ορμής)
- **Μεταφορά.** Κριτήρια: $Pr_t \cong 1$ όπου Pr_t ο τυρβώδης αριθμός Prandtl του νερού (η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 0,7–0,9) ή $Fr < 1$, όπου Fr ο αριθμός Froude του ποταμού που δίνεται από τις ισοδύναμες εξισώσεις 2.69, 2.70, και 2.110 ή $Ri > 1$, όπου Ri ο αριθμός Richardson ποταμού που δίνεται από την εξίσωση 2.97 χωρίς τη διόρθωση Bous-



sinesq διότι το ποτάμι σύμφωνα με το Κεφάλαιο 2 δεν έχει βαθμίδα μεταβολής πυκνότητας

- Υποκρίσιμη ροή ταχύτητας. Κριτήρια: $Fr < 1$ ή $V < V_c$ ή $S_o < S_c$ ή $y > y_c$, όπου Fr ο αριθμός Froude του ποταμού που δίνεται από τις ισοδύναμες εξισώσεις 2.69, 2.70, και 2.110, V_c η κρίσιμη ταχύτητα του νερού, y_c το κρίσιμο βάθος που δίνεται από το τύπο 2.107, S_c η κρίσιμη κλίση που δίνεται από το τύπο 2.112 και S_o η κλίση της κοίτης του ποταμού

Επιδρά στο υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής και στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης ποταμού ακριβώς όπως η ιξώδης ροή (βλέπε ιξώδη ροή παραπάνω στη δομή)

- Υπερκρίσιμη ροή ταχύτητας. Κριτήριο: $Fr > 1$ ή $V > V_c$ ή $S_o > S_c$ ή $y < y_c$

Επιδρά στο υπομοντέλο ροής ακριβώς όπως η μη ιξώδης ροή δηλ. δε λαμβάνονται υπόψη απώλειες λόγω τριβής στην εξίσωση ενέργειας Bernoulli, η οποία διατηρεί τη μορφή 2.3

□ Διεύθυνση ροής

- μονοδιάστατης μετατόπισης και μονοδιάστατης διάχυσης εγκάρσια στη διεύθυνση ροής, από σημειακή πηγή στο κέντρο του ποταμού και στιγμιαία κατακόρυφη ανάμιξη καθ' όλο το βάθος του ποταμού (2.90), με αναλυτική λύση την εξίσωση 2.91. Η σταθμισμένη κατά βάθος ποταμού συγκέντρωση είναι $\dot{m} = \frac{QC_o}{d}$ όπου \dot{m} (kg/s) Q παροχή πηγής (m^3/s) C_o αρχική συγκέντρωση στον αποδέκτη δίπλα από τη πηγή (kg/m^3) η οποία δίνεται από τον τύπο 2.75 και d βάθος ποταμού (m)
- μονοδιάστατης μετατόπισης και μονοδιάστατης εγκάρσιας διάχυσης από σημειακή πηγή στη μια του όχθη του ποταμού, όπου ισχύουν τα ίδια με την προηγούμενη περίπτωση (εξισώσεις 2.9–2.92 και 2.75) με τη μόνη διαφορά ότι η κατάντη απόσταση όπου επιτυγχάνεται η ανάμιξη καθ' όλο το πλάτος του ποταμού είναι 4πλάσια από την περίπτωση σημειακής πηγής στο κέντρο του ποταμού (προηγούμενη περίπτωση)
- μονοδιάστατης μετατόπισης και μονοδιάστατης διάχυσης στη ίδια διεύθυνση από σημειακή πηγή στο μέσο του ποταμού (2.73) με αναλυ-



τική λύση την 2.74 και αρχική συγκέντρωση στον αποδέκτη δίπλα από τη πηγή C_0 (kg/m^3) που δίνεται από την 2.75

□ Καθαρές πλευρικές ροές

Όταν υπάρχουν λαμβάνονται υπόψη στην εξίσωση συνέχειας του υπομοντέλου ροής μακρινής περιοχής (εξισώσεις 2.1 και 2.2)

□ Χαρακτηριστικά επιφάνειας ροής

- Τραχύτητα η οποία εκφράζεται με τον συντελεστή Manning που δίνεται σε πίνακες όπως ο Πίνακας 2.1

Στο υπομοντέλο ροής η μέση ταχύτητα ποταμού υπολογίζεται με την εξίσωση Manning 2.106 με τη βοήθεια του συντελεστή Manning (για ομοιόμορφη ροή)

- Μεταβολές επιφάνειας ροής

- Απότομες μεταβολές. Κριτήριο: αλλαγή του βάθους του ποταμού Συγκρίνοντας το βάθος y με το κρίσιμο βάθος y_c κρίνεται αν το είδος ροής ταχύτητας αλλάζει ή όχι (βλέπε παραπάνω στη δομή υποκρίσιμη και υπερκρίσιμη ροή)

Το βάθος ποταμού έχει επίδραση τόσο στο συντελεστή εγκάρσιας τυρβώδους διάχυσης όσο και στο συντελεστή διαμήκου διάχυσης της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης μέσα από τις σχέσεις 2.83-2.86

- Σταδιακές μεταβολές. Κριτήριο: αλλαγή της κλίσης του ποταμού Συγκρίνοντας τη κλίση του ποταμού S_0 με τη κρίσιμη κλίση S_c η οποία υπολογίζεται από το κρίσιμο βάθος y_c με την εξίσωση 2.112, κρίνεται αν το είδος ροής ταχύτητας αλλάζει ή όχι (βλέπε παραπάνω στη δομή υποκρίσιμη και υπερκρίσιμη ροή)



➤ Υπομοντέλο ροής κοντινής περιοχής:

- ❖ εξίσωση συνέχειας πλουμίου κοντινής περιοχής (γενική μορφή 2.12)
- ❖ εξίσωση ενέργειας ή άνωσης πλουμίου κοντινής περιοχής (γενική μορφή 2.14)
- ❖ εξίσωση ορμής πλουμίου κοντινής περιοχής (γενική μορφή 2.13)
- ❖ εξίσωση συνέχειας ρύπου κοντινής περιοχής (γενική μορφή 2.31)



Χαρακτηριστικά που επιδρούν άμεσα στο υπομοντέλο ροής κοντινής περιοχής και έμμεσα στο μοντέλο ποιότητας ποταμού:

- Είδος πλουμίου κοντινής περιοχής
 - Καθαρό πλούμιο. Κριτήριο: $R_o = 8\alpha/5$ ή $R_{o_d} = 1$, όπου R_o ο αρχικός αριθμός Richardson πλουμίου κοντινής περιοχής στο στόμιο της πηγής που δίνεται από τη σχέση 2.21, α η σταθερά παράσυρσης πλουμίου και R_{o_d} ο σχετικός αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Richardson πλουμίου κοντινής περιοχής στο στόμιο της πηγής ως προς τη ροή του νερού
 - Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος πλουμίου σε εγκάρσια ροή νερού δίνεται από την εξίσωση 2.40
 - Για επιφανειακή πηγή, το μήκος πλουμίου σε εγκάρσια ροή δίνεται από την εξίσωση 2.5
 - Καθαρή εκτόξευση. Κριτήριο $J_o = 0$ ή $\beta_o = 0$, όπου J_o ή β_o η αρχική ροή λόγω μεταβολής πυκνότητας στο στόμιο πηγής και υπολογίζεται από τους αντίστοιχους τύπους του Πίνακα 2.1
 - Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος εκτόξευσης σε εγκάρσια ροή νερού δίνεται από την εξίσωση 2.39
 - Για γραμμική βυθισμένη πηγή, το μήκος εκτόξευσης σε εγκάρσια ροή δίνεται από την εξίσωση 2.44
 - Για επιφανειακή πηγή, το μήκος εκτόξευσης σε εγκάρσια ροή δίνεται από την εξίσωση 2.49
 - Εξαναγκασμένο πλούμιο. Κριτήρια: $R_o < 8\alpha/5$ ή $R_{o_d} < 1$, όπου R_o ο αρχικός αριθμός Richardson πλουμίου κοντινής περιοχής στο στόμιο της πηγής που δίνεται από τη σχέση 2.21, α η σταθερά παράσυρσης πλουμίου και R_{o_d} ο σχετικός αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Richardson πλουμίου κοντινής περιοχής στο στόμιο της πηγής ως προς τη ροή του νερού και $J_o \neq 0$ ή $\beta_o \neq 0$, όπου J_o ή β_o αρχική ροή κινηματικής λόγω μεταβολής πυκνότητας στο στόμιο της πηγής
 - Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος μετάβασης εκτόξευσης σε πλούμιο δίνεται από την εξίσωση 2.38
 - Για γραμμική βυθισμένη πηγή, το μήκος μετάβασης εκτόξευσης σε πλούμιο δίνεται από την εξίσωση 2.43



- Για επιφανειακή πηγή, το μήκος μετάβασης εκτόξευσης σε πλούμιο δίνεται από την εξίσωση 2.48
 - Συνθήκες ροής ποταμού
 - ουδέτερες ή ασταθείς συνθήκες (σύμφωνα με το Κεφάλαιο 2, δεν υπάρχει θερμική διαστρωμάτωση σε ποτάμι και κατά συνέπεια ούτε βαθμίδα διαφοράς πυκνότητας)
 - Τα παραπάνω τρία (3) είδη ροής κοντινής περιοχής επιδρούν στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης με μία τελική μετατόπιση ή της κατακόρυφης συντεταγμένης αν πρόκειται για βυθισμένη πηγή ή της εγκάρσιας συντεταγμένης αν πρόκειται για επιφανειακή πηγή (ανύψωση πλουμίου)
 - Χαρακτηριστικά πηγής
 - Σημείο έκλυσης
 - Όλοι οι τύποι αγωγών/καναλιών αποβλήτων θεωρούνται σημειακές πηγές με σημείο έκλυσης (release) που βρίσκεται στο μέσο της διατομής στην έξοδο του αγωγού/καναλιού στο ποτάμι
 - Οι πολυσκεδαστήρες πεπερασμένου μήκους (βλέπε Σχήμα 2.1) θεωρούνται γραμμικές πηγές (γραμμή έκλυσης) με τον άξονα διεύθυνσης ροής ρευστού να περνάει από το κέντρο της γραμμικής πηγής. (βλέπε Σχήμα 2.10)
 - Ανάντη διείδυση. Κριτήριο $Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g'L}} < 1$, όπου Fr_d ο σχετικός πυκνομετρικός αριθμός Froude ροής αποβλήτων υπολογισμένος στην έξοδο αγωγού, g' η προσαρμοσμένη στις συνθήκες ροής διόρθωση Boussinesq και U η σχετική ταχύτητα των αποβλήτων ως προς τη ροή του νερού
- Η ανάντη διείδυση επιδρά στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης με πτώση πλουμίου δηλ. με μείωση της κατακόρυφης συντεταγμένης της σημειακής πηγής κατά ύψος z_s για βυθισμένη πηγή και κατά $z_s/2$ για επιφανειακή πηγή
- Η ανάντη διείδυση συμπεριλαμβάνεται στην αναλυτική λύση Thomann και Mueller της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης για σημειακή πηγή στη μέση του ποταμού 2.74



- Συνεχής (μη πεπερασμένη) πηγή. Κριτήριο: η πηγή εκλύει συνεχώς (για πάντα) ρύπο
- Σταθερή πηγή. Κριτήριο: η συγκέντρωση έκλυσης του ρύπου (C_0) είναι σταθερή



Χαρακτηριστικά που επιδρούν άμεσα στο μοντέλο ποιότητας ποταμού:

- Ως προς τα χαρακτηριστικά του ρύπου
 - Κατανάλωση-αποικοδόμηση πρώτης τάξης. Κριτήριο $\frac{dC}{dt} = -kC$ όπου k σταθερά αποικοδόμησης πρώτης τάξης (s^{-1}) και C η συγκέντρωση του ρύπου
 - Στο δεξιό σκέλος της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης μπαίνει ο όρος $-kC$ (εξισώσεις 2.54 και 2.73).
Ο όρος αποικοδόμησης (κατανάλωσης) συμπεριλαμβάνεται στις αναλυτικές λύσεις της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης για BOD (εξίσωση 2.77) και για DO (εξίσωση 2.78)
 - Παραγωγή πρώτης τάξης. Κριτήριο $\frac{dC}{dt} = k_m C_m$ όπου k_m σταθερά παραγωγής πρώτης τάξης (s^{-1}) και C_m συγκέντρωση του πατρικού συστατικού του ρύπου.
 - Στο δεξιό σκέλος της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης μπαίνει ο όρος $+k_m C_m$
Ο όρος παραγωγής συμπεριλαμβάνεται στην αναλυτική λύση της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης για DO (εξίσωση 2.78)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΔΟΜΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ

- Μοντέλο ποιότητας θάλασσας: εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης (γενική μορφή 2.6)



- Υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής:
 - ❖ εξίσωση συνέχειας νερού (2.1 γενική μορφή)
 - ❖ εξίσωση ενέργειας δεν αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2
 - ❖ η εξίσωση ορμής δεν αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2

Χαρακτηριστικά που επιδρούν άμεσα στο υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής και έμμεσα στο μοντέλο ποιότητας θάλασσας:

□ Είδος ροής νερού

- Ασυμπίεστη ροή. Κριτήριο: $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ όπου ρ πυκνότητα νερού και t χρόνος
Οι εξισώσεις του υπομοντέλου ροής μακρινής περιοχής και η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης αφορούν ασυμπίεστη ροή
- Τυρβώδης ροή. Κριτήριο: υψηλές τιμές αριθμού Reynolds Re , ο οποίος υπολογίζεται από τις ισοδύναμες εξισώσεις 2.66 και 2.98
Στο υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής και στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης χρησιμοποιείται η μέση ως προς τη διακύμανση (λόγω τύρβων) ταχύτητα ροής ρευστού \bar{u} και οι συντελεστές διάχυσης της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης γίνονται συντελεστές τυρβώδους διάχυσης
- Μόνιμη ροή. Κριτήριο: $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$ όπου u ταχύτητα νερού και t χρόνος
Οι εξισώσεις του υπομοντέλου ροής θαλασσινού νερού αφορούν μόνιμη ροή. Στην εξίσωση συνέχειας μόνιμης ροής 2.1 και 2.2 έχει γίνει η αντικατάσταση $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$, όπου h το ύψος του συστήματος
Στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης (μονίμων συνθηκών) γίνεται η αντικατάσταση $\frac{\partial c}{\partial t} = 0$
- Ιξώδης ροή. Κριτήριο: λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες λόγω τριβής



Στο υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής λαμβάνεται υπόψη το οριακό στρώμα ταχύτητας νερού σύμφωνα με την εξίσωση 2.62

- Ομοιόμορφη ροή. Κριτήρια: $S_o = S_f$ όπου S_o η κλίση του βυθού της θάλασσας και S_f η αντιπροσωπευτική κλίση τριβής ή κλίση επιφάνειας νερού, δεδομένου ότι η ιξώδης ροή είναι σταθερής εγκάρσιας διατομής χωρίς πλευρικές ροές. Επιλέγεται σύστημα μοντέλου ποιότητας θάλασσας σύμφωνα με τα κριτήρια ομοιόμορφης ροής.

Στις εξισώσεις του υπομοντέλου μακρινής περιοχής και στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης η ταχύτητα (μονοδιάστατης ροής) θαλασσινού νερού είναι σταθερή $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$

- Μεταφορά. Κριτήριο: $Pr_t \cong 1$ όπου Pr_t ο τυρβώδης αριθμός Prandtl του νερού (η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 0,7–0,9) ή $|Ri| > 1$ όπου Ri ο συνολικός πυκνομετρικός αριθμός Richardson της θάλασσας που δίνεται από την εξίσωση 2.68
- Υποκρίσιμη ροή ταχύτητας. Κριτήριο ροής ταχύτητας κατά τη Monin-Obukhov θεωρία ομοιότητας (similarity theory): $|Ri| < 1$ όπου Ri ο πυκνομετρικός αριθμός Richardson σε διαφορετικά ύψη που δίνεται από την εξίσωση 2.68. Κριτήριο υποκρίσιμης ροής: $V < V_c$ ή $S_o < S_c$ ή $y > y_c$, όπου V_c η κρίσιμη ταχύτητα του νερού, y_c το κρίσιμο βάθος, S_c η κρίσιμη κλίση και S_o η κλίση του βυθού της θάλασσας
 - σε ουδέτερες και ασταθείς συνθήκες ροής υφίσταται σε όλα τα ύψη θαλάσσιας ροής
 - σε συνθήκες θερμικής διαστρωμάτωσης ($\frac{\partial T}{\partial z} > 0$) υφίσταται σε ύψη πάνω από το χαρακτηριστικό ύψος L Monin-Obukhov ή θερμοκλίνη, που υπολογίζεται από την εξίσωση 2.63

Σε σταθερές συνθήκες η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης εφαρμόζεται πάνω από το χαρακτηριστικό ύψος ή θερμοκλίνη
- Ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας ή ελεύθερη ή φυσική μεταφορά. Κριτήριο κατά τη Monin-Obukhov θεωρία ομοιότητας (similarity theory): $|Ri| > 1$ όπου Ri ο πυκνομετρικός αριθμός Richardson σε διαφορετικά ύψη που δίνεται από την εξίσωση 2.68



- σε σταθερές συνθήκες ή θερμική διαστρωμάτωση ή θερμοκλίνη ($\frac{\partial \rho}{\partial z} < 0$ λόγω $\frac{\partial T}{\partial z} > 0$) υφίσταται σε ύψη κάτω από το χαρακτηριστικό ύψος, το οποίο υπολογίζεται από την εξίσωση 2.63
Για βυθισμένες πηγές εφαρμόζεται το μοντέλο κοντινής περιοχής μέχρι το ύψος της θερμοκλίνης
 - μονοδιάστατης μετατόπισης κατά τη διεύθυνση ροής και μονοδιάστατης διάχυσης εγκάρσια στη ροή κατά τον άξονα γραμμικής πηγής πεπερασμένου μήκους (2.54) με αναλυτική λύση την 2.55 και μέγιστες συγκεντρώσεις στο άξονα που περνά από το μέσο της γραμμικής πηγής κατά τη διεύθυνση ροής σύμφωνα με τις εξισώσεις 2.57 και 2.58
 - μονοδιάστατης μετατόπισης και μονοδιάστατης διάχυσης στη ίδια διεύθυνση από σημειακή πηγή στο μέσο της θάλασσας (2.73) με αναλυτική λύση την 2I.74
 - Καθαρές πλευρικές ροές
Δεν αναφέρονται στο Κεφάλαιο 2
 - Χαρακτηριστικά επιφάνειας ροής
 - Τραχύτητα η οποία εκφράζεται με τον συντελεστή Manning που δίνεται σε πίνακες όπως ο Πίνακας 2.1
Στο υπομοντέλο ροής η ταχύτητα τριβής (στο βυθό της θάλασσας) υπολογίζεται από την εξίσωση 2.88 με τη βοήθεια του συντελεστή Manning
 - Μεταβολές επιφάνειας ροής
 - Απότομες μεταβολές. Κριτήριο: αλλαγή του βάθους της θάλασσας
Το βάθος της θάλασσας έχει επίδραση τόσο στο συντελεστή εγκάρσιας τυρβώδους διάχυσης όσο και στο συντελεστή διαμήκους διάχυσης της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης
 - Σταδιακές μεταβολές. Κριτήριο: αλλαγή της κλίσης του βυθού της θάλασσας
Η κλίση του βυθού επηρεάζει τη τιμή της μέσης ταχύτητας του νερού και των απωλειών λόγω τριβής
- ☐
- Υπομοντέλο ροής κοντινής περιοχής:



- ❖ εξίσωση συνέχειας πλουμίου κοντινής περιοχής (γενική μορφή 2.12)
- ❖ εξίσωση ενέργειας ή άνωσης πλουμίου κοντινής περιοχής (γενική μορφή 2.14)
- ❖ εξίσωση ορμής πλουμίου κοντινής περιοχής (γενική μορφή 2.13)
- ❖ εξίσωση συνέχειας ρύπου κοντινής περιοχής (γενική μορφή 2.31)

Χαρακτηριστικά που επιδρούν άμεσα στο υπομοντέλο ροής κοντινής περιοχής και έμμεσα στο μοντέλο ποιότητας θάλασσας:

□ Είδος πλουμίου κοντινής περιοχής

- Καθαρό πλούμιο. Κριτήριο: $R_o = 8\alpha/5$ ή $R_{od} = 1$, όπου R_o ο αρχικός αριθμός Richardson πλουμίου κοντινής περιοχής στο στόμιο της πηγής που δίνεται από τη σχέση 2.21, α η σταθερά παράσυρσης πλουμίου και R_{od} ο σχετικός αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Richardson πλουμίου κοντινής περιοχής στο στόμιο της πηγής ως προς τη ροή του νερού
 - σε ασταθείς ή ουδέτερες συνθήκες
Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος πλουμίου σε εγκάρσια ροή νερού δίνεται από την εξίσωση 2.40
Για επιφανειακή πηγή, το μήκος πλουμίου σε εγκάρσια ροή δίνεται από την εξίσωση 2.50
 - σε σταθερές συνθήκες
Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος πλουμίου σε σταθερές συνθήκες αποδέκτη (διαστρωμάτωση) δίνεται από την εξίσωση 2.42
Για γραμμική βυθισμένη πηγή, το μήκος πλουμίου σε εγκάρσια ροή με διαστρωμάτωση δίνεται από την εξίσωση 2.47
Για γραμμική βυθισμένη πηγή, το μήκος πλουμίου σε διαστρωμάτωση δίνεται από τις ισοδύναμες εξισώσεις 2.46, 2.34 και 2.36
- Καθαρή εκτόξευση. Κριτήριο $J_o = 0$ ή $\beta_o = 0$, όπου J_o ή β_o η αρχική ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας στο στόμιο πηγής και υπολογίζεται από τους αντίστοιχους τύπους του Πίνακα 2.1
 - σε ασταθείς ή ουδέτερες συνθήκες



Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος εκτόξευσης σε εγκάρσια ροή νερού δίνεται από την εξίσωση 2.39

Για γραμμική βυθισμένη πηγή, το μήκος εκτόξευσης σε εγκάρσια ροή δίνεται από την εξίσωση 2.44

Για επιφανειακή πηγή, το μήκος εκτόξευσης σε εγκάρσια ροή δίνεται από την εξίσωση 2.49

- σε σταθερές συνθήκες

Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος εκτόξευσης σε διαστρωμάτωση δίνεται από την εξίσωση 2.41

Για γραμμική βυθισμένη πηγή, το μήκος εκτόξευσης σε διαστρωμάτωση δίνεται από την εξίσωση 2.45

- Εξαναγκασμένο πλούμιο. Κριτήρια: $R_o < 8\alpha/5$ ή $R_{od} < 1$, όπου R_o ο αρχικός αριθμός Richardson πλουμίου κοντινής περιοχής στο στόμιο της πηγής που δίνεται από τη σχέση 2.21, α η σταθερά παράσυρσης πλουμίου και R_{od} ο σχετικός αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Richardson πλουμίου κοντινής περιοχής στο στόμιο της πηγής ως προς τη ροή του νερού και $J_o \neq 0$ ή $\beta_o \neq 0$, όπου J_o ή β_o αρχική ροή κινηματικής λόγω διαφοράς πυκνότητας στο στόμιο της πηγής

- σε ασταθείς ή ουδέτερες συνθήκες

Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος μετάβασης εκτόξευσης σε πλούμιο δίνεται από την εξίσωση 2.38

Για γραμμική βυθισμένη πηγή, το μήκος μετάβασης εκτόξευσης σε πλούμιο δίνεται από την εξίσωση 2.43

Για επιφανειακή πηγή, το μήκος μετάβασης εκτόξευσης σε πλούμιο δίνεται από την εξίσωση 2.48

- σε σταθερές συνθήκες

Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος μετάβασης εκτόξευσης σε πλούμιο δίνεται από την εξίσωση 2.38

Για γραμμική βυθισμένη πηγή, το μήκος μετάβασης εκτόξευσης σε πλούμιο δίνεται από την εξίσωση 2.43

Για επιφανειακή πηγή, το μήκος μετάβασης εκτόξευσης σε πλούμιο δίνεται από την εξίσωση 2.48



□ Τα παραπάνω τρία (3) είδη ροής κοντινής περιοχής επιδρούν στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης με μία τελική ανύψωση της κατακόρυφης συντεταγμένης της βυθισμένης συνήθως πηγής (ανύψωση πλουμίου). Για να εφαρμοστεί μοντέλο ποιότητας στο σημείο τελικής ανύψωσης πρέπει αυτό να βρίσκεται πάνω από τη θερμοκλίνη αλλιώς το πλούμιο εγκλωβίζεται σε σύννεφο όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.2 και 2.3

▪ Συνθήκες θαλάσσιας ροής

- σε θερμική διαστρωμάτωση (σταθερές συνθήκες)

Η προσέγγιση Boussinesq για το πλούμιο κοντινής περιοχής ως προς τη ροή του ρευστού δίνεται από τη σχέση 2.19, όπου $\rho_\infty \neq \rho_0$ και ρ_∞ είναι η πυκνότητα ισορροπίας νερού και πλουμίου ρύπανσης (στο όριο κοντινής περιοχής), ρ_0 πυκνότητα αποδέκτη έξω από το πλούμιο σε κάποιο επίπεδο και ρ πυκνότητα πλουμίου στο ίδιο επίπεδο

Όταν η προσέγγιση Boussinesq αφορά ολόκληρο τον υδάτινο αποδέκτη τότε οι παραπάνω πυκνότητες παίρνουν τιμές ορίων αποδέκτη δηλ. ρ_0 πυκνότητα αποδέκτη στο επίπεδο του στομίου της πηγής και ρ πυκνότητα πλουμίου στο στόμιο της πηγής

Στην εξίσωση ενέργειας υπομοντέλου ροής κοντινής περιοχής 2.14, στην παράμετρο σταθερότητας συνθηκών $\frac{gd\rho_0}{\rho_1 dz}$, ρ_1 είναι η πυκνότητα αποδέκτη στο επίπεδο του στομίου της πηγής και $d\rho_0$ η διαφορά πυκνότητας του πλουμίου (η οποία διαφοροποιείται κατά z) από την πυκνότητα ισορροπίας με τον αποδέκτη (σύμφωνα με τη σχέση Boussinesq 2.19)

- σε ουδέτερες ή ασταθείς συνθήκες

Στην εξίσωση ενέργειας υπομοντέλου ροής κοντινής περιοχής 2.14, η παράμετρος σταθερότητας συνθηκών $\frac{gd\rho_0}{\rho_1 dz}$ μηδενίζεται και η ροή μέσα στο πλούμιο θεωρείται σταθερή κατά το ύψος ($\frac{dF}{dz} = 0$)

□ Χαρακτηριστικά πηγής

- Σημείο έκλυσης



- Όλοι οι τύποι αγωγών/καναλιών αποβλήτων θεωρούνται σημειακές πηγές με σημείο έκλυσης (release) που βρίσκεται στο μέσο της διατομής στην έξοδο του αγωγού/καναλιού στον επιφανειακό αποδέκτη.
- Οι πολυσκεδαστήρες πεπερασμένου μήκους (βλέπε Σχήμα 2.1) θεωρούνται γραμμικές πηγές (γραμμή έκλυσης) με τον άξονα διεύθυνσης ροής ρευστού να περνάει από το κέντρο της γραμμικής πηγής. (βλέπε Σχήμα 2.10)
- Ανάντη διείδυση. Κριτήριο $Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g'L}} < 1$, όπου Fr_d ο σχετικός πυκνομετρικός αριθμός Froude ροής αποβλήτων υπολογισμένος στην έξοδο αγωγού, g' η προσαρμοσμένη στις συνθήκες ροής διόρθωση Boussinesq (βλέπε Ενότητα 11.3 περί συνθηκών ροής αποδέκτη) και U η σχετική ταχύτητα των αποβλήτων ως προς τη ροή του νερού
Επιδρά στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης με πτώση πλουμίου δηλ. με μείωση της κατακόρυφης συντεταγμένης της σημειακής πηγής κατά ύψος z_s για βυθισμένη πηγή
- Συνεχής (μη πεπερασμένη) πηγή. Κριτήριο η πηγή εκλύει συνεχώς (για πάντα) ρύπο
- Σταθερή πηγή. Κριτήριο δεν αλλάζει με το χρόνο η συγκέντρωση έκλυσης του ρύπου (C_o)



Χαρακτηριστικά που επιδρούν άμεσα στο μοντέλο ποιότητας θάλασσας:

- Χαρακτηριστικά του ρύπου
 - Κατανάλωση-αποικοδόμηση πρώτης τάξης. Κριτήριο $\frac{dC}{dt} = -kC$ όπου k σταθερά αποικοδόμησης πρώτης τάξης (s^{-1}) και C η συγκέντρωση του ρύπου
 - Στο δεξιό σκέλος της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης μπαίνει ο όρος $-kC$ (εξισώσεις 2.54 και 2.73)
Ο όρος αποικοδόμησης (κατανάλωσης) συμπεριλαμβάνεται στις αναλυτικές λύσεις της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης για BOD (εξίσωση 2.77) και για DO (εξίσωση 2.78)



- Παραγωγή πρώτης τάξης. Κριτήριο $\frac{dC}{dt} = k_m C_m$ όπου k_m σταθερά παραγωγής πρώτης τάξης (s^{-1}) και C_m συγκέντρωση του πατρικού συστατικού του ρύπου.
 - Στο δεξιό σκέλος της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης μπαίνει ο όρος $+k_m C_m$
Ο όρος παραγωγής συμπεριλαμβάνεται στην αναλυτική λύση της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης για DO (εξίσωση 2.78)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΔΟΜΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΛΙΜΝΗΣ

- Μοντέλο ποιότητας λίμνης: εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης (γενική μορφή 2.6)



- Υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής:
 - ❖ εξίσωση συνέχειας νερού (2.1 γενική μορφή)
 - ❖ εξίσωση ενέργειας νερού δεν αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2
 - ❖ η εξίσωση ορμής νερού δεν αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2

Χαρακτηριστικά που επιδρούν άμεσα στο υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής και έμμεσα στο μοντέλο ποιότητας λίμνης:

□ Είδος ροής νερού

- Ασυμπίεστη ροή. Κριτήριο: $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ όπου ρ πυκνότητα νερού και t χρόνος

Οι εξισώσεις του υπομοντέλου ροής μακρινής περιοχής και η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης αφορούν ασυμπίεστη ροή

- Στρωτή ή Τυρβώδης ροή. Κριτήριο: εξαρτάται από τη τιμή του αριθμού Reynolds που υπολογίζεται από τις ισοδύναμες εξισώσεις 2.66 και 2.98

Στην περίπτωση τυρβώδους ροής, στο υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής και στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης χρησιμοποιείται η μέση ως προς τη διακύμανση (λόγω τύρβων) ταχύτητα ροής νερού \bar{u} και οι συντελεστές διάχυσης της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης γίνονται συντελεστές τυρβώδους διάχυσης

- Μόνιμη ροή. Κριτήριο: $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$, όπου u ταχύτητα νερού και t χρόνος

Οι εξισώσεις του υπομοντέλου ροής νερού λίμνης αφορούν μόνιμη ροή. Στην εξίσωση συνέχειας μόνιμης ροής 2.1 και 2.2 έχει γίνει η αντικατάσταση $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$, όπου h το ύψος του συστήματος

Στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης (μονίμων συνθηκών) γίνεται η αντικατάσταση $\frac{\partial c}{\partial t} = 0$

- Ιξώδης ροή. Κριτήριο: λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες λόγω τριβής



Στο υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής λαμβάνεται υπόψη το οριακό στρώμα ταχύτητας νερού σύμφωνα με την εξίσωση 2.62

- Ομοιόμορφη ροή. Κριτήρια: $S_o = S_f$ όπου S_o η κλίση του βυθού της λίμνης και S_f η αντιπροσωπευτική κλίση τριβής ή κλίση επιφάνειας νερού, δεδομένου ότι η ιξώδης ροή είναι σταθερής εγκάρσιας διατομής χωρίς πλευρικές ροές. Επιλέγεται σύστημα μοντέλου ποιότητας λίμνης σύμφωνα με τα κριτήρια ομοιόμορφης ροής.

Στις εξισώσεις του υπομοντέλου μακρινής περιοχής και στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης η ταχύτητα (μονοδιάστατης ροής) θαλασσινού νερού είναι σταθερή $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$

- Μεταφορά. Κριτήριο: $Fr < 0,32$ ή $|Ri| > 1$, όπου Fr ο αριθμός Froude της λίμνης που δίνεται από τις ισοδύναμες εξισώσεις 2.69, 2.70, και 2.110 και Ri ο πυκνομετρικός αριθμός Richardson της λίμνης που δίνεται από την εξίσωση 2.67

Αν δεν πληρείται το κριτήριο της μεταφοράς, τότε οι συνθήκες ροής νερού λίμνης είναι ασταθείς ή ουδέτερες (βλέπε υποκρίσιμη ροή ταχύτητας)

- Υποκρίσιμη ροή ταχύτητας. Κριτήριο ροής ταχύτητας κατά τη Monin-Obukhov θεωρία ομοιότητας (similarity theory): $|Ri| < 1$ όπου Ri ο πυκνομετρικός αριθμός Richardson σε διαφορετικά ύψη που δίνεται από την εξίσωση 2.68. Κριτήριο υποκρίσιμης ροής: $V < V_c$ ή $S_o < S_c$ ή $y > y_c$, όπου V_c η κρίσιμη ταχύτητα του νερού, y_c το κρίσιμο βάθος, S_c η κρίσιμη κλίση και S_o η κλίση του βυθού της λίμνης

- σε ουδέτερες και ασταθείς συνθήκες υφίσταται σε όλα τα ύψη ροής νερού

- σε σταθερές συνθήκες (θερμική διαστρωμάτωση $\frac{\partial T}{\partial z} > 0$) υφίσταται σε ύψη πάνω από το χαρακτηριστικό ύψος L Monin-Obukhov ή θερμοκλίνη, που δίνεται από την εξίσωση 2.63

Σε σταθερές συνθήκες η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης εφαρμόζεται πάνω από το χαρακτηριστικό ύψος ή θερμοκλίνη

- Ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας ή ελεύθερη ή φυσική μεταφορά. Κριτήριο κατά τη Monin-Obukhov θεωρία ομοιότητας (similarity



theory): $|Ri| > 1$ όπου Ri ο πυκνομετρικός αριθμός Richardson σε διαφορετικά ύψη που δίνεται από την εξίσωση 2.68

- σε σταθερές συνθήκες ($\frac{\partial \rho}{\partial z} < 0$ λόγω θερμικής διαστρωμάτωσης $\frac{\partial T}{\partial z} > 0$) υφίσταται σε ύψη κάτω από το χαρακτηριστικό ύψος ή θερμοκλίνη, που δίνεται από την εξίσωση 2.63

Για βυθισμένες πηγές εφαρμόζεται το μοντέλο κοντινής περιοχής μέχρι το ύψος της θερμοκλίνης

□ Διεύθυνση ροής

- μονοδιάστατης μετατόπισης κατά τη διεύθυνση ροής και μονοδιάστατης διάχυσης εγκάρσια στη ροή κατά τον άξονα γραμμικής πηγής πεπερασμένου μήκους (εξίσωση 2.54) με αναλυτική λύση την εξίσωση 2.55 και μέγιστες συγκεντρώσεις στο άξονα που περνά από το μέσο της γραμμικής πηγής κατά τη διεύθυνση ροής σύμφωνα με τις εξισώσεις 2.57 και 2.58
- μονοδιάστατης μετατόπισης και μονοδιάστατης διάχυσης στη ίδια διεύθυνση από σημειακή πηγή στο μέσο της λίμνης (εξίσωση 2.73) με αναλυτική λύση την 2.74
- τρισδιάστατη διάχυση από σημειακή πηγή στο κέντρο της λίμνης με αναλυτική λύση την εξίσωση 2.11 (για στάσιμα νερά)

□ Καθαρές πλευρικές ροές

Δεν αναφέρονται στο Κεφάλαιο 2

□ Χαρακτηριστικά επιφάνειας ροής

- Τραχύτητα η οποία εκφράζεται με τον συντελεστή Manning που δίνεται σε πίνακες όπως ο Πίνακας 2.1

Στο υπομοντέλο ροής η μέση ταχύτητα νερού υπολογίζεται με την εξίσωση Manning 2.106 με τη βοήθεια του συντελεστή Manning για ομοιόμορφη ροή

□ Μεταβολές επιφάνειας ροής

- Απότομες μεταβολές. Κριτήριο: αλλαγή του βάθους της λίμνης
Από τη τιμή του αριθμού Froude για το νέο βάθος της λίμνης κρίνεται αν υφίσταται μεταφορά ή όχι.



Το βάθος της λίμνης έχει επίδραση τόσο στο συντελεστή εγκάρσιας τυρβώδους διάχυσης όσο και στο συντελεστή διαμήκου διάχυσης της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης μέσα από τις σχέσεις 2.83-2.86

- Σταδιακές μεταβολές. Κριτήριο: αλλαγή της κλίσης του βυθού της λίμνης
Η κλίση του βυθού επηρεάζει τη τιμή της μέσης ταχύτητας του νερού της λίμνης

➤ Υπομοντέλο ροής κοντινής περιοχής:

- ❖ εξίσωση συνέχειας πλουμίου κοντινής περιοχής (γενική μορφή 2.12)
- ❖ εξίσωση ενέργειας ή άνωσης πλουμίου κοντινής περιοχής (γενική μορφή 2.14)
- ❖ εξίσωση ορμής πλουμίου κοντινής περιοχής (γενική μορφή 2.13)
- ❖ εξίσωση συνέχειας ρύπου κοντινής περιοχής (γενική μορφή 2.31)

Χαρακτηριστικά που επιδρούν άμεσα στο υπομοντέλο ροής κοντινής περιοχής και έμμεσα στο μοντέλο ποιότητας λίμνης:

□ Είδος πλουμίου κοντινής περιοχής

- Καθαρό πλούμιο. Κριτήριο: $R_o = 8\alpha/5$ ή $R_{o_d} = 1$, όπου R_o ο αρχικός αριθμός Richardson πλουμίου κοντινής περιοχής στο στόμιο της πηγής που δίνεται από τη σχέση 2.21, α η σταθερά παράσυρσης πλουμίου και R_{o_d} ο σχετικός αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Richardson πλουμίου κοντινής περιοχής στο στόμιο της πηγής ως προς τη ροή του νερού

- σε ασταθείς ή ουδέτερες συνθήκες

Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος πλουμίου σε εγκάρσια ροή νερού δίνεται από την εξίσωση 2.40

Για επιφανειακή πηγή, το μήκος πλουμίου σε εγκάρσια ροή δίνεται από την εξίσωση 2.50

- σε σταθερές συνθήκες

Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος πλουμίου σε σταθερές συνθήκες αποδέκτη (διαστρωμάτωση) δίνεται από την εξίσωση 2.42



Για γραμμική βυθισμένη πηγή, το μήκος πλουμίου σε εγκάρσια ροή με διαστρωμάτωση δίνεται από την εξίσωση 2.47

Για γραμμική βυθισμένη πηγή, το μήκος πλουμίου σε διαστρωμάτωση δίνεται από τις ισοδύναμες εξισώσεις 2.46, 2.34 και 2.36

- Καθαρή εκτόξευση. Κριτήριο $J_o = 0$ ή $\beta_o = 0$, όπου J_o ή β_o η αρχική ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας στο στόμιο πηγής και υπολογίζεται από τους αντίστοιχους τύπους του Πίνακα 2.1
 - σε ασταθείς ή ουδέτερες συνθήκες

Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος εκτόξευσης σε εγκάρσια ροή νερού δίνεται από την εξίσωση 2.39

Για γραμμική βυθισμένη πηγή, το μήκος εκτόξευσης σε εγκάρσια ροή δίνεται από την εξίσωση 2.44

Για επιφανειακή πηγή, το μήκος εκτόξευσης σε εγκάρσια ροή δίνεται από την εξίσωση 2.49
 - σε σταθερές συνθήκες

Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος εκτόξευσης σε διαστρωμάτωση δίνεται από την εξίσωση 2.41

Για γραμμική βυθισμένη πηγή, το μήκος εκτόξευσης σε διαστρωμάτωση δίνεται από την εξίσωση 2.45
- Εξαναγκασμένο πλούμιο. Κριτήρια: $R_o < 8\alpha/5$ ή $R_{o_d} < 1$, όπου R_o ο αρχικός αριθμός Richardson πλουμίου κοντινής περιοχής στο στόμιο της πηγής που δίνεται από τη σχέση 2.21, α η σταθερά παράσυρσης πλουμίου και R_{o_d} ο σχετικός αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Richardson πλουμίου κοντινής περιοχής στο στόμιο της πηγής ως προς τη ροή του νερού και $J_o \neq 0$ ή $\beta_o \neq 0$, όπου J_o ή β_o αρχική ροή κινηματικής στο στόμιο της πηγής
 - σε ασταθείς ή ουδέτερες συνθήκες

Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος μετάβασης εκτόξευσης σε πλούμιο δίνεται από την εξίσωση 2.38

Για γραμμική βυθισμένη πηγή, το μήκος μετάβασης εκτόξευσης σε πλούμιο δίνεται από την εξίσωση 2.43



Για επιφανειακή πηγή, το μήκος μετάβασης εκτόξευσης σε πλούμιο δίνεται από την εξίσωση 2.48

- σε σταθερές συνθήκες

Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος μετάβασης εκτόξευσης σε πλούμιο δίνεται από την εξίσωση 2.38

Για γραμμική βυθισμένη πηγή, το μήκος μετάβασης εκτόξευσης σε πλούμιο δίνεται από την εξίσωση 2.43

Για επιφανειακή πηγή, το μήκος μετάβασης εκτόξευσης σε πλούμιο δίνεται από την εξίσωση 2.48

- Τα παραπάνω τρία (3) είδη ροής κοντινής περιοχής επιδρούν στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης με μία τελική ανύψωση της κατακόρυφης συντεταγμένης της βυθισμένης συνήθως πηγής (ανύψωση πλουμίου). Για να εφαρμοστεί μοντέλο ποιότητας στο σημείο τελικής ανύψωσης πρέπει αυτό να βρίσκεται πάνω από τη θερμοκλίνη αλλιώς το πλούμιο εγκλωβίζεται σε σύννεφο όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.2 και 2.3

- Συνθήκες ροής νερού λίμνης

- σε λίμνη με θερμική διαστρωμάτωση (σταθερές συνθήκες)

Η προσέγγιση Boussinesq για το πλούμιο κοντινής περιοχής ως προς τη ροή του ρευστού δίνεται από τη σχέση 2.19, όπου $\rho_\infty \neq \rho_0$ και ρ_∞ είναι η πυκνότητα ισορροπίας νερού και πλουμίου ρύπανσης (στο όριο κοντινής περιοχής), ρ_0 πυκνότητα αποδέκτη έξω από το πλούμιο σε κάποιο επίπεδο και ρ πυκνότητα πλουμίου στο ίδιο επίπεδο.

Όταν η προσέγγιση Boussinesq αφορά ολόκληρο τον υδάτινο αποδέκτη τότε οι παραπάνω πυκνότητες παίρνουν τιμές ορίων αποδέκτη δηλ. ρ_0 πυκνότητα αποδέκτη στο επίπεδο του στομίου της πηγής και ρ πυκνότητα πλουμίου στο στόμιο της πηγής

Στην εξίσωση ενέργειας κοντινής περιοχής 2.14, στην παράμετρο σταθερότητας συνθηκών $\frac{gd\rho_0}{\rho_1 dz}$, ρ_1 είναι η πυκνότητα αποδέκτη στο επίπεδο του στομίου της πηγής και $d\rho_0$ η διαφορά πυκνότητας του πλουμίου (η οποία διαφοροποιείται κατά z) από την πυκνότητα ι-



σορροπίας με τον αποδέκτη (σύμφωνα με τη σχέση Boussinesq 2.19)

- σε ουδέτερες ή ασταθείς ατμοσφαιρικές συνθήκες
Στην εξίσωση ενέργειας κοντινής περιοχής 2.14, η παράμετρος σταθερότητας συνθηκών $\frac{gd\rho_0}{\rho_1 dz}$ μηδενίζεται και η ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας μέσα στο πλούμιο θεωρείται σταθερή κατά το ύψος ($\frac{dF}{dz} = 0$)

□ Χαρακτηριστικά πηγής

▪ Σημείο έκλυσης

- Όλοι οι τύποι αγωγών/καναλιών αποβλήτων θεωρούνται σημειακές πηγές με σημείο έκλυσης (release) που βρίσκεται στο μέσο της διατομής στην έξοδο του αγωγού/καναλιού στον επιφανειακό αποδέκτη.
- Οι πολυσκεδαστήρες πεπερασμένου μήκους (βλέπε Σχήμα 2.1) θεωρούνται γραμμικές πηγές (γραμμή έκλυσης) με τον άξονα διεύθυνσης ροής ρευστού να περνάει από το κέντρο της γραμμικής πηγής. (βλέπε Σχήμα 2.10)

- Ανάντη διείδυση. Κριτήριο $Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g'L}} < 1$, όπου Fr_d ο σχετικός πυκνομετρικός αριθμός Froude ροής αποβλήτων υπολογισμένος στην έξοδο αγωγού, g' η προσαρμοσμένη στις συνθήκες ροής διόρθωση Boussinesq και U η σχετική ταχύτητα των αποβλήτων ως προς τη ροή του νερού

Επιδρά στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης με πτώση πλουμίου δηλ. με μείωση της κατακόρυφης συντεταγμένης της σημειακής πηγής κατά ύψος z_s για βυθισμένη πηγή

- Συνεχής (μη πεπερασμένη) πηγή. Κριτήριο η πηγή εκλύει συνεχώς (για πάντα) ρύπο
- Σταθερή πηγή. Κριτήριο δεν αλλάζει με το χρόνο η συγκέντρωση έκλυσης του ρύπου (C_0)



Χαρακτηριστικά που επιδρούν άμεσα στο μοντέλο ποιότητας λίμνης:



- Ως προς τα χαρακτηριστικά του ρύπου
 - Κατανάλωση-αποικοδόμηση πρώτης τάξης. Κριτήριο $\frac{dC}{dt} = -kC$ όπου k σταθερά αποικοδόμησης πρώτης τάξης (s^{-1}) και C η συγκέντρωση του ρύπου
 - Στο δεξιό σκέλος της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης μπαίνει ο όρος $-kC$ (εξισώσεις 2.54 και 2.73)
Ο όρος αποικοδόμησης (κατανάλωσης) συμπεριλαμβάνεται στις αναλυτικές λύσεις της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης για BOD (εξίσωση 2.77) και για DO (εξίσωση 2.78)
 - Παραγωγή πρώτης τάξης. Κριτήριο $\frac{dC}{dt} = k_m C_m$ όπου k_m σταθερά παραγωγής πρώτης τάξης (s^{-1}) και C_m συγκέντρωση του πατρικού συστατικού του ρύπου.
 - Στο δεξιό σκέλος της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης μπαίνει ο όρος $+k_m C_m$
Ο όρος παραγωγής συμπεριλαμβάνεται στην αναλυτική λύση της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης για DO (εξίσωση 2.78)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΑΠΟΔΕΚΤΩΝ

9.1. ΔΟΜΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΑΠΟΔΕΚΤΩΝ

Το μοντέλο ποιότητας αέρα ή επιφανειακού ή υπόγειου νερού αποτελείται βασικά από μία εξίσωση:

- Την εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης (advection-diffusion)

Το μοντέλο ποιότητας παίρνει δεδομένα από δυο ανεξάρτητα υπομοντέλα ροής (κοντινής και μακρινής περιοχής) και ενσωματώνει ένα «υπομοντέλο» που αφορά τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του ρύπου όπως φαίνεται στη δενδροειδή κάθετη δομή του Σχήματος 9.1.

Για τους σκοπούς της παρούσης εργασίας η παρουσίαση των τριών υπομοντέλων που επηρεάζουν παράλληλα και ανεξάρτητα μεταξύ τους την εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης γίνεται κάθετα (καθετοποίηση). Στο τίτλο της παρούσης εργασίας γίνεται αναφορά σε καθετοποιημένη δομή, η οποία αποτελεί απεικόνιση σε μία στοίβα οριζόντιων επιπέδων (γραμμών) της κάθετης δενδροειδούς στην πραγματικότητα δομής του αναλυτικού μοντέλου ποιότητας.

Η κοινή καθετοποιημένη δομή του αναλυτικού μοντέλου ποιότητας για όλους τους φυσικούς αποδέκτες σύμφωνα με τα Κεφάλαια 1, 2 και 3 είναι:

- ➔ Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του ρύπου τα οποία ενσωματώνονται στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης (πλούμιο μακρινής περιοχής)
- ➔ Το (υπο)μοντέλο ροής ρευστού (μακρινής περιοχής) το οποίο αποτελείται από τρεις εξισώσεις, οι οποίες στη μορφή μερικών διαφορικών εξισώσεων είναι οι γνωστές εξισώσεις Navier-Stokes:
 - Εξίσωση συνέχειας (μάζας) ρευστού
 - Εξίσωση ορμής ρευστού
 - Εξίσωση ενέργειας ρευστού
- ➔ Το (υπο)μοντέλο ροής (πλουμίου) κοντινής περιοχής το οποίο αποτελείται από 4 εξισώσεις
 - Εξίσωση συνέχειας (μάζας) πλουμίου κοντινής περιοχής
 - Εξίσωση ορμής πλουμίου κοντινής περιοχής
 - Εξίσωση ενέργειας πλουμίου κοντινής περιοχής
 - Εξίσωση συνέχειας (μάζας) ρύπου κοντινής περιοχής



Γενικά το μοντέλο ποιότητας παίρνει αριθμητικά δεδομένα από τα υπομοντέλα ροής ή/και επηρεάζεται έμμεσα από τους παράγοντες που επηρεάζουν τα δυο υπομοντέλα ροής και είναι διαφορετικοί για το καθένα.

Το υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής επηρεάζεται από:

- ↳ το είδος της ροής του ρευστού
 - Ασυμπίεστη
 - Μόνιμη
 - Στρωτή ή τυρβώδης
 - Ιξώδης ή μη ιξώδης
 - Ομοιόμορφη
 - Μεταφορά
- ↳ τη διεύθυνση ροής του ρευστού
- ↳ την ύπαρξη ή όχι καθαρών πλευρικών ροών ρευστού
- ↳ τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας ροής
- ↳ τις μεταβολές της επιφάνειας ροής

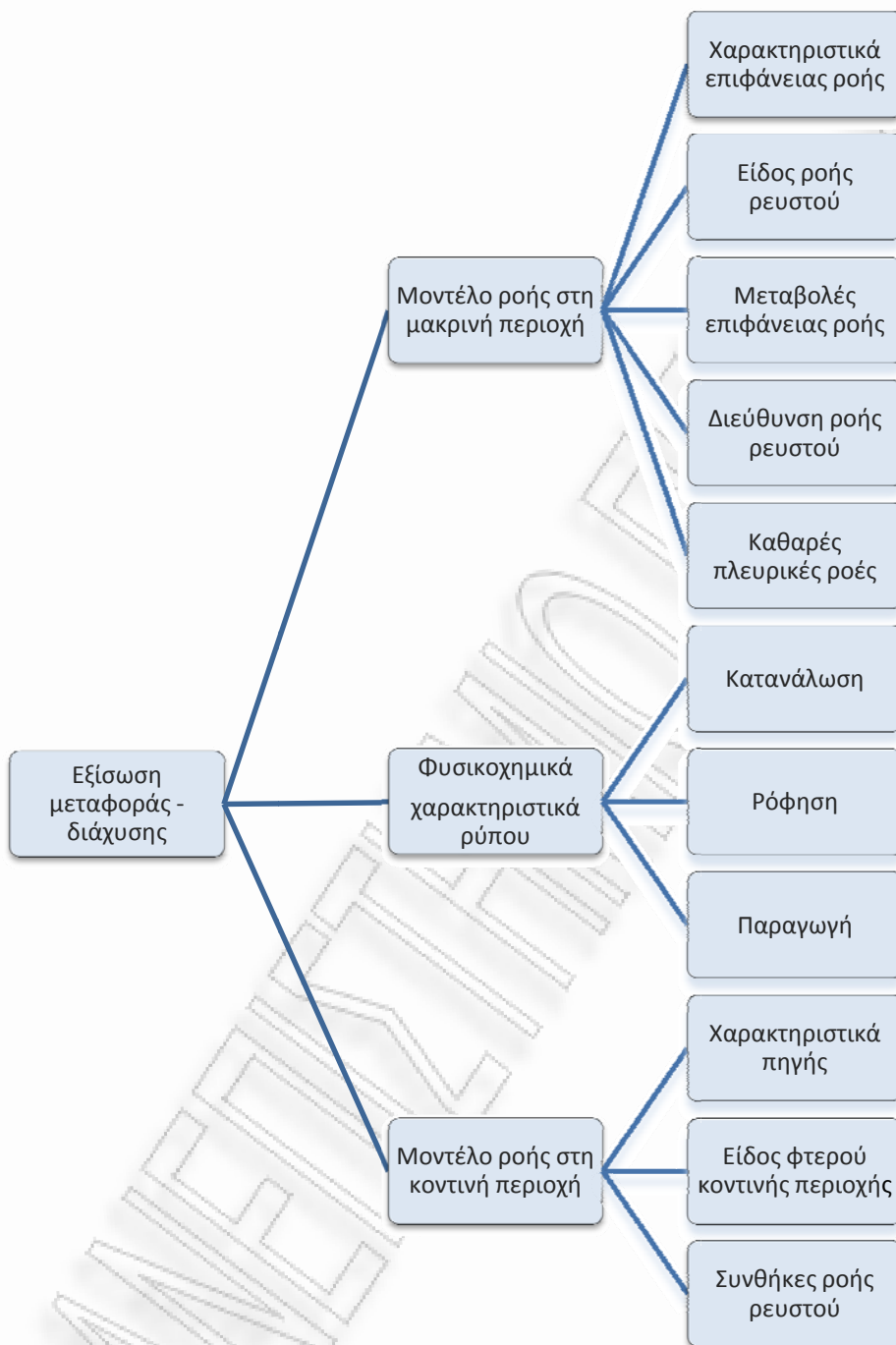
Το υπομοντέλο ροής στη κοντινή περιοχή επηρεάζεται από:

- ↳ το είδος πλουμίου κοντινής περιοχής
 - Καθαρό πλούμιο
 - Καθαρή εκτόξευση
 - Εξαναγκασμένο πλούμιο (εκτόξευση λόγω διαφοράς πυκνότητας)
- ↳ τα χαρακτηριστικά της πηγής ρύπανσης
 - Σημείο έκλυσης
 - Ανάντη διείδυση
 - Σταθερή πηγή
 - Μη πεπερασμένη πηγή
- ↳ τις συνθήκες ροής του αποδέκτη

Το υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής αφορά αποκλειστικά το ρευστό (αέρα ή νερό) του αποδέκτη και δεν λαμβάνει υπόψη καθόλου τον ρύπο.

Το υπομοντέλο ροής κοντινής περιοχής αφορά τη ροή των αποβλήτων μέσα στη ροή του ρευστού κοντά στη πηγή δηλ. το πλούμιο κοντινής περιοχής, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του ρύπου.





Σχήμα 9.1. Κοινή καθετοποιημένη δομή αναλυτικών μοντέλων ποιότητας φυσικών αποδεκτών

Στην περίπτωση των επιφανειακών νερών οι 4 εξισώσεις του υπομοντέλου ροής κοντινής περιοχής επιλύονται σύμφωνα με τις παραδοχές πλουμίου κοντινής περιοχής και εξισώσεις 2.15–2.19 του Κεφαλαίου 2 σελ.37–38.



Το μοντέλο ποιότητας αποδέκτη (εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης) όπως και το υπομοντέλο ροής ρευστού αφορούν τη μακρινή περιοχή ή περιοχή παθητικής διάχυσης του αποδέκτη, όπου η διάχυση και μεταφορά του διαλυμένου ρύπου οφείλεται αποκλειστικά στη ροή του ρευστού. Η αναλυτική λύση της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης, η μόνη εξίσωση η οποία λαμβάνει υπόψη τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του ρύπου, εκφράζει το πλούμιο (ροή αποβλήτων σε ροή ρευστού) μακρινής περιοχής. Στην περίπτωση του αέρα η αναλυτική λύση της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης επιλύεται σύμφωνα με τις παραδοχές πλουμίου (μακρινής περιοχής) και σχέσεις 1.12α και 1.12β του Κεφαλαίου 1 σελ. 9–10.

9.2 ΕΞΙΣΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ–ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΣΤΟΥΣ ΦΥΣΙΚΟΥΣ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ

Η εξίσωση μεταφοράς–διάχυσης του μοντέλου ποιότητας φυσικού αποδέκτη συμπεριλαμβάνει τους εξής φυσικούς μηχανισμούς:

- ❖ Μεταφορά (advection) που οφείλεται στη κίνηση του ρευστού (δυναμική ιδιότητα)
- ❖ Διάχυση (diffusion) που οφείλεται σε
 - Μοριακή κίνηση Brown και λέγεται μηχανική διάχυση Fick
 - Τυρβώδη κίνηση ή στροβιλισμούς δηλ. τυρβώδη διάχυση η οποία οφείλεται κυρίως στην υδροδυναμική διάχυση λόγω μεταβολών στη διεύθυνση της κίνησης του ρευστού και λιγότερο στη μοριακή διάχυση. Αν η μοριακή διάχυση θεωρηθεί αμελητέα οι συντελεστές τυρβώδους και υδροδυναμικής διάχυσης ταυτίζονται στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης.

Να αναφέρουμε ότι ο όρος μεταφορά στην παρούσα ενότητα είναι καταχρηστικός. Όπως θα δούμε και στην Ενότητα 10.1.5 η μεταφορά συμπεριλαμβάνει και τη μετατόπιση και τη διάχυση της μάζας και της θερμότητας. Η ορθότερη μετάφραση του ονόματος της εξίσωσης του μοντέλου ποιότητας είναι μετατόπιση–διάχυση, αλλά για λόγους ευφωνίας η ελληνική λέξη μεταφορά χρησιμοποιείται τόσο για τη μετάφραση του γενικότερου όρου convection (μεταφορά), όσο και για τη μετάφραση του ειδικότερου όρου advection (μετατόπιση) που αφορά την παρούσα ενότητα.



Να αναφέρουμε ότι ο όρος «διασπορά» αφορά σε διάδοση κυμάτων γενικά. Συνήθως ο όρος «διασπορά» χρησιμοποιείται αντί για τον όρο «διάχυση» όταν θεωρούμε ότι η διάχυση του ρύπου ακολουθεί την κανονική στατιστική κατανομή (Gauss) – βλέπε παραδοχές πλουμίου (μακρινής περιοχής) και σχέσεις 1.12α και 1.12β του Κεφαλαίου 1 σελ. 9–10 για τον εγκάρσιο και κατακόρυφο συντελεστή διάχυσης ρύπου στον αέρα. Στην παρούσα εργασία θα επιμείνουμε στον ορθότερο όρο «διάχυση» για όλους τους αποδέκτες.

Στην εξίσωση μεταφοράς–διάχυσης για όλους τους αποδέκτες (συνεπτυγμένη και πλήρης μορφή 3.11) μπορεί για πολύ μικρό αριθμό Peclet (εξίσωση 3.1 υπολογισμού αριθμού Peclet μάζας) να αγνοηθεί η μετατόπιση δηλ. ο όρος $V_i \frac{\partial C_\ell}{\partial x_i}$ όπου V_i ταχύτητες ρευστού σε κάθε διεύθυνση x_i (m/s) και C_ℓ η συγκέντρωση του συστατικού ℓ (mg/L) και να μείνει μόνο ο όρος της διάχυσης $\frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C_\ell}{\partial x_j} \right)$ όπου D_{ij} συντελεστές τυρβώδους διάχυσης (m^2/s).

Η εξίσωση διάχυσης (χωρίς μετατόπιση) είναι ο 2^{ος} νόμος του Fick (εξίσωση 3.19 γενική διατύπωση 2^{ου} νόμου του Fick και για τις τρεις διαστάσεις και 3.22 2^{ος} μονοδιάστατος νόμος Fick κατά τη διεύθυνση ροής με αναλυτική λύση την 3.23) γεγονός που ισχύει για μηδενικές ταχύτητες ρευστού (π.χ. στα υπόγεια νερά και στις λίμνες). Σε αυτές τις περιπτώσεις το υπομοντέλο ροής ρευστού δεν χρειάζεται δεδομένου ότι η ταχύτητα ροής ρευστού είναι μηδενική.

Τα αναλυτικά μοντέλα ποιότητας για όλους τους φυσικούς αποδέκτες είναι μόνιμων συνθηκών.

Στα υπόγεια νερά και στα επιφανειακά νερά η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης επιλύεται για μόνιμες συνθήκες $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$.

Στον αέρα η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης επιλύεται για μόνιμες συνθήκες $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$, αλλά επειδή δε νοούνται μόνιμες συνθήκες ροής αέρα παράγονται συνήθως αποτελέσματα τελικού μόνιμου πλουμίου μακρινής περιοχής από μέσες ωριαίες τιμές δεδομένων για τη ροή του αέρα (μετεωρολογικά δεδομένα). Δηλαδή υπολογίζονται μόνιμες μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις ρύπου στον αποδέκτη οι οποίες θεωρείται ότι υφίστανται μέσα στο αντίστοιχο ωριαίο διάστημα ακαριαία (χωρίς να λαμβάνεται υπόψη καμία καθυστέρηση).



Επισημαίνεται ότι η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης με προσαρμογή της συγκέντρωσης του ρύπου σε μονάδες μάζας παίρνει τη μορφή ισοζυγίου μάζας για το συστατικό/ρύπο σε μη στατικό ρευστό.

Η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης εφαρμόζεται σε καθαρό αποδέκτη δηλ. η συγκέντρωση του ρύπου στον αποδέκτη οφείλεται αποκλειστικά στη πηγή για την οποία εφαρμόζεται το μοντέλο ποιότητας.

Εκτός από τους όρους μεταφοράς (μετατόπιση και διάχυση) η εξίσωση του μοντέλου ποιότητας αποδέκτη συμπεριλαμβάνει και επιπλέον όρους που έχουν να κάνουν με τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του ρύπου. Στα Κεφάλαια 1, 2 και 3 της παρούσας εργασίας αναφέρονται μόνο όροι σχετικά με τις εξής τρεις φυσικοχημικές ιδιότητες από τις πολλές που θα μπορούσε να έχει ένα συστατικό (ρύπος):

- κατανάλωση-αποικοδόμηση
- παραγωγή
- ρόφηση

9.2.1. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ-ΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗ

Η κατανάλωση του ρύπου εκφράζεται με έναν αρνητικού πρόσημου όρο, ο οποίος προστίθεται στο δεξιό σκέλος της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης.

Αέρας

Ο όρος κατανάλωσης παίρνει την απλούστερη μορφή του $-KC$ όπου K ή k η σταθερά αποικοδόμησης (πρώτης τάξης) του ρύπου (s^{-1}) και C η συγκέντρωση του ρύπου. Η εξίσωση 1.6 γενική μορφή τρισδιάστατης εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης συμπεριλαμβάνει αντίστοιχο όρο κατανάλωσης R και η εξίσωση 1.10 συμπεριλαμβάνει αντίστοιχο όρο κατανάλωσης (αλλά και παραγωγής) S . Γενικά στις αναλυτικές λύσεις της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης του Κεφαλαίου 1 δε λαμβάνεται υπόψη η αποικοδόμηση του ρύπου. Όταν λαμβάνεται υπόψη η αποικοδόμηση, στη λύση της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης ο αδιάστατος όρος $D = e^{-kt}$ πολλαπλασιάζεται με το ρυθμό εκπομπής ρύπου Q (g/s) όπως φαίνεται στην αναλυτική λύση 1.24 που λαμβάνει υπόψη και αναστροφή ύψους z_i και αποικοδόμηση πρώτης τάξης.

Επιφανειακά νερά



Ο όρος κατανάλωσης παίρνει την απλούστερη μορφή του $-KC$, όπου K η σταθερά αποικοδόμησης (πρώτης τάξης) του ρύπου (s^{-1}) και C η συγκέντρωση του ρύπου. Η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης 2.54 που εφαρμόζεται για γραμμική πηγή πεπερασμένου μήκους σε θάλασσα ή μεγάλη λίμνη περιλαμβάνει τον όρο κατανάλωσης $-kC$. Ομοίως η μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης 2.73. Ομοίως η μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης BOD 2.77 και η πολυπλοκότερη μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης ελλείμματος διαλυμένου οξυγόνου DO 2.78. Στη τελευταία εξίσωση ο όρος κατανάλωσης είναι ο $-K_2DO$ όπου K_2 η σταθερά αερισμού (day^{-1}) παίζει το ρόλο σταθεράς αποικοδόμησης και DO έλλειμμα διαλυμένου οξυγόνου (συγκέντρωση κορεσμού μείον συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου).

Υπόγειο νερό

Ο όρος κατανάλωσης είναι πιο πολύπλοκος $-\phi_e Q_\ell \lambda_{\ell,s} C_\ell$ όπου ϕ_e ενεργό πορώδες υπόγειου υδροφόρου στρώματος (αδιάστατο), Q_ℓ παράγοντας διόρθωσης (αδιάστατος) που λαμβάνει υπόψη τη ροφημένη φάση του συστατικού ℓ ($Q_\ell = R_{\ell,s}$ για γραμμική ισόθερμη ροφήση, όπου $R_{\ell,s}$ παράγοντας καθυστέρησης επίσης αδιάστατος), $\lambda_{\ell,s}$ σταθερά αποικοδόμησης (πρώτης τάξης) του ℓ (s^{-1}) και C_ℓ συγκέντρωση συστατικού ℓ (mg/L). Ο όρος κατανάλωσης συμπεριλαμβάνεται στην πλήρη τρισδιάστατη εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης ρύπου σε υπόγειο υδροφόρο στρώμα 3.11, στη μονοδιάστατη ως προς τη ροή και τρισδιάστατη ως προς τη διάχυση 3.68 και στη μονοδιάστατη 3.24. Μόνο στην αναλυτική λύση 3.27 της μονοδιάστατης με παράγοντα καθυστέρησης εξίσωσης 3.26 συμπεριλαμβάνεται η σταθερά αποικοδόμησης ρύπου πρώτης τάξης.

9.2.2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Αντίθετα με την κατανάλωση ο όρος παραγωγής του ρύπου έχει θετικό πρόσημο και προστίθεται στο δεξιό σκέλος της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης.

Αέρας

Ο όρος παραγωγής παίρνει την απλούστερη μορφή του $+K_m C_m$ όπου K_m η σταθερά αντίδρασης (πρώτης τάξης) παραγωγής του ρύπου από το πατρικό του συστατικό m και C_m η συγκέντρωση του πατρικού συστατικού του ρύπου. Ο όρος παραγωγής δεν λαμβάνεται υπόψη πουθενά στο Κεφάλαιο 1 παρά μόνο στην



εξίσωση 1.6 γενική μορφή τρισδιάστατης εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης με τον όρο S και στην εξίσωση 1.10 πάλι με τον όρο S .

Επιφανειακά νερά

Επειδή ο όρος παραγωγής συμπεριλαμβάνει συγκέντρωση άλλου συστατικού (πατρικό) από το συστατικό για το οποίο εφαρμόζεται (παραγόμενο) η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης, χρειάζεται και η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης για το πατρικό συστατικό. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του ελλείμματος διαλυμένου οξυγόνου DO που παράγεται από το πατρικό BOD.

Η μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης ελλείμματος διαλυμένου οξυγόνου DO 2.78 περιλαμβάνει τον όρο παραγωγής $+kL_x$ όπου L_x συγκέντρωση BOD στο σημείο x (mg/L) και k σταθερά βιοχημικής οξείδωσης οργανικού φορτίου BOD (day^{-1}). Επιλύεται σε συνδυασμό με τη μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης BOD 2.77 με αναλυτική λύση την 2.80 που υπολογίζει τη κατάντη συγκέντρωση του ελλείμματος διαλυμένου οξυγόνου DO μέσω της 2.79 που υπολογίζει τη κατάντη συγκέντρωση BOD.

Υπόγειο νερό

Ο όρος παραγωγής είναι το ίδιο πολύπλοκος με τον όρο κατανάλωσης $\phi_e \sum_{m=1}^M \xi_{\ell m} Q_m \lambda_{m,s} C_m$ όπου M το πλήθος πατρικών συστατικών m του ρύπου, $\xi_{\ell m}$ σταθερά αντίδρασης του m προς παραγωγή ℓ , Q_m συντελεστής διόρθωσης για τη ροφημένη φάση του πατρικού συστατικού (αδιάστατος), ϕ_e ενεργό πορώδες του υπόγειου υδροφόρου στρώματος (αδιάστατο), $\lambda_{m,s}$ σταθερά αποικοδόμησης (πρώτης τάξης) του πατρικού συστατικού του ρύπου και C_m συγκέντρωση συστατικού m (mg/L). Ο όρος παραγωγής συμπεριλαμβάνεται στην πλήρη τρισδιάστατη εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης ρύπου σε υπόγειο υδροφόρο στρώμα 3.11 και στη μονοδιάστατη ως προς τη ροή και τρισδιάστατη ως προς τη διάχυση 3.68.

9.2.3. ΡΟΦΗΣΗ

Υπόγειο νερό

Η ρόφηση αναφέρεται μόνο στο Κεφάλαιο 3 για το υπόγειο νερό. Πρόκειται συνήθως για γραμμική ισόθερμη ρόφηση δηλ. για μοντέλο γρήγορης προσρόφησης –και στιγμιαίες αντιδράσεις. Στα Σχήματα 3.6 και 3.7 γίνεται σύγκριση του γραμμικού με τα ισοθερμικά διαγράμματα ισορροπίας συγκέντρωσης ροφη-



μένου συστατικού στη στερεή φάση και συγκέντρωσης στο διάλυμα κατά Freundlich και κατά Langmuir. Η γραμμική ισόθερμη ρόφηση περιγράφεται μαθηματικά από την 3.41 που υπολογίζει το συντελεστή κατανομής ρύπου σε έδαφος και νερό. Ο παράγοντας καθυστέρησης συστατικού για γραμμική ισόθερμη προσρόφησή του σε πορώδες υλικό υπολογίζεται με τις εξισώσεις 3.18, 3.46 και 3.69 που είναι ίδιες μεταξύ τους.

Κατά πρώτο η ρόφηση λαμβάνεται υπόψη με τον παράγοντα καθυστέρησης $R_{\ell,s}$ του ρύπου στον όρο $\phi_e R_{\ell,s} \frac{\partial c_\ell}{\partial t}$ της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης όπου ϕ_e το ενεργό πορώδες του υπόγειου υδροφόρου στρώματος.

Κατά δεύτερο, όταν στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης υπάρχουν οι δύο (ή ο ένας από τους δύο) όρους παραγωγής και κατανάλωσης-αποικοδόμησης του ρύπου η ρόφηση λαμβάνεται υπόψη με τον παράγοντα διόρθωσης αντίστοιχης ροφημένης φάσης (Q_ℓ του ρύπου στην περίπτωση κατανάλωσης και Q_m του πατρικού του ρύπου συστατικού στην περίπτωση παραγωγής).

Στη συνήθη περίπτωση που η ρόφηση θεωρείται γραμμική ισόθερμη ο παράγοντας διόρθωσης ροφημένης φάσης του ρύπου Q_ℓ ισούται με τον παράγοντα καθυστέρησης $R_{\ell,s}$ του ρύπου σύμφωνα με τη σχέση 3.46.

Η ρόφηση συμπεριλαμβάνεται στην πλήρη τρισδιάστατη εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης 3.11, στη μονοδιάστατη ως προς τη ροή και τρισδιάστατη ως προς τη διάχυση 3.68, στην μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης 3.24 όπου έχει γίνει αντικατάσταση του παράγοντα καθυστέρησης από την εξίσωση 3.18 και στη μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης 3.26. Προφανώς στην 3.26 με αναλυτική λύση την 3.27, στον παράγοντα καθυστέρησης R έχει συμπεριληφθεί και το αδιάστατο ενεργό πορώδες ϕ_e .



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10. ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΡΟΗΣ ΡΕΥΣΤΟΥ (ΜΑΚΡΙΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ) ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΦΥΣΙΚΟΥΣ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ

10.1. ΕΙΔΟΣ ΡΟΗΣ ΡΕΥΣΤΟΥ

10.1.1. ΑΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΡΟΗ

Ενώ τα ρευστά είναι λίγο πολύ συμπιεστά, σε όλα τα αναλυτικά μοντέλα ποιότητας φυσικού αποδέκτη των Κεφαλαίων 1, 2 και 3 η ροή του αέρα και του νερού θεωρείται ασυμπίεστη, δηλ. οι μεταβολές στη πίεση και θερμοκρασία μέσα στα όρια του συστήματος του μοντέλου ποιότητας θεωρούνται τόσο μικρές που οι μεταβολές στη πυκνότητα των δυο ρευστών από αυτά τα αίτια είναι αμελητέες (μηδενικές).

Η παραδοχή της ασυμπίεστης ροής $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ απλουστεύει τις τρεις εξισώσεις Navier-Stokes συνέχειας ορμής και ενέργειας για τα δυο Νευτώνεια ρευστά (αέρα, νερό).

Υπάρχει ανοχή για πολύ μικρές μεταβολές στη πυκνότητα του ρευστού ($\Delta\rho/\rho \leq 0,1$) (διόρθωση Boussinesq βλέπε Ενότητα 10.1.5.1. για ελεύθερη μεταφορά μακρινής περιοχής και 11.3 για επίδραση συνθηκών ροής στο πλούμιο κοντινής περιοχής). Η ανισότητα εξασφαλίζει ότι:

- ✓ οι μεταβολές στην πυκνότητα οφείλονται σε διαφορά θερμοκρασίας
- ✓ η συνολική ροή του ρευστού παραμένει ασυμπίεστη

10.1.2. ΜΟΝΙΜΗ ΡΟΗ

Η ροή των δυο ρευστών σε όλα τα αναλυτικά μοντέλα ποιότητας φυσικού αποδέκτη των Κεφαλαίων 1, 2 και 3, θεωρείται μόνιμη (ή μόνιμων συνθηκών). Η παραδοχή μόνιμης ροής απλουστεύει την εξίσωση συνέχειας και ενέργειας με την αντικατάσταση $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$ δηλ. δεν υπάρχει συσσώρευση στο σύστημα και την εξίσωση ορμής του υπομοντέλου ροής ρευστού με την αντικατάσταση $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$. Για παράδειγμα στο Κεφάλαιο 2 για επιφανειακά νερά τόσο η τρισδιάστατη εξίσωση συνέχειας 2.1, όσο και η μονοδιάστατη εξίσωση συνέχειας 2.2 και ενέργειας (Bernoulli) 2.3 ισχύουν για μόνιμη ροή. Επίσης στο Κεφάλαιο 3 για



υπόγεια νερά η τρισδιάστατη εξίσωση συνέχειας 3.4 και ο συνδυασμός της με το νόμο Darcy 3.5 ισχύουν για μόνιμη ροή.

10.1.3. ΣΤΡΩΤΗ Η ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΡΟΗ

Ο αριθμός Reynolds's κατατάσσει τη ροή του ρευστού σε τυρβώδη ή στρωτή. Οι εξισώσεις υπολογισμού του αριθμού Reynolds's που αναφέρονται στα Κεφάλαια 1, 2 και 3 ταυτίζονται.

Γενικά αν η ροή είναι τυρβώδης στις εξισώσεις συνέχειας, ορμής και ενέργειας ρευστού καθώς και στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης μπαίνει παντού η μέση ως προς τη διακύμανση (λόγω τύρβων) ταχύτητα ροής ρευστού \bar{u} και οι συντελεστές διάχυσης της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης γίνονται συντελεστές τυρβώδους διάχυσης (βλέπε Ενότητα 9.2).

Αέρας

Στο Κεφάλαιο 1, ο αριθμός Reynolds's δίνεται από την εξίσωση 1.3 και για $Re > 10^5 - 10^6$ η ροή του αέρα είναι τυρβώδης.

Επιφανειακά νερά

Στο Κεφάλαιο 2, ο αριθμός Reynolds's δίνεται από τις ισοδύναμες εξισώσεις 2.66 και 2.98 και σε ανοιχτά κανάλια (ποτάμια) για $Re < 500$ η ροή του νερού είναι στρωτή και για $Re > 2000$ η ροή του νερού είναι τυρβώδης.

Όπως φαίνεται από τις 2.66 και 2.98 όσο μεγαλώνει το μέσο βάθος ροής νερού τόσο μεγαλώνει και ο αριθμός Reynolds's (βλέπε Ενότητα 10.1.5 για μεταφορά και αριθμό Prandtl).

Υπόγεια νερά

Στο Κεφάλαιο 3, ο αριθμός Reynolds's δίνεται από την εξίσωση 3.2. Στη περίπτωση υπόγειου νερού ο αριθμός Reynolds's είναι σημαντικός γιατί μόνο όταν η υπόγεια ροή είναι στρωτή δηλ. $1 < Re < 10$ ισχύει ο Νόμος Darcy (η εξίσωση ορμής υπόγειου νερού), που εκφράζεται μαθηματικά για τις τρεις διευθύνσεις από την εξίσωση 3.3. Στη περίπτωση αυτή υπάρχει και κάτω όριο τιμής του αριθμού Reynolds's γιατί προφανώς για $Re < 1$ η ταχύτητα υπόγειου νερού είναι μηδενική και δεν εφαρμόζεται το υπομοντέλο ροής υπόγειου νερού (βλέπε Ενότητα 9.2 περίπτωση πολύ μικρού αριθμού Peclet και εξίσωση διάχυσης).



10.1.4 ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΡΟΗ

Ιξώδης ή μη ιξώδης ροή

Ο σχηματισμός οριακού στρώματος ταχύτητας ρευστού πάνω σε επίπεδη επιφάνεια οφείλεται στη τριβή και σε αυτή την περίπτωση η ροή του ρευστού χαρακτηρίζεται ως ιξώδης. Στο Σχήμα 1.2 φαίνεται το οριακό στρώμα ταχύτητας αέρα. Το οριακό στρώμα ταχύτητας συνήθως θεωρείται τύπου Blasius (η ταχύτητα του ρευστού σε επαφή με την επιφάνεια ροής είναι μηδέν).

Στην περίπτωση που θεωρούμε μη ιξώδη ροή ρευστού δε λαμβάνεται υπόψη οριακό στρώμα ταχύτητας ούτε απώλειες λόγω τριβής στην εξίσωση ενέργειας του υπομοντέλου ροής ρευστού.

Αέρας

Για τον αέρα, που θεωρείται ιδανικό αέριο η παραδοχή μη ιξώδους ροής προσεγγίζει τη πραγματικότητα. Οι εξισώσεις του Κεφαλαίου 1 βασίζονται στη παραδοχή μη ιξώδους ροής αέρα.

Χαρακτηριστική εξαίρεση του Κεφαλαίου 1 είναι η σχέση 1.34, η οποία λαμβάνει υπόψη το οριακό στρώμα ταχύτητας αέρα πάνω από το έδαφος και η οποία χρησιμοποιείται ευρέως. Η σχέση 1.34 υπολογίζει τη ταχύτητα του αέρα στο ύψος της καμινάδας με τη βοήθεια της τιμής μέτρησής της σε ύψος 10m από το έδαφος και του πίνακα τιμών εκθέτη p 1.8.

Ωστόσο η τιμή της ταχύτητας αέρα που προκύπτει από την 1.34, χρησιμοποιείται ως αντιπροσωπευτική της μη ιξώδους μονοδιάστατης ροής του αέρα.

Επιφανειακά νερά

Το νερό είναι ιξώδες ρευστό σε αντίθεση με τον αέρα που όπως αναφέρθηκε παραπάνω θεωρείται ιδανικό αέριο.

Στις λίμνες το είδος ροής ως προς τη τριβή (ιξώδης ή μη ιξώδης) εξαρτάται από το μέσο βάθος.

Στις θάλασσες η ροή του νερού είναι ιξώδης.

Στο Κεφάλαιο 2 για τα ποτάμια αναφέρεται ο παράγοντας τριβής Darcy-Wiesbach f . Ο παράγοντας τριβής μπαίνει στον υπολογισμό της υδραυλικής απώλειας h_f (m) λόγω τριβής με την εξίσωση Darcy-Wiesbach (2.99).

Στην περίπτωση ιξώδους ροής, στην μορφή της εξίσωσης ενέργειας Bernoulli 2.3, όταν αυτή εφαρμόζεται μεταξύ δυο σημείων κατά την διεύθυνση



ροής, συμπεριλαμβάνεται η υδραυλική απώλεια h_f (m) λόγω τριβής. Αντίστοιχα, η εξίσωση ενέργειας Bernoulli μορφής 2.4 και 2.5 συμπεριλαμβάνει την αντιπροσωπευτική κλίση τριβής ή κλίση επιφάνειας νερού S_f .

Ο παράγοντας τριβής Darcy-Wiesbach μπορεί να επηρεάσει το συντελεστή εγκάρσιας διάχυσης του μοντέλου ποιότητας ποταμού μέσα από τη σχέση 2.83.

Όταν η ροή ποταμού είναι υπερκρίσιμη δεν λαμβάνονται υπόψη απώλειες λόγω τριβής και η ροή θεωρείται μη ιξώδης (βλέπε Ενότητα 10.1.5.2 για τα είδη ροής ταχύτητας).

Υπόγειο νερό

Στο Κεφάλαιο 3 δεν συμπεριλαμβάνεται εξίσωση ενέργειας υπόγειας ροής οπότε δεν υπολογίζονται πουθενά απώλειες λόγω τριβής, δηλ. η υπόγεια ροή θεωρείται απλουστευτικά μη ιξώδης.

Ομοιόμορφη ροή

Αν η ροή είναι μη ιξώδης και επιπλέον σταθερής εγκάρσιας διατομής (βλέπε Ενότητα 10.4) χωρίς πλευρικές εισροές (βλέπε Ενότητα 10.5) λέγεται ομοιόμορφη ροή. Ομοιόμορφη μονοδιάστατη ροή σημαίνει σταθερή ταχύτητα κατά τη διεύθυνση ροής δηλ. $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$.

Αέρας

Η μη ιξώδης ροή του αέρα πάνω από επίπεδο έδαφος θεωρείται και ομοιόμορφη.

Επιφανειακά νερά

Επειδή γενικά η ροή επιφανειακών νερών είναι ιξώδης, προκειμένου να μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφη πρέπει να είναι σταθερής εγκάρσιας διατομής, χωρίς πλευρικές εισροές και επιπλέον η κλίση της κοίτης να εξουδετερώνει τη τριβή, όπως στη περίπτωση ποταμού ομοιόμορφης ροής που αναλύεται εκτενώς στο Κεφάλαιο 2.

Στα ποτάμια ιξώδους ροής, όταν ισχύει $S_o = S_f$ όπου S_o η κλίση της κοίτης του ποταμού και S_f αντιπροσωπευτική κλίση τριβής ή κλίση επιφάνειας νερού τότε οι απώλειες λόγω τριβής εξουδετερώνονται από τη κλίση της κοίτης και η ροή του ποταμού θεωρείται ομοιόμορφη.

Στην περίπτωση ομοιόμορφης ροής ποταμού δηλ. $S_o = S_f$:



- η μονοδιάστατη εξίσωση ενέργειας για ανοιχτά κανάλια ή εξίσωση Bernoulli γίνεται $\frac{dE_s}{dx} = 0$ ή $\frac{d}{dx}\left(y + \frac{av^2}{2g}\right) = 0$ όπου E_s ειδική ενέργεια (m), y βάθος ποταμού, V μέση ταχύτητα ποταμού δηλ. η κλίση της κοίτης του ποταμού εξουδετερώνει τις απώλειες λόγω τριβής.
- το βάθος του ποταμού είναι το κανονικό δηλ. $y = y_n$
- ισχύουν οι εξισώσεις υπολογισμού ταχύτητας νερού (εξίσωση ορμής) Chezy (2.103) και Manning (2.106)

Υπόγειο νερό

Η μη ιξώδης ροή του υπόγειου νερού θεωρείται και ομοιόμορφη (Σχήμα 3.9).

10.1.5. ΜΕΤΑΦΟΡΑ

Το είδος ροής «μεταφορά» (convection) αφορά και μάζα και θερμότητα και συμπεριλαμβάνει τους δυο μηχανισμούς διάχυσης (diffusion) και μετατόπισης (advection) (βλέπε Ενότητα 9.2).

Η μεταφορά ρευστού αντικαθίσταται από τα παρακάτω είδη ροής ρευστού σύμφωνα με τη θεωρία ομοιότητας (Similarity theory) που αναφέρεται παρακάτω στην παρούσα ενότητα:

- μεταφορά (convection) θερμότητας. Στα Κεφάλαια 1 και 2 αναφέρεται μόνο η βαρυτική μεταφορά θερμότητας ή ελεύθερη (φυσική) μεταφορά του ρευστού (βλέπε Ενότητα 10.1.5.1). Σε κανένα από τα Κεφάλαια 1, 2 και 3 δεν αναφέρεται μεταφορά (transfer) θερμότητας με ακτινοβολία ή αγωγή.
- Μεταφορά (transfer) μάζας ή ροή ταχύτητας (ορμής) ρευστού (Ενότητα 10.1.5.2)

Η ροή μεταφοράς βρίσκει εφαρμογή ενιαία μόνο στο υπομοντέλο ροής κοιτικής περιοχής (βλέπε Ενότητα 11.1), μέσα από συνδυασμούς της ροής ταχύτητας και της ελεύθερης (φυσικής) μεταφοράς (βλέπε Ενότητες 11.2.1, 11.2.2 και 11.2.3).

Τιμή του αριθμού Prandtl $Pr = \frac{\text{διάχυση ορμής}}{\text{διάχυση θερμότητας}}$ (εξίσωση 1.2) ρευστού (και κατάστασης ρευστού) κοντά στη μονάδα δείχνει ότι η συνεισφορά της ταχύτητας και της θερμότητας στη μεταφορά του ρευστού είναι σχεδόν ίση.



Υπάρχει και τυρβώδης αριθμός Prandtl $Pr_t = \frac{\text{τυρβώδης διάχυση ορμής}}{\text{τυρβώδη διάχυση θερμότητας}}$ (άλλη κατάσταση ρευστού) που κυμαίνεται μεταξύ 0,7–0,9 ανάλογα με τον αριθμό Prandtl του ρευστού.

Αέρας

Ο αριθμός Prandtl για τον αέρα είναι περίπου 0,7–0,8. Από την τιμή του αριθμού Prandtl για τον αέρα, φαίνεται ότι η ροή του οφείλεται και στην ορμή (ταχύτητα) και στη θερμότητα και είναι μεταφορά είτε για στρωτή ροή (Pr αέρα [0,7–0,8]) είτε για τυρβώδη ροή (Pr_t αέρα [0,7–0,9]).

Επιφανειακά νερά

Στις περιπτώσεις επιφανειακών υδάτων στρωτής ροής, ο αριθμός Prandtl επιφανειακού νερού έχει τιμή (7), η οποία δικαιολογεί ροή ταχύτητας (μεταφορά μάζας) ως προσέγγιση της πραγματικής ροής. Δηλ. σε στρωτή επιφανειακή ροή νερού δε λαμβάνεται υπόψη η μεταφορά θερμότητας.

Στις περιπτώσεις επιφανειακών υδάτων τυρβώδους ροής, ο τυρβώδης αριθμός Prandtl επιφανειακού νερού έχει τιμή (0,7–0,9), η οποία δικαιολογεί μεταφορά. Δηλ. σε τυρβώδη επιφανειακή ροή νερού πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η μεταφορά θερμότητας.

Στις θάλασσες τυρβώδους ροής υπάρχει θερμική διαστρωμάτωση οπότε η μεταφορά αφορά και μάζα και θερμότητα, όπως στον αέρα.

Ανάλογα το βάθος ενός ποταμού, η ροή μπορεί να είναι στρωτή και ταχύτητας (μόνο μεταφορά μάζας) ή τυρβώδης οπότε λαμβάνεται υπόψη μεταφορά θερμότητας μέσω μείωσης της κινητικής ενέργειας λόγω τριβής (ιξώδης ροή) (βλέπε Ενότητα 10.1.5.2).

Ανάλογα το βάθος μιας λίμνης, η ροή μπορεί να είναι στρωτή και ταχύτητας (μόνο μεταφορά μάζας) ή τυρβώδης οπότε λαμβάνεται υπόψη θερμική διαστρωμάτωση όπως στις θάλασσες (βλέπε Ενότητα 10.1.5.1).

Υπόγειο νερό

Η υπόγεια ροή είναι στρωτή με τιμή αριθμού Prandtl υπόγειου νερού (7), που δικαιολογεί ροή ταχύτητας (μεταφορά μάζας) ως προσέγγιση της πραγματικής ροής.

Θεωρητικά στρώματα μεταφοράς-θεωρία ομοιότητας



Σύμφωνα με τη θεωρία ομοιότητας επιφανειακών ροών με το επιφανειακό στρώμα αέρα (Monin-Obukhov Similarity theory), η ροή θερμότητας και η ροή ορμής του ρευστού κατά το κατακόρυφο άξονα θεωρούνται σταθερές και η μεταφορά του ρευστού ισοδυναμεί με απλούστερα είδη ροών ανάλογα με τις τρεις καταστάσεις ευστάθειας συνθηκών ροής ρευστού. Τα δυο θεωρητικά στρώματα ταχύτητας και θερμότητας διαχωρίζονται στο χαρακτηριστικό ύψος L Monin-Obukhov όπου ισχύει η ισότητα $Ri = 1$ όπου Ri ο πυκνομετρικός αριθμός Richardson που δίνεται από την εξίσωση 1.5.

Τα θεωρητικά είδη ροής που ισοδυναμούν με τη μεταφορά ανάλογα με τις τρεις καταστάσεις ευστάθειας συνθηκών ροής ρευστού (ασταθείς, σταθερές, ουδέτερες) είναι:

- ασταθείς συνθήκες
 - ολόκληρο το στρώμα μεταφοράς (για κάθε z) ισοδυναμεί με στρώμα ταχύτητας

- σταθερές συνθήκες $\frac{\partial \rho}{\partial z} < 0$ λόγω $\frac{\partial T}{\partial z} > 0$

Ολόκληρο το στρώμα μεταφοράς ισοδυναμεί με δύο διαφορετικά στρώματα ταχύτητας και θερμότητας

- για $z < L$ ισοδυναμεί με στρώμα θερμότητας (υποκείμενο)
- για $z > L$ ισοδυναμεί με στρώμα ταχύτητας (υπερκείμενο)

- σταθερές συνθήκες $\frac{\partial \rho}{\partial z} > 0$ λόγω $\frac{\partial T}{\partial z} < 0$

Ολόκληρο το στρώμα μεταφοράς ισοδυναμεί με δύο διαφορετικά στρώματα ταχύτητας και θερμότητας

- για $z < L$ ισοδυναμεί με στρώμα ταχύτητας (υποκείμενο)
- για $z > L$ ισοδυναμεί με στρώμα θερμότητας (υπερκείμενο)

- ουδέτερες συνθήκες

- ολόκληρο το στρώμα μεταφοράς (για κάθε z) ισοδυναμεί με στρώμα ταχύτητας



10.1.5.1 ΕΛΕΥΘΕΡΗ (Η ΦΥΣΙΚΗ) ΜΕΤΑΦΟΡΑ

Η ελεύθερη (ή φυσική) μεταφορά ή ροή (buoyancy flux) είναι η μεταφορά θερμότητας που οφείλεται στην άνωση λόγω διαφοράς πυκνότητας η οποία οφείλεται σε διαφορά θερμοκρασίας στο ρευστό.

Πρακτικά ελεύθερη μεταφορά υφίσταται σε ρευστό με αριθμό Prandtl $Pr \ll 1$, τιμή την οποία δεν έχουν ούτε ο αέρας, ούτε το νερό.

Σύμφωνα με τη Similarity theory η ελεύθερη (ή φυσική) μεταφορά υφίσταται θεωρητικά σε μέρος της μεταφοράς.

Αέρας

Το θεωρητικό ύψος διαχωρισμού L θεωρητικών στρωμάτων ροής αέρα σε αδιαβατικά θερμικά διαστρωματωμένα ατμόσφαιρα λέγεται αναστροφή. Υπενθυμίζεται ότι στη τροπόσφαιρα (κατώτατο ατμοσφαιρικό στρώμα) σταθερών συνθηκών υπάρχει θερμική διαστρωμάτωση η λεγόμενη αδιαβατική βαθμίδα θερμοκρασίας ($\frac{\partial T}{\partial z} = \text{σταθερό} < 0$).

Ο πυκνομετρικός αριθμός Richardson που χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό της μεταφοράς αέρα (εξίσωση 1.5) συμπεριλαμβάνει διόρθωση επιτάχυνσης της βαρύτητας (διόρθωση Boussinesq $\Delta\rho/\rho$ όπου ρ η πυκνότητα αναφοράς) λόγω διαφοράς πυκνότητας αέρα που οφείλεται στην αδιαβατική βαθμίδα θερμοκρασίας.

- ατμοσφαιρική αστάθεια
 - δεν υφίσταται ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας
- ατμοσφαιρική σταθερότητα δηλ. θερμική διαστρωμάτωση με $\frac{\partial\rho}{\partial z} > 0$ λόγω $\frac{\partial T}{\partial z} < 0$
 - ελεύθερη (ή φυσική) μεταφορά υφίσταται για ύψη πάνω από το ύψος αναστροφής και δεν αναφέρεται στο Κεφάλαιο 1
- ουδέτερες συνθήκες
 - δεν υφίσταται ροή λόγω διαφορά πυκνότητας

Επιφανειακά νερά

Το θεωρητικό ύψος διαχωρισμού L θεωρητικών στρωμάτων ροής νερού σε θερμικά διαστρωματωμένο επιφανειακό αποδέκτη λέγεται θερμοκλίνη. Υπενθυμίζεται ότι σε ωκεανούς και θάλασσες σταθερών συνθηκών υπάρχει θερμική



διαστρωμάτωση με μείωση της θερμοκρασίας από την επιφάνεια προς το βυθό ($\frac{\partial T}{\partial z} > 0$).

Ο πυκνομετρικός αριθμός Richardson που χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό της μεταφοράς νερού (εξίσωση 2.68) συμπεριλαμβάνει διόρθωση επιτάχυνσης της βαρύτητας (διόρθωση Boussinesq $\Delta\rho/\rho$ όπου ρ η πυκνότητα αναφοράς) λόγω διαφοράς πυκνότητας νερού που οφείλεται στη θερμική διαστρωμάτωση.

Προφανώς όταν $Ri_d < 1$ όπου Ri_d ο πυκνομετρικός αριθμός Richardson του επιφανειακού αποδέκτη δε μπορούν να διαχωριστούν δύο στρώματα ταχύτητας και θερμότητας και υπάρχει μόνο ένα στρώμα ταχύτητας. Δεδομένου ότι $\Delta\rho/\rho \leq 0,1$ με αντικατάσταση στην παραπάνω ανισότητα προκύπτει η ανισότητα $Fr > \sqrt{0,1} \cong 0,32$ όπου Fr ο αριθμός Froude ολόκληρου του αποδέκτη (μη πυκνομετρικός). Ο αριθμός Froude υπολογίζεται από τις ισοδύναμες 2.69, 2.70 και 2.110.

Σε θάλασσα και βαθιά λίμνη με $Fr < 0,32$ και σύμφωνα με τα παραπάνω:

- συνθήκες αστάθειας
 - δεν υφίσταται ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας
- συνθήκες σταθερότητας ή θερμική διαστρωμάτωση $\frac{\partial\rho}{\partial z} < 0$ λόγω $\frac{\partial T}{\partial z} > 0$
 - ελεύθερη (ή φυσική) μεταφορά σε θάλασσα ή μεγάλη λίμνη υφίσταται σε ύψη κάτω από τη θερμοκλίνη (βλέπε Ενότητα 11.1 για υπομοντέλο κοντινής περιοχής για βυθισμένη πηγή)
- ουδέτερες συνθήκες
 - δεν υφίσταται ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας

Σε ρηχή λίμνη $Fr > 0,32$ δε λαμβάνεται υπόψη θερμική διαστρωμάτωση, ούτε βαθμίδα άνωσης (λόγω διαφοράς θερμοκρασίας), ούτε ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας.

Σε ποτάμι δε λαμβάνεται υπόψη θερμική διαστρωμάτωση, ούτε βαθμίδα άνωσης (λόγω διαφοράς θερμοκρασίας), ούτε ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας (βλέπε Ενότητα 10.1.5.2).

Υπόγειο νερό



Σε υπόγειο υδροφόρο στρώμα δε λαμβάνεται υπόψη θερμική διαστρωμάτωση, ούτε ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας ή ελεύθερη (ή φυσική) μεταφορά (βλέπε Ενότητα 10.1.5.2 ροή ταχύτητας).

10.1.5.2. ΡΟΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ (ΟΡΜΗΣ)

Ροή ταχύτητας είναι η μεταφορά που οφείλεται αποκλειστικά στην ταχύτητα (ορμή) του ρευστού δηλ. η μεταφορά (μετατόπιση και διάχυση) μάζας.

Η ροή ταχύτητας ρευστού είναι δυο ειδών:

- Υπερκρίσιμη με κύρια χαρακτηριστικά:
 - ▲ Δεν επανέρχεται κατάντη εμποδίου
 - ▲ Δεν επιτρέπει ανάντη διείδυση πηγής (ρύπανσης, κυμάτων)
- Υποκρίσιμη με κύρια χαρακτηριστικά:
 - ▲ Επανέρχεται κατάντη εμποδίου
 - ▲ Επιτρέπει ανάντη διείδυση πηγής (ρύπανσης, κυμάτων)

Σε όλες τις περιπτώσεις φυσικού αποδέκτη η ροή είναι υποκρίσιμη (υποηχητική για τον αέρα), εκτός από το ποτάμι όπου πρέπει να ελέγχεται το είδος ροής ταχύτητας (υποκρίσιμη ή υπερκρίσιμη).

Πρακτικά ροή ταχύτητας υφίσταται σε ρευστό με αριθμό Prandtl $Pr \gg 1$, τιμή την οποία έχει το ακίνητο νερό ή στρωτής ροής.

Σύμφωνα με τη Similarity theory η ροή ταχύτητας υφίσταται και θεωρητικά σε μέρος της μεταφοράς (mixed layer).

Αέρας

M ή Ma είναι ο αριθμός Mach της ροής του αέρα. Ο αριθμός Mach δίνεται από τη σχέση $M = \frac{u_s}{u}$, όπου u_s η ταχύτητα του αέρα και u η ταχύτητα του ήχου στον αέρα. Η ροή ταχύτητας του αέρα είναι:

- Υπερηχητική ροή όταν $M > 1$ ή όταν η ταχύτητα του αέρα είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ήχου στην ίδια θερμοκρασία και στο ίδιο υψόμετρο
- Υποηχητική ροή όταν $M < 1$ ή όταν η ταχύτητα του αέρα είναι μικρότερη από την ταχύτητα του ήχου στην ίδια θερμοκρασία και στο ίδιο υψόμετρο

Σε ολόκληρο το Κεφάλαιο 1 η ροή ταχύτητας του αέρα θεωρείται υποηχητική.



- ατμοσφαιρική αστάθεια
 - για κάθε z ροή ταχύτητας
- ουδέτερες συνθήκες
 - για κάθε z ροή ταχύτητας
- ατμοσφαιρική σταθερότητα ή θερμική διαστρωμάτωση με $\frac{\partial \rho}{\partial z} > 0$ λόγω $\frac{\partial T}{\partial z} < 0$
 - για $z < L$ ροή ταχύτητας (mixed layer). Όλα τα αναλυτικά μοντέλα του Κεφαλαίου 1 αφορούν το στρώμα αυτό

Επιφανειακά νερά

Η επιφανειακή ροή είναι:

- Υπερκρίσιμη όταν $V > V_c$ ή $S_o > S_c$ ή $y < y_c$, όπου V η ταχύτητα του ρευστού και V_c η κρίσιμη ταχύτητα του ρευστού, y το βάθος, y_c το κρίσιμο βάθος, S η κλίση και S_c η κρίσιμη κλίση
- Υποκρίσιμη όταν $V < V_c$ ή $S_o < S_c$ ή $y > y_c$

Θάλασσα-λίμνη

Σε ολόκληρο το Κεφάλαιο 2 η ροή ταχύτητας του νερού σε θάλασσα και λίμνη είναι υποκρίσιμη.

Η μεταφορά αφορά και θερμότητα και μάζα όταν $Ri > 1$ όπου Ri ο πυκνομετρικός αριθμός Richardson αποδέκτη σύμφωνα με την εξίσωση 2.68. Από τον πυκνομετρικό αριθμό Richardson αποδέκτη προκύπτει ο πυκνομετρικός αριθμός Froude αποδέκτη Fr_d σύμφωνα με την εξίσωση 2.72, οπότε η μεταφορά (θερμότητας και μάζας) υφίσταται όταν $Fr_d < 1$ ή ισοδύναμα όταν $Fr < 0,32$, όπου Fr ο αριθμός Froude του αποδέκτη που δίνεται από τις ισοδύναμες εξισώσεις 2.69, 2.70, και 2.110.

Θάλασσα και βαθιά λίμνη με $Fr < 0,32$ δηλ. με θερμική διαστρωμάτωση

- ατμοσφαιρική αστάθεια
 - για κάθε z ροή ταχύτητας
- ουδέτερες συνθήκες
 - για κάθε z ροή ταχύτητας
- συνθήκες σταθερότητας θερμική διαστρωμάτωση $\frac{\partial \rho}{\partial z} < 0$ λόγω $\frac{\partial T}{\partial z} > 0$
 - $z > L$ ροή ταχύτητας (mixed layer)



Σε ρηχή λίμνη με $Fr > 0,32$ δηλ. χωρίς θερμική διαστρωμάτωση ολόκληρη η επιφανειακή ροή θεωρείται ροή ταχύτητας.

Ποτάμια

Δεδομένου ότι στα ποτάμια λόγω πλήρους ανάμιξης δεν υπάρχει θερμική διαστρωμάτωση ούτε βαθμίδα άνωσης, η τιμή του αριθμού Froude Fr ποταμού που δίνεται από τις ισοδύναμες εξισώσεις 2.69, 2.70, και 2.110, αποτελεί κριτήριο διαχωρισμού υποκρίσιμης και υπερκρίσιμης ροής. Σε αυτή την περίπτωση η μεταφορά θερμότητας οφείλεται στις απώλειες λόγω τριβής.

- Αν $Fr > 1$ ή $S_o > S_c$ ή $y < y_c$ η ροή είναι υπερκρίσιμη και ισχύει η εξίσωση ενέργειας Bernoulli χωρίς τριβές 2.3.
- Αν $Fr < 1$ η ροή είναι υποκρίσιμη και ισχύει η εξίσωση ενέργειας Bernoulli με τριβές 2.5.
- Αν $S_o = S_f$ ή $y = y_n$ η ροή είναι ομοιόμορφη (βλέπε 10.1.4)

Όπου y_c το κρίσιμο βάθος που δίνεται από το τύπο 2.107, S_c η κρίσιμη κλίση που δίνεται από το τύπο 2.112, S_o η κλίση κοίτης, S_f κλίση επιφάνειας ή κλίση τριβής, y_n κανονικό βάθος.

Υπόγειο νερό

Σε ολόκληρο το Κεφάλαιο 3 η υπόγεια ροή θεωρείται υποκρίσιμη ροή ταχύτητας.

10.2. ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΡΟΗΣ

Η πλήρης εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης είναι τριών διαστάσεων ως προς τη μεταφορά και τριών διαστάσεων ως προς τη διάχυση, αλλά δεν επιλύεται αναλυτικά. Κατά προσέγγιση της πραγματικότητας και προκειμένου να επιλυθεί αναλυτικά αγνοείται η μεταφορά ή/και η διάχυση κατά συγκεκριμένες διευθύνσεις.

Αέρας

Η διάχυση κατά τη διεύθυνση ροής θεωρείται αμελητέα σε σύγκριση με τη μεγάλη ταχύτητα του αέρα κατά τη διεύθυνση ροής. Επίσης η ροή του αέρα θεωρείται μονοδιάστατη.

Τα αναλυτικά μοντέλα ποιότητας αέρα είναι μονοδιάστατης μετατόπισης και δισδιάστατης διάχυσης στο κάθετο στη ροή επίπεδο (εγκάρσια και κατακόρυ-



φα). Οι παραδοχές στις οποίες βασίζεται η αναλυτική επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης στον αέρα σε μοντέλο λεπτού πλουμίου δηλ. σε να ήταν ο ρυπασμένος αέρας ροή μέσα στη ροή καθαρού αέρα στη μακρινή περιοχή (σε σχήμα ελλειπτικού κώνου Σχήματα 1.3 και 1.9) παρατίθενται στη σελίδα 9 του Κεφαλαίου 1. Η βασικότερη παραδοχή βάση της οποίας η αναλυτική λύση είναι στατιστική και το μοντέλο ποιότητας αέρα θεωρείται στατιστικό είναι ότι η εγκάρσια και κατακόρυφη διάχυση ακολουθεί την κανονική κατανομή (Gauss) όπως φαίνεται στις κλασσικές αναλυτικές λύσεις 1.11 για σημειακή πηγή εδάφους και 1.12 για ανυψωμένη σημειακή πηγή.

Επιφανειακά νερά

Τα αναλυτικά μοντέλα ποιότητας ποταμού είναι συνήθως:

- μονοδιάστατης μετατόπισης και μονοδιάστατης διάχυσης εγκάρσια στη διεύθυνση ροής, από σημειακή πηγή είτε στο κέντρο είτε στην όχθη του ποταμού (2.90). Στην αναλυτική της λύση (2.91), θεωρείται στιγμιαία κατακόρυφη ανάμιξη καθ' όλο το βάθος του ποταμού με τη βοήθεια της σταθμισμένης κατά το βάθος του ποταμού συγκέντρωσης $\dot{m} = \frac{QC_o}{d}$ σε (kg/s/m), όπου Q παροχή πηγής (m^3/s), d βάθος ποταμού (m) και C_o αρχική συγκέντρωση στον αποδέκτη δίπλα από τη πηγή (kg/m^3) η οποία δίνεται από τον τύπο 2.75.
- μονοδιάστατης μετατόπισης και μονοδιάστατης διάχυσης στη ίδια διεύθυνση από σημειακή πηγή στο μέσο του ποταμού (2.73) με αναλυτική λύση την 2.74 και αρχική συγκέντρωση στον αποδέκτη δίπλα από τη πηγή C_o (kg/m^3) που δίνεται από την 2.75

Θάλασσα-Λίμνη

- μονοδιάστατης μετατόπισης κατά τη διεύθυνση ροής και μονοδιάστατης διάχυσης εγκάρσια στη ροή κατά τον άξονα γραμμικής πηγής πεπερασμένου μήκους (2.54) με αναλυτική λύση την 2.55 και μέγιστες συγκεντρώσεις στο άξονα που περνά από το μέσο της γραμμικής πηγής κατά τη διεύθυνση ροής σύμφωνα με τις 2.57 και 2.58.
- μονοδιάστατης μετατόπισης και μονοδιάστατης διάχυσης στη ίδια διεύθυνση από σημειακή πηγή στο μέσο της θάλασσας ή λίμνης (2.73) με αναλυτική λύση την 2.74.



Λίμνη (στάσιμα νερά)

- τρισδιάστατη διάχυση από σημειακή πηγή στο κέντρο της λίμνης με αναλυτική λύση την 2.11. (βλέπε Ενότητα 9.2 για εξίσωση διάχυσης).

Υπόγειο νερό

Η επίλυση του μοντέλου ποιότητας υπόγειου νερού αποτελεί συνδυασμό των αναλυτικών λύσεων τριών διαφορετικών εξισώσεων μεταφοράς-διάχυσης ξεχωριστά ανάλογα τη ζώνη στην οποία ανήκει ο αποδέκτης σύμφωνα με το Σχήμα 3.10:

- ❖ Ζώνη 1. Α) μονοδιάστατης μετατόπισης και μονοδιάστατης διάχυσης κατά τη διεύθυνση υπόγειας ροής 3.20 με αναλυτική λύση την 3.21 και 3.26 με αναλυτική λύση την 3.27. Δεδομένου ότι ο αποδέκτης βρίσκεται ταυτόχρονα σε κάποιο βάθος κάτω από τη στάθμη υπόγειου νερού Β) μονοδιάστατης μετατόπισης και μονοδιάστατης διάχυσης κατακόρυφα στη ροή 3.84 με αναλυτική λύση την 3.85.
- ❖ Ζώνη 2. Α) μονοδιάστατης μετατόπισης και μονοδιάστατης διάχυσης εγκάρσια στη ροή 3.82 με αναλυτική λύση την 3.83 όπου η κατάντη απόσταση υπολογίζεται από την 3.57 σύμφωνα με το σχήμα 3.10. Αν ο αποδέκτης βρίσκεται ταυτόχρονα σε κάποιο βάθος κάτω από τη στάθμη υπόγειου νερού Β) μονοδιάστατης μετατόπισης και μονοδιάστατης διάχυσης κατακόρυφα στη ροή 3.84 με αναλυτική λύση την 3.85.

10.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΡΟΗΣ

Αέρας

Η τραχύτητα της επιφάνειας ροής εκφράζεται με το λεγόμενο ύψος ανάγλυφου z_0 (m) της επιφάνειας ροής.

Επίδραση ύψους ανάγλυφου εδάφους στο υπομοντέλο ροής αέρα:

- ❖ αλλάζει το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2
- ❖ Το ύψος ανάγλυφου μπαίνει στη σχέση 1.34 υπολογισμού της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος της καμινάδας ως προς τη τιμή της στο ύψος μέτρησης συνήθως 10m μέσα από τον Πίνακα 1.8 που δίνει τιμές του εκθέτη της σχέσης ως προς το ανάγλυφο του εδάφους



Επίδραση ύψους ανάγλυφου εδάφους στο μοντέλο ποιότητας αέρα:

- ❖ Η τραχύτητα μπαίνει στον υπολογισμό των στατιστικών συντελεστών διάχυσης σ_y, σ_z μέσα από τους Πίνακες 1.2-5 σύμφωνα με τις καμπύλες Pasquill-Gifford και Briggs οι οποίες διαχωρίζονται για αγροτικά (λεία) και αστικά (τραχιά) εδάφη.

Επιφανειακά νερά

Εκφράζεται με το συντελεστή Manning (από πίνακες τύπου Πίνακα 2.1) που μπαίνει στον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας ποταμού με την εξίσωση Manning 2.106, μέσα από την εξίσωση Manning 2.105.

Υπόγειο νερό

Το υπόγειο υδροφόρο στρώμα χαρακτηρίζεται από ιδιότητες διαφορετικές από την επιφάνεια ροής αέρα και επιφανειακού νερού.

Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3 οι βασικές ιδιότητες ενός υπόγειου στρώματος είναι η ολοκληρωμένη κατά μια διάσταση εγγενής διαπερατότητα a (m) ή η υδραυλική αγωγιμότητά K (m/s) του κατά τις τρεις διευθύνσεις. Και οι δυο ιδιότητες υπολογίζονται από την εγγενή διαπερατότητα (m^2) του υπόγειου υδροφόρου στρώματος.

Το στερεό υδροφόρο στρώμα χαρακτηρίζεται ως ισοτροπικό όταν ισχύει $K_x = K_y = K_z = K$ ή ισοδύναμα $a_L = a_T = a_V = a$ για τις τρεις διευθύνσεις.

Στη περίπτωση ισοτροπικότητας οι ενδιάμεσοι συντελεστές τυρβώδους διάχυσης μηδενίζονται $D_{xy} = D_{yx} = D_{xz} = D_{zx} = D_{yz} = D_{zy} = 0$ (σχέσεις 3.15, 3.16 και 3.17) και εξισώνονται οι συντελεστές τυρβώδους διάχυσης κατά τις τρεις διευθύνσεις $D_{xx} = D_{yy} = D_{zz}$ (σχέσεις 3.12, 3.13 και 3.14), στην πλήρη εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης 3.11.

Το στερεό υδροφόρο στρώμα χαρακτηρίζεται ως ομοιογενές και για τις τρεις διευθύνσεις όταν ισχύει $\frac{\partial K_z}{\partial z} = \frac{\partial K_x}{\partial x} = \frac{\partial K_y}{\partial y} = 0$ δηλ. οι συνιστώσες υδραυλικής αγωγιμότητας μπορούν να βγουν έξω από τα διαφορικά της τρισδιάστατης εξίσωσης συνέχειας μόνιμων συνθηκών 3.5.

Τέλος όταν το υπόγειο υδροφόρο στρώμα θεωρείται και ομοιογενές και ισοτροπικό η τρισδιάστατη εξίσωση συνέχειας μόνιμων συνθηκών παίρνει τη μορφή 3.6 η οποία δε συντελεί περαιτέρω στην αναλυτική επίλυση του μοντέλου



ποιότητας και η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης παίρνει τη μορφή 3.68 η οποία επιλύεται αναλυτικά με περαιτέρω απλουστεύσεις.

10.4. ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΡΟΗΣ

Η ροή ενός ρευστού που συναντά εμπόδιο χωρίζεται οριζόντια και κάθετα σε τρία εκτρεπόμενα τμήματα (άνω, κάτω δεξιά και κάτω αριστερά αντίστοιχα). Το οριζόντιο επίπεδο διαχωρισμού σε ύψος H_c και το κατακόρυφο επίπεδο διαχωρισμού ή γραμμή στασιμότητας (stagnation) φαίνονται στο Κεφάλαιο 1 Σχήμα 1.9.

Προφανώς ένα εμπόδιο τροποποιεί τις τρεις εξισώσεις του υπομοντέλου ροής ρευστού. Ωστόσο και για το σκοπό της παρούσας εργασίας, μας ενδιαφέρει η επίδραση του στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης και στην αναλυτική της λύση τελικά.

Αέρας

Η ροή του αέρα είναι υποκρίσιμη και οι μεταβολές της γήινης επιφάνειας δεν είναι ικανές να αλλάξουν το είδος ροής του αέρα, δεδομένου ότι η κρίσιμη ταχύτητα του αέρα V_c έχει πολύ υψηλή τιμή.

Οποιαδήποτε λοιπόν μεταβολή της επιφάνειας ροής του αέρα έχει τη μορφή εμποδίων κατάντη των οποίων η ροή επανέρχεται στην αρχική της κατάσταση.

Για κάθε μικρό (π.χ. κτίριο) ή μεγάλο (π.χ. λόφος) κατάντη εμπόδιο ικανό να επηρεάσει το πλούμιο σημειακής πηγής, υπάρχουν ανυψωμένοι κατάντη του εμποδίου αποδέκτες (όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.11) και κατάντη του εμποδίου επιφανειακοί αποδέκτες (όπως φαίνεται από το Σχήμα 1.12) όπου παρουσιάζεται ενίσχυση της ρύπανσης.

Ανυψωμένοι κατάντη του εμποδίου αποδέκτες

Για να επιβαρυνθεί κάποιος ανυψωμένος κατάντη του εμποδίου αποδέκτης, είτε βρίσκεται πάνω στο έδαφος είτε είναι ανυψωμένος από αυτό, πρέπει το έδαφος από κάτω του να βρίσκεται σε ύψος μεγαλύτερο ή ίσο με το ύψος H_c οριζόντιου διαχωρισμού της ροής από το εμπόδιο (βλέπε Σχήματα 1.7 και 1.11).

Στον ανυψωμένο κατάντη του εμποδίου αποδέκτη φτάνει η συγκέντρωση από στάθμιση μεταξύ της συγκέντρωσης πραγματικού πλουμίου στο πραγματικό



ύψος του αποδέκτη και της συγκέντρωσης στον αποδέκτη τέλεια εκτρεπόμενου πλουμίου με $z = 0$ στο ύψος διαχωρισμού της ροής του αέρα (βλέπε Σχήμα 1.11).

Το συνολικό ύψος του πλουμίου κατάντη του σημείου διαχωρισμού της ροής του αέρα εξαρτάται και από την ευστάθεια της ατμόσφαιρας και δίνεται από το τύπο 1.62.

Η συγκέντρωση ρύπου σε ανυψωμένο κατάντη του εμποδίου αποδέκτη συνολικά δίνεται από τη σχέση 1.63, όπου η συγκέντρωση στον αποδέκτη από το τέλεια εκτρεπόμενο πλούμιο ($H_c = 0$) μπορεί να υπολογιστεί από την 1.60.

Ο συντελεστής βαρύτητας πλουμίου f της σχέσης 1.62 και 1.63 κυμαίνεται από τη τιμή 1 για σταθερές συνθήκες μέχρι τη τιμή 0,5 για ουδέτερες συνθήκες.

Επιφανειακοί κατάντη του εμποδίου αποδέκτες

Για να επιβαρυνθεί ένας επιφανειακός κατάντη του εμποδίου αποδέκτης πρέπει να βρίσκεται στη μακρινή υπήνεμη περιοχή (μετά την επανακυκλοφορία) του εμποδίου στη διεύθυνση ροής του ρευστού.

Στον κατάντη του εμποδίου επιφανειακό αποδέκτη φτάνει η συγκέντρωση από στάθμιση μεταξύ των συγκεντρώσεων πραγματικού πλουμίου και φανταστικού πλουμίου πηγής όγκου στο τέλος της κοντινής περιοχής του εμποδίου, προερχόμενης από σημειακή πηγή εδάφους στη βάση της υπήνεμης πλευράς του εμποδίου.

Ένα κτίριο έχει επίδραση στο πλούμιο καμινάδας, όταν η πηγή βρίσκεται μέσα σε συγκεκριμένη έκταση γύρω από το κτίριο όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.13.

Κατά τον άξονα ροής αέρα υπάρχει επίδραση εμποδίου στο πλούμιο ανάντη σημειακής πηγής όταν:

- ↳ $h_s \geq H + 0,5L$
- ↳ $h_s + \Delta H_m < 2,5H$
- ↳ $h_s + \Delta H_m < H + 1,5W$

όπου h_s ύψος καμινάδας, H ύψος κτιρίου (m), W προβολή πλάτος του κτιρίου κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου (m), $L = \min(H, W)$ και ΔH_m ανύψωση του πλουμίου μόνο λόγω ορμής.



Όλα τα παραπάνω αποτελούν προϋποθέσεις για την εφαρμογή του Huber & Snyder μοντέλου για τον υπολογισμό των ενισχυμένων συντελεστών εγκάρσιας και κατακόρυφης διάχυσης πλούμιου κατάντη εμποδίου.

Ένας άλλος απλούστερος τρόπος εκτίμησης της επίδρασης κτιρίου σε πλούμιο ρύπανσης είναι να θεωρηθεί το κτίριο σα πηγή όγκου.

Σε πηγή όγκου, το σημείο έκλυσης βρίσκεται στο έδαφος στο μέσο της υπήνεμης πλευράς του κτιρίου και οι συντελεστές διάχυσης της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης υπολογίζονται ως εξής:

- ο συντελεστής εγκάρσιας διάχυσης υπολογίζεται από την αντίστοιχη καμπύλη Pasquill-Gifford (P-G) (αντίστοιχες σχέσεις 1.16) για κατάντη από τη σημειακή πηγή απόσταση κατά τον άξονα ροής, προσαυξημένη κατά απόσταση, η οποία αντιστοιχεί σε αρχική τιμή ενισχυμένου εγκάρσιου συντελεστή από την 1.88 (Πίνακας 1.6), και η οποία υπολογίζεται με τη βοήθεια της σχέσης 1.17 και του Πίνακα 1.7.
- ο συντελεστής κατακόρυφης διάχυσης υπολογίζεται από την αντίστοιχη καμπύλη Pasquill-Gifford (P-G) (αντίστοιχη σχέση 1.16) για κατάντη από τη σημειακή πηγή απόσταση κατά τον άξονα ροής, προσαυξημένη κατά απόσταση, η οποία αντιστοιχεί σε αρχική τιμή ενισχυμένου κατακόρυφου συντελεστή από την 1.89 (Πίνακας 1.6), και η οποία υπολογίζεται με τη βοήθεια της σχέσης 1.18 και του Πίνακα 1.3.
- *Επιφανειακό νερό*

Στο Παράρτημα 2 για τα επιφανειακά νερά δε γίνεται καμία αναφορά στην επίδραση εμποδίων στο πλούμιο πηγής ρύπανσης.

Μόνο στη περίπτωση ποταμού μπορεί να αλλάξει το είδος ροής ταχύτητας, υπό την επίδραση μόνιμων μεταβολών της επιφάνειας ροής (βλέπε Ενότητα 10.1.5.2).

Όταν μεταβάλλεται σταδιακά το βάθος του ποταμού, ουσιαστικά αλλάζει η κλίση του ποταμού και το βάθος του. Συγκρίνοντας τη κλίση του ποταμού S_0 με τη κρίσιμη κλίση S_c η οποία υπολογίζεται από το y_c με την 2.112, κρίνεται αν το είδος ροής ταχύτητας θα αλλάξει ή όχι (βλέπε Ενότητα 10.1.5.2).

Όταν μεταβάλλεται απότομα το βάθος του ποταμού, αλλάζει ο αριθμός Froude της επιφανειακής ροής μέσα από τη σχέση 2.111 και από τη νέα τιμή



του κρίνεται αν το είδος ροής ταχύτητας θα αλλάξει ή όχι (βλέπε Ενότητα 10.1.5.2).

Το βάθος ποταμού έχει επίδραση τόσο στο συντελεστή εγκάρσιας τυρβώδους διάχυσης όσο και στο συντελεστή διαμήκους διάχυσης μέσα από τις σχέσεις 2.83-2.86.

Υπόγειο νερό

Σε υπόγειο υδροφόρο στρώμα, όταν το πλούμιο της ρύπανσης συναντά εμπόδιο δε διαχωρίζεται οριζόντια και κάθετα αλλά γυρίζει ολόκληρο πίσω (ανάντη).

Στη μόνη περίπτωση που ο διαχωρισμός υπόγειας ροής έχει επίδραση στο πλούμιο από συγκεκριμένης έκτασης πηγή είναι όταν γίνεται μέσα στην έκταση της πηγής και εκφράζεται ταυτόχρονα με:

- $x_u \leq x_{crest} \leq x_d$, όπου x_u είναι η συντεταγμένη του ανάντη άκρου (πλευράς) της πηγής, x_d είναι η συντεταγμένη του κατάντη άκρου (πλευράς) της πηγής και x_{crest} είναι η συντεταγμένη της κορυφής στάθμης υπόγειου νερού κατά τον άξονα υπόγειας ροής που υπολογίζεται από την 3.75
- $y_{st} \geq \frac{1}{4}(y_s(x_d) + y_D)$ δηλ. η γραμμή στασιμότητας βρίσκεται μέσα στην έκταση της πηγής, όπου y_{st} συντεταγμένη γραμμής στασιμότητας στη y διεύθυνση (εγκάρσια της υπόγειας ροής), $y_s(x_d)$ ισοδύναμο πλάτος πηγής στο κατάντη άκρο της x_d και y_D πλάτος πηγής

Στην περίπτωση που ισχύουν τα παραπάνω δηλ. στην περίπτωση διαχωρισμού υπόγειας ροής μέσα στην έκταση της πηγής, οι συνέπειες στην ανάπτυξη του πλουμίου από το ανάντη ως το κατάντη άκρο της πηγής εκφράζονται με την ύπαρξη ανάντη του x_u διείδυσης πλουμίου (βλέπε Ενότητα 11.4.2 ανάντη διείδυση), δεδομένου ότι στην πραγματικότητα το σημείο έκλυσης γίνεται το $(x_{crest}, \frac{1}{2}y_D)$ (βλέπε Ενότητα 11.4.1).

Στην περίπτωση ανάντη διείδυσης, στους υπολογισμούς ισοδύναμου ύψους πηγής z_s και ισοδύναμης συγκέντρωσης $C_{k,s}(t)$ στο κατακόρυφο επίπεδο στο κατάντη άκρο της πηγής λαμβάνεται υπόψη το κλάσμα πηγής $f = \frac{x_d - x_{crest}}{x_d - x_u}$ που παίρνει τιμές $[0,1]$ (3.76).



Αν η κορυφή στάθμης υπόγειου νερού βρίσκεται κατάντη της έκτασης πηγής δηλ. $x_{crest} > x_d$ τότε θέτουμε $f = 0$ και όλη η μάζα του ρύπου μεταφέρεται ανάντη της πηγής (βλέπε Ενότητα 11.4.2 για ανάντη διείσδυση).

Αν η κορυφή στάθμης υπόγειου νερού βρίσκεται ανάντη της έκτασης πηγής δηλ. $x_{crest} < x_u$ τότε θέτουμε $f = 1$ και το πλούμιο αναπτύσσεται κατάντη (κανονικά) με σημείο έκλυσης έχει συντεταγμένες $(x_u, \frac{1}{2}y_D)$.

10.5. ΚΑΘΑΡΕΣ ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ ΡΟΕΣ

Αέρας

Στο Κεφάλαιο 1 δε λαμβάνονται υπόψη πλευρικές ροές γιατί το ρεύμα αέρα θεωρείται ενιαίο.

Επιφανειακά νερά

Στα επιφανειακά νερά οι καθαρές πλευρικές εισροές εκφράζονται με q_s (m^2/s) που αποτελεί γινόμενο της πλευρικής παροχής (m^3/s) επί το πλάτος της στη θέση εισροής στον αποδέκτη. Οι πλευρικές εισροές λαμβάνονται υπόψη στην εξίσωση συνέχειας τριών διαστάσεων (2.1) ή μιας διάστασης (2.2) για μόνιμη ροή όπως φαίνεται στο Κεφάλαιο 2 και επιδρούν στο βάθος και τη ταχύτητα του νερού του επιφανειακού αποδέκτη.

Υπόγειο νερό

Όταν στην υπόγεια ροή λαμβάνεται υπόψη (καθαρή) επαναφόρτιση I_r (m/y) έξω από τη πηγή τότε τροποποιείται η εξίσωση συνέχειας του υπομοντέλου υπόγειας ροής και κατ' επέκταση η εξίσωση 3.5 που αποτελεί συνδυασμό της εξίσωσης συνέχειας με το νόμο Darcy και οι αναλυτικές της λύσεις:

- α) εξίσωση Dupuit για μονοδιάστατη υπόγεια ροή με επαναφόρτιση 3.9 και
- β) αναλυτικές λύσεις κατά την υπόθεση Dupuit-Forchheimer για μονοδιάστατη υπόγεια ροή και ενεργό ρυθμό διήθησης I_{EFF} (m/y) για την διαπερατή (υπερκείμενη) πλευρά του συστήματος 3.54–3.56.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11. ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΡΟΗΣ ΚΟΝΤΙΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΦΥΣΙΚΟΥΣ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ

11.1 ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΡΟΗΣ ΚΟΝΤΙΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Το υπομοντέλο ροής κοντινής περιοχής είναι μίμηση του συνολικού μοντέλου ποιότητας αποδέκτη με βασικές διαφορές τις εξής:

- ☛ Στη μακρινή περιοχή υπάρχει ξεχωριστά η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης (πλούμιο μακρινής περιοχής) και οι τρεις εξισώσεις συνέχειας, ορμής και ενέργειας που περιέχονται στο υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής.

Στη κοντινή περιοχή επιλύονται ταυτόχρονα τέσσερις (4) εξισώσεις:

- ❖ Συνέχειας πλουμίου κοντινής περιοχής (γενική μορφή 2.12)
 - ❖ Ορμής πλουμίου κοντινής περιοχής (γενική μορφή 2.13)
 - ❖ Ενέργειας πλουμίου κοντινής περιοχής (γενική μορφή 2.14) και
 - ❖ Εξίσωση συνέχειας συντηρητικού ρύπου στη κοντινή περιοχή (γενική μορφή 2.31)
- ☛ Η ροή κοντινής περιοχής χαρακτηρίζεται από το τυρβώδη αριθμό Prandtl που κυμαίνεται μεταξύ 0,7–0,9. Δηλαδή η ροή των αποβλήτων μέσα στη ροή του αέρα ή του επιφανειακού νερού (πλούμιο κοντινής περιοχής) είναι σε όλες τις περιπτώσεις μεταφορά (βλέπε Ενότητες 10.1.5, 10.1.5.1 και 10.1.5.2).

Στην κοντινή περιοχή, αντίθετα με τη μακρινή περιοχή, δε μας ενδιαφέρει ο θεωρητικός διαχωρισμός της μεταφοράς αλλά τα είδη της (είδη πλουμίου κοντινής περιοχής), για τον υπολογισμό ενός τελικού ύψος πλουμίου, το οποίο αποτελεί το όριο της κοντινής περιοχής και από το οποίο εφαρμόζεται το μοντέλο ποιότητας μακρινής περιοχής.

Το είδος της μεταφοράς κρίνεται από τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Richardson της ροής των αποβλήτων στο στόμιο της πηγής. Όταν $Ri_d < 1$ η μεταφορά είναι μάζας και θερμότητας, όταν $Ri_d = 1$ η μεταφορά μάζας οφείλεται στη μεταφορά θερμότητας (καθαρό πλούμιο), όταν $Ri_d > 1$ λαμβάνεται υπόψη μόνο η μεταφορά θερμότητας (κουρασμένο πλούμιο) που δε συνηθίζεται γιατί οι ταχύτητες εξόδου αποβλήτων είναι σχετικά υψηλές και όταν $Ri_d = 0$ καθαρή μεταφορά μάζας (καθαρή εκτόξευση).



- ☞ Στη μακρινή περιοχή ανάλογα με τις συνθήκες ροής ρευστού επικρατούν συγκεκριμένα είδη ροής ρευστού (βλέπε Ενότητα 10.1.5). Στην κοντινή περιοχή οι συνθήκες ροής ρευστού λαμβάνονται υπόψη στο υπομοντέλο κοντινής περιοχής μέσα από τον τύπο της προσέγγισης Boussinesq $g' = g(\Delta\rho/\rho)$ όπου $\Delta\rho/\rho \leq 0,1$ στην εξίσωση ενέργειας κοντινής περιοχής (βλέπε Ενότητα 11.3).
- ☞ Οι τέσσερις εξισώσεις υπομοντέλου κοντινής περιοχής διατυπώνονται σύμφωνα με τις παραδοχές πλουμίου κοντινής περιοχής που παρατίθενται στο Κεφάλαιο 2, σελ. 37–38 και εκφράζονται με τις σχέσεις 2.15–2.19. Οι παραδοχές που αφορούν τη στατιστική επίλυση του υπομοντέλου κοντινής περιοχής είναι γκαουσιανή εγκάρσια κατανομή κατακόρυφης ταχύτητας w και ανωστικής δύναμης g' . Οι παραδοχές που αφορούν τη στατιστική επίλυση του μοντέλου ποιότητας (πλούμιο μακρινής περιοχής) είναι γκαουσιανή κατακόρυφη και εγκάρσια διάχυση σχέσεις 1.12α και 1.12β του Κεφαλαίου 1 σελ. 9–10.
- ☞ Η αναλυτική λύση υπομοντέλου ροής κοντινής περιοχής υπολογίζει χαρακτηριστικά μήκη στα οποία μηδενίζεται είτε η ροή ορμής είτε η ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας (buoyancy flux ή kinematic buoyancy flux) για ουδέτερες/ασταθείς ή σταθερές συνθήκες σε στάσιμο ή μη στάσιμο αποδέκτη. Στη μόνο περίπτωση που το υπομοντέλο δεν υπολογίζει χαρακτηριστικό μήκος είναι για πηγή σε ομοιόμορφο στάσιμο ή μη στάσιμο αποδέκτη οπότε το μήκος αραίωσης είναι άπειρο (2.32). Σε αυτή την περίπτωση δεν χρειάζεται το υπομοντέλο κοντινής περιοχής και μπορεί να εφαρμοστεί κατ' ευθείαν το μοντέλο ποιότητας. Ειδικά στην περίπτωση του αέρα η τελική συνολική ανύψωση πλουμίου κοντινής περιοχής δε αποτελεί μόνο διόρθωση του ύψους της σημειακής πηγής στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης, αλλά βοηθάει και στον υπολογισμό των ενισχυμένων (ενεργών) λόγω ανύψωσης στατιστικών συντελεστών διάχυσης σύμφωνα με τις σχέσεις 1.58 και 1.59 της μεθόδου Pasquill. Αντίθετα η αναλυτική λύση της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης υπολογίζει συγκεντρώσεις ρύπου.



Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι τύποι πλουμίου στην κοντινή περιοχή που καλύπτουν όλα τα πιθανά είδη μεταφοράς (βασικούς συνδυασμούς ροής ταχύτητας και ροής λόγω διαφοράς πυκνότητας) είναι τρεις:

- ❖ Το καθαρό πλούμιο ρύπανσης (pure plume) όπου η μεταφορά μάζας αποδίδεται αποκλειστικά στην άνωση
- ❖ Η καθαρή εκτόξευση (pure jet)
- ❖ και η εκτόξευση άνωσης (buoyant jet) ή εξαναγκασμένο πλούμιο όπου λαμβάνεται υπόψη και η άνωση και η ορμή

Το υπομοντέλο ροής στη κοντινή περιοχή διαμορφώνεται σύμφωνα με τα:

- χαρακτηριστικά της πηγής
- είδος πλουμίου κοντινής περιοχής
- συνθήκες ροής αποδέκτη

Όσον αφορά τη διεύθυνση της ροής αποβλήτων ως προς τη διεύθυνση ροής του ρευστού, η οποία χαρακτηρίζεται από δυο γωνίες την οριζόντια γωνία εκφόρτισης σ και την κατακόρυφη γωνία εκφόρτισης θ , δε παίζει κανένα ρόλο στο υπομοντέλο κοντινής περιοχής και έμμεσα στο μοντέλο ποιότητας αποδέκτη. Στο Παράρτημα 2 το οποίο εμβαθύνει στο υπομοντέλο κοντινής περιοχής, η μόνη αμελητέα επίδραση διεύθυνσης ροής αποβλήτων ως προς τη διεύθυνση ροής του ρευστού είναι η κατακόρυφη γωνία εκφόρτισης θ .

Σύγκριση ύψους πλουμίου βυθισμένης γραμμικής πηγής σε στάσιμο αποδέκτη με γραμμική διαστρωμάτωση, οριζόντιας εκφόρτισης $\theta=0^\circ$ (σχέση 2.36) και κατακόρυφης εκφόρτισης $\theta=90^\circ$ (σχέση 2.34), καταλήγει στο συμπέρασμα ότι για οριζόντια εκφόρτιση το τελικό ύψος πλουμίου κοντινής περιοχής είναι μικρότερο.

Τέλος να τονίσουμε ότι σε ολόκληρο το Κεφάλαιο 3 δεν αναφέρεται κοντινή περιοχή γιατί:

- ο επιφανειακός χώρος εναπόθεσης ισοδυναμεί με πηγή ίσης έκτασης με την κατακόρυφη προβολή του πάνω στην πιεζομετρική επιφάνεια
- δε λαμβάνεται υπόψη μεταφορά θερμότητας
- το πλούμιο ξεκινά κατ' ευθείαν από το ανάντη άκρο της πηγής



11.2. ΕΙΔΟΣ ΡΟΗΣ

11.2.1. ΚΑΘΑΡΟ ΠΛΟΥΜΙΟ

Όταν ισχύει $Ri_d = 1$, όπου Ri_d είναι ο αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Richardson της ροής στο στόμιο της πηγής, τότε η ροή κοντινής περιοχής είναι καθαρό πλούμιο (pure plume) και η πηγή λέγεται ανωστική, παρότι δεν επικρατεί η μεταφορά θερμότητας. Στη περίπτωση καθαρού πλουμίου η μεταφορά μάζας ισούται με τη μεταφορά θερμότητας. Στη βιβλιογραφία και ιδιαίτερα στο Κεφάλαιο 2 όπου δίνεται έμφαση στο υπομοντέλο κοντινής περιοχής το «καθαρό πλούμιο» λέγεται και «πλούμιο».

Επιφανειακά νερά

Σύμφωνα με τις σχέσεις 2.24, η ροή κοντινής περιοχής είναι καθαρό πλούμιο (ή πλούμιο) όταν:

- $c = 0$
- $\Gamma = 1$
- $R_o = 8\alpha/5$

όπου R_o ο αρχικός αριθμός Richardson του πλουμίου που δίνεται από τη σχέση 2.21 και $\alpha = \frac{1}{r} \frac{dA}{dx} = 2\pi \frac{dr}{dx}$ η σταθερά παράσυρσης, όπου A η εγκάρσια διατομή πλουμίου και r η ακτίνα του πλουμίου σε απόσταση x .

Για το καθαρό πλούμιο η μέση σταθερή ταχύτητα πλουμίου προκύπτει από την αρχική ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας και μόνο σύμφωνα με τη σχέση 2.28.

- Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος πλουμίου σε εγκάρσια ροή νερού δίνεται από την εξίσωση 2.40
- Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος πλουμίου σε σταθερές συνθήκες αποδέκτη (διαστρωμάτωση) δίνεται από την εξίσωση 2.42
- Για γραμμική βυθισμένη πηγή, το μήκος πλουμίου σε εγκάρσια ροή με διαστρωμάτωση δίνεται από την εξίσωση 2.47
- Για γραμμική βυθισμένη πηγή, το μήκος πλουμίου σε διαστρωμάτωση δίνεται από τις ισοδύναμες εξισώσεις 2.46, 2.34 και 2.36
- Για επιφανειακή πηγή, το μήκος πλουμίου σε εγκάρσια ροή δίνεται από την εξίσωση 2.50



Αέρας

Όταν ισχύει $(T_s - T_\alpha) \geq (\Delta T)_c$ η ροή των καυσαερίων (κοντινής περιοχής) είναι καθαρό πλούμιο (pure plume), όπου T_s θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων και T_α απόλυτη θερμοκρασία αέρα στη κορυφή της καμινάδας. Ο παράγοντας άνωσης πηγής F_b δίνεται από το τύπο 1.41.

- Για ασταθείς ή ουδέτερες συνθήκες και $F_b < 55$ η τελική ανύψωση σε συγκεκριμένη κατάντη απόσταση δίνεται από τον τύπο (1.42). Στην περίπτωση αυτή το $(\Delta T)_c$ υπολογίζεται από την 1.38
- Για ασταθείς ή ουδέτερες συνθήκες και $F_b \geq 55$ η τελική ανύψωση σε συγκεκριμένη κατάντη απόσταση δίνεται από τον τύπο (1.43). Στην περίπτωση αυτή το $(\Delta T)_c$ υπολογίζεται από την 1.39
- Ενώ για σταθερές συνθήκες η τελική ανύψωση σε συγκεκριμένη κατάντη απόσταση δίνεται από τον τύπο (1.44). Στην περίπτωση αυτή το $(\Delta T)_c$ υπολογίζεται από την 1.40 όπου συμπεριλαμβάνεται και η παράμετρος σταθερότητας συνθηκών (1.45)

11.2.2. ΚΑΘΑΡΗ ΕΚΤΟΞΕΥΣΗ

Όταν η αρχική (κινηματική) ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας (buoyancy flux ή kinematic buoyancy flux) F_o ή J_o ή β_o στο στόμιο της πηγής είναι μηδενική τότε η ροή κοντινής περιοχής είναι καθαρή εκτόξευση (pure jet). Με άλλα λόγια ισχύει $Ri_d = 0$, όπου Ri_d ο αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Richardson της ροής στο στόμιο της πηγής ως προς τη ροή του ρευστού.

Αέρας

Στη περίπτωση καθαρής εκτόξευσης, ισχύει $F_b = 0$, όπου F_b είναι ο παράγοντας άνωσης πηγής.

- Για ασταθείς ή ουδέτερες συνθήκες και $F_b = 0$ η τελική ανύψωση σε συγκεκριμένη κατάντη απόσταση δίνεται από το τύπο (1.47)
- Για σταθερές συνθήκες και $F_b = 0$ η τελική ανύψωση σε συγκεκριμένη κατάντη απόσταση δίνεται από το τύπο (1.50)

Επιφανειακά νερά

- Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος εκτόξευσης σε εγκάρσια ροή νερού δίνεται από την εξίσωση 2.39



- Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος εκτόξευσης σε διαστρωμάτωση δίνεται από την εξίσωση 2.41
- Για γραμμική βυθισμένη πηγή, το μήκος εκτόξευσης σε εγκάρσια ροή δίνεται από την εξίσωση 2.44
- Για γραμμική βυθισμένη πηγή, το μήκος εκτόξευσης σε διαστρωμάτωση δίνεται από την εξίσωση 2.45
- Για επιφανειακή πηγή, το μήκος εκτόξευσης σε εγκάρσια ροή δίνεται από την εξίσωση 2.49

11.2.3. ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΟ ΠΛΟΥΜΙΟ

Όταν ισχύει $Ri_d < 1$, όπου Ri_d ο αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Richardson της ροής στο στόμιο της πηγής, τότε η ροή κοντινής περιοχής είναι εξαναγκασμένο πλούμιο (forced plume) ή εκτόξευση λόγω διαφοράς πυκνότητας (buoyant jet). Στη περίπτωση αυτή λαμβάνεται υπόψη και αρχική ροή ορμής και αρχική ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας.

Επιφανειακά νερά

Σύμφωνα με τις σχέσεις 2.24, η ροή κοντινής περιοχής είναι εξαναγκασμένο πλούμιο ή εκτόξευση όταν:

- $c < 0$
- $0 < \Gamma < 1$
- $R_o < 8\alpha/5$

όπου R_o ο αρχικός αριθμός Richardson του πλουμίου που δίνεται από τη σχέση 2.21 και $\alpha = \frac{1}{r} \frac{dA}{dx} = 2\pi \frac{dr}{dx}$ η σταθερά παράσυρσης, όπου A η εγκάρσια διατομή πλουμίου και r η ακτίνα του πλουμίου σε απόσταση x .

- Για σημειακή βυθισμένη πηγή, το μήκος μετάβασης εκτόξευσης σε πλούμιο δίνεται από την εξίσωση 2.38
- Για γραμμική βυθισμένη πηγή, το μήκος μετάβασης εκτόξευσης σε πλούμιο δίνεται από την εξίσωση 2.43
- Για επιφανειακή πηγή, το μήκος μετάβασης εκτόξευσης σε πλούμιο δίνεται από την εξίσωση 2.48

Αέρας



Όταν δεν ισχύουν οι συνθήκες $(T_s - T_a) \geq (\Delta T)_c$ και $F_b = 0$ (βλέπε Ενότητες 11.2.1 και 11.2.2), η ροή κοντινής περιοχής είναι εξαναγκασμένο πλούμιο. Στην περίπτωση αυτή λαμβάνονται υπόψη και ο παράγοντας ορμής πηγής F_m που δίνεται από το τύπο 1.46 και ο παράγοντας άνωσης πηγής F_b που δίνεται από το τύπο 1.41.

- Για ασταθείς ή ουδέτερες συνθήκες και $F_b < 55$ η τελική ανύψωση σε συγκεκριμένη κατάντη απόσταση δίνεται από τον τύπο (1.48)
- Για ασταθείς ή ουδέτερες συνθήκες και $F_b \geq 55$ η τελική ανύψωση σε συγκεκριμένη κατάντη απόσταση δίνεται από τον τύπο (1.49)
- Για σταθερές συνθήκες και $F_b < 55$ η τελική ανύψωση σε συγκεκριμένη κατάντη απόσταση δίνεται από τον τύπο (1.51)
- Για σταθερές συνθήκες και $F_b \geq 55$ η τελική ανύψωση σε συγκεκριμένη κατάντη απόσταση δίνεται από τον τύπο (1.52)

11.3. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ ΑΠΟΔΕΚΤΗ

Και τα τρία είδη πλουμίου κοντινής περιοχής (βλέπε Ενότητες 11.2.1–11.2.3) αναπτύσσονται στις εξής συνθήκες ροής αποδέκτη:

- σε ομοιόμορφο αποδέκτη, δηλ. σε ασταθείς ή ουδέτερες συνθήκες ροής ρευστού
- σε αποδέκτη με γραμμική θερμική διαστρωμάτωση, δηλ. σε σταθερές συνθήκες ροής ρευστού, εξαιτίας των οποίων ο αποδέκτης έχει βαθμίδα άνωσης

Οι συνθήκες ροής αποδέκτη λαμβάνονται υπόψη στις εξισώσεις του υπομοντέλου ροής κοντινής περιοχής με τροποποίηση της προσέγγισης Boussinesq $\Delta\rho/\rho_0$. Σύμφωνα με τη τροποποιημένη προσέγγιση Boussinesq διαμορφώνεται και η παράμετρος σταθερότητας συνθηκών ο τύπος της οποίας θυμίζει το τύπο της βαθμίδας άνωσης αποδέκτη $\epsilon = \frac{g}{\rho_0} \frac{\Delta\rho}{\Delta z}$. Η παράμετρος σταθερότητας συνθηκών μπαίνει στην εξίσωση ενέργειας του υπομοντέλου ροής κοντινής περιοχής.

Αέρας

Η προσέγγιση Boussinesq διαφοροποιείται για ασταθείς/ουδέτερες συνθήκες και για σταθερές συνθήκες (αντίστοιχα με τα επιφανειακά νερά), αλλά στο Κεφάλαιο 1 δεν αναφέρεται παρά μόνο η παράμετρος σταθερότητας συνθηκών:



- ❖ σε ατμόσφαιρα με θερμική διαστρωμάτωση (σταθερές συνθήκες):
Η παράμετρος σταθερότητας συνθηκών s συμπεριλαμβάνεται στην εξίσωση τελικής ανύψωσης σε σταθερές συνθήκες λόγο άνωσης 1.44 και στην εξίσωση τελικής ανύψωσης σε σταθερές συνθήκες λόγο ορμής 1.50–1.52.
- ❖ σε ουδέτερες ή ασταθείς ατμοσφαιρικές συνθήκες η παράμετρος σταθερότητας συνθηκών s μηδενίζεται

Η παράμετρος σταθερότητας συνθηκών δίνεται από το τύπο $s = g \frac{\partial \theta / \partial z}{T_a}$ όπου T_a η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας στο στόμιο της καμινάδας και $d\theta$ η διαφορά θερμοκρασίας πλουμίου (διαφορετική κατά z) από την θερμοκρασία ισορροπίας με την ατμόσφαιρα.

Επιφανειακά νερά

Η προσέγγιση Boussinesq διαφοροποιείται για ασταθείς/ουδέτερες συνθήκες και για σταθερές συνθήκες:

- ❖ στην περίπτωση αποδέκτη με γραμμική διαστρωμάτωση πυκνότητας (σταθερές συνθήκες):
 - η προσέγγιση Boussinesq για το πλούμιο κοντινής περιοχής ως προς τη ροή του ρευστού δίνεται από τη σχέση 2.19, όπου $\rho_\infty \neq \rho_0$ και ρ_∞ είναι η πυκνότητα ισορροπίας νερού και πλουμίου ρύπανσης (στο όριο κοντινής περιοχής), ρ_0 πυκνότητα αποδέκτη έξω από το πλούμιο σε κάποιο επίπεδο και ρ πυκνότητα πλουμίου στο ίδιο επίπεδο.
Όταν η προσέγγιση Boussinesq αφορά ολόκληρο τον υδάτινο αποδέκτη τότε οι παραπάνω πυκνότητες παίρνουν τιμές ορίων αποδέκτη δηλ. ρ_0 πυκνότητα αποδέκτη στο επίπεδο του στομίου της πηγής και ρ πυκνότητα πλουμίου στο στόμιο της πηγής
 - στην εξίσωση ενέργειας κοντινής περιοχής 2.14, στην παράμετρο σταθερότητας συνθηκών $\frac{g d \rho_0}{\rho_1 dz}$, ρ_1 είναι η πυκνότητα αποδέκτη στο επίπεδο του στομίου της πηγής και $d\rho_0$ η διαφορά πυκνότητας του πλουμίου (η οποία διαφοροποιείται κατά z) από την πυκνότητα ισορροπίας με τον αποδέκτη (σύμφωνα με τη σχέση Boussinesq 2.19)



- ❖ στην περίπτωση ομοιόμορφου αποδέκτη (ασταθείς ή ουδέτερες συνθήκες):
 - η προσέγγιση Boussinesq για το πλούμιο κοντινής περιοχής ως προς τη ροή του ρευστού δίνεται από τη σχέση 2.64, όπου ρ_a είναι η σταθερή πυκνότητα του υδάτινου αποδέκτη και ρ_o η πυκνότητα του πλουμίου σε κάποιο επίπεδο. Όταν η προσέγγιση Boussinesq αφορά ολόκληρο τον υδάτινο αποδέκτη τότε οι πυκνότητες που συμπεριλαμβάνει παίρνουν τιμές ορίων αποδέκτη δηλ. ρ_o είναι η πυκνότητα του πλουμίου στο στόμιο της πηγής.
 - στην εξίσωση ενέργειας κοντινής περιοχής 2.14, η παράμετρος σταθερότητας συνθηκών $\frac{gd\rho_o}{\rho_1 dz}$ μηδενίζεται και η ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας μέσα στο πλούμιο θεωρείται σταθερή κατά το ύψος ($\frac{dF}{dz} = 0$).

11.4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΗΓΗΣ

11.4.1. ΣΗΜΕΙΟ ΕΚΛΥΣΗΣ

Αέρας

Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 1, όλοι οι τύποι καμινάδων θεωρούνται σημειακές πηγές και το σημείο έκλυσης (release) βρίσκεται στο μέσο της διατομής του στομίου της καμινάδας.

Οι μόνες εξαιρέσεις του Κεφαλαίου 1 είναι:

- οι εξισώσεις 1.29 και 1.30 που αφορούν πηγή έκτασης (έκταση με πολλές σημειακές πηγές)
- οι εξισώσεις 1.17–1.22 και Πίνακες 1.6 και 1.7 που αφορούν πηγές όγκου δηλ. κτίρια με υψηλές συγκεντρώσεις ρύπου τα οποία θεωρούνται πηγή ρύπανσης αέρα

Επιφανειακά νερά

Όλοι οι τύποι αγωγών/καναλιών αποβλήτων θεωρούνται σημειακές πηγές με σημείο έκλυσης (release) που βρίσκεται στο μέσο της διατομής του στομίου του αγωγού/καναλιού στον επιφανειακό αποδέκτη.



Οι πολυσκεδαστήρες πεπερασμένου μήκους (βλέπε Σχήμα 2.1) θεωρούνται γραμμικές πηγές (γραμμή έκλυσης), με άξονα διεύθυνσης ροής ρευστού να περνάει από το κέντρο της γραμμικής πηγής. (βλέπε Σχήμα 2.10).

Στην περίπτωση ποταμού η έκλυση από αγωγό στην όχθη τετραπλασιάζει την κατάντη απόσταση όπου επιτυγχάνεται η ανάμιξη καθ' όλο το πλάτος του ποταμού σε σχέση με την έκλυση από αγωγό στο κέντρο του ποταμού κατά τα άλλα ισχύουν οι ίδιες εξισώσεις 2.9–2.92 και 2.75 (βλέπε Ενότητα 10.2 διεύθυνση ροής).

Υπόγειο νερό

Οι κατακόρυφες προβολές επιφανειακών πηγών ρύπανσης (χώροι εναπόθεσης) πάνω στη στάθμη υπόγειου νερού προσομοιάζονται με σημειακές πηγές.

Στην περίπτωση υπόγειου υδροφόρου στρώματος η αρχή των αξόνων βρίσκεται ανάντη της πηγής στο κάτω ανάντη άκρο του συστήματος Σχήμα 3.9.

Το σημείο έκλυσης κανονικά και σύμφωνα με το Σχήμα 3.10 έχει συντεταγμένες $(x_w, \frac{1}{2}y_D)$ δηλ. βρίσκεται στο ανάντη άκρο (πλευρά) της πηγής x_w και σε εγκάρσια απόσταση από τον άξονα υπόγειας ροής όσο το μισό πλάτος της πηγής $y_D/2$. Δηλ. ο άξονας διεύθυνσης υπόγειας ροής περνά από το μέσο της πηγής. Η επιφάνεια (έκταση) της πηγής βρίσκεται σε ύψος $z = B$ πάνω στην επιφάνεια υπόγειου νερού, όπου B το πάχος του υδροφόρου στρώματος (βλέπε Σχήμα 3.9).

Όταν μέσα στην έκταση της πηγής γίνεται διαχωρισμός υπόγεια ροής (βλέπε Ενότητα 10.4 περί μεταβολών επιφάνειας ροής και 10.5 ανάντη διείδυση) τότε το πλούμιο από το ανάντη ως το κατάντη άκρο της πηγής αλλοιώνεται και γι' αυτό ως σημείο έκλυσης λαμβάνεται το $(x_d, \frac{1}{2}y_s)$ όπου x_d συντεταγμένη κατάντη άκρου (πλευράς) της πηγής και y_s ισοδύναμο πλάτος πηγής στο x_d . Η κατακόρυφη συντεταγμένη του σημείου έκλυσης στη περίπτωση διαχωρισμού πλουμίου μέσα στην έκταση της πηγής περιγράφεται στην επόμενη ενότητα 11.4.2 για την ανάντη διείδυση.



11.4.2. ΑΝΑΝΤΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ

Αέρας

Αν $M < 1$, όπου M ή Ma ο σχετικός αριθμός Mach της ροής καυσαερίων ως προς τη ροή του αέρα στο στόμιο της καμινάδας. Ο αριθμός Mach δίνεται από τη σχέση $M = \frac{u_s}{u}$, όπου u_s η σχετική ταχύτητα των καυσαερίων ως προς τη ροή του αέρα και u η ταχύτητα του ήχου στον αέρα. Αν η ροή των καυσαερίων στο στόμιο της πηγής είναι υποκρίσιμη, τότε λαμβάνεται υπόψη ανάντη διείδυση ρύπου στον αέρα ή πτώση πλουμίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5.

Η ανάντη διείδυση ισοδυναμεί με μείωση κατά z_s της αρχής του κατακόρυφου άξονα z του συστήματος, που ισοδυναμεί με μείωση κατά z_s της κατακόρυφης συντεταγμένης z του σημείου έκλυσης (πτώση πλουμίου που δίνεται από τη σχέση 1.36).

Από την ανισότητα $M < 1$ έχει προκύψει η ανισότητα $v_s < 1,5u_s$ όπου v_s ταχύτητα εξόδου καυσαερίων και u_s μέση ταχύτητα ανέμου στη κορυφή της καμινάδας, του Κεφαλαίου 1, για την οποία λαμβάνεται υπόψη ανάντη διείδυση και η πτώση πλουμίου καμινάδας κατά τον κατακόρυφο άξονα (μείωση κατακόρυφης συντεταγμένης σημείου έκλυσης) υπολογίζεται από τη σχέση 1.36.

Επιφανειακά νερά

Αν $Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g'L}} < 1$, όπου Fr_d ο σχετικός πυκνομετρικός αριθμός Froude ροής αποβλήτων υπολογισμένος στην έξοδο αγωγού, g' η προσαρμοσμένη στις συνθήκες ροής διόρθωση Boussinesq (βλέπε Ενότητα 11.3 περί συνθηκών ροής) και U η σχετική ταχύτητα των αποβλήτων ως προς τη ροή του νερού δηλ. αν η ροή των αποβλήτων στην έξοδο του αγωγού είναι υποκρίσιμη, τότε λαμβάνεται υπόψη ανάντη διείδυση ρύπου στο επιφανειακό νερό ή πτώση πλουμίου, όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.6ii για βυθισμένη και 2.8d για επιφανειακή πηγή.

Η ανάντη διείδυση εκφράζεται με μείωση κατά z_s της αρχής του κατακόρυφου άξονα z του συστήματος, που ισοδυναμεί με μείωση κατά z_s ή $z_s/2$ (στην περίπτωση επιφανειακής πηγής) της κατακόρυφης συντεταγμένης z του σημείου έκλυσης (πτώση πλουμίου).

Παράδειγμα επιφανειακής πηγής σε επιφανειακό αποδέκτη είναι πλευρικό (εγκάρσιο ή παράλληλο) κανάλι σε ποτάμι, του οποίου ο πυκνομετρικός αριθ-



μός Froude F_{h_0} της ροής αποβλήτων στην έξοδο υπολογίζεται στη βάση του καναλιού, σύμφωνα με τη σχέση 2.52, όπου χρησιμοποιείται το βάθος h_0 του καναλιού (βλέπε Σχήμα 2.9). Αν $F_{h_0} < 1$, τότε λαμβάνεται υπόψη ανάντη διείδυση και το βάθος του καναλιού h_0 αντικαθίσταται από το κρίσιμο βάθος καναλιού h_c και το σημείο $z = 0$ στην επιφάνεια καναλιού/ποταμού κατεβαίνει κατά $z_s = h_0 - h_c$ (βλέπε Σχήμα 2.9c). Το σημείο έκλυσης και στις δυο περιπτώσεις βρίσκεται στο κέντρο της εγκάρσιας διατομής στην έξοδο του πλευρικού καναλιού με διαφορά κατά τον κατακόρυφο άξονα $z_s/2 = (h_0 - h_c)/2$.

Η Αναλυτική λύση Thomann και Mueller 2.74 για σημειακή πηγή σταθερής αρχικής συγκέντρωσης ρύπου C_0 , στη μέση ευθύ παραλληλόγραμμου καναλιού υπολογίζει και την ανάντη συγκέντρωση του ρύπου. Για να εφαρμοστεί ο τύπος ανάντη συγκεντρώσεων πρέπει να ισχύει πρώτα $Fr_d < 1$ για τη ροή από τη σημειακή πηγή.

Υπόγειο νερό

Σύμφωνα με τις ανισότητες 3.99, υπάρχει διείδυση ρύπου ανάντη της ανάντη πλευράς x_u της πηγής (η οποία διείδυση μετράται από το μέσο $(x_d - x_u)/2$ της πηγής) όταν γίνεται διαχωρισμός υπόγειας ροής μέσα στην έκταση της πηγής σύμφωνα με την Ενότητα 10.4 και όταν η υπόγεια ροή το επιτρέπει δηλ. όταν η υπόγεια ροή ως προς τη ροή στραγγισμάτων είναι υποκρίσιμη δηλ. όταν η ταχύτητα διήθησης στην έκταση της πηγής είναι μεγάλη δηλ. όταν $\frac{2\pi B q_0}{ly_D} \leq 1$, όπου q_0 η μέση ταχύτητα Darcy κατά τον κύριο άξονα ροής (m/y), B πάχος υδροφόρου στρώματος, y_D πλάτος πηγής και I ταχύτητα διήθησης (m/y)

Η ανάντη διείδυση εκφράζεται με μείωση κατά z_s της αρχής του κατακόρυφου άξονα z του συστήματος στο κατάντη άκρο (πλευρά) της πηγής σε σχέση με το ανάντη άκρο (πλευρά) της. Αυτό ισοδυναμεί με μείωση κατά $z_s/2$ (όπως στην περίπτωση επιφανειακής πηγής σε επιφανειακό αποδέκτη, λόγω επιφάνειας υπόγειου νερού) της κατακόρυφης συντεταγμένης z του σημείου έκλυσης (πτώση πλουμίου) στο κατάντη άκρο της πηγής σε σχέση με το σημείο έκλυσης στο ανάντη άκρο της. Το ισοδύναμο ύψος της πηγής z_s στο κατάντη άκρο της υπολογίζεται με την εξίσωση 3.74.

Στην περίπτωση ανάντη διείδυσης, στην αναλυτική λύση της εξίσωσης μεταφοράς-εγκάρσιας διάχυσης 3.92 χρησιμοποιείται συγκέντρωση κατάντη ά-



κρου πηγής ($C_{k,s}(t)$ σύμφωνα με την 3.77), κατακόρυφα ολοκληρωμένη στο κέντρο του πλουμίου C_{z_0} (mg·m/L).

Στην περίπτωση ανάντη διείδυσης, λαμβάνεται υπόψη και η πτώση του πλουμίου στο κατάντη άκρο της πηγής x_d λόγω επίδρασης της καθαρής επαναφόρτισης μέχρι το σημείο αυτό (x_d). Όταν δηλ. υπάρχει ανάντη διείδυση και καθαρή επαναφόρτιση η κατακόρυφη συντεταγμένη του κατάντη σημείου έκλυσης ($B-z_s/2$) μειώνεται περαιτέρω κατά D_R που είναι η μέση σε βάθος διείδυση της επαναφόρτισης (m) και δίνεται από τη σχέση 3.72.

11.4.3. ΣΤΑΘΕΡΗ

Στα Κεφάλαια 1, 2 και 3 οι πηγές θεωρούνται σταθερές δηλ. δεν αλλάζει με το χρόνο η συγκέντρωση έκλυσης του ρύπου (C_0) δηλ. η αρχική συγκέντρωση ρύπου.

11.4.4. ΣΥΝΕΧΗΣ

Στα Κεφάλαια 1, 2 και 3 οι πηγές θεωρούνται μη πεπερασμένες ή συνεχείς δηλ. η πηγή εκλύει συνεχώς αρχική συγκέντρωση ρύπου (C_0).



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αναλυτικά μοντέλα ποιότητας φυσικών αποδεκτών (αέρα, λίμνης, θάλασσας, ποταμού και υπόγειου νερού) έχουν την ίδια καθετοποιημένη δομή όπως αναλύεται στην Ενότητα 9.1 και φαίνεται στο Σχήμα 9.1.

Αυτό σημαίνει ότι αποτελούνται από μία εξίσωση την εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης, η οποία διαμορφώνεται για όλους τους αποδέκτες από τους ίδιους παράγοντες μέσα από τα τρία υπομοντέλα του μοντέλου ποιότητας αποδέκτη ή και απ' ευθείας:

- ✓ υπομοντέλο ροής κοντινής περιοχής
- ✓ υπομοντέλο ροής μακρινής περιοχής και
- ✓ φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του ρύπου

Κάθε παράγοντας ανήκει σε ένα μόνο από τα τρία υπομοντέλα του μοντέλου ποιότητας και αυτό αποδεικνύει την ενιαία φόρμα της καθετοποιημένης δομής.

Κάθε παράγοντας έχει διαφορετική σημασία για τους πέντε φυσικούς αποδέκτες και σε κάποιον/ους αποδέκτη/ες μπορεί να αγνοηθεί. Συνήθως η αναλυτική (μαθηματική) έκφραση ενός παράγοντα (οριζόντια γραμμή θεωρητικού πίνακα αναλυτικών μοντέλων ποιότητας) στο αντίστοιχο του υπομοντέλο, στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης και στην αναλυτική της λύση είναι παρόμοια για τους πέντε αποδέκτες (κατακόρυφες στήλες θεωρητικού πίνακα αναλυτικών μοντέλων ποιότητας).

Συνοπτικά μπορούμε να πούμε ότι οι σημαντικότερες ομοιότητες μεταξύ των φυσικών αποδεκτών (αέρα, λίμνης, θάλασσας, ποταμού και υπόγειου νερού) σύμφωνα με την οριζόντια σύγκριση ανά επίπεδο της κοινής καθετοποιημένης δομής (οριζόντια γραμμή θεωρητικού πίνακα) αναλυτικών μοντέλων ποιότητας αποδεκτών βάση του περιεχομένου των Κεφαλαίων 1, 2 και 3 είναι:

- * η ροή του αέρα και του νερού θεωρείται ασυμπίεστη και μόνιμη
- * η ροή του ρευστού – είτε ιξώδης, είτε μη ιξώδης – θεωρείται ομοιόμορφη. Στην περίπτωση ιξώδους επιφανειακής ροής νερού, λαμβάνεται υπόψη κλίση κοίτης/βυθού που εξουδετερώνει τη τριβή οπότε η ροή συνεχίζει να θεωρείται ομοιόμορφη
- * η μεταφορά ρευστού σταθερών συνθηκών χωρίζεται σε μεταφορά μάζας (ροή λόγω ορμής) και μεταφορά θερμότητας (ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας), σύμφωνα με τη θεωρία ομοιότητας με το επιφανειακό στρώμα αέ-



ρα, στο χαρακτηριστικό ύψος Monin-Obukhov. Η θεωρία ομοιότητας λαμβάνει υπόψη οριακό στρώμα ταχύτητας και οριακό στρώμα θερμότητας τροπόσφαιρας. Συνεπώς, όταν η θεωρία ομοιότητας εφαρμόζεται σε ατμόσφαιρα, θάλασσα και λίμνη σταθερών συνθηκών η ροή του αέρα και του νερού αντίστοιχα θεωρείται ιξώδης και τα μοντέλα ποιότητας γίνονται πολύπλοκα.

- * στα υπομοντέλα κοντινής περιοχής η ροή των αποβλήτων θεωρείται η ίδια ποιοτικά με την κύρια ροή ρευστού δηλ. τα καυσαέρια θεωρούνται αέρας με αρχική κινηματική ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας η οποία οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας τους από τον αέρα και τα υγρά απόβλητα θεωρούνται νερό με αρχική κινηματική ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας η οποία οφείλεται σε διαφορά θερμοκρασίας τους από το νερό
- * Η μεταβολές πυκνότητας λόγω διαφοράς θερμοκρασίας είναι τόσο μικρές (έλεγχος Boussinesq $\Delta\rho/\rho \leq 0,1$) που εξασφαλίζεται η ασυμπίεστη ροή
- * Η ανάντη διείδυση πλουμίου κοντινής περιοχής στο ρευστό δηλ. ανάντη ρύπανση του ρευστού, οφείλεται στη σχετική ως προς τη ροή του ρευστού υποκρίσιμη ροή αποβλήτων/καυσαερίων και εκφράζεται αναλυτικά (μαθηματικά) σε πτώση πλουμίου μακρινής περιοχής.
Αντίστοιχα στην περίπτωση υπόγειου νερού η ανάντη διείδυση οφείλεται στη σχετική ως προς τη ροή στραγγισμάτων υποκρίσιμη υπόγεια ροή.
- * Ο σχετικός αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Richardson της ροής αποβλήτων/καυσαερίων ως προς τη ροή του ρευστού κυμαίνεται συνήθως μεταξύ του διαστήματος $[0,1]$ που σημαίνει ότι η ροή κοντινής περιοχής είναι μεταφορά εκτός από την περίπτωση που έχει τιμή 0 (περίπτωση καθαρής εκτόξευσης). Οι περιορισμένες τιμές του σχετικού πυκνομετρικού αριθμού Richardson της πηγής με άλλα λόγια η μεταφορά στην κοντινή περιοχή οφείλονται στη τυρβώδη ροή κοντινής περιοχής (τυρβώδης αριθμός Prandtl των δυο ρευστών) και στις συνήθως μεγάλες ταχύτητες εξόδου καυσαερίων και αποβλήτων με ελάχιστη τη ταχύτητα που οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας τους από το ρευστό, περίπτωση καθαρού πλουμίου (περίπτωση τιμής 1).



Οι εξισώσεις καθαρού πλουμίου καυσαερίων καλύπτουν και την περίπτωση του αργού πλουμίου (lazy plume) με σχετικό ως προς τη ροή του αέρα αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Richardson μεγαλύτερο της μονάδας.

- * Ο πυκνομετρικός αριθμός Richardson Ri αποδέκτη χρησιμοποιείται και σα κριτήριο μεταφοράς ($|Ri| > 1$ υποδηλώνει γραμμική θερμική διαστρωμάτωση) και για τον προσδιορισμό του ύψους αναστροφής ή θερμοκλίνης όπου $Ri = 1$, ενώ ο πυκνομετρικός αριθμός Froude αποδέκτη ($Fr_d = \frac{1}{\sqrt{Ri}} < 1$) χρησιμοποιείται μόνο σα κριτήριο μεταφοράς και υποδηλώνει γραμμική θερμική διαστρωμάτωση (δε μπορεί να προσδιορίσει θερμοκλίνη). Η μεταφορά θερμότητας στις δυο περιπτώσεις οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας αν αγνοηθεί η τριβή (μη ιξώδης ροή).

Οι μη πυκνομετρικοί αριθμοί χρησιμοποιούνται όταν δεν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας στον αποδέκτη. Όταν $Fr < 1$, όπου Fr ο αριθμός Froude αποδέκτη, η ροή στον αποδέκτη είναι μεταφορά αλλά σε αυτή την περίπτωση η μεταφορά θερμότητας οφείλεται στις απώλειες λόγω τριβής.

- * Η μεταφορά θερμότητας δε συμπεριλαμβάνει ακτινοβολία και αγωγή. Η μεταφορά θερμότητας εκφράζεται είτε με θερμική διαστρωμάτωση αποδέκτη (σταθερές συνθήκες) και τελικά με μεταφορά μάζας (λόγω θερμότητας) λόγω ανωστικών δυνάμεων, είτε με απώλεια ύψους ροής λόγω τριβής στην περίπτωση του ποταμού (όπου δεν υπάρχει θερμική διαστρωμάτωση).

Συνοπτικά μπορούμε να πούμε ότι οι σημαντικότερες διαφορές μεταξύ των φυσικών αποδεκτών (αέρα, λίμνης, θάλασσας, ποταμού και υπόγειου νερού) σύμφωνα με την οριζόντια σύγκριση ανά επίπεδο της κοινής καθετοποιημένης δομής (οριζόντια γραμμή θεωρητικού πίνακα) αναλυτικών μοντέλων ποιότητας αποδεκτών βάση του περιεχομένου των Κεφαλαίων 1, 2 και 3 είναι:

- * Η ροή του αέρα μπορεί να θεωρηθεί μη ιξώδης, αντίθετα με τη ροή του νερού που θεωρείται ιξώδης (εκτός από τη περίπτωση πολύ μικρών ή μηδενικών ταχυτήτων)
- * Στην ατμόσφαιρα, στις θάλασσες και στα ποτάμια η μεταφορά του ρευστού είναι δεδομένη με άλλα λόγια στους συγκεκριμένους αποδέκτες πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η μεταφορά θερμότητας, λόγω τυρβώδους



ροής που είναι η αιτία υψηλού αριθμού Reynolds ροής και τιμής κοντά στη μονάδα τυρβώδους αριθμού Prandtl ρευστού (0,7–0,9)

- * Στις λίμνες όπου τα νερά είναι σχεδόν στάσιμα και η ροή μπορεί να θεωρηθεί μη ιξώδης, ο αριθμός Reynolds αυξάνει με το μέσο βάθος της λίμνης και τελικά η μεταφορά θερμότητας ως γραμμική διαστρωμάτωση λαμβάνεται υπόψη σε βαθείς λίμνες τυρβώδους ροής των οποίων ο πυκνομετρικός αριθμός Froude είναι μικρότερος της μονάδας.
- * Στα ποτάμια δεν υπάρχει βαθμίδα θερμοκρασίας και πυκνότητας, οπότε η μεταφορά θερμότητας οφείλεται μόνο στις απώλειες λόγω τριβής. Στα ποτάμια η μεταβολή του βάθους και της κλίσης αλλάζει τη ροή ταχύτητας από υποκρίσιμη σε υπερκρίσιμη και το αντίθετο. Στην περίπτωση υποκρίσιμης ροής λαμβάνεται υπόψη η τριβή και στην περίπτωση υπερκρίσιμης ροής δε λαμβάνεται υπόψη η τριβή
- * Μόνο η ροή υπόγειου νερού θεωρείται πάντα στρωτή (πολύ χαμηλής ταχύτητας), προκειμένου να ισχύει ο Νόμος Darcy δηλ. η εξίσωση ορμής στην οποία στηρίζεται το μοντέλο ποιότητας υπόγειου νερού. Άμεση συνέπεια της παραδοχής στρωτής υπόγειας ροής είναι να αγνοείται η μεταφορά θερμότητας είτε λόγω θερμικής διαστρωμάτωσης είτε λόγω τριβής στο υπόγειο νερό, εξαιτίας του αριθμού Prandtl του νερού στρωτής ροής. Η υπόγεια ροή είναι η καθαρότερη περίπτωση μεταφοράς μάζας (ροής λόγω ορμής).
- * Στα επιφανειακά νερά σταθερών συνθηκών, ο ρόλος της βαθμίδας άνωσης (λόγω θερμικής διαστρωμάτωσης) και του υπομοντέλου ροής κοντινής περιοχής είναι σημαντικότερος σε σχέση με την ατμόσφαιρα σταθερών επίσης συνθηκών, γιατί λόγω αντίθετης μεταξύ τους βαθμίδας θερμοκρασίας το υποκείμενο στρώμα αέρα όπου ανήκει η πηγή είναι ταχύτητας, ενώ το υποκείμενο στρώμα επιφανειακού νερού όπου ανήκει η βυθισμένη συνήθως πηγή είναι στρώμα θερμότητας. Στα επιφανειακά νερά σταθερών συνθηκών το ζητούμενο είναι το τελικό ύψος πλουμίου κοντινής περιοχής βυθισμένης πηγής να φτάσει τη θερμοκλίνη για να μεταφερθεί στο στρώμα ταχύτητας (mixed layer)
- * Η ροή στη θάλασσα δε μπορεί να θεωρηθεί μη ιξώδης όπως στη λίμνη, λόγω της ταχύτητας του νερού



Σύμφωνα με τις παραπάνω ομοιότητες και διαφορές μεταξύ των πέντε φυσικών αποδεκτών (αέρα, λίμνης, θάλασσας, ποταμού και υπόγειου νερού), τα αναλυτικά μοντέλα ποιότητας αποδεκτών των Κεφαλαίων 1, 2 και 3 δίνουν καλά αποτελέσματα στις εξής περιπτώσεις ρύπανσης καθαρού αποδέκτη (χωρίς προϋπάρχουσα ρύπανση) από εντοπισμένη σταθερή και συνεχή πηγή:

- * σε ατμόσφαιρα ουδέτερων συνθηκών ή συνθηκών αστάθειας όπου η ροή του αέρα μπορεί να θεωρηθεί μη ιξώδης
- * σε στάσιμα επιφανειακά νερά με γραμμική θερμική διαστρωμάτωση (λίμνες)
- * σε αβαθή επιφανειακά νερά τυρβώδους ροής στα οποία δεν υφίσταται θερμική διαστρωμάτωση (ποτάμια)

Σύμφωνα με τις παραπάνω ομοιότητες και διαφορές μεταξύ των πέντε φυσικών αποδεκτών (αέρα, λίμνης, θάλασσας, ποταμού και υπόγειου νερού), τα περιλαμβανόμενα στην παρούσα εργασία αναλυτικά μοντέλα ποιότητας αποδεκτών δεν εφαρμόζονται στις περιπτώσεις ρύπανσης σε καθαρό φυσικό αποδέκτη (αέρα ή νερό) σταθερών συνθηκών και ιξώδους ανομοιομορφής ροής με χαρακτηριστικότερη την περίπτωση της θάλασσας, γιατί δε μπορούν να συμπεριλάβουν και τα δυο είδη μεταφοράς θερμότητας (θερμική διαστρωμάτωση και απώλειες λόγω τριβής).



Βιβλιογραφία

1. **D.R.Middleton, D.J.Thomson.** *Uncertainties in met pre-processing for dispersion models.* London : Crown Copyright Met Office, 2002. http://www.admlc.org.uk/pdfs/workshop/doug_middleton.pdf.
2. **L.L.Schulman, D.G.Strimaitis , J.S.Scire.** *Development and evaluation of the prime plume rise and building downwash model.* Journal of the Air & Waste Management Association (in press). MA USA : Earth Tech, Inc. <http://www.epa.gov/scram001/7thconf/iscprime/tekpr1.pdf>.
3. **R.Macdonald.** *Theory and objectives of air dispersion modelling.* Modelling Air Emissions for Compliance, MME 474A Wind Engineering. Waterloo: University of Waterloo, 2003. http://www.engga.uwo.ca/people/esavory/MME474A_Part1.pdf.
4. *User's Guide to the Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Unstable Situations (CTDMPLUS):Volume 1.Model Description and User Instructions.* Atmospheric Research and Exposure Assessment Laboratory, Research and Development. USA : EPA, 1989.
5. *Good Practice Guide for Atmospheric Dispersion Modelling.* National Institute of Water and Atmospheric Research. New Zealand: Ministry for the Environment, 2004. <http://www.mfe.govt.nz/publications/air/atmospheric-dispersion-modelling-jun04/adm-foreword-chapter2.pdf>.
6. *User's Guide for the Assessment System for Population Exposure nationwide (ASPEN, VERSION 1.1) Model.* Office of Air Quality Planning and Standards. USA : EPA, 2000. <http://www.epa.gov/scram001/userg/other/aspenug.pdf>.
7. **A.J.Cimorelli, S.G.Perry , A.Venkatram , J.C.Weil.** *AEROMOD: Description of Model Formulation.* Emissions Monitoring and Analysis Division, Office of Air Quality Planning and Standards. USA : EPA, 2004. http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod_mfd.pdf.
8. *Point Source dispersion parameters.* <http://www.dipic.unipd.it/Impianti/Profs/Canu/files/FdT/Point%20Source%20Dispersion%20Parameters.pdf>.
9. *Lakes Environmental - ISCST3 User's Guide.htm.* Risk Assessment. Air Dispersion. Environmental IT Solutions. <http://www.lakes-environmental.com/ISCVOL2/115.htm>.
10. *Disperse-stack Maximum Ground level Concentration Prediction USER MANUAL.* ENVIROKIT. s.l. : P & I Design Ltd, 2003. <http://www.users.globalnet.co.uk/~jee/Mnl101a.pdf>.
11. <http://en.wikipedia.org/wiki/>. Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page.
12. *Appendix I: Dispersion Methodology.* http://www.faa.gov/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/airquality_handbook/media/App_I.PDF.
13. **J.S.Scire, D.G.Strimaitis , R.J.Yamartino.** *A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model (Version 5).* s.l. : Earth Tech Inc., 2000. http://www.src.com/calpuff/download/CALPUFF_UsersGuide.pdf.



14. *User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models Volume II - Description of model algorithms*. Emissions, Monitoring, and Analysis Division, Office of Air Quality Planning and Standards. North Carolina : EPA, 1995. http://www.rflc.com/RFL_Pages/isc3v1.pdf.
15. *Chapter 2: Literature Review*. University of Wollongong. <http://www.library.uow.edu.au/adt-NWU/uploads/approved/adt-NWU20060227.102144/public/03Chapter2.pdf>.
16. **P.W.Roberts, D.R.Webster**. *Turbulent Diffusion*. School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology. Georgia : s.n. http://people.ce.gatech.edu/~dwebster/asce_chapter.pdf.
17. *Chapter 5 Methods for predicting n Values for the Manning Equation*. 1994. <http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-1601/c-5.pdf>. EM 1110-2-1601 Change 1.
18. **X.Chao, Y.Jia , F.D.Shields , Jr.& S.Wang**. *Development and Application of a three dimensional Water Quality Model for a shallow Oxbow Lake*. USA : US-CHINA WORKSHOP. http://www.irtces.org/zt/us_China/proceedings/Chao_man_Revised.pdf.
19. *Chapter 1. Introduction*. http://il.water.usgs.gov/staff/bholmes/chapter_1.pdf.
20. *Introduction to the HEC-River Analysis System (HEC-RAS)*. CE 4620. 2006. <http://www.cee.mtu.edu/~dwatkins/ce4620/HEC-RAS2.pdf>.
21. *CIVE2400 Fluid Mechanics Section 2: Open Channel Hydraulics*. <http://www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/CIVE2400/OpenChannelHydraulics2.pdf>.
22. **D.J.Baumgartner, W.E.Frick , P.J.W.Roberts**. *Dilution Models for Effluent Discharges*. Office of Research and Development. USA : EPA, 1994. http://www.environmental-engineer.com/docs/dos_plumes/rsb_um_plumes.pdf.
23. **J.S.Gierke**. *ENG5300 Engineering Applications in the Earth Sciences: River Velocity*. Department of Geological and Mining Engineering and Sciences, Michigan Technological University. Houghton : s.n., 2002. http://www.cee.mtu.edu/peacecorps/resources/use_of_manning_equation_for_measuring_river_velocity.pdf.
24. **G.H.Jirka, R.L.Doneker , S.W.Hinton**. *User's manual for CORMIX: a hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters*. Office of Science and Technology. Washington : U.S. EPA, 1996.
25. **A.E.Shahidi, J.Imberger**. *Anatomy of turbulence in thermally stratified lakes*. Limnol. Oceanogr. 46(5). s.l.: American Society of Limnology and Oceanography Inc., 2001. http://www.aslo.org/lo/toc/vol_46/issue_5/1158.pdf.
26. *8. Concepts, Definitions, and Governing Equations*. <http://ceprofs.tamu.edu/kchang/ocen689/ocen689ch8.pdf>.



27. **S.K.Venayagamoorthy, J.R.Koseff, J.H.Ferziger, L.H.Shih.** *Testing of RANS turbulence models for stratified flows based on DNS data.* Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs 2003. <http://ctr.stanford.edu/ResBriefs03/Venayagamoorthy.pdf>.
28. **J.S.Turner.** *Small-Scale Mixing Processes.* <http://ocw.mit.edu/ans7870/resources/Wunsch/Edited/8.1-8.3.pdf>.
29. **G.H.Jirka.** *Five asymptotic regimes of a round buoyant jet in stratified crossflow.* Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe. Germany: s.n. <http://www.iahr.org/membersonly/grazproceedings99/pdf/D129.pdf>.
30. **G.R.Jones, J.D.Nash, R.L.Doneker, G.H.Jirka.** *Buoyant Surface Discharges into Water Bodies. I: Flow Classification and Prediction Methodology.* Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 2007. [online].
31. **R.C.Y.Koh, N.H.Brooks.** *Fluid Mechanics of Waste-Water disposal in the ocean.* www.annualreviews.org/aronline, Annual Reviews. 1975.
32. **X.Tian, P.J.W.Roberts, G.J.Daviero.** *Marine Wastewater Discharges from Multiport Diffusers. I: Ustratified Stationary Water.* Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 2004. <http://www.brown.edu/Departments/EEB/EML/files/Tian%20et%20al%202004a.pdf>.
33. **H.Biswas.** *Technical Guidance Manual for Performing WasteLoad Allocations. Book III: Estuaries.* Office of Water, U.S. EPA. Washington: s.n., 1992. <http://www.epa.gov/waterscience/models/library/wlbook3part3.pdf>.
34. *Chapter 2 Introduction to River Hydraulics.* 1993. <http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-1416/c-2.pdf>.
35. *Groundwater.* Health Division, Oregon Department of Human Resources. 1995. Drinking Water Programm. <http://www.oregon.gov/DHS/ph/dwp/docs/gwater/grndwtr.pdf>.
36. **R.J.Mandle.** *Groundwater Modeling Guidance.* Michigan Department of Environmental Quality, Groundwater Modeling Program. Draft 1.0. http://www.megwrm.aun.edu.eg/sub/workshop4/gwguidance_mandle.pdf.
37. *Fundamentals of Pollution 4.* Groundwater and its susceptibility to dagraadation. http://www.unep.org/DEWA/water/GroundWater/pdfs/Groundwater_33-84_SCREEN.pdf.
38. *Principles of Ground-Water Flow.* <http://140.113.16.3/~wwwadm/chinese/teacher/Ppt-pdf/02Principles%20of%20Groundwater%20Flow.pdf>.
39. **R.M.Cohen, J.W.Mercer, R.M.Greenwald, M.S.Beljin.** *Ground Water Issue. Design Guidelines for Conventional Pump-and-Treat Systems.* Office of Solid Waste and Emergency Response, Office of Research and Development. s.l.: U.S. EPA, 1997. <http://www.epa.gov/ada/download/issue/pmptreat.pdf>.



40. **Z.A.Saleem.** *The Vadose and Saturated Zone Modules extracted from EPACMTP for HWIR99.* Office of Solid Waste, U.S. EPA. Washington : HydroGeoLogic Inc., 1999. <http://epa.gov/osw/hazard/wastetypes/wasteid/hwirwste/pdf/risk/modules/s0539.pdf>.
41. **R.Zhang.** *The Transfer Function for Solute Transport.* s.l. : Hydrology Days, 1994. Proceedings of Fourteenth Annual American Geophysical Union. <http://library.wrds.uwo.edu/wrp/94-11/94-11.pdf>.
42. **S.S.Smith, M.B.Allen , J.Puckett , T.Edgar.** *The Finite Layer Method for Groundwater Flow Models.* Water Resources Research. 1992. Vol. 28, No. 6.
43. *EPA's Composite Model for Leachate Migration with Transformation Products (EPACMTP).* Office of Solid Waste. s.l. : U.S. EPA, 2003. Technical Background Document. http://www.epa.gov/osw/nonhaz/industrial/tools/cmtp/pd_toc-2.pdf.
44. **Z.A.Saleem.** *EPA's Composite Model for Leachate Migration with Transformation Products. EPACMTP: User's Guide.* Office of Solid Waste, U.S. EPA. Washington : HydroGeoLogic Inc., 1997. <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/industrial/tools/cmtp/userguid.pdf>.
45. **G.Kiely.** *Environmental Engineering.* s.l. : McGraw-Hill International Editions.
46. **B.Mendes.** *Functional Data Analysis. Modeling of Groundwater Contamination.* Department of Mathematical Sciences, University of Bath. 2002. <http://www.ams.ucsc.edu/~draper/mendes-MSc-dissertation-2002.pdf>.

