

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική Εργασία:

Η Μοντελοποίηση της Υπόγειας Ροής και Μεταφοράς
Ρύπων ως Εργαλείο Εξειδίκευσης της Αρχής
«Ο Ρυπαίνων Πληρώνει»

Φωτεινή Ε. Βελεγράκη

Εξεταστική Επιτροπή:

Γεώργιος Καρατζάς

Ευπραξία-Αίθρα Μαριά

Νικόλαος Νικολαΐδης

Χανιά, Οκτώβριος 2004

«Ν' αγαπάς την ευθύνη.
Να λες: εγώ μονάχος μου έχω χρέος να σώσω τη γη.
Αν δε σωθεί, εγώ θα φταίω»

Νίκος Καζαντζάκης, Ασκητική

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους καθηγητές κύριο Γεώργιο Καρατζά και κυρία Ευπραξία-Αίθρα Μαριά για τη βοήθεια και τη συνεργασία, σε όλη τη διάρκεια της σύνταξης της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και την κυρία Μαρία Παπαδοπούλου για τη βοήθεια στα πρώτα βήματα με το μοντέλο PTC. Ευχαριστώ, επίσης, τον καθηγητή κύριο Νίκο Νικολαΐδη για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ | 4 |
| Περίληψη | 7 |
| 1. Εισαγωγή..... | 9 |
| 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο..... | 12 |
| 2.1 Βασικές εξισώσεις | 12 |
| 2.1.1 Συστήματα Υπογείων Υδάτων | 12 |
| 2.1.1.1 Εξίσωση Boussinesq..... | 16 |
| 2.1.2 Παραγωγή των Κυρίων εξισώσεων | 17 |
| 2.1.2 Αριθμητικές μέθοδοι..... | 22 |
| 2.2 Η κατασκευή του θεμελιώδους μοντέλου | 26 |
| 2.2.1 Καθορισμός των υδροστρωματογραφικών μονάδων..... | 26 |
| 2.2.2 Εκτίμηση υδατικού αποθέματος | 27 |
| 2.2.3 Καθορισμός του συστήματος ροής | 28 |
| 2.3 Είδη μοντέλων | 29 |
| 2.3.1 Διοδιάστατα χωρικά μοντέλα | 29 |
| 2.3.1.1 Περιορισμένοι υδροφορείς..... | 29 |
| 2.3.1.2 Περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή | 29 |
| 2.3.1.3 Ελεύθεροι υδροφορείς | 30 |
| 2.3.1.4 Μικτά συστήματα υδροφορέων | 31 |
| 2.3.2 Ημι-τριοδιάστατα μοντέλα..... | 31 |
| 2.3.3 Μοντέλα κάθετων τομών και πλήρως τριοδιάστατα μοντέλα | 32 |
| 2.2 Περιγραφή του Μοντέλου PTC | 33 |
| 2.4.1 Κύριες εξισώσεις | 33 |
| 2.4.2 Ο αλγόριθμος επίλυσης του PTC | 33 |
| 2.4.3 Τριοδιάστατη Υπόγεια Ροή | 34 |
| 2.4.3.1 Βασική εξίσωση..... | 34 |
| 2.4.3.2 Εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων..... | 35 |
| 2.4.3.3 Εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών | 38 |
| 2.4.3.3.1 Η κάθετη παράγωγος | 39 |
| 2.4.3.3.2 Η Χρονική Παράγωγος..... | 40 |
| 2.4.3.4 Οριακές συνθήκες..... | 41 |
| 2.4.3.4.1 Καθορισμένο υδραυλικό ύψος..... | 42 |
| 2.4.3.4.2 Καθορισμένη ροή | 42 |
| 2.4.3.4.3 Τρίτος τύπος..... | 43 |
| 2.4.3.5 Συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα | 44 |
| 2.4.4 Τριοδιάστατη Μεταφορά Ρύπων | 46 |
| 2.4.4.1 Κύριες εξισώσεις | 46 |
| 2.4.4.2 Οριακές Συνθήκες | 48 |

| | |
|--|----|
| 3. Η θεσμική θεώρηση της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» | 49 |
| 3.1 Η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» | 49 |
| 3.1.1 Γενικά..... | 49 |
| 3.1.2 Ιστορικά στοιχεία | 50 |
| 3.1.3 Στο διεθνές δίκαιο..... | 53 |
| 3.1.4 Οι λειτουργίες της αρχής..... | 54 |
| 3.2 Η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» στην Κοινοτική Νομοθεσία | 56 |
| 3.2.1 Η Λευκή Βίβλος για την Περιβαλλοντική ευθύνη | 56 |
| 3.2.2 Πράσινη Βίβλος..... | 58 |
| 3.2.3 Οδηγία 2004/35/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 21 ^{ης} Απριλίου 2004 σχετικά με την περιβαλλοντική ευθύνη όσον αφορά στην πρόληψη και την αποκατάσταση περιβαλλοντικής ζημιάς..... | 59 |
| 3.2.4 Δικαστική Εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» στην Ευρωπαϊκή Ένωση | 65 |
| 3.3 Η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» στην Εθνική Νομοθεσία..... | 67 |
| 3.3.1 Το Σύνταγμα..... | 67 |
| 3.3.2 Η κοινή νομοθεσία..... | 67 |
| 3.3.2.1 Το άρθρο 29 του Ν.1650/1986..... | 67 |
| 3.3.2.2 Το άρθρο 926 ΑΚ..... | 69 |
| 3.3.4 Νομολογία των ελληνικών δικαστηρίων | 71 |
| 3.3.4.1 Περιβαλλοντική ζημία ως προσβολή της προσωπικότητας (άρθρο 57 ΑΚ) – Ιστορική διαδρομή της νομολογίας των πολιτικών δικαστηρίων | 71 |
| 3.3.4.2 Η υπόθεση 12/94 του Μονομελούς Πρωτοδικείου Σερρών για ρύπανση που προκαλείται από περισσότερους του ενός φορέων | 73 |
| 3.4 Η συνύπαρξη και αλληλεπίδραση των δύο θεωρήσεων της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» - τεχνικής και θεσμικής- μέσω του μοντέλου PTC | 76 |
| 4. Εισαγωγή και επεξεργασία των δεδομένων | 79 |
| 4.1 Στοιχεία εισόδου στο μοντέλο PTC | 79 |
| 4.2 Περιγραφή σεναρίων | 81 |
| 4.2.1 1 ^η Περίπτωση | 81 |
| 4.2.1.1 Σενάριο 1 ^ο | 83 |
| 4.2.1.2 Σενάριο 2 ^ο | 84 |
| 4.2.1.3 Σενάριο 3 ^ο | 85 |
| 4.2.1.4 Σενάριο 4 ^ο | 86 |
| 4.2.1.5 Ανακεφαλαίωση..... | 87 |
| 4.2.2 2 ^η Περίπτωση | 90 |
| 4.2.2.1 Σενάριο 5 ^ο | 90 |
| 4.2.2.2 Σενάριο 6 ^ο | 92 |
| 4.2.2.3 Ανακεφαλαίωση..... | 93 |

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 4.2.3 3 ^η Περίπτωση | 94 |
| 4.2.3.1 Σενάριο 7 ^ο | 96 |
| 4.2.3.2 Σενάριο 8 ^ο | 97 |
| 4.2.3.3 Σενάριο 9 ^ο | 98 |
| 4.2.3.4 Ανακεφαλαίωση | 99 |
| 4.2.4. 4 ^η Περίπτωση | 100 |
| 5. Συμπεράσματα | 103 |
| Βιβλιογραφία..... | 108 |

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια διεπιστημονικής προσέγγισης του προβλήματος της αδυναμίας απόδειξης του αιτιώδους συνδέσμου μεταξύ της περιβαλλοντικής ζημίας και της δραστηριότητας που την προκάλεσε, σε περιπτώσεις διάχυτης ρύπανσης ή σε περιπτώσεις όπου εμπλέκονται στη ρύπανση περισσότεροι του ενός φορείς ή δραστηριότητες. Η απόδειξη αυτή είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την ορθή εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» και τη δίκαιη κατανομή της ευθύνης στους εν δυνάμει ρυπαντές στο πλαίσιο της δικαστικής διαδικασίας.

Για το σκοπό αυτό γίνεται χρήση του μοντέλου PTC (Princeton Transport Code), το οποίο προσομοιώνει τη μεταφορά της ρύπανσης στον υπόγειο υδροφόρα, δίνοντας μια χωροχρονική εικόνα της. Μέσα από την εικόνα αυτή είναι δυνατός ένας, σε αρκετά μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας, ακριβής προσδιορισμός του υπαίτιου της ρύπανσης και του βαθμού στον οποίο συνέβαλε σε αυτήν.

Αρχικά, λοιπόν, γίνεται μια γενική αναφορά στα διάφορα είδη μοντέλων και στις μεθόδους που χρησιμοποιούν για την προσομοίωση της υπόγειας ροής και της μεταφοράς της υπόγειας ρύπανσης, και συγκεκριμένα στο μοντέλο PTC που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία και στις βασικές εξισώσεις που επιλύει.

Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση της θεσμικής θεώρησης της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» που περιλαμβάνει τόσο το περιεχόμενο και τις λειτουργίες της, όσο και την ερμηνεία της μέσα από τα κείμενα της κοινοτικής και εθνικής νομοθεσίας, καθώς και από τη σχετική νομολογία. Μέσα από την ανάλυση αυτή εμφανίζεται η ανάγκη για ένα τεχνικό μέσο, το οποίο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα δικαστήρια, ως πραγματογνωμοσύνη, κατά την αποδεικτική διαδικασία του υπαίτιου ή των υπαίτιων της περιβαλλοντικής ζημίας στις περιπτώσεις που αυτή είναι δύσκολη ή και αδύνατη.

Με τη χρήση του μοντέλου PTC προσομοιώνεται η μεταφορά των ρύπων σε τέσσερις περιπτώσεις ρύπανσης του υπόγειου υδροφόρα, στις οποίες, κάθε φορά, συμβάλλουν περισσότεροι του ενός ρυπαίνοντες. Μέσω των αποτελεσμάτων του μοντέλου προσδιορίζεται σε κάθε περίπτωση η συμβολή

του καθενός στην υποβάθμιση των υπογείων υδάτων και γίνεται έτσι εμφανής η συμβολή του συγκεκριμένου μοντέλου στη δίκαιη απόδοση ευθύνης από τα δικαστήρια.

1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, με τη συνεχή επέμβαση του ανθρώπου στο περιβάλλον και την ολοένα αυξανόμενη υποβάθμισή του από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, η προστασία του περιβάλλοντος αποτελεί επιτακτική ανάγκη. Τόσο η έννοια της προστασίας, όσο και η έννοια του περιβάλλοντος, έχουν έντονα διεπιστημονικό χαρακτήρα, μιας και αποτελούν αντικείμενο επεξεργασίας, τόσο των θετικών όσο και των κοινωνικών και νομικών επιστημών. Οι μεν θετικές επιστήμες μελετούν τη σύσταση του περιβάλλοντος, τις σχέσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχείων του, και οι δε κοινωνικές επιστήμες τη σχέση του ανθρώπου με αυτό. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια, έχει συνειδητοποιηθεί η ανάγκη για νομική κάλυψη της προστασίας του περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα να ενταχθεί στο χώρο του δικαίου ως ιδιαίτερο αντικείμενο.

Το δικαίο περιβάλλοντος εμφανίζει την ιδιαιτερότητα του έντονα τεχνικού και διεπιστημονικού χαρακτήρα, πράγμα που καθιστά αναγκαία τη συνόπαρξη νομικών περιβάλλοντος και τεχνικών, τόσο για τη διαμόρφωση

και ερμηνεία των νομικών κανόνων, όσο και για την αποτελεσματική τήρηση και εφαρμογή τους.

Ένα τέτοιο διεπιστημονικό θέμα αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα, επιδιώκεται η αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκύπτουν από την ασάφεια και τις αδυναμίες μίας από τις αρχές του περιβαλλοντικού δικαίου κατά την εφαρμογή της, με τη συμβολή ενός περιβαλλοντικού μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ρύπανσης. Έτσι, εξετάζεται αν και κατά πόσο δύο ζητήματα, τα οποία φαινομενικά ανήκουν σε δύο εντελώς διαφορετικά επιστημονικά πεδία και δε σχετίζονται καθόλου μεταξύ τους, μπορούν να συνδυαστούν και να αλληλοσυμπληρωθούν.

Ο λόγος για την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει», η οποία μαζί με τις αρχές της πρόληψης, της προφύλαξης και της επανόρθωσης των βλαβών κατά προτεραιότητα στην πηγή, συμπληρώνει την ενότητα των αρχών στην οποία στηρίζεται το ευρωπαϊκό περιβαλλοντικό δίκαιο. Σύμφωνα με την αρχή, κάθε φορέας έργου ή δραστηριότητας που προκαλεί περιβαλλοντική ζημία ή άμεσο κίνδυνο ανάλογης ζημίας, θα πρέπει να επωμίζεται το κόστος των απαραίτητων μέτρων πρόληψης ή αποκατάστασης. Πρόκειται για ένα ρεαλιστικό οικονομικό εργαλείο, που προσεγγίζει την πραγματική διάσταση του προβλήματος της ρύπανσης του περιβάλλοντος, περιέχει όμως πολλές αδυναμίες και ελλείψεις ως προς την ερμηνεία και εφαρμογή της.

Στην ελληνική νομοθεσία, εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» αποτελεί το άρθρο 29 του νόμου 1650/86, όπου εισάγεται η αστική ευθύνη σε περίπτωση περιβαλλοντικής ζημίας. Πρόσφατα εκδόθηκε η κοινοτική Οδηγία για την περιβαλλοντική ευθύνη όσον αφορά στην πρόληψη και αποκατάσταση της περιβαλλοντικής ζημίας, η οποία αποτελεί ουσιαστικά την εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» σε κοινοτικό επίπεδο. Η Οδηγία περιλαμβάνει ένα ευρύ εξαιρετικό πεδίο, μέσα στο οποίο εμπεριέχεται και η εξαίρεση για διάχυτη ρύπανση όταν δεν είναι δυνατόν να αποδειχθεί η αιτιώδης συνάφεια μεταξύ της ζημίας και των δραστηριοτήτων που την προκαλούν. Στην περίπτωση αυτή είναι δύσκολο ή και αδύνατο να προσδιοριστεί ποιος και σε ποιο βαθμό προκάλεσε τη ρύπανση.

Στόχος μας, λοιπόν, είναι η συμβολή στον περιορισμό του εξαιρετικού πεδίου της Οδηγίας αυτής μέσω του περιβαλλοντικού μοντέλου προσομοίωσης της ρύπανσης που θα χρησιμοποιηθεί. Με την εφαρμογή του

μοντέλου, επιδιώκεται ένας, σε αρκετά μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας, ακριβής προσδιορισμός του υπαίτιου της ρύπανσης και του βαθμού στον οποίο συνέβαλε σε αυτήν. Έτσι, κατά τη δικαστική διαδικασία, τα αποτελέσματα που δίνει το μοντέλο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πραγματογνωμοσύνη για τον προσδιορισμό του αιτιώδους συνδέσμου μεταξύ της ρυπογόνου δραστηριότητας και της περιβαλλοντικής ζημίας, καθώς και, στη περίπτωση της υποκειμενικής ευθύνης, της υπαιτιότητας και του βαθμού της, του καθενός από τους εν δυνάμει ρυπαντές που εμπλέκονται, σ' αυτήν.

Για το σκοπό αυτό, επιλέγεται η περίπτωση ρύπανσης υπόγειου υδροφορέα, η οποία αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα πολυπαραγοντικής και διάχυτης ρύπανσης, λόγω της πολυπλοκότητας του μηχανισμού διασποράς της στους υπόγειους υδροφορείς. Αυτή ακριβώς η πολυπλοκότητα είναι ο παράγοντας που δυσχεραίνει τον προσδιορισμό του ρυπαίνοντα, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εφαρμοσθεί σωστά η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει».

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται στην εργασία είναι το μοντέλο PTC (Princeton Transport Code), το οποίο προσομοιώνει τη μεταφορά της ρύπανσης στον υπόγειο υδροφορέα, και στα αποτελέσματά του απεικονίζεται η ακριβής προέλευσή της, καθώς και οι παράγοντες που συντελούν στην εξάπλωσή της.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Βασικές εξισώσεις

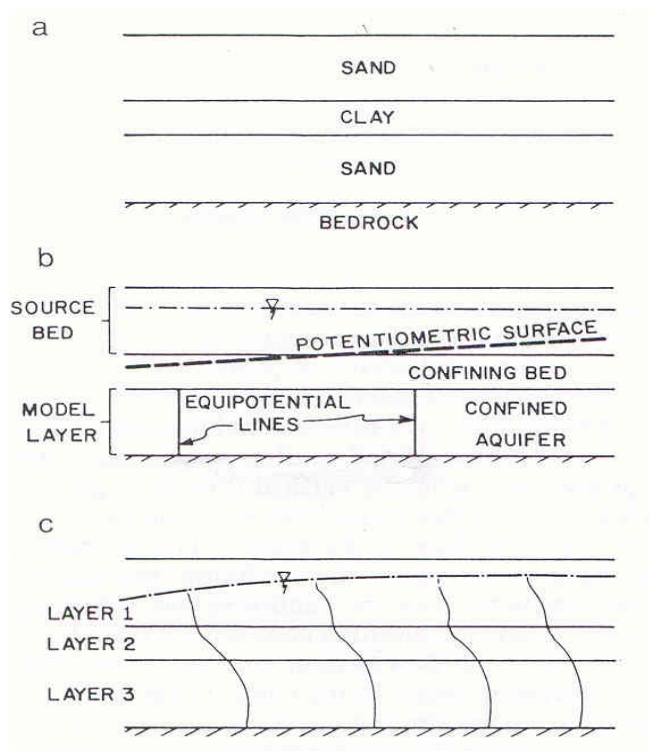
2.1.1 Συστήματα Υπογείων Υδάτων

Πριν από την παραγωγή της βασικής εξίσωσης για την υπόγεια ροή, απαιτείται ένα θεμελιώδες μοντέλο του συστήματος. Υπάρχουν δύο θεμελιώδεις απόψεις για τα συστήματα υπογείων υδάτων-η άποψη του υδροφορέα και η άποψη του συστήματος ροής.

Η άποψη του υδροφορέα βασίζεται στην έννοια του περιορισμένου και ελεύθερου υδροφορέα. Υδροφορέας είναι μια μονάδα πορώδους υλικού ικανού για την αποθήκευση και τη μεταβίβαση εκτιμητών ποσοτήτων νερού σε πηγάδια. Ο περιορισμένος υδροφορέας επικαλύπτεται από ένα περιοριστικό στρώμα, μια μονάδα από πορώδες υλικό που επιβραδύνει την κίνηση του νερού. Ο ελεύθερος υδροφορέας έχει τον υδροφόρο ορίζοντα σαν ανώτερο όριο. Η άποψη του υδροφορέα είναι ειδικά συμβατή για ανάλυση της ροής σε πηγάδια άντλησης και είναι η βάση για πολλές αναλυτικές λύσεις περιλαμβανομένων αυτών του Thiem, Theis and Jacob. Σε αυτήν την άποψη, η υπόγεια ροή θεωρείται ότι είναι αυστηρώς οριζόντια προς τους υδροφορείς και αυστηρώς κάθετα προς τα περιοριστικά στρώματα. Η ικανότητα ενός

υδροφορέα να μεταφέρει νερό περιγράφεται από την υδραυλική αγωγιμότητα. Στην άποψη του υδροφορέα, η υδραυλική αγωγιμότητα ολοκληρώνεται στην κατακόρυφη διάσταση για να δώσει μια μέση χαρακτηριστική μεταβίβαση, που είναι γνωστή ως μεταβιβασιμότητα, ή η υδραυλική αγωγιμότητα επί το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα. Η μεταβιβασιμότητα ενός περιορισμένου υδροφορέα είναι σταθερή αν ο υδροφορέας είναι ομογενής και ομοιόμορφου πάχους, ενώ η μεταβιβασιμότητα ενός ελεύθερου υδροφορέα πάντα ποικίλει χωρικά γιατί το κορεσμένο πάχος εξαρτάται από την ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα. Παρόλο που η υδραυλική αγωγιμότητα και η μεταβιβασιμότητα θεωρούνται σταθερές, στις αναλυτικές λύσεις που χρησιμοποιούνται στη υδραυλική των πηγαδιών, ποικίλουν χωρικά στις καταστάσεις πεδίου γιατί οι υδροφορείς είναι σχεδόν πάντα ετερογενείς.

Η άποψη του υδροφορέα χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει τη δισδιάστατη οριζόντια ροή σε περιορισμένους και ελεύθερους υδροφορείς. Περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή μπορούν να προσομοιωθούν χρησιμοποιώντας μια ημι-τρισδιάστατη προσέγγιση, μέσω της οποίας η κάθετη ροή προς τα περιοριστικά στρώματα αντιπροσωπεύεται από έναν όρο διαρροής που προσθέτει ή αφαιρεί νερό από τον υδροφορέα υπέρκειται ή υπόκειται του περιορισμένο υδροφορέα με διαρροή. Η ποσότητα της διαρροής εξαρτάται από την υδραυλική κλίση κατά μήκος του περιοριστικού στρώματος και από το πάχος και την κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα του περιοριστικού στρώματος. Τα περιοριστικά στρώματα δεν έχουν μοντελοποιηθεί σαφώς και τα υδραυλικά ύψη στα περιοριστικά στρώματα δεν έχουν υπολογιστεί.



Σχήμα 2-1 Απόψεις συστημάτων υπογείων υδάτων

- a) Το γεωλογικό σύστημα
 - b) Η άποψη του υδροφορέα
 - c) Η άποψη του συστήματος ροής
- (Πηγή: Anderson & Woessner, 1992)

Η γενική μορφή της βασικής εξίσωσης για την άποψη του υδροφορέα είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R + L \quad (2.1.1)$$

όπου:

$$L = -K_z' \frac{h_{source} - h}{b}$$

Οι όροι στην αριστερή πλευρά της Εξίσωσης (2.1.1) παριστάνουν την οριζόντια ροή μέσα στον υδροφορέα όπου h είναι το υδραυλικό ύψος και T_x και T_y είναι οι συνιστώσες της μεταβιβασιμότητας. Η τοποθέτηση των T_x και T_y μέσα στις μερικές παραγώγους επιτρέπει τη χωρική μεταβολή αυτών των παραμέτρων (ετερογένεια). Οι δείκτες x και y στο T δείχνουν ότι η

μεταβιβασιμότητα σε κάθε μία από αυτές τις διευθύνσεις μπορεί να είναι διαφορετική, π.χ. ο υδροφορέας μπορεί να είναι ανισοτροπικός. Το S είναι ο συντελεστής αποθηκευτικότητας, το R είναι ένας όρος σημειακής διαρροής/πηγής που ορίζεται να είναι εγγενώς θετικός για να αναπαραστήσει την επαναφόρτιση (recharge). Αν συμβαίνει άντληση, $R=-W$ όπου W είναι ο ρυθμός άντλησης. Ο τελευταίος όρος στα δεξιά της εξίσωσης (L) παριστάνει τη διαρροή μέσω του περιοριστικού στρώματος, όπου K_z' είναι η κατακόρυφη υδραυλική αγωγιμότητα του περιοριστικού στρώματος και b' είναι το πάχος του περιοριστικού στρώματος · h_{source} είναι το υδραυλικό ύψος στη δεξαμενή πηγής, στην άλλη πλευρά του περιοριστικού στρώματος.

Όταν η παραπάνω Εξίσωση εφαρμόζεται σε ελεύθερο υδροφορέα, χρησιμοποιούνται οι παραδοχές του Dupuit:

- (1) Οι γραμμές ροής είναι οριζόντιες και οι ισοδυναμικές γραμμές κάθετες.
- (2) Η οριζόντια υδραυλική κλίση είναι ίση με την κλίση της ελεύθερης επιφάνειας και ποικίλει με το βάθος.

Είναι κατανοητό ότι $T_x = K_x h$ και $T_y = K_y h$, όπου h είναι η ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα πάνω από τον πυθμένα του υδροφορέα, π.χ. το κορεσμένο βάθος · το h μπορεί να ποικίλει και χρονικά και χωρικά. S είναι η ειδική απόδοση. Ο όρος της διαρροής είναι τυπικά μηδέν, εκτός κι αν υπάρχει διαρροή προς ή από μια μονάδα που βρίσκεται κάτω από τον ελεύθερο υδροφορέα.

Στην Εξίσωση (2.1.1) δεν υπάρχει συνιστώσα της μεταβιβασιμότητας στην διεύθυνση z . Αυτό συμβαίνει επειδή η μεταβιβασιμότητα είναι μια μέση κατακόρυφη παράμετρος. Είναι μία διοδιάστατη χωρική έννοια που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την οριζόντια ροή σε έναν υδροφορέα. Επομένως, η μεταβιβασιμότητα στη διεύθυνση z δεν ορίζεται. Παρόλα αυτά, η υδραυλική αγωγιμότητα περιγράφει τις ιδιότητες της μεταβίβασης σε ένα σημείο σε έναν υδροφορέα και επομένως, έχει συνιστώσες και στις 3 διευθύνσεις.

Η άποψη του συστήματος ροής, δεν ασχολείται με την ταυτοποίηση υδροφορέων και περιοριστικών στρωμάτων, καθαυτών, αλλά με την κατασκευή της τρισδιάστατης κατανομής των υδραυλικών υψών, των

υδραυλικών αγωγιμοτήτων και των ιδιοτήτων αποθήκευσης οπουδήποτε μέσα στο σύστημα. Η άποψη του συστήματος ροής επιτρέπει και κάθετες και οριζόντιες συνιστώσες της ροής σε κάθε σημείο του συστήματος και έτσι επιτρέπει χρήση της ροής σε προφίλ δύο διαστάσεων ή τριών διαστάσεων.

Μια γενική μορφή της βασικής εξίσωσης είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (2.1.2)$$

όπου K_x, K_y, K_z είναι οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας, S_s είναι η ειδική αποθήκευση, R^* είναι ένας γενικός όρος σημειακής διαρροής/ πηγής που ορίζεται να είναι εγγενώς θετικός και ορίζει τον όγκο της εισροής στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα ανά μονάδα χρόνου. Εκροή: $R^* = -W^*$ (Anderson & Woessner, 1992)

2.1.1.1 Εξίσωση Boussinesq

Παραπάνω παρατηρήσαμε ότι όταν η Εξίσωση (2.1.1) χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει ελεύθερους υδροφορείς, θεωρούμε ότι $T_x = K_x h$ και $T_y = K_y h$ όπου h το κορεσμένο βάθος. Όταν τα $K_x h$ και $K_y h$ αντικαθίστανται στην Εξίσωση (2.1.1), η εξίσωση που προκύπτει είναι η μη-γραμμική εξίσωση Boussinesq:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (2.1.3)$$

όπου το L της Εξίσωσης (2.1.1) είναι μηδέν και ο συντελεστής αποθηκευτικότητας (S) είναι ίσος με την ειδική απόδοση (S_y). Γνωρίζοντας ότι:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h^2}{\partial x} &= 2h \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h^2}{\partial y} &= 2h \frac{\partial h}{\partial y} \end{aligned} \quad (2.1.4)$$

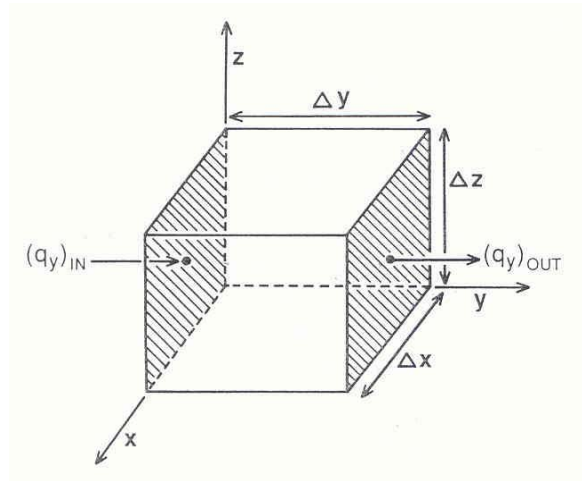
η εξίσωση μπορεί να γραφτεί:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) = 2S_y \frac{\partial h}{\partial t} - 2R \quad (2.1.5)$$

Η Εξίσωση (2.1.5) είναι μη- γραμμική γιατί το h εμφανίζεται υψωμένο στη δεύτερη δύναμη στην αριστερή πλευρά της εξίσωσης και στην πρώτη δύναμη στη δεξιά πλευρά. Κάποιοι ερευνητές(π.χ. Hornberger et al., 1970; Lin, 1972; Zucker et al., 1973; Gambolati et al., 1984) έχουν λύσει αυτή την εξίσωση με αριθμητικές τεχνικές ειδικά σχεδιασμένες να χειρίζονται μη-γραμμικές εξισώσεις. Παρόλα αυτά, υπάρχει ένας σχετικά εύκολος τρόπος να μεταχειριστούμε τη μη-γραμμικότητα στην Εξίσωση (2.1.3) που δεν ανακατεύει ειδικές τεχνικές επίλυσης. Χρησιμοποιώντας την πραγματική τιμή του κορεσμένου βάθους, η εξίσωση μπορεί να γραμμικοποιηθεί αποτελεσματικά σε ένα αριθμητικό μοντέλο. Αυτή είναι η προσέγγιση που χρησιμοποιείται στα MODFLOW, PLASM, και AQUIFEM-1 . (Anderson&Woessner, 1992)

2.1.2 Παραγωγή των Κυρίων εξισώσεων

Η Εξίσωση (2.1.2) προκύπτει με μαθηματικό συνδυασμό ενός υδρολογικού ισοζυγίου και του νόμου του Darcy. Η παραγωγή γίνεται παραδοσιακά με αναφορά σε έναν κύβο πορώδους υλικού που είναι αρκετά μεγάλο για να είναι αντιπροσωπευτικό των ιδιοτήτων του πορώδους μέσου και αρκετά μικρό έτσι ώστε η αλλαγή στο υδραυλικό ύψος μέσα στον όγκο αυτό να είναι σχετικά μικρός. Αυτός ο κύβος από πορώδες υλικό είναι γνωστός ως αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος (Representative Elementary Volume ή REV). Ο όγκος του είναι ίσος με $\Delta x \Delta y \Delta z$.



Σχήμα 2-2 Ο αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος που χρησιμοποιείται στην παραγωγή των εξισώσεων του συστήματος

(Πηγή: Anderson&Woessner, 1992)

Η ροή του νερού μέσα από τον REV εκφράζεται με όρους του ρυθμού εκπλήρωσης (\mathbf{q}), όπου \mathbf{q} είναι ένα διάνυσμα του οποίου το μέγεθος μπορεί να εκφραστεί με όρους τριών συνιστωσών: q_x , q_y και q_z .

$$\mathbf{q} = q_x \mathbf{i}_x + q_y \mathbf{i}_y + q_z \mathbf{i}_z \quad (2.1.6)$$

όπου \mathbf{i}_x , \mathbf{i}_y και \mathbf{i}_z είναι τα μοναδιαία διανύσματα στους άξονες x , y και z .

Από το υδρολογικό ισοζύγιο (διατήρηση μάζας):

$$\text{Εκροή- Εισροή} = \text{Μεταβολή στη συσσώρευση} \quad (2.1.7)$$

Θεωρούμε ροή κατά μήκος του y άξονα του REV. Η εισροή στον REV συμβαίνει μέσα από την επιφάνεια $\Delta x \Delta z$ και ισούται με $(q_y)_{IN}$. Η εκροή ισούται με $(q_y)_{OUT}$. Η τιμή της ογκομετρικής εκροής μείον την τιμή της ογκομετρικής εισροής κατά μήκος του άξονα y είναι:

$$[(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}] \Delta x \Delta z \quad (2.1.8)$$

Μπορούμε επίσης να το γράψουμε σαν:

$$\frac{(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}}{\Delta y} (\Delta x \Delta z \Delta y) \quad (2.1.9)$$

ή παραλείποντας τους δείκτες IN και OUT, η μεταβολή στο ρυθμό της ροής μέσα στον REV κατά μήκος του άξονα y είναι:

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} (\Delta x \Delta z \Delta y) \quad (2.1.10)$$

Παρόμοιες εκφράσεις μπορούν να γραφτούν για τη μεταβολή στο ρυθμό της ροής κατά μήκος των αξόνων x και z. Η ολική μεταβολή στο ρυθμό ροής είναι ίση με τη μεταβολή στη συσσώρευση και εκφράζεται σαν:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta z \Delta y = \text{Μεταβολή στη συσσώρευση} \quad (2.1.11)$$

Πρέπει επίσης να επιτρέψουμε τη δυνατότητα για σημειακή εκφόρτιση (π.χ. ένα πηγάδι άντλησης) ή για πηγή νερού (π.χ. ένα πηγάδι εμπλουτισμού ή κάποια άλλη πηγή φόρτισης) μέσα στον REV. Ορίσαμε το R^* να είναι θετικό όταν είναι πηγή νερού. Επομένως, αφαιρείται από την αριστερή πλευρά της Εξίσωσης (2.1.11). (Στην Εξίσωση (2.1.7) υπάρχει μείον μπροστά από τον όρο της εισροής). Το αποτέλεσμα είναι

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - R^* \right) \Delta x \Delta z \Delta y = \text{Μεταβολή στη συσσώρευση} \quad (2.1.12)$$

Τώρα θεωρούμε τη δεξιά πλευρά της Εξίσωσης (2.1.7). Η μεταβολή στην αποθήκευση εκφράζεται από την ειδική αποθήκευση (S_s), που ορίζεται να είναι ο όγκος του νερού που απελευθερώνεται από την αποθήκευση, ανά μονάδα μεταβολής στο υδραυλικό ύψος (h), ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα:

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z} \quad (2.1.13)$$

Η σύμβαση που χρησιμοποιείται στην Εξίσωση (2.1.13) είναι ότι το ΔV είναι θετικό, όταν το Δh είναι αρνητικό, ή με άλλα λόγια, το νερό απελευθερώνεται από την αποθήκευση όταν το υδραυλικό ύψος πέφτει. Ο ρυθμός της μεταβολής στην αποθήκευση στον REV είναι:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = - S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta z \Delta y \quad (2.1.14)$$

Συνδυάζοντας τις Εξισώσεις (2.1.13) και (2.1.14) και διαιρώντας με $\Delta x \Delta z \Delta y$, προκύπτει η τελική μορφή της εξίσωσης του υδρολογικού ισοζυγίου:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = - S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^* \quad (2.1.15)$$

Αυτή η εξίσωση, παρόλα αυτά, είναι περιορισμένης χρήσης γιατί δεν μπορούμε να μετρήσουμε το \mathbf{q} κατευθείαν. Χρησιμοποιείται ο νόμος του Darcy για να ορίσει τη σχέση μεταξύ \mathbf{q} και h . Το υδραυλικό ύψος είναι μια μεταβλητή που δεν μπορούμε να μετρήσουμε κατευθείαν. Ο νόμος του Darcy στις τρεις διαστάσεις γράφεται:

$$q_x = - K_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad q_y = - K_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad q_z = - K_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.1.16)$$

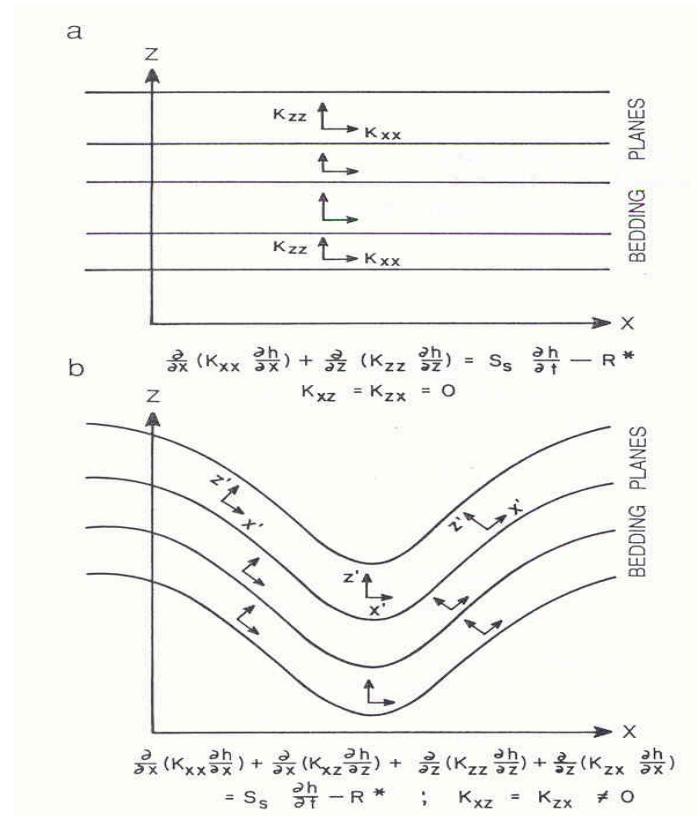
Όταν οι Εξισώσεις (2.1.16) αντικαθιστούνται στην Εξίσωση (2.1.15), προκύπτει η (2.1.2). Η Εξίσωση (2.1.1) προκύπτει από τη (2.1.2) θέτοντας $\frac{\partial h}{\partial z}$ ίσο με το μηδέν, πολλαπλασιάζοντας με b , προσθέτοντας τον όρο της διαρροής και θέτοντας $bS_s=S$ και $bR^*=R$.

Στις Εξισώσεις (2.1.1) και (2.1.2) γίνεται η υπόθεση ότι τα K_x , K_y και K_z (ή T_x , T_y) είναι ευθυγραμμισμένα με τους άξονες x , y και z . Αν η γεωλογία είναι τέτοια που να μην είναι δυνατή η ευθυγράμμιση των κύριων διευθύνσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας με ένα ορθογωνικό σύστημα συντεταγμένων, απαιτείται μια τροποποιημένη μορφή της κύριας εξίσωσης, που χρησιμοποιεί όλες τις συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας. Τότε:

$$\overline{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.1.17)$$

Οι συνιστώσες του τένσορα μπορούν να μετρηθούν κατά τη διάρκεια ενός τεστ άντλησης, αλλά όταν οι κύριες διευθύνσεις είναι γνωστές, γίνονται εναλλαγές συντεταγμένων, έτσι ώστε οι εκτός κυρίας διαγωνίου συνιστώσες να μηδενιστούν μέσα στα κελιά ή στα στοιχεία. Αυτό ολοκληρώνεται ορίζοντας ένα παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων για όλο το πεδίο του προβλήματος και τοπικά συστήματα συντεταγμένων για κάθε κελί ή στοιχείο στο πλέγμα. Στα τοπικά συστήματα, οι εκτός κυρίας διαγωνίου συνιστώσες του τένσορα της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι ίσες με το μηδέν. Έτσι, είναι δυνατόν να προκύψουν εξισώσεις συσχετίζοντας τις κύριες συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας που ορίστηκαν στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων, με τις συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας που ορίστηκαν στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων.

Όταν οι κύριες συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι ευθυγραμμισμένες με ένα ορθογωνικό σύστημα συντεταγμένων, οι εκτός κυρίας διαγωνίου συνιστώσες του tensor της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι μηδέν και η δευτερεύουσες συνεισφορές στις κύριες συνιστώσες μπορούν να απαλειφθούν όπως στην Εξίσωση (2.1.2). Οι Εξισώσεις (2.1.1) και (2.1.2) επίσης υποθέτουν ότι η πυκνότητα του νερού είναι σταθερή. Η ροή που εξαρτάται από την πυκνότητα είναι μια περιπλοκή στα προβλήματα που εμπεριέχουν αλμυρό νερό, αμιγείς ρυπαντές και διάφορους αναμειγμένους ρυπαντές. Αν οι επιδράσεις της πυκνότητας είναι σημαντικές, απαιτείται μια διαφορετική κύρια εξίσωση και ένας ειδικός αριθμητικός κώδικας. (Anderson&Woessner,1992)



Σχήμα 2-3 Προσανατολισμός του συστήματος συντεταγμένων.

a. Οι άξονες z και x είναι ευθυγραμμισμένοι με τις κύριες διευθύνσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας.

b. Ορίζεται ένα καθολικό σύστημα x-z . Τα τοπικά συστήματα (x'-z') ευθυγραμμίζονται με τις κύριες συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας.

(Πηγή: Anderson & Woessner, 1992)

2.1.2 Αριθμητικές μέθοδοι

Όταν οι Εξισώσεις (2.1.1) και (2.1.2) απλοποιηθούν, μπορούν να λυθούν αναλυτικά. Οι απλοποιήσεις συνήθως περιέχουν παραδοχές ομοιογένειας μονο- ή διοδιάστατη ροή. Εκτός από τις εφαρμογές στην υδραυλική πηγαδιών, οι αναλυτικές λύσεις για τη ροή δε χρησιμοποιούνται ευρέως σε πρακτικές εφαρμογές. Οι αριθμητικές λύσεις είναι πολύ πιο ασταθείς και, με την εκτεταμένη διαθεσιμότητα των υπολογιστών, τώρα είναι ευκολότερο να χρησιμοποιηθούν από ότι οι περισσότερο πολύπλοκες αναλυτικές λύσεις.

Στη μοντελοποίηση των υπογείων υδάτων χρησιμοποιούνται οι παρακάτω πέντε αριθμητικές μέθοδοι: α) πεπερασμένων διαφορών, β) πεπερασμένων στοιχείων, γ) ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών, δ) η μέθοδος ολοκληρωμένης οριακής εξίσωσης, και ε) αναλυτικών στοιχείων. Η μέθοδος ολοκληρωμένης οριακής εξίσωσης, και αναλυτικών στοιχείων είναι σχετικά νέες τεχνικές και δεν έχουν ακόμα χρησιμοποιηθεί ευρέως. Η μέθοδος των ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών σχετίζεται στενά με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων είναι αυτές που χρησιμοποιούνται συνήθως για την επίλυση προβλημάτων ροής.

Ένα πρόγραμμα υπολογιστή επιλύει ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων που δημιουργούνται προσεγγίζοντας τις μερικές διαφορικές εξισώσεις (κύρια εξίσωση, οριακές και αρχικές συνθήκες) που αποτελούν το μαθηματικό μοντέλο. Οι τεχνικές προσέγγισης, όπως οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων, ενεργούν στο μαθηματικό μοντέλο και το μετατρέπουν σε μια μορφή που μπορεί να επιλυθεί γρήγορα από έναν υπολογιστή. Το σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων που προκύπτουν με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εκφραστεί σαν μια συνάρτηση πινάκων. Έτσι, η διαδικασία επίλυσης αποτελείται από δύο βήματα: (1) εφαρμογή των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων στο μαθηματικό μοντέλο και (2) επίλυση της εξίσωσης πινάκων που προκύπτει.

Η επιλογή ανάμεσα στο μοντέλο πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων εξαρτάται από το πρόβλημα που πρόκειται να λυθεί και από την προτίμηση του χρήστη. Οι πεπερασμένες διαφορές είναι εύκολες στην κατανόηση και στον προγραμματισμό. Γενικά, απαιτούνται λιγότερα δεδομένα εισόδου για την κατασκευή του πλέγματος πεπερασμένης διαφοράς. Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι καλύτερα για την προσέγγιση ορίων ακανόνιστου σχήματος, παρά οι πεπερασμένες διαφορές. Είναι ευκολότερο να προσαρμοστεί το μέγεθος μεμονωμένων στοιχείων, καθώς και η τοποθεσία των ορίων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, διευκολύνοντας πολύ τη διερεύνηση της επίδρασης της χωροθέτησης των κόμβων στην επίλυση. Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι επίσης καλύτερα στη διαχείριση εσωτερικών ορίων, όπως οι ζώνες με σφάλμα και μπορούν να προσομοιώσουν σημειακές πηγές και σημειακές διαρροές, επιφάνειες με διαρροή και κινούμενους

υδροφόρους ορίζοντες καλύτερα από ότι οι πεπερασμένες διαφορές. Για άλλα προβλήματα, η επιλογή μιας μεθόδου προσέγγισης γενικά βασίζεται στην προτίμηση του χρήστη.

Στην πραγματικότητα, πολλοί υποστηρίζουν ότι η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών είναι μια ειδική περίπτωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Παρόλα αυτά, υπάρχει μια θεμελιώδης διαφορά στη φιλοσοφία ανάμεσα στις δύο μεθόδους. Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών υπολογίζει μία τιμή για το υδραυλικό ύψος σε κάθε κόμβο, που είναι επίσης το μέσο υδραυλικό ύψος στο κελί γύρω από τον κόμβο. Καμία υπόθεση δε γίνεται για τον τρόπο μεταβολής της τιμής του υδραυλικού ύψους από τον έναν κόμβο στον άλλον. Τα πεπερασμένα στοιχεία, από την άλλη, ορίζουν ακριβώς τη μεταβολή του υδραυλικού ύψους μέσα σε ένα στοιχείο μέσω των βασικών συναρτήσεων. Τα υδραυλικά ύψη υπολογίζονται στους κόμβους για ευκολία, αλλά το υδραυλικό ύψος ορίζεται παντού μέσω των βασικών συναρτήσεων.

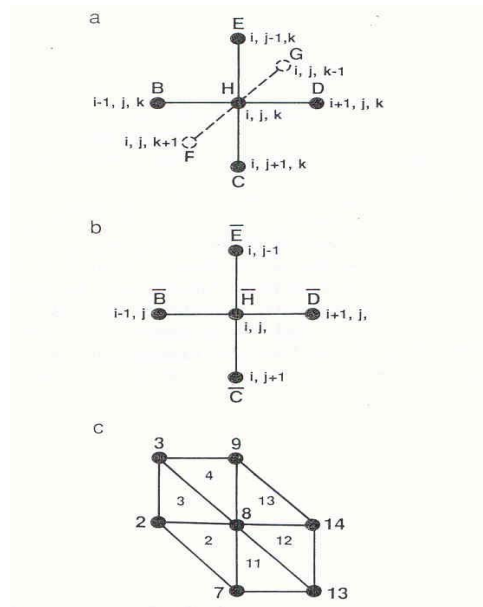
Η γενική μορφή έκφρασης της πεπερασμένης διαφοράς για την εξίσωση (2.2) γράφεται για το υπολογιστικό μόριο του σχήματος 2-4a ως εξής:

$$Bh_{i-1,j,k} + Ch_{i,j+1,k} + Dh_{i+1,j,k} + Eh_{i,j-1,k} + Fh_{i,j,k+1} + Gh_{i,j,k-1} + Hh_{i,j,k} = RHS_{i,j,k} \quad (2.1.18)$$

Η εξίσωση για το υδραυλικό ύψος στον κόμβο i, j, k ($h_{i,j,k}$) περιλαμβάνει το υδραυλικό ύψος στον ίδιο τον κόμβο, καθώς και τα υδραυλικά ύψη στους 6 γύρω κόμβους. Κάθε υδραυλικό ύψος πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή (B, C, D, E, F, G , ή H) που είναι συνάρτηση της υδραυλικής αγωγιμότητας μεταξύ των κόμβων. Ο συντελεστής H είναι, επίσης, συνάρτηση του όρου αποθήκευσης. Ο όρος $RHS_{i,j,k}$ περιέχει τους όρους αποθηκευτικότητας και εμπλουτισμού στο δεξί μέρος της εξίσωσης. Η δισδιάστατη εξίσωση πεπερασμένης διαφοράς, για το υπολογιστικό μόριο της εικόνας 2-4b γράφεται:

$$\bar{B}h_{i-1,j} + \bar{C}h_{i,j+1} + \bar{D}h_{i+1,j} + \bar{E}h_{i,j-1} + 1 + \bar{H}h_{i,j} = RHS_{i,j} \quad (2.1.19)$$

όπου πάλι τα $\bar{B}, \bar{C}, \bar{D}, \bar{E}$ και \bar{H} είναι συντελεστές. Και οι δύο παραπάνω εξισώσεις μπορούν να γραφτούν σαν εξισώσεις πινάκων της μορφής $[A]\{h\}=\{f\}$ όπου $[A]$ είναι ο πίνακας συντελεστών, $\{h\}$ είναι το διάνυσμα των άγνωστων υδραυλικών υψών και $\{f\}$ είναι το διάνυσμα των όρων της δεξιάς μέλους (RHS) της εξίσωσης. (Anderson & Woessner, 1992)



Σχήμα 2-4 Υπολογιστικά στοιχεία

a. Τρισδιάστατο στοιχείο πεπερασμένων διαφορών

b. Δισδιάστατο στοιχείο πεπερασμένων διαφορών

c. Κομμάτι με έξι πεπερασμένα στοιχεία γύρω από τον κόμβο 8.

(Πηγή: Anderson & Woessner, 1992)

2.2 Η κατασκευή του θεμελιώδους μοντέλου

Θεμελιώδες μοντέλο είναι η εικονική αναπαράσταση του συστήματος της υπόγειας ροής, συχνά με τη μορφή ενός διαγράμματος συστημάτων ή τομών. Η φύση του θεμελιώδους μοντέλου θα καθορίσει τις διαστάσεις του αριθμητικού μοντέλου και το σχέδιο του πλέγματος.

Ο στόχος της κατασκευής του θεμελιώδους μοντέλου είναι να απλοποιήσει το πρόβλημα του πεδίου και να οργανώσει τη συσχετιζόμενη πληροφορία πεδίου, έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να αναλυθεί πιο εύκολα. Η απλοποίηση είναι απαραίτητη γιατί δεν είναι εφικτή η πλήρης ανακατασκευή του συστήματος πεδίου.

Το πρώτο βήμα στο σχηματισμό του θεμελιώδους μοντέλου είναι ο ορισμός της περιοχής ενδιαφέροντος, π.χ. ο καθορισμός των ορίων του μοντέλου. Τα αριθμητικά μοντέλα απαιτούν οριακές συνθήκες, έτσι που το υδραυλικό ύψος ή η ροή να καθορίζεται κατά μήκος. Όποτε είναι δυνατόν, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται τα φυσικά υδρογεωλογικά όρια σαν όρια του μοντέλου. Παρόλα αυτά, για κάποια προβλήματα μπορεί να είναι αναγκαίο να περιοριστεί το πεδίο του προβλήματος σε μικρότερο από αυτό που περικλείεται από τα φυσικά όρια του υδροφορέα. Τα πραγματικά υδρογεωλογικά όρια του συστήματος θα πρέπει να καθορίζονται όταν σχηματίζεται το θεμελιώδες μοντέλο. Υπάρχουν τρία βήματα στην κατασκευή του θεμελιώδους μοντέλου.: 1) καθορισμός των υδροστρωματογραφικών μονάδων, 2) εκτίμηση υδατικού αποθέματος, 3) ορισμός του συστήματος ροής.

2.2.1 Καθορισμός των υδροστρωματογραφικών μονάδων

Η γεωλογική πληροφορία, που περιλαμβάνει γεωλογικούς χάρτες και τομές, και πηγάδια συνδυάζεται με πληροφορίες σχετικές με τις υδρογεωλογικές ιδιότητες για να ορίσουν τις υδροστρωματογραφικές μονάδες για το θεμελιώδες μοντέλο. Στην μοντελοποίηση τοπικών συστημάτων ροής, οι υδροφορείς και τα περιοριστικά στρώματα ορίζονται χρησιμοποιώντας το μοντέλο της υδροστρωματογραφικής μονάδας που εισήγαγε ο Maxey (1964) και επανεκτίμησε ο Seaber (1988). Απλά, οι υδροστρωματογραφικές μονάδες περιλαμβάνουν γεωλογικές μονάδες παρόμοιων υδρογεωλογικών ιδιοτήτων.

Διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί μπορούν να συνδυαστούν σε μία απλή υδροστρωματογραφική μονάδα ή ένας γεωλογικός σχηματισμός μπορεί να διαιρεθεί σε υδροφορείς και περιοριστικές μονάδες.

Οι γεωλόγοι βασίζονται πάνω σε υδροστρωματογραφικές πληροφορίες και σε μια κατανόηση της ιστορίας της εναπόθεσης για να βοηθήσουν στην επανακατασκευή του περιβάλλοντος της εναπόθεσης. Τα μοντέλα φάσεων είναι βοηθητικά σε αυτή την ανάλυση. Φάσεις είναι μια μονάδα από υλικό με παρόμοιες φυσικές ιδιότητες που εναποτέθηκε στο ίδιο γεωλογικό περιβάλλον. Τα μοντέλα φάσεων είναι θεμελιώδη μοντέλα της αναμενόμενης κατανομής των φάσεων. Η γνώση της ιστορίας της εναπόθεσης μιας περιοχής μπορεί να βοηθήσει στην πρόβλεψη της εμφάνισης τύπων ιζήματος όταν δεν υπάρχει πλούσια γεωλογική πληροφορία. Οι γεωλογικές φάσεις μπορούν τότε να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό των υδροστρωματογραφικών μονάδων.

Η έννοια της υδροστρωματογραφικής μονάδας είναι χρήσιμη κυρίως για προσομοίωση γεωλογικών συστημάτων σε τοπική κλίμακα. Σε μικρότερες κλίμακες, κάποιος θα ήθελε να ομαδοποιήσει γειτονικές γεωλογικές μονάδες παρόμοιων υδρογεωλογικών ιδιοτήτων μέσα σε τοπικά ορισμένες υδροστρωματογραφικές μονάδες. Στην πράξη, παρόλα αυτά, αυτό είναι δύσκολο να γίνει γιατί απαιτούνται λεπτομερείς ειδικές πληροφορίες για την στρωματογραφία και την υδραυλική αγωγιμότητα, για να οριστούν οι υδροστρωματογραφικές μονάδες σε αυτή την κλίμακα. Τέτοιες λεπτομερείς πληροφορίες είναι σπάνια διαθέσιμες. Τα μοντέλα φάσεων είναι περιορισμένης χρήσης εδώ γιατί είναι ιδανικές περιλήψεις των περιβαλλόντων εναπόθεσης, παριστάνοντας μια σύνθεση των χαρακτηριστικών πολλών παρόμοιων περιβαλλόντων. Δεν παριστάνουν, όμως, τα χαρακτηριστικά καμιάς τοποθεσίας.

2.2.2 Εκτίμηση υδατικού αποθέματος

Οι πηγές του νερού προς το σύστημα καθώς και οι αναμενόμενες διευθύνσεις ροής και τα σημεία εξόδου θα πρέπει να είναι τμήμα του θεμελιώδους μοντέλου. Οι εκτιμώμενες στο πεδίο εισροές μπορούν να περιλαμβάνουν εμπλουτισμό του υπογείου νερού από βροχόπτωση,

επιφανειακή ροή ή εμπλουτισμό από επιφανειακά υδάτινα στρώματα. Οι εκροές μπορούν να περιλαμβάνουν πηγές, χαμηλή ροή προς χείμαρρους, εξατμισοδιαπνοή και άντληση. Η υπόγεια ροή μπορεί να συμβαίνει και σαν εισροή και σαν εκροή.

2.2.3 Καθορισμός του συστήματος ροής

Η υδροστρωματογραφία αποτελεί το πλαίσιο εργασίας του θεμελιώδους μοντέλου. Η υδρολογική πληροφορία χρησιμοποιείται για να αντιληφθούμε την κίνηση των υπογείων υδάτων μέσα στο σύστημα. Η υδρολογική πληροφορία για την κατακρήμνιση, την εξάτμιση και την επιφανειακή απορροή, καθώς και πληροφορίες για το υδραυλικό ύψος και τη γεωχημεία, χρησιμοποιούνται σε αυτήν την ανάλυση. Οι μετρήσεις για τα επίπεδα του νερού χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της γενικής κατεύθυνσης της υπόγειας ροής, της θέσης των περιοχών εμπλουτισμού και άντλησης, και της σύνδεσης ανάμεσα στους υδροφορείς και στα συστήματα επιφανειακών υδάτων. Ο καθορισμός του συστήματος ροής μπορεί να βασιστεί μόνο σε φυσικά υδρολογικά στοιχεία, αλλά συνίσταται η χρήση γεωχημικών στοιχείων όποτε είναι δυνατό για να ενδυναμωθεί το θεμελιώδες μοντέλο. Στοιχεία χημείας νερού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προκύψουν οι διευθύνσεις ροής, για να ταυτοποιηθούν οι πηγές και οι ποσότητες εμπλουτισμού, να εκτιμηθούν οι ρυθμοί υπόγειας ροής και να οριστούν τα τοπικά, ενδιάμεσα και περιφερειακά συστήματα ροής. Οι χημικές αναλύσεις συνήθως περιλαμβάνουν τις συγκεντρώσεις των κυρίων κατιόντων (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+}) και ανιόντων (SO_4^{-2} , HCO_3^{-} , Cl^{-}), θερμοκρασία, και pH. Ανάλογα με το σκοπό της χημικής μελέτης, οι αναλύσεις μπορούν ακόμα να περιλαμβάνουν ίχνη μετάλλων, σταθερά και ραδιενεργά ισότοπα, και οργανικά μίγματα. (Anderson & Woessner, 1992)

2.3 Είδη μοντέλων

2.3.1 Δισδιάστατα χωρικά μοντέλα

Οι δισδιάστατες χωρικές προσομοιώσεις μπορούν να μελετήσουν τέσσερις διαφορετικούς τύπους υδροφορέων. Αυτοί είναι οι περιορισμένοι υδροφορείς, οι περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή, οι ελεύθεροι υδροφορείς και οι μικτοί υδροφορείς.

2.3.1.1 Περιορισμένοι υδροφορείς

Κατά την προσομοίωση περιορισμένων υδροφορέων, η μεταβιβασιμότητα και ο συντελεστής αποθήκευσης καθορίζονται για κάθε κόμβο, κελί ή στοιχείο. Μεταβολή στη μεταβιβασιμότητα μπορεί να αντιπροσωπεύει αλλαγές είτε στην υδραυλική αγωγιμότητα, είτε στο πάχος του υδροφορέα. Σε ένα δισδιάστατο χωρικό μοντέλο, η ανισοτροπία στη μεταβιβασιμότητα εκπροσωπείται από τη διαφορά ανάμεσα στη μεταβιβασιμότητα στους άξονες x και y (T_x και T_y). Τα στοιχεία εισόδου στο μοντέλο μπορούν να αποτελούνται από τους δύο πίνακες μεταβιβασιμότητας ή από τον πίνακα T_x και έναν ανισοτροπικό παράγοντα που υπολογίζει τον πίνακα T_y από τον πίνακα T_x . Η μεταβιβασιμότητα μπορεί να εκτιμηθεί από βιβλιογραφικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και εκτιμήσεις του πάχους του υδροφορέα. Οι τιμές για τη μεταβιβασιμότητα και το συντελεστή αποθήκευσης γενικά παίρνονται από αποτελέσματα των τεστ άντλησης. Ο συντελεστής αποθήκευσης μπορεί να υπολογιστεί από εκτιμήσεις της ειδικής αποθήκευσης. (Anderson & Woessner, 1992)

2.3.1.2 Περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή

Σε ένα περιορισμένο σύστημα με διαρροή, το περιοριστικό στρώμα και ο γειτονικός υδροφορέας που τροφοδοτεί με διαρροή τον περιορισμένο υδροφορέα δεν αντιπροσωπεύονται σαφώς στο μοντέλο αλλά

προσομοιώνονται μέσω ενός όρου διαρροής. Ο όρος διαρροής είναι μια συνάρτηση του λόγου της κατακόρυφης υδραυλικής αγωγιμότητας (K_z') του περιοριστικού στρώματος προς το πάχος του περιοριστικού στρώματος (b')

$$f(L) = K_z' / b' \quad (2.3.1)$$

Πίνακες καθορίζουν τις τιμές της διαρροής και την κατανομή του υδραυλικού ύψους στον υδροφορέα-πηγή. Απαιτούνται επίσης, η μεταβιβασιμότητα και ο συντελεστής αποθήκευσης του περιορισμένου υδροφορέα με διαρροή.

Η πηγή του νερού προς τον υδροφορέα μπορεί να είναι ένας άλλος περιορισμένος υδροφορέας ή ένας ελεύθερος υδροφορέας ή ακόμα και ένα επιφανειακό υδάτινο σώμα. Το μοντέλο γενικά θεωρεί ότι το υδραυλικό ύψος στην πηγή ποικίλει με το χρόνο. Με άλλα λόγια, οι υδρολογικές πιέσεις στον υδροφορέα με διαρροή δεν έχουν καμιά επιρροή στο υδραυλικό ύψος στον υδροφορέα πηγή.

Άλλη παραδοχή που χρησιμοποιείται κατά την προσομοίωση περιορισμένων υδροφορέων με διαρροή σε διοδιάστατα χωρικά μοντέλα, είναι ότι δεν υπάρχει καμία απελευθέρωση νερού από την αποθήκευση μέσα στο περιοριστικό στρώμα. Η παροδική απελευθέρωση νερού από το περιοριστικό στρώμα μπορεί να θεωρηθεί ότι συμβαίνει κατά την περίοδο $t_s = S_s' b'^2 / 2K_z'$, όπου S_s' και K_z' είναι η ειδική αποθήκευση και η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα, αντίστοιχα, του περιοριστικού στρώματος και b' είναι το πάχος του περιοριστικού στρώματος. (Anderson & Woessner, 1992)

2.3.1.3 Ελεύθεροι υδροφορείς

Οι περισσότερες εφαρμογές που περιλαμβάνουν ελεύθερους υδροφορείς χρησιμοποιούν τις παραδοχές του Dupuit, οι οποίες εξασφαλίζουν την οριζόντια ροή απαιτώντας να μην υπάρχει αλλαγή στο υδραυλικό ύψος με το βάθος. Η χρήση των παραδοχών του Dupuit, πρακτικά, μετατρέπει ένα τρισδιάστατο πρόβλημα σε διοδιάστατο χωρικό πρόβλημα και ένα πρόβλημα διοδιάστατου προφίλ σε μονοδιάστατο πρόβλημα. Το μοντέλο υπολογίζει την ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα για κάθε κόμβο. Οι προσομοιώσεις που περιλαμβάνουν ελεύθερο υδροφορέα απαιτούν πίνακες που να καθορίζουν την υδραυλική αγωγιμότητα, την ειδική απόδοση και την ανύψωση του επιπέδου αναφοράς. Επειδή η προσομοίωση γίνεται συνήθως από

διοδιάστατη χωρική σκοπιά, οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας θα πρέπει να υπολογίζονται κατά μέσον όρο κατακόρυφα ή να παίρνονται από τεστ άντλησης. Η ειδική απόδοση μπορεί επίσης να αποκτηθεί από τεστ άντλησης αλλά αυτό δεν είναι πάντα εφικτό. Η ειδική απόδοση ποικίλει από 0,1 ως 0,4. Δεδομένης αυτής της μικρής διακύμανσης των πιθανών τιμών για την ειδική απόδοση, είναι σύνηθες να επιλέγεται μια τιμή μέσα από αυτό το εύρος και μετά να ελέγχεται η ευαισθησία του μοντέλου στην ειδική απόδοση.

2.3.1.4 Μικτά συστήματα υδροφορέων

Ένα μικτό σύστημα υδροφορέων αποτελείται από κάποιο συνδυασμό των παραπάνω τριών τύπων υδροφορέων. Ένας υδροφορέας μπορεί να ποικίλει χωρικά από ελεύθερες σε περιορισμένες συνθήκες. Ένας υδροφορέας μπορεί να υποστεί μετατροπή από περιορισμένες σε ελεύθερες συνθήκες, σαν αποτέλεσμα άντλησης.

2.3.2 Ημι-τριδιάστατα μοντέλα

Ένα ημι-τριδιάστατο μοντέλο προσομοιώνει μια σειρά από υδροφορείς με ενδιάμεσα περιοριστικά στρώματα. Όπως στα διοδιάστατα χωρικά μοντέλα περιορισμένων υδροφορέων με διαρροή, τα περιοριστικά στρώματα δεν παριστάνονται σαφώς σε ένα ημι-τριδιάστατο μοντέλο, ούτε υπολογίζονται τα υδραυτικά ύψη στα περιοριστικά στρώματα. Η επίδραση ενός περιοριστικού στρώματος προσομοιώνεται μέσω ενός όρου διαρροής (L_{ij}) που αντιπροσωπεύει την κατακόρυφη ροή ανάμεσα σε δύο υδροφορείς. Ο όρος διαρροής είναι μια συνάρτηση του συντελεστή διαρροής όπως εκφράζεται στην Εξίσωση (2.3.1) και της διαφοράς υδραυλικού ύψους κατά μήκος του περιοριστικού στρώματος (Εξίσωση 2.1.1). Η απελευθέρωση νερού από την αποθηκευτικότητα μέσω του περιοριστικού στρώματος τυπικά δε λαμβάνεται υπόψη σ' αυτήν την προσέγγιση. Σε ένα ημι-τριδιάστατο μοντέλο, το υδραυλικό ύψος στη μονάδα πάνω από το ανώτερο περιοριστικό στρώμα,

συνήθως ελεύθερος υδροφορέας, μπορεί να υπολογιστεί άμεσα από το μοντέλο. Οι κώδικες που σχεδιάστηκαν για την αντιμετώπιση ημι-

τρισδιάστατων συνθηκών συζητώνται από τους Aral(1989), Walton (1989), και Hemker-van Elburg (1987).

Η αγνόηση της οριζόντιας ροής στα περιοριστικά στρώματα προκαλεί μια διαφορά στα υδραυλικά ύψη των μοντελοποιημένων στρωμάτων μικρότερη από 5%, όταν η αντίθεση στην υδραυλική αγωγιμότητα ανάμεσα στον υδροφορέα και στα περιοριστικά στρώματα είναι τουλάχιστον δύο τάξεις μεγέθους. Όταν η αντίθεση στην υδραυλική αγωγιμότητα ανάμεσα στον υδροφορέα και στα περιοριστικά στρώματα είναι μικρότερη από δύο τάξεις μεγέθους, πρέπει να προτιμηθεί ένα πλήρως τρισδιάστατο μοντέλο. (Anderson & Woessner, 1992)

2.3.3 Μοντέλα κάθετων τομών και πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα

Τα δισδιάστατα μοντέλα κάθετων τομών και τα πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα χρησιμοποιούν την άποψη του συστήματος ροής. Τα πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα έχουν κατ' ουσία τις ίδιες απαιτήσεις σε πίνακες όπως και τα δισδιάστατα χωρικά μοντέλα εκτός του ότι οι παράμετροι πρέπει να καθορίζονται για κάθε στρώμα του μοντέλου. Τα μοντέλα κάθετων τομών είναι μια ειδική τάξη μοντέλων · τα στοιχεία εισόδου μπορούν να συντεθούν παρόμοια με τα δισδιάστατα χωρικά (περιορισμένα) μοντέλα ή με τα πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα.

Τα μοντέλα κάθετων τομών και τα πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν ελεύθερους υδροφορείς όταν οι κατακόρυφες κλίσεις του υδραυλικού ύψους είναι σημαντικές. Σε αυτά τα μοντέλα, ο υδροφόρος ορίζοντας αποτελεί μέρος του ορίου. Και τα δύο μοντέλα, πεπερασμένης διαφοράς και πεπερασμένου στοιχείου, μπορούν να προσομοιώσουν υδροφορείς σε προφίλ, αλλά η κίνηση του υδροφόρου ορίζοντα χειρίζεται πιο εύκολα με ένα μοντέλο πεπερασμένου στοιχείου.

Τα πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παραστήσουν παροδική απελευθέρωση νερού από την αποθηκευτικότητα μέσω των περιοριστικών στρωμάτων, περιλαμβάνοντας το περιοριστικό στρώμα σαν στρώμα με προσδιορισμένη τιμή ειδικής αποθηκευτικότητας. Η απελευθέρωση νερού από την αποθηκευτικότητα μέσω των ενδιάμεσων στρωμάτων περιλαμβάνεται σαν μια επιλογή σε κάποιους κώδικες.

2.2 Περιγραφή του Μοντέλου PTC

2.4.1 Κύριες εξισώσεις

Το PTC χρησιμοποιεί το παρακάτω σύστημα διαφορικών εξισώσεων για να παραστήσει την υπόγεια ροή που περιγράφεται από το υδραυλικό ύψος, h ,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \quad (2.4.1)$$

από τις συνιστώσες της υπόγειας ταχύτητας,

$$V_x = K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.4.2)$$

και από τη μεταφορά του ρυπαντή, που περιγράφεται από τη συγκέντρωση, c ,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ - \left[V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] + Q(c^w - c) - \theta[1 + E(\theta)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2.4.3)$$

Αυτές οι εξισώσεις προέρχονται από τις αρχές διατήρησης της μάζας και από το νόμο του Darcy. Οι όροι της εξίσωσης (2.4.3) θα εξηγηθούν αναλυτικά στο κεφάλαιο 2.4.4.

Η επίλυση των εξισώσεων απορρέει με την επόμενη σειρά: πρώτα επίλυση των υδραυλικών υψών, h , από την 1.1, μετά υπολογισμός των ταχυτήτων του Darcy V_x , V_y , V_z και, τελικά, λύση από την 1.3 για τη συγκέντρωση του ρυπαντή. (D.K. Babu, et al., 1997)

2.4.2 Ο αλγόριθμος επίλυσης του PTC

Λύνοντας το σύστημα των εξισώσεων 2.4.1-2.4.3 για πολύπλοκα φυσικά συστήματα, γενικά απαιτείται εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Για συστήματα κλίμακας πεδίου (field scale systems), η υπολογιστική προσπάθεια

που καταβάλλεται για τη επίλυση αυτών των τρισδιάστατων εξισώσεων είναι μεγάλη. Το PTC εφαρμόζει ένα μοναδικό διαχωριστικό αλγόριθμο για τη επίλυση των πλήρως τρισδιάστατων εξισώσεων, που μειώνει την υπολογιστική επιβάρυνση σημαντικά.

Ο αλγόριθμος εμπεριέχει διακριτικοποίηση του πεδίου σε περίπου παράλληλα οριζόντια επίπεδα. Μέσα από κάθε στρώμα, χρησιμοποιείται μια διακριτικοποίηση πεπερασμένων στοιχείων, επιτρέποντας την ακριβή αναπαράσταση πεδίων ακανόνιστου σχήματος. Τα επίπεδα συνδέονται κατακόρυφα μέσω μιας διακριτικοποίησης πεπερασμένων διαφορών. Αυτή η υβριδική σύζευξη της μεθόδου πεπερασμένου στοιχείου και πεπερασμένων διαφορών, παρέχει την ευκαιρία για την εφαρμογή της διαχωριστικής διαδικασίας. Κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης χρονικής επανάληψης, όλοι οι υπολογισμοί χωρίζονται σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα, όλες οι διακριτικοποιήσεις πεπερασμένων οριζόντιων στοιχείων λύνονται ανεξάρτητα η μία από την άλλη. Στο δεύτερο βήμα, λύνονται οι κατακόρυφες εξισώσεις που συνδέουν τα επίπεδα. (D.K. Babu, et al., 1997)

2.4.3 Τρισδιάστατη Υπόγεια Ροή

2.4.3.1 Βασική εξίσωση

Το PTC καθορίζει τα χαρακτηριστικά της ροής ενός υπόγειου συστήματος λύνοντας ως προς το υδραυλικό ύψος στην παρακάτω μερική διαφορική εξίσωση

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0 \quad (2.4.4)$$

όπου, χρησιμοποιώντας ένα βασικό σετ μονάδων μήκους(L), χρόνου(T) και μάζας(M),

h είναι το υδραυλικό ύψος [L],

K_{xx} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην οριζόντια διεύθυνση x [LT^{-1}],

K_{yy} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην οριζόντια διεύθυνση y [LT^{-1}],

K_{zz} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην κατακόρυφη διεύθυνση z [LT^{-1}],

S είναι ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας [L^{-1}],

Q_i είναι ο όρος σημειακής εκφόρτισης/ πηγής στη θέση i [$L^3 T^{-1}$] (π.χ.
αντλίες- θετικές τιμές υπονοούν έγχυση)

$\delta(\cdot)$ είναι η δέλτα συνάρτηση Dirac

r είναι ο αριθμός των σημείων σημειακής εκφόρτισης/ πηγής

Για ευκολία ο τελευταίος όρος στην Εξίσωση (2.4.4) θα συντομεύεται σαν Q .

Η βασική εξίσωση (2.4.4) λύνεται αριθμητικά από το PTC, χρησιμοποιώντας μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών. Στις επόμενες ενότητες, εισάγουμε κάθε μέθοδο και την εφαρμόζουμε στην εξίσωση (2.4.1).

2.4.3.2 Εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

Το σχήμα διακριτικοποίησης που χρησιμοποιείται από το PTC για τη επίλυση της (2.4.4), εμπεριέχει την προσέγγιση των όρων της (2.4.4) συμπεριλαμβάνοντας τις παραγώγους x και y , χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Τα πεπερασμένα στοιχεία στο οριζόντιο επίπεδο χρησιμοποιούνται ευρέως (π.χ. Pinder and Gray, 1977).

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων θεωρεί ότι υπάρχει ένα απεριόριστο σύνολο συναρτήσεων που θα αναπαραστήσει τη επίλυση της μερικής διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει την υπόγεια ροή.

Ένας πεπερασμένος τύπος προσέγγισης των σειρών είναι:

$$h(x, y, z, t) \sim \tilde{h}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N h_i(z, t) \omega_i(x, y) \quad (2.4.5)$$

όπου:

h είναι το υδραυλικό ύψος [L],

\tilde{h} είναι η σειριακή προσέγγιση του h [L],

h_i είναι ένας απροσδιόριστος συντελεστής [L],

ω_i είναι μια βασική συνάρτηση [αδιάστατη]

N είναι ο αριθμός των κόμβων στο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων

Η σειριακή προσέγγιση (2.4.5) παρέχει μια ακριβή αναπαράσταση, καθώς το N τείνει στο άπειρο (το \tilde{h} τείνει στο h). Με μια προσεκτική επιλογή των βασικών συναρτήσεων ω_i , οι αόριστοι συντελεστές h_i παίρνουν τις τιμές του υδραυλικού ύψους στους κόμβους με συντεταγμένες (x,y,z) . Ένα κλειδί για την υπολογιστική αποδοτικότητα της μεθόδου πεπερασμένου στοιχείου είναι η χρήση μιας συνεχούς βασικής συνάρτησης με ξεχωριστά βήματα, που είναι μη μηδενική μόνο σε μια μικρή υποπεριοχή του συνολικού πεδίου. Ενώ πολλά διαφορετικά είδη βασικών συναρτήσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν [Lapidus and Pinder, 1982], το PTC χρησιμοποιεί γραμμικές βασικές συναρτήσεις με ξεχωριστά βήματα ανάμεσα σε γειτονικούς κόμβους πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος πεπερασμένου στοιχείου προχωρεί σημειώνοντας ότι, παρόλο που η διαφορική συνάρτηση L (π.χ. εξίσωση 2.4.4) όταν λειτουργεί στο h είναι ίση με το μηδέν, όταν η L λειτουργεί στην προσεγγιστική συνάρτηση εισάγεται λάθος. Μαθηματικά, ξαναγράφουμε την (2.4.4) σαν:

$$L(h) = 0 \quad (2.4.6)$$

όταν

$$L(\tilde{h}) = R \quad (2.4.7)$$

Όπου R είναι το υπολειμματικό λάθος.

Για να λύσουμε την εξίσωση (2.4.5) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένου στοιχείου, προσπαθούμε να ελαχιστοποιήσουμε το λάθος R . Αυτό το πετυχαίνουμε θεωρώντας πρώτα ένα ολοκληρωμένο σετ συναρτήσεων ω_i . Αν τώρα επιδιώξουμε το λάθος R να είναι ορθογωνικό σε όλες τις πιθανές τιμές των ω_i , επιδιώκουμε στην πραγματικότητα το R να

μηδενιστεί κι έτσι να αποκτήσουμε μια λύση της (2.4.5). Εκφράζοντας αυτό με άλλο τρόπο:

$$L(\tilde{h}) = L(h) \quad \text{όταν} \quad R = 0 \quad (2.4.8)$$

Το PTC χρησιμοποιεί το ίδιο σύνολο συναρτήσεων για τις συναρτήσεις ω_i , όπως και για τις συναρτήσεις ω_i . Αυτή η διαδικασία λέγεται μέθοδος του Galerkin. Συνεπώς, οι ω_i και ω_j χρησιμοποιούνται εναλλάξ από δω και στο εξής.

Δυστυχώς, η συνθήκη που εκφράζεται από την (2.4.8) μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν το N τείνει στο άπειρο, ενώ οι υπολογιστές μπορούν να χειριστούν μόνο πεπερασμένα σύνολα αριθμών. Αναγκάζομαστε, επομένως, να θεωρήσουμε ένα πεπερασμένο υποσύνολο τιμών ω_i , $i=1,2,\dots,N$, το οποίο γενικά δίνει μια προσέγγιση της λύσης. Ανακαλώντας τον ορισμό των ορθογωνικών συναρτήσεων, οι συνθήκες N μπορούν να εκφραστούν σαν:

$$\iint_{\Omega} L(\tilde{h}) \omega_i dx dy = 0 \quad i=1,2,\dots,N \quad (2.4.9)$$

όπου το πεδίο ολοκλήρωσης Ω καλύπτει ολόκληρη την οριζόντια διατομή της περιοχής ροής. Εισάγοντας τον ορισμό της (2.4.5), παίρνουμε για κάθε συνάρτηση ω_i

$$\iint_{\Omega} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial z} \right) - S \frac{\partial \tilde{h}}{\partial t} + Q \right] \omega_i dx dy = 0 \quad (2.4.10)$$

Ακολουθώντας την καθιερωμένη διαδικασία για την ολοκλήρωση σε διδιάστατη περίπτωση, οι όροι x και y της εξίσωσης (2.4.10) μπορούν να ολοκληρωθούν με τη χρήση του θεωρήματος του Green, και προκύπτει

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} \left[K_{zz} \left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} \frac{\partial \omega_i}{\partial x} \right) + K_{yy} \left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial y} \frac{\partial \omega_i}{\partial y} \right) \right] dx dy - \int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial y} l_y \right] \omega_i d\sigma \\ & - \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial z} \right) \right] \omega_i dx dy + \iint_{\Omega} \left[S \frac{\partial \tilde{h}}{\partial t} - Q \right] \omega_i dx dy = 0 \end{aligned} \quad (1.11)$$

όπου l_x και l_y είναι τα συνημίτονα διεύθυνσης ανάμεσα στην κάθετο στη διατομή του ορίου σ (το $d\sigma$ αντιπροσωπεύει ένα μικρό μήκος αυτού του ορίου) και στους άξονες x και y , αντίστοιχα. Με αντικατάσταση της (2.4.5) στην (2.4.11) ολοκληρώνεται η χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών για διακριτικοποίηση:

$$\iint_{\Omega} \left[K_{zz} \left(\sum_{j=1}^N h_j \frac{\partial \omega_j}{\partial x} \right) \frac{\partial \omega_i}{\partial x} + K_{yy} \left(\sum_{j=1}^N h_j \frac{\partial \omega_j}{\partial y} \right) \frac{\partial \omega_i}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial}{\partial z} \sum_{j=1}^N h_j \omega_j \right) \omega_i + S \frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{j=1}^N h_j \omega_j \right) \omega_i - Q \omega_i \right] dx dy - \int_{\sigma} \left[K_{zz} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial y} l_y \right] \omega_i d\sigma = 0 \quad (2.4.12)$$

όπου $i = 1, 2, \dots, N$. Στον τελευταίο όρο της παραπάνω εξίσωσης δεν γίνεται τυπική αντικατάσταση, επειδή η ποσότητα στις αγκύλες είναι στην πραγματικότητα η ροή κατά μήκος του κατακόρυφου ορίου σ της οριζόντιας περιοχής. Επομένως, αυτός ο όρος αντιπροσωπεύει την οριακή συνθήκη της οριζόντιας ροής.

Στο οριζόντιο επίπεδο, σε δεδομένη χρονική στιγμή, η διακριτικοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων που συνοψίζεται στην (2.4.12), παρέχει με N εξισώσεις με N άγνωστους συντελεστές που ορίζονται στην (2.4.5). Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων παρέχει τα μέσα για τη μετατροπή των παραγώγων των γνωστών βασικών συναρτήσεων.

Σαν βοήθεια στους υπολογισμούς του ισοζυγίου μάζας, όλες αυτές οι εξισώσεις πολλαπλασιάζονται με το πάχος του επιπέδου στον κώδικα. (D.K. Babu, et al., 1997)

2.4.3.3 Εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών

Εισάγοντας ένα σύστημα πινάκων, όπου τα κεφαλαία μαυρισμένα γράμματα παριστάνουν τετραγωνικούς πίνακες και τα μικρά μαυρισμένα γράμματα παριστάνουν πίνακες στήλη, ξαναγράφουμε την 1.12 σε μορφή πίνακα:

$$\mathbf{A}\mathbf{h} + \mathbf{B} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} - \mathbf{v} + \mathbf{f} = 0 \quad (2.4.13)$$

Όπου τα \mathbf{A} και \mathbf{B} είναι πίνακες $N \times N$ και τα \mathbf{h} , $\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t}$, \mathbf{v} και \mathbf{f} είναι πίνακες-στήλες μήκους N . Τα στοιχεία των \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{v} και \mathbf{f} είναι

$$A_{ij} = \iint_{\Omega} \left[K_{xx} \frac{\partial w_i}{\partial x} \frac{\partial w_j}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w_j}{\partial y} \right] dx dy \quad (2.4.14a)$$

$$B_{ij} = \iint_{\Omega} S w_i w_j dx dy \quad (2.4.14b)$$

$$f_i = \iint_{\Omega} Q w_i dx dy - \int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma \quad (2.4.14c)$$

$$v_i = \sum_{j=1}^N \left[\iint_{\Omega} \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h_j}{\partial z} \right) w_i w_j dx dy \right] \quad (2.4.14d)$$

όπου το \mathbf{f} περιέχει τις γνωστές οριακές συνθήκες.

2.4.3.3.1 Η κάθετη παράγωγος

Το κύριο χαρακτηριστικό αυτού του κώδικα είναι η χρήση ενός διαχωριστικού σχήματος για τις χωρικές παραγώγους της διεύθυνσης z στην Εξίσωση 2.4.14d. Η κάθετη διακριτικοποίηση επιτυγχάνεται απαιτώντας οι οριζόντιοι βρόγχοι πεπερασμένου στοιχείου να αντιγράφονται σε στρώματα με κόμβους που στοιβάζονται το ένα πάνω στο άλλο. Αυτό σημαίνει ότι στην κατακόρυφη διεύθυνση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μονοδιάστατη εξίσωση πεπερασμένου στοιχείου για την προσέγγιση της (2.4.14d).

Χρησιμοποιώντας το k σαν κάθετο δείκτη, με $k=1$ σαν το κατώτατο στρώμα, αυτή η προσέγγιση μπορεί να γραφτεί σε πίνακοειδή μορφή:

$$\mathbf{v} \cong \mathbf{C}_k^+ (\mathbf{h}_{k+1} - \mathbf{h}_k) - \mathbf{C}_k^- (\mathbf{h}_k - \mathbf{h}_{k-1}) \quad (2.4.15)$$

όπου ο αρμονικός μέσος των ιδιοτήτων του γειτονικού στρώματος χρησιμοποιείται για να ορίσει τα στοιχεία του \mathbf{C}_k^+ , τον κάθετο όρο του στρώματος k και του στρώματος k+1, και του \mathbf{C}_k^- , του κάθετου στρώματος μεταξύ του στρώματος k και k-1.

$$C_{ij;k}^{\pm} = \iint_{\Omega} \frac{2}{\Delta z_k [\Delta z_{k\pm 1} / (K_{zz})_k + \Delta z_k / (K_{zz})_{k\pm 1}]} \omega_i \omega_j dx dy \quad (2.4.16)$$

όπου (Δz_k) είναι το πάχος k-οστού στρώματος στο σημείο προσέγγισης. Ο αρμονικός μέσος δίνει τις πιο ρεαλιστικές ποσότητες στις ετερογενείς καταστάσεις που αντιμετωπίζονται κανονικά.

Η αντικατάσταση της Εξίσωσης (2.4.15) στην (2.4.13) δίνει την παρακάτω έκφραση για ένα τυπικό k-οστό στρώμα:

$$\mathbf{A}_k \mathbf{h}_k + \mathbf{B}_k \frac{\partial \mathbf{h}_k}{\partial t} - [\mathbf{C}_k^+ (\mathbf{h}_{k+1} - \mathbf{h}_k) - \mathbf{C}_k^- (\mathbf{h}_k - \mathbf{h}_{k-1})] + \mathbf{f}_k = 0 \quad (2.4.17)$$

όπου το \mathbf{h}_k παριστάνει το διάνυσμα \mathbf{h} των υδραυλικών υψών στο k-οστό στρώμα, $k=1,2,\dots,M$, και M είναι ο αριθμός των στρωμάτων στη διεύθυνση z.

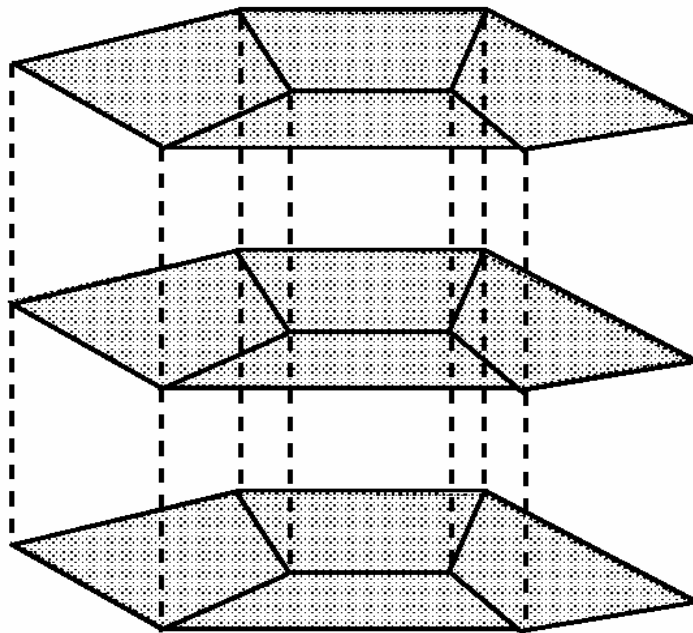
2.4.3.3.2 Η Χρονική Παράγωγος

Η εμπειρία δείχνει ότι μια συνεπαγόμενη προς τα πίσω διαφορική προσέγγιση της χρονικής παραγωγού, παρέχει την πιο ακριβή λύση σε προβλήματα υπόγειας ροής για ένα δεδομένο κόστος. Στην προς τα πίσω διαφορική απεικόνιση, ένα διορθωτικό πλάνο πρώτου βαθμού χρησιμοποιείται για την προσέγγιση της χρονικής παραγωγού, και οι χωρικές παράγωγοι γράφονται σε ένα νέο χρονικό επίπεδο.

Εφαρμόζοντας αυτό το πλάνο στη χρονική παράγωγο στην (2.4.17), για κάθε επίπεδο:

$$\mathbf{A}_k \mathbf{h}_k^{(t+\Delta t)} + \frac{(\mathbf{B}_D)_k}{\Delta t} [\mathbf{h}_k^{(t+\Delta t)} - \mathbf{h}_k^t] - [\mathbf{C}_k^+ (\mathbf{h}_{k+1} - \mathbf{h}_k) - \mathbf{C}_k^- (\mathbf{h}_k - \mathbf{h}_{k-1})]^{(t+\Delta t)} + \mathbf{f}_k^t = 0 \quad (2.4.18)$$

Η εξίσωση (2.4.18) είναι η πλήρης διακριτικοποίηση της (2.4.4) και μας παρέχει με $M \times N$ εξισώσεις τους N αγνώστους στην (2.4.5) σε κάθε ένα από τα M επίπεδα. (D.K. Babu, et al., 1997)



Σχήμα 2-5 Σχηματικό διάγραμμα των οριζόντιων πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων, το ένα πάνω στο άλλο, παράγοντας την τρισδιάστατη διακριτικοποίηση (Πηγή: D.K. Babu, et al., 1997)

2.4.3.4 Οριακές συνθήκες

Το PTC περιέχει τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση της ροής. Οι τρεις τύποι είναι Dirichlet (καθορισμένο υδραυλικό ύψος), Neumann

(καθορισμένη ροή) και ο τρίτος τύπος (διαρροή). Οι οριακές συνθήκες μπορούν να αλλάζουν από το χρήστη κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η

έλλειψη οριακής συνθήκης για όλα τα όρια είναι ο μηδενικός ρυθμός ροής. Αυτό υποδηλώνει έναν περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέρατη βάση και πλευρές. Επιλέγοντας εναλλασσόμενες οριακές συνθήκες σε κάθε σημείο της περιοχής, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει άλλες υδρολογικές καταστάσεις.

2.4.3.4.1 Καθορισμένο υδραυλικό ύψος

Τα όρια σταθερού υδραυλικού ύψους ορίζονται καθορίζοντας τους κόμβους και τις τιμές των υδραυλικών υψών σε αυτούς τους κόμβους. Ο κώδικας αυτόματα αναλύει αυτές τις σειρές και στήλες στον πίνακα συντελεστών που συνδέονται με αυτούς τους κόμβους. Αφού οι κόμβοι σταθερού υδραυλικού ύψους είναι, γι' αυτό το λόγο, αφαιρεμένα αποτελεσματικά από την εξίσωση του πίνακα, θα μείνουμε με $(N \times M - N_c)$ ισότητες με $(N \times M - N_c)$ αγνώστους, με το N_c να είναι ο συνολικός αριθμός των οριακών κόμβων σταθερού υδραυλικού ύψους στο πεδίο ροής.

2.4.3.4.2 Καθορισμένη ροή

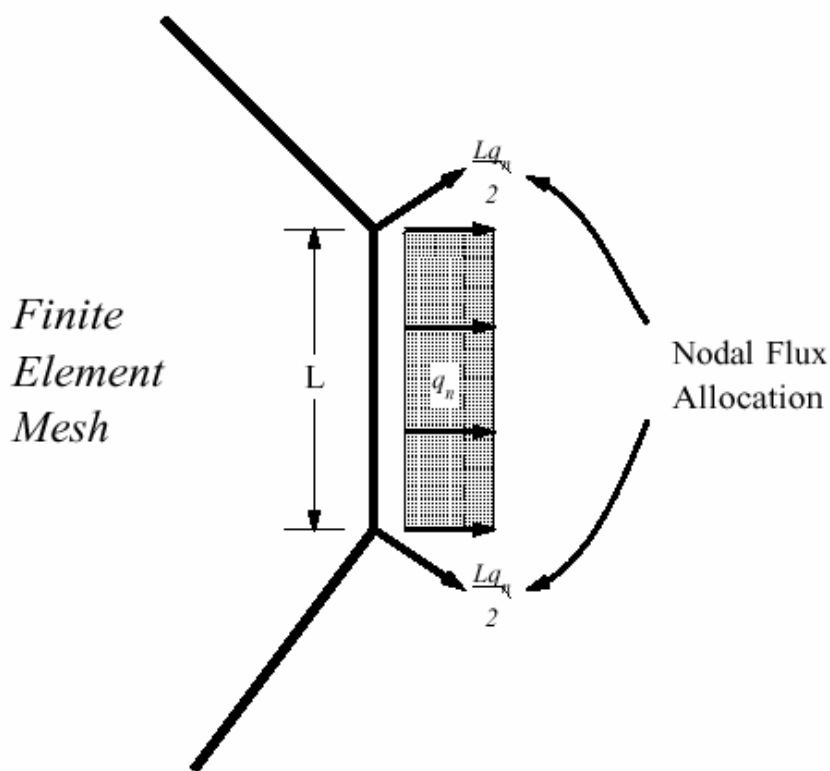
Η μέθοδος πεπερασμένου στοιχείου παρέχει ένα πολύ απλό μέσο καθορισμού της οριακής συνθήκης του ρυθμού ροής. Σύμφωνα με την εφαρμογή του Green's Theorem στην Εξίσωση (2.4.11), ένας οριακός όρος αυξάνεται. Αυτός ο όρος μπορεί να ξαναγραφεί σαν:

$$-\int_{\sigma} [K_{xx} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial y} l_y] w_i d\sigma = -\int_{\sigma} q_n w_i d\sigma \quad (2.4.24)$$

όπου

q_n είναι ο κανονικός ρυθμός ροής δια μέσου μιας μοναδιαίας περιοχής (μήκος \times ύψος) του κατακόρυφου ορίου σ . Όταν ο ρυθμός ροής θεωρείται σταθερός κατά μήκος μιας όψης στοιχείου μήκους L , η ολοκλήρωση της εξ. (2.4.24) θα δώσει τις κομβικές κατανομές που φαίνονται στο σχήμα 2.6. Έτσι, ο

χρήστης χρειάζεται μόνο να καθορίσει τον ογκομετρικό ρυθμό ροής σε έναν κόμβο για παραστήσει το ρυθμό ροής κατά μήκος ενός ορίου. Οι ρυθμοί ροής λόγω άντλησης εισάγονται μαθηματικά με τον ίδιο τρόπο. Αυτό είναι, ότι ο χρήστης καθορίζει έναν ογκομετρικό ρυθμό ροής σε έναν κόμβο. Για τη διευκόλυνση της εισαγωγής της ομοιόμορφης διήθησης, ο κώδικας επιτρέπει τον καθορισμό της κομβικής ροής διήθησης. Για την απόκτηση του ογκομετρικού ρυθμού ροής, γίνεται χωρική ολοκλήρωση αυτόματα από τον κώδικα.



Σχήμα 2-6: Κομβική κατανομή της παροχής q κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους L . Για γραμμικά στοιχεία, κάθε κόμβος έχει ίδιο συντελεστή βαρύτητας (Πηγή: D.K. Babu, et al., 1997)

2.4.3.4.3 Τρίτος τύπος

Οι οριακές συνθήκες με διαρροή εισάγονται με αντικατάσταση στην εξ.
1.14c

$$Q = k_L(h_{j,L}^t - h_{j,k}^t) \quad (2.4.25)$$

όπου

$h_{j,k}^t$ είναι το υδραυλικό ύψος στον κόμβο j στο στρώμα k τη χρονική στιγμή t ,
 $h_{j,L}^t$ είναι το αντίστοιχο υδραυλικό ύψος στο σημείο αναφοράς της διαρροής
(π.χ. ανύψωση μιας λίμνης) και k_L είναι η αγωγιμότητα της διαρροής
(υδραυλική αγωγιμότητα διαιρεμένη με την απόσταση). Ο όρος της
αγωγιμότητας ολοκληρώνεται σε μία επιφάνεια κι έτσι, αναμφιβόλως
παριστάνει μια κατακόρυφη διαρροή. Παρόλα αυτά, με κατάλληλο ορισμό
της σταθεράς k_L , σε οποιαδήποτε διεύθυνση διαρροή μπορεί να οριστεί.

2.4.3.5 Συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα

Η επιβολή του υδροφόρου ορίζοντα ή οι οριακές συνθήκες ελεύθερου
υδροφορέα απαιτούν την εισαγωγή δύο οριακών συνθηκών που
εφαρμόζονται στο επίπεδο του νερού στο ανώτερο στρώμα. Ένα σχήμα της
κατάστασης που εμπεριέχει έναν κινούμενο υδροφόρο ορίζοντα, υποκείμενο
σε διήθηση μεγέθους $R(x,y;t)$, φαίνεται στο σχήμα 2.7.

Η σταθερή ανύψωση του ανώτερου ορίου της περιοχής ροής θα έπρεπε να
δίνεται από $z = z_{M+1}(x, y, t)$ και η πραγματική ανύψωση του υδροφόρου
ορίζοντα δηλώνεται από $z = z_{WT}(x, y, t)$.

Η πρώτη οριακή κατάσταση δηλώνει ότι το επίπεδο του νερού στο ανώτερο
στρώμα (h_M) ορίζει το πάχος του υδροφορέα στο ανώτερο στρώμα ($z_{WT} - z_M$).

Ανάλογα, σε κάθε κόμβο απαιτούμε:

$$(z_{WT})_i = (h_M)_i \quad (2.4.26)$$

Θεωρείται στην παρούσα εργασία ότι ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται
πάντα μέσα στο ανώτερο στρώμα ($k=M$). Έτσι, όταν το πρόγραμμα
υπολογίζει τα υδραυλικά ύψη στο ανώτερο στρώμα, ελέγχει αν οι κομβικές
τιμές του h_M είναι μέσα στο εύρος των ανυψώσεων που δίνονται από

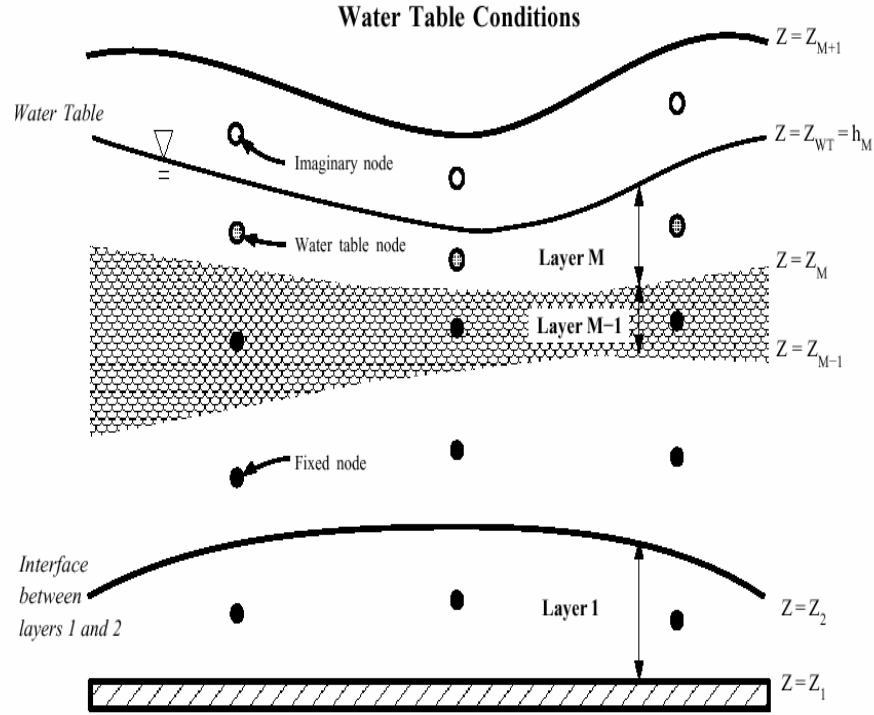
$$z_M \leq h_M \leq z_{M+1} \quad (2.4.27)$$

Το PTC προβάλλει ένα μήνυμα αν παραβιάζεται η συνθήκη (2.4.27). Τυπώνει την κομβική θέση, το ανώτερο πάχος, κτλ. σχετικά με αυτή την παραβίαση. Η εκτέλεση τότε έχει τελειώσει. Σημειώνουμε ότι η σχέση (2.4.27) πρέπει επίσης να ικανοποιείται από τις αρχικές συνθήκες υδραυλικών υψών. Αφότου το z_{WT} ορίζει το πάχος του ανώτερου στρώματος, που είναι παρόν στους πίνακες συντελεστών, η σχέση (2.4.26) εισάγει τη μη-γραμμικότητα στην επίλυση του συστήματος εξισώσεων ροής. Αυτή η μη-γραμμικότητα εξομαλύνεται με συνεχή επανάληψη στο δεύτερο βήμα του αλγόριθμου διαχωρισμού. Οι επαναλήψεις γίνονται σε ένα μονό χρονικό βήμα, με όλες τις ιδιότητες που σχετίζονται με το πάχος στη σχέση (2.4.23) ανανεωμένες. Όταν το h αλλάζει λιγότερο από EPSILN, μια δεδομένη τιμή αντοχής, οι επαναλήψεις τελειώνουν και οι υπολογισμοί προχωρούν στο επόμενο χρονικό βήμα.

Η δεύτερη οριακή κατάσταση του υδροφόρου ορίζοντα περιγράφει την παροδική αντίδραση του υδροφόρου ορίζοντα στη διήθηση. Το S_y δηλώνει την ειδική απόδοση κοντά στον υδροφόρο ορίζοντα. Τότε οι εξισώσεις που σχετίζονται με αυτή την κατάσταση δίνονται από

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} + K_z \frac{\partial h}{\partial z} = R \quad (2.4.28)$$

(D.K. Babu, et al., 1997)



Σχήμα 2-7: Συνθήκες υδροφόρου οριζοντα και κατακρήμνισης στο ανώτερο όριο. Οι επιφάνειες που σημειώνονται με $z=z_1$, $z=z_2$, κτλ., είναι καθορισμένα όρια στο χώρο και ορίζουν τα στρώματα. Σημείωση: ο κινούμενος υδροφόρος οριζοντας $z=z_{WT}$ πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση $z_M \leq z_{WT} \leq z_{M+1}$ (Πηγή: D.K. Babu, et al., 1997)

2.4.4 Τρισδιάστατη Μεταφορά Ρύπων

2.4.4.1 Κύριες εξισώσεις

Οι ταχύτητες του Darcy V_x , V_y και V_z , υπολογίζονται σαν μέσες στοιχειακές ποσότητες.

Η εξίσωση μεταφοράς (2.4.3) είναι:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ + Q(c^w - c) - \left[V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \theta[1 + E(\theta)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \quad (2.4.29) \end{aligned}$$

Οι όροι της διασποράς στην (2.4.29) ορίζονται (σύμφωνα με τους Burnett and Frind [1987]):

$$\begin{aligned}D_{xx} &= (\alpha_L V_x^2 + \alpha_T V_y^2 + \alpha_V V_z^2)/V + D_M \\D_{yy} &= (\alpha_T V_x^2 + \alpha_L V_y^2 + \alpha_V V_z^2)/V + D_M \\D_{zz} &= (\alpha_V V_x^2 + \alpha_V V_y^2 + \alpha_L V_z^2)/V + D_M \\D_{yx} &= D_{xy} = (\alpha_L - \alpha_T)V_x V_y/V \\D_{yz} &= D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_V)V_y V_z/V \\D_{zx} &= D_{xz} = (\alpha_L - \alpha_V)V_z V_x/V\end{aligned}\tag{2.4.30}$$

και οι υπόλοιποι όροι είναι:

D_M είναι ο συντελεστής μοριακής διάχυσης, γενικά μικρός [L^2/T]

α_L είναι ο συντελεστής διαμήκους διασποράς [L],

α_T είναι ο συντελεστής εγκάρσιας διασποράς [L],

α_V είναι ο συντελεστής κατακόρυφης διασποράς [L]

V είναι το μέγεθος του διανύσματος της ταχύτητας [L/T]

$$(V \equiv \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}),$$

c είναι η χημική συγκέντρωση στο σημείο (x, y, z) σε χρόνο t [M/L^3],

θ είναι το πορώδες του υδροφορέα [αδιάστατο]

$E(c)$ είναι η συνάρτηση που παριστάνει τις ιδιότητες της χημικής
προσρόφησης

Q είναι η ισχύς εμπλουτισμού/ άντλησης [$1/T$]

$$(Q \equiv Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i)),$$

Q_i είναι ο ογκομετρικός ρυθμός εμπλουτισμού/ άντλησης [L^3/T] στο σημείο
 (x_i, y_i, z_i) ,

c^w είναι η συγκέντρωση του αντλημένου υγρού στο σημείο (x_i, y_i, z_i) ,

$\delta()$ είναι η δέλτα συνάρτηση Dirac

Για όλες τις περιπτώσεις άντλησης με αντλία ($Q_i \leq 0$), θεωρούμε ότι η συγκέντρωση του αντλημένου (υγρού) νερού c^w στην αντλία ισοδυναμεί με τη συγκέντρωση c του νερού του γύρω περιβάλλοντος. Έτσι, σε όλες τις αντλίες

εκκένωσης, ο όρος $Q(c^w - c) \equiv 0$ στην (2.4.29). Ο κώδικας, επομένως, διατηρεί τους όρους με Q στην 3.1 μόνο όταν η αντλία εμπλουτίζει ($Q_i > 0$) τη διαλυμένη ύλη, με τη συγκέντρωση c^w να παριστάνει τη συγκέντρωση του υγρού εμπλουτισμού.

2.4.4.2 Οριακές Συνθήκες

Το PTC δέχεται δύο τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση μεταφοράς, την καθορισμένη κομβική συγκέντρωση και την καθορισμένη ροή συμμεταφοράς. Οι οριακές συνθήκες είναι μηδενική ροή από διασπορά στα κατακόρυφα όρια και μηδενική ολική ροή ρύπου στα άνω και κάτω όρια.

Οι καθορισμένες κομβικές συγκεντρώσεις ορίζονται από το χρήστη. Οι καθορισμένες ροές συμμεταφοράς δίνονται μέσω δήλωσης μιας συγκέντρωσης που σχετίζεται με τις ογκομετρικές ροές υγρών στα δεδομένα εισόδου του προγράμματος. Παρομοίως, η έμμεσα καθορισμένη ροή συμμεταφοράς εισάγεται μέσω της συγκέντρωσης που σχετίζεται με το διαρρέον υγρό στις οριακές συνθήκες ροής τρίτου τύπου. (D.K. Babu, et al., 1997)

3. Η θεσμική θεώρηση της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει»

3.1 Η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει»

3.1.1 Γενικά

Σύμφωνα με την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» κάθε φορέας έργου ή δραστηριότητας που προκαλεί περιβαλλοντική ζημία ή άμεσο κίνδυνο ανάλογης ζημίας, θα πρέπει να επιβαρύνεται το κόστος των απαραίτητων μέτρων πρόληψης ή αποκατάστασης. Σκοπός της αρχής δεν είναι να τιμωρήσει το ρυπαντή, αλλά -μιλώντας με οικονομικούς όρους- η εσωτερικοποίηση όλων των εξωτερικών κοστών που προκύπτουν από τη ρύπανση.

Εξωτερικά κόστη προκύπτουν κάθε φορά που, η δραστηριότητα κάποιου φορέα είτε αποφέρει σε κάποιον κέρδος ή όφελος, χωρίς να αμειφθεί γι' αυτό, είτε του προκαλεί ζημία ή κόστος χωρίς να δώσει αποζημίωση. Στην πρώτη περίπτωση πρόκειται για θετικό εξωτερικό κόστος, ενώ στη δεύτερη περίπτωση για αρνητικό εξωτερικό κόστος.

Η χρήση και η εκμετάλλευση των περιβαλλοντικών αγαθών που έχει σαν συνέπεια την καταστροφή ή την υποβάθμισή τους, προκαλεί εξωτερικά κόστη γι' αυτούς που επηρεάζονται από αυτή. Παραδείγματα τέτοιων κοστών είναι το κόστος για την αποκατάσταση της ανθρώπινης υγείας, για την αποκατάσταση των υποβαθμισμένων περιβαλλοντικών στοιχείων ή της λειτουργικής ισορροπίας των οικολογικών συστημάτων μέσα στα οποία βρίσκονται ενσωματωμένα αυτά τα περιβαλλοντικά στοιχεία. Όταν αυτές οι ζημιές δεν αποκαθίστανται από αυτούς που τις προκαλούν, έχουμε να κάνουμε με αρνητικό περιβαλλοντικό κόστος. Καθώς η κοινωνία πρέπει να επωμισθεί το κόστος για την αποκατάσταση των ζημιών, τα εξωτερικά κόστη καταλήγουν να μετατραπούν σε κοινωνικά κόστη. Για να αντιμετωπισθεί αυτή η κατάσταση, έχουν προταθεί διάφορες λύσεις, που όλες προσανατολίζονται σε αυτό που ονομάζεται εσωτερίκευση του εξωτερικού κόστους. Δηλαδή, τα εξωτερικά κόστη που σχετίζονται με την πρόληψη και την αποκατάσταση ζημιών που έχουν προκληθεί στα κοινά περιβαλλοντικά αγαθά, θα πρέπει να αναλαμβάνονται και να θεωρούνται εσωτερικά κόστη από αυτούς που προκαλούν τη ζημιά.⁽³⁾

Η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει», λοιπόν, είναι μια ρεαλιστική αρχή που προσεγγίζει την πραγματική διάσταση του προβλήματος της ρύπανσης αναζητώντας τη «γέφυρα» που ενώνει τον άνθρωπο και τις δραστηριότητές του με το περιβάλλον.

Φαίνεται να έχει κυρίως οικονομικό παρά νομικό χαρακτήρα, στρεφόμενη προς την οικονομική διάσταση του περιβάλλοντος, αν και για την αποτελεσματικότητά της, θα πρέπει να βρίσκεται καθιερωμένη στη νομοθεσία κάθε χώρας ή στις διεθνείς συμφωνίες.

3.1.2 Ιστορικά στοιχεία

Η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» διατυπώθηκε για πρώτη φορά το 1972 σε σύσταση του Οργανισμού για την Οικονομική Συνεργασία και Ανάπτυξη (ΟΟΣΑ) με τη μορφή αμιγώς οικονομικού κανόνα. Ο κανόνας αυτός ορίζει ότι: «ο ρυπαίνων βαρύνεται με τα έξοδα για την υλοποίηση των μέτρων που αποφασίζουν οι δημόσιες αρχές, για να διασφαλισθεί η διατήρηση του

περιβάλλοντος σε αποδεκτή κατάσταση». Με άλλα λόγια, το κόστος των μέτρων αυτών θα πρέπει να αντανakλάται στο κόστος των αγαθών και των υπηρεσιών που είναι ρυπογόνες κατά την παραγωγή ή/ και την κατανάλωση τους.⁽³⁾ Πρόκειται για μία καθαρά οικονομική θεώρηση της αρχής, όπου τα κόστη για την αντιμετώπιση της ρύπανσης αντιμετωπίζονται ως «έξοδα». Επίσης, χαρακτηρίζεται από αοριστία και γενικότητα, αφού η έννοια «αποδεκτή κατάσταση» είναι ασαφής και μπορεί να ερμηνευθεί πολλαπλώς και ποικιλοτρόπως.

Ο παραπάνω κανόνας ενσωματώθηκε στην Ατζέντα 21 και στη διακήρυξη του Ρίο για το περιβάλλον και την ανάπτυξη. Το άρθρο 16 της διακήρυξης δηλώνει ότι: «Οι εθνικές αρχές θα πρέπει να προσπαθούν να προωθήσουν την εσωτερικευση του περιβαλλοντικού κόστους και τη χρήση οικονομικών οργάνων, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο ρυπαίνων θα πρέπει, κατ' αρχήν, να επιβαρυνθεί το κόστος της ρύπανσης, έχοντας υπόψη του το δημόσιο συμφέρον και χωρίς να διαστρέφει το διεθνές εμπόριο και τις διεθνείς επενδύσεις.» Και η Ατζέντα 21, λοιπόν, λειτουργώντας ως κατευθυντήρια αρχή, αντιμετωπίζει την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» ως οικονομικό εργαλείο με σκοπό να προστατεύσει το διεθνές εμπόριο και τις επενδύσεις.

Στο κοινοτικό δίκαιο, η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» εμφανίστηκε για πρώτη φορά στη Σύσταση 75/436 του Συμβουλίου με τον ακόλουθο ορισμό: «Φυσικά ή νομικά πρόσωπα δημοσίου ή ιδιωτικού δικαίου, που είναι υπεύθυνα για πρόκληση ρύπανσης, οφείλουν να αναλάβουν τα έξοδα των μέτρων εκείνων που είναι απαραίτητα για την εξάλειψη της ρύπανσης ή για τον περιορισμό της, σε συμμόρφωση προς τις προδιαγραφές ή αντίστοιχα μέτρα που τίθενται από τις δημόσιες αρχές». Η Σύσταση αυτή έχει χαρακτήρα τόσο κατασταλτικό όσο και προληπτικό, αφού μέσω της συμμόρφωσης προς τις προδιαγραφές και της αποκατάστασης των ζημιών, παραδειγματίζονται και συμμορφώνονται και οι υπόλοιποι ρυπαντές. Κινείται, όμως και αυτή στην ίδια κατεύθυνση με τα παραπάνω, δίνοντας μία οικονομοκεντρική θεώρηση στον ορισμό της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει».

Η αρχή έχει ως στόχο να ωθήσει τους επιχειρηματίες και τους εν δυνάμει ρυπαντές να μειώσουν τα επίπεδα ρύπανσης, που οφείλονται στη δική τους δραστηριότητα και να επιδεικνύουν περισσότερη προσοχή, όταν προβαίνουν σε ενέργειες επικίνδυνες προς το περιβάλλον. Τους παρέχεται επίσης το

απαραίτητο κίνητρο, για να ενισχύσουν την έρευνα προς αναζήτηση «καθαρών τεχνολογιών» και λιγότερο ρυπογόνων προϊόντων, καθώς και για πιο λογική χρήση των φυσικών πόρων.⁽⁴⁾

Το ευρωπαϊκό περιβαλλοντικό δίκαιο περιέχει ένα σύστημα αρχών, όχι ιεραρχημένο, το οποίο περιλαμβάνει τις αρχές της πρόληψης, της προφύλαξης, τη επανόρθωσης των βλαβών κατά προτεραιότητα στην πηγή και την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει», από τις οποίες άλλες μπορούν να έχουν περισσότερο πολιτικό και άλλες περισσότερο οικονομικό χαρακτήρα. Ο περιβαλλοντικός τομέας μπορεί, μέσα από αυτές τις αρχές, να βελτιωθεί, αντιμετωπίζοντάς τις σαν μία λειτουργική ενότητα και όχι αποσπασματικά. Για τις ανάγκες όμως της εργασίας, απομονώνουμε εδώ την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει».

Οι δυνατότητες πρακτικής εφαρμογής της αρχής είναι ποικίλες και εκτείνονται τόσο στο χώρο του δημοσίου όσο και του ιδιωτικού δικαίου. Στο πλαίσιο του δημοσίου δικαίου είναι δυνατή η φορολόγηση των ρυπογόνων δραστηριοτήτων. Με τον τρόπο αυτό, οι επιχειρήσεις εξαναγκάζονται να προσαρμόσουν τη δραστηριότητά τους στις απαιτήσεις προστασίας του περιβάλλοντος. Όμως η Ε.Ε. δεν έχει λάβει ακόμη μέτρα προς την κατεύθυνση αυτή.

Στο χώρο του ιδιωτικού δικαίου, ιδιαίτερο ενδιαφέρον εμφανίζει το ζήτημα της αστικής ευθύνης σε περίπτωση ρυπογόνων δραστηριοτήτων. Το Φεβρουάριο του 2000 η Κοινότητα εξέδωσε τη Λευκή Βίβλο για την περιβαλλοντική ευθύνη, ενώ είχε προηγηθεί η Πράσινη Βίβλος το Μάρτιο του 1993, σχετικά με την αποκατάσταση περιβαλλοντικών ζημιών. Στη Λευκή Βίβλο προτείνεται η θέσπιση μιας οδηγίας-πλαισίου η οποία θα εξειδικεύει τις προϋποθέσεις εφαρμογής της αστικής ευθύνης στην περίπτωση των περιβαλλοντικών ζημιών.⁽⁵⁾

Εν τέλει, ύστερα από μακροχρόνιες συζητήσεις και διαβουλεύσεις, τον Απρίλιο του 2004 εκδόθηκε η Οδηγία 2004/35/EK σχετικά με την περιβαλλοντική ευθύνη όσον αφορά στην πρόληψη και την αποκατάσταση περιβαλλοντικής ζημιάς.

3.1.3 Στο διεθνές δίκαιο

Η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» , εκτός από το ότι υιοθετήθηκε από τον Οργανισμό για την Οικονομική Συνεργασία και Ανάπτυξη (ΟΟΣΑ) και την Ευρωπαϊκή Κοινότητα (ΕΚ), έχει αναγνωριστεί ακριβώς σε έναν αριθμό πολυμερών συμβάσεων. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να γίνει μια διαφοροποίηση ανάμεσα σε αυτές τις συμβάσεις που δηλώνουν την αρχή στις εισαγωγές τους (σε αυτή την περίπτωση, ο ρόλος της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» είναι να ερμηνεύσει μερικώς τις πιο ακριβείς νόρμες που περιέχονται στη σύμβαση) και σε αυτές τις συμβάσεις που επιβεβαιώνουν την αρχή σε κάποιο λειτουργικό άρθρο (σε αυτή την περίπτωση η αρχή είναι δεσμευτική).

Η αρχή βρίσκεται στο προοίμιο του Πρωτοκόλλου των Αθηνών για την προστασία της Μεσογείου ενάντια στη ρύπανση από επίγειες πηγές και δραστηριότητες, 1980 (όπως βελτιώθηκε στις Συρακούσες στις 7 Μαρτίου 1990), στη σύμβαση OPRC του 1990, στη σύμβαση του Ελσίνκι (1992) για τις διασυνοριακές επιδράσεις των βιομηχανικών ατυχημάτων, στη σύμβαση του Λουγκάνο (1993) για την αστική ευθύνη για τη ζημιά που προκύπτει από δραστηριότητες επικίνδυνες για το περιβάλλον, και στο πρωτόκολλο του Λονδίνου (2000) για την ετοιμότητα, απόκριση και συνεργασία στα περιστατικά ρύπανσης από επικίνδυνες και επιβλαβείς ουσίες.

Στη δεσμευτική της μορφή, η αρχή βρίσκεται στα λειτουργικά άρθρα της συμφωνίας ASEAN (1985) για τη διατήρηση της φύσης και των φυσικών πόρων, στη σύμβαση για την προστασία των Άλπεων (1991), στη συμφωνία του Πόρτο (1992) για τη σταθεροποίηση της ευρωπαϊκής οικονομικής περιοχής (ΕΕΑ), στη σύμβαση OSPAR (1992), στη σύμβαση του Ελσίνκι (1992) για την προστασία και χρήση των διασυνοριακών κοιτών και διεθνών λιμνών, στη σύμβαση του Ελσίνκι (1992) για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος της Βαλτικής θαλάσσιας περιοχής, στις συμφωνίες του 1994 σχετικά με την προστασία των ποταμών Schelt και Meuse, στη σύμβαση του 1994 για τη συνεργασία και την αειφόρο χρήση του ποταμού Danube, στη σύμβαση της Βαρκελώνης (1976) για την προστασία της Μεσογείου ενάντια στη ρύπανση (όπως βελτιώθηκε το 1995) , στο πρωτόκολλο του Λονδίνου για τη σύμβαση για την πρόληψη της θαλάσσιας ρύπανσης με την άντληση των ρύπων και άλλα ζητήματα, και στη σύμβαση του Ρότερνταμ (1998) για την προστασία του Ρήνου.⁽⁶⁾

3.1.4 Οι λειτουργίες της αρχής

Η ιστορία της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» αντανακλά μια βαθμιαία αλλαγή στην έννοια της. Αρχικά, οι Συστάσεις του ΟΟΣΑ και της ΕΚ αναφέρθηκαν στην αρχή σαν ένα μέσο για την πρόληψη της στρέβλωσης του συναγωνισμού. Αργότερα, αποτέλεσε τη βάση για την εσωτερίκευση της χρονίας ρύπανσης και της πρόληψής της, ενώ τελικά, χρησιμοποιήθηκε για να εγγυηθεί την ενσωματωμένη αποκατάσταση της ζημίας. Αυτές οι λειτουργίες είναι άλλοτε αλληλοσυμπληρούμενες και άλλοτε ανεξάρτητες.

Η επιβάρυνση του ρυπαίνοντα με το κόστος της αποκατάστασης της ζημίας, μπορεί να θεωρηθεί ως τιμωρία και να αποδοθεί στην αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» η κυρωτική λειτουργία. Η κυρωτική λειτουργία της αρχής έχει γίνει αντικείμενο κριτικής μιας και, παρόλο που μπορεί να ικανοποιεί το ηθικό αίσθημα, θεωρείται ότι δεν προσφέρει και πολλά πράγματα στη λειτουργία της πρόληψης και της αποκατάστασης της ρύπανσης.

Η επικρατέστερη λειτουργία της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» είναι η ανταποδοτική. Μέσω της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει», ένα μέρος των κερδών που αποκομίζουν οι ρυπαίνοντες σαν αποτέλεσμα των δραστηριοτήτων τους, επιστρέφεται στις δημόσιες αρχές που είναι υπεύθυνες για την επιθεώρηση, την παρακολούθηση και τον έλεγχο της ρύπανσης που προκαλούν αυτές οι δραστηριότητες. Και αυτή η λειτουργία έχει προκαλέσει επικριτικά σχόλια, τα οποία υποστηρίζουν ότι με αυτόν τον τρόπο δίνεται «αξία» στο δικαίωμα της ρύπανσης. Συνεπώς, φαίνεται σα να δέχεται την υποβάθμιση του περιβάλλοντος ως αναπόφευκτη υπό την όρο ότι ο υπαίτιος πληρώνει.

Παρόλα αυτά, η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» μπορεί επίσης να συνεισφέρει στη μείωση της ρύπανσης (προληπτική λειτουργία) και στην επιτάχυνση της διαδικασίας με την οποία οι υπεύθυνη για τη ρύπανση θα αναλάβουν την ευθύνη για την οικολογική ζημία (αποκαταστατική λειτουργία).

Η προληπτική λειτουργία της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» διαφαίνεται ήδη από τη Σύσταση 75/463 σύμφωνα με την οποία η υιοθέτηση μέτρων περιβαλλοντικού ελέγχου, θα πρέπει «να ενθαρρύνει τον ρυπαίνοντα να

λαμβάνει τα αναγκαία μέτρα για τη μείωση της ρύπανσης που προκαλεί όσο φθηνότερα γίνεται». Η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει», υπηρετώντας την πρόληψη, δε θα πρέπει να ερμηνεύεται ότι επιτρέπεται στον ρυπαίνοντα που πληρώνει να συνεχίσει να ρυπαίνει χωρίς να τιμωρείται. Ο αληθινός σκοπός της αρχής θα πρέπει στο εξής να είναι η θέσπιση μιας αντιρρυπαντικής πολιτικής που θα ενθαρρύνει τους ρυπαίνοντες να μειώνουν τις εκπομπές τους αντί να περιορίζονται στο να πληρώνουν τις χρηματικές επιβαρύνσεις, συμπληρώνοντας με αυτόν τον τρόπο την αρχή της πρόληψης.

Μέσω της αποκαταστατικής λειτουργίας της αρχής, ο ρυπαντής, πέρα από την κάλυψη του κόστους των μέτρων πρόληψης και καταπολέμησης της ρύπανσης, καλείται να εξασφαλίσει μια πλήρη αποκατάσταση της υποβάθμισης του περιβάλλοντος, που προκάλεσαν οι δραστηριότητές του. Η αποκατάσταση της ζημίας μπορεί να επέλθει μέσω ενός συστήματος αστικής ευθύνης, στα πλαίσια του οποίου μπορεί να ζητηθεί από το ρυπαντή να αποζημιώσει τα θύματα της ρύπανσης και να αποκαταστήσει τις ζημιές που προκλήθηκαν στο περιβάλλον.

Πρέπει να σημειωθεί, ότι όλες οι λειτουργίες της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» δρουν συμπληρωματικά. Επομένως, πολλές από τις κριτικές πρέπει να αντιληφθούν ότι οι λειτουργίες ως σύνολο έχουν ως σκοπό την πρόληψη και την αποκατάσταση της περιβαλλοντικής ζημίας, και άρα είναι αδιάφορο αν κάθε μία ξεχωριστά εμπίπτει στην κατηγορία πρόληψη ή καταστολή. Το δίλημμα είναι ανύπαρκτο, μιας και η λειτουργία τους δεν είναι αντιθετική αλλά συμπληρωματική.

3.2 Η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» στην Κοινοτική Νομοθεσία

Στην Κοινοτική Νομοθεσία, είναι τρία τα σημαντικότερα κείμενα που αφορούν στην περιβαλλοντική ευθύνη για την πρόληψη και την αποκατάσταση των περιβαλλοντικών ζημιών. Πρόκειται για τη «Λευκή Βίβλο για την Περιβαλλοντική Ευθύνη», την «Πράσινη Βίβλο για την Αποκατάσταση των Περιβαλλοντικών Ζημιών», καθώς και η πιο πρόσφατη «Οδηγία σχετικά με την Περιβαλλοντική Ευθύνη όσον αφορά στην Πρόληψη και την Αποκατάσταση Περιβαλλοντικής Ζημιάς», που παρουσιάζονται παρακάτω.

3.2.1 Η Λευκή Βίβλος για την Περιβαλλοντική ευθύνη

Στο πλαίσιο της Λευκής Βίβλου της Επιτροπής για την ευθύνη από τη ρύπανση του περιβάλλοντος, που ψηφίστηκε το Φεβρουάριο του 2000, ερευνάται το πώς μπορεί να διαμορφωθεί σε κοινοτικό επίπεδο ένα πλαίσιο ευθύνης για οικολογικές ζημιές, ώστε να εφαρμοσθούν οι περιβαλλοντικές αρχές της Συνθήκης της Ευρωπαϊκής Κοινότητας (ΣυνθΕΚ), να ενισχυθούν η ισχύουσα κοινοτική και εθνική νομοθεσία για το περιβάλλον και να θεσμοθετηθούν αποτελεσματικές διαδικασίες εξυγίανσης και προστασίας του περιβάλλοντος.

Η ευθύνη για ζημιές στο περιβάλλον αποσκοπεί στην αποκατάσταση των ζημιών στο περιβάλλον από τον δράστη και προϋποθέτει εξ ορισμού προσδιορισμό δράστη, υπολογίσιμη ζημία και αιτιώδη συνάφεια πράξης και ζημιάς. Η ευθύνη για ζημιές δεν αποτελεί αποτελεσματικό μέτρο αντιμετώπισης οικολογικών ζημιών, που δημιουργούνται από διαφορετικές εστίες κινδύνου με συγκεχυμένο τρόπο.

Το νέο σύστημα ευθύνης για ζημιές στο περιβάλλον θα πρέπει, σύμφωνα με την Επιτροπή, να διέπεται ως προς το περιεχόμενό του από τις βασικές περιβαλλοντικές αρχές της Κοινότητας, όπως αυτές έχουν διατυπωθεί στη ΣυνθΕΟΚ (άρθρο 174, παρ.2), δηλαδή την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει», τις αρχές της προφύλαξης και της πρόληψης, και της επανόρθωσης κατά

προτεραιότητα στην πηγή, και να αποσκοπεί στην ισχυροποίηση της κείμενης κοινοτικής και εθνικής νομοθεσίας για το περιβάλλον. Με το νέο σύστημα ευθύνης θα πρέπει επίσης να ενισχυθεί η οικολογική συνείδηση των επιχειρήσεων και με αυτόν τον τρόπο να επιτευχθεί ένα είδος προληπτικής οικολογικής προστασίας.

Ως ειδικά χαρακτηριστικά της συζητούμενης ευθύνης προτείνονται: καμία αναδρομικότητα (εφαρμογή μόνο σε μελλοντικές ζημίες), αντικειμενική ευθύνη -δηλαδή ευθύνη ανεξάρτητα από υπαιτιότητα- για οικολογικές ζημίες, ζημίες στην υγεία ή/ και στα πράγματα μέσω της ρύπανσης του περιβάλλοντος, ζημίες στη βιοποικιλότητα όσον αφορά τις περιοχές του δικτύου οικολογικής προστασίας Φύση 2000 εξαιτίας επικίνδυνων για το περιβάλλον δραστηριοτήτων και υποκειμενική ευθύνη - δηλαδή ευθύνη που συνδέεται και εξαρτάται από την υπαιτιότητα- για ζημίες στη βιοποικιλότητα στις περιοχές του Φύση 2000 εξαιτίας ακίνδυνων για το περιβάλλον δραστηριοτήτων. Επίσης προτείνονται: λόγοι άρσεως του παρανόμου, ελαφρύνσεις στο βάρος της απόδειξης για τον ενάγοντα, υποχρέωση διάθεσης της αποζημίωσης μόνο για αποκατάσταση του περιβάλλοντος, διευκολύνσεις όσον αφορά την πρόσβαση στα δικαστήρια για τις «οικολογικές» διαφορές.

Στη Λευκή Βίβλο τίθενται και οι ουσιαστικές προϋποθέσεις για την προτεινόμενη ευθύνη. Όσον αφορά στο ποιος ευθύνεται, υποκείμενο της ευθύνης θα είναι εκείνο το πρόσωπο, φυσικό ή νομικό, που θα έχει τον έλεγχο της άσκησης ή μη της δραστηριότητας που θα αποτελεί τη γενεσιουργό αιτία της ζημίας. Αν η δραστηριότητα προέρχεται από επιχείρηση που είναι νομικό πρόσωπο, θα ευθύνεται το νομικό πρόσωπο και όχι τα διευθυντικά στελέχη ή οι συνεργάτες που συμμετείχαν στην άσκηση της δραστηριότητας που προκάλεσε τη ζημία. Επίσης, δεν ευθύνονται πιστωτικά ιδρύματα που δεν ασκούν καμία επιρροή στη λειτουργία της επιχείρησης.

Όσον αφορά τις ζημίες, η προτεινόμενη ευθύνη πρέπει να καλύπτει οικολογικές ζημίες. Όπως δείχνει η εμπειρία από τις νομοθεσίες των κρατών-μελών, αυτό δεν είναι αυτονόητο. Σε πολλά κράτη-μέλη προβλέπεται «οικολογική ευθύνη» που καταλογίζεται για ζημίες στην υγεία ή/ και στα πράγματα που έχουν ωστόσο προκληθεί από επικίνδυνες για το περιβάλλον δραστηριότητες. Σε μερικές νομοθεσίες απαντώνται επίσης ρυθμίσεις που προβλέπουν την αποκατάσταση οικολογικών ζημιών χωρίς ωστόσο να

ορίζεται σαφώς στο πραγματικό η σχετική νομική έννοια. Με τη Λευκή Βίβλο προτείνεται η ευθύνη να συμπεριλάβει τις οικολογικές ζημίες, και ως τέτοιες θεωρούνται: α) οι ζημίες στη σύσταση του περιβάλλοντος και β) οι ζημίες στη βιοποικιλότητα.

Ως ζημίες στη σύσταση του περιβάλλοντος θα πρέπει να ορισθούν η ρύπανση του εδάφους, των υπέργειων ή/ και των υπόγειων υδάτων. Στα περισσότερα κράτη-μέλη υπάρχουν νόμοι ή προγράμματα που αναφέρονται στην αποκατάσταση τέτοιων ζημιών. Η ευθύνη θα δημιουργείται, ωστόσο, εφόσον η αποκατάσταση θεωρείται αναγκαία, δηλαδή όταν υπάρχει σοβαρή απειλή για την υγεία των ανθρώπων ή το περιβάλλον. Η αποκατάσταση θα πρέπει να αποβλέπει στη δημιουργία μιας -τουλάχιστον- εφάμιλλης κατάστασης που θα εξασφαλίζει την κατά προορισμό χρήση της περιοχής.

Όσον αφορά τις ζημίες στη βιοποικιλότητα του περιβάλλοντος, στις περισσότερες εθνικές νομοθεσίες για το περιβάλλον δεν υπάρχει πρόβλεψη για τέτοιες ζημίες, συνεπώς ο ορισμός θα πρέπει να προέλθει από το νόημα του δίνει σχετικά η κοινοτική νομοθεσία.

Σε όλα σχεδόν τα κράτη-μέλη οι ρυθμίσεις για την προστασία του περιβάλλοντος αναφέρονται στις επικίνδυνες για το περιβάλλον δραστηριότητες. Ένα αξιόπιστο πλαίσιο ευθύνης θα πρέπει να εναρμονίζεται με τις ισχύουσες κοινοτικές και εθνικές διατάξεις για την προστασία του περιβάλλοντος. Η θέσπιση της προτεινόμενης ευθύνης θεωρούνταν νέα ώθηση στην τήρηση της ισχύουσας νομοθεσίας για την προστασία του περιβάλλοντος, κοινοτικής και εθνικής. ⁽⁷⁾

3.2.2 Πράσινη Βίβλος

Της Λευκής Βίβλου είχε προηγηθεί η Πράσινη Βίβλος, που εκδόθηκε το Μάιο του 1993, στην οποία προτείνεται ο εκ των προτέρων καθορισμός της σειράς με την οποία ο ζημιωθείς πρέπει να στραφεί κατά των υπευθύνων προσώπων. Επίσης προτείνεται η δημιουργία κοινού ταμείου από εισφορές επιχειρήσεων, το οποίο θα αποκαθιστά ζημίες που δεν μπορούν να αποδοθούν σε συγκεκριμένο πρόσωπο.

3.2.3 Οδηγία 2004/35/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 21^{ης} Απριλίου 2004 σχετικά με την περιβαλλοντική ευθύνη όσον αφορά στην πρόληψη και την αποκατάσταση περιβαλλοντικής ζημιάς

Τον Απρίλιο του 2004 εκδόθηκε η Οδηγία σχετικά με την περιβαλλοντική ευθύνη όσον αφορά την πρόληψη και την αποκατάσταση της περιβαλλοντικής ζημιάς. Η Οδηγία εκδόθηκε με συναπόφαση του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου και έχει ως νομική βάση το άρθρο 175 §1 ΣυνθΕΚ για την προστασία του περιβάλλοντος. Το γεγονός αυτό την κατατάσσει στις Οδηγίες του περιβαλλοντικού τομέα, υπερσκελίζοντας, αλλά όχι αποσιωπώντας την οικονομική της διάσταση.

Στο προοίμιο της Οδηγίας αναφέρονται τα δεδομένα και οι λόγοι που οδήγησαν την Ευρωπαϊκή Ένωση στην υιοθέτησή της. Συγκεκριμένα, μεταξύ άλλων, αναφέρεται ότι στην Κοινότητα υπάρχουν πολυάριθμες τοποθεσίες που έχουν υποστεί ρύπανση, γεγονός που συνεπάγεται σοβαρούς κινδύνους για την υγεία, ενώ παράλληλα κατά τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται θεαματική επιτάχυνση της απώλειας της βιοποικιλότητας. Οποιαδήποτε αδράνεια, εν προκειμένω, θα μπορούσε να έχει ως αποτέλεσμα την κλιμάκωση της ρύπανσης και την ακόμα μεγαλύτερη απώλεια της βιοποικιλότητας στο μέλλον. Η πρόληψη και η αποκατάσταση, στο μέτρο του δυνατού, των περιβαλλοντικών ζημιών συμβάλλει στην υλοποίηση των στόχων και των αρχών της κοινοτικής πολιτικής για το περιβάλλον. (Σημείο 1 του προοιμίου)

Η παραπάνω πρόληψη και αποκατάσταση των περιβαλλοντικών ζημιών θα πρέπει να επιτυγχάνεται μέσω της προώθησης της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει», όπως αναφέρεται στη Συνθήκη και σύμφωνα με την αρχή της αειφόρου ανάπτυξης. Ο φορέας εκμετάλλευσης, η δραστηριότητα του οποίου προκάλεσε την περιβαλλοντική ζημιά ή τον άμεσο κίνδυνο ανάλογης ζημιάς, είναι οικονομικά υπεύθυνος έτσι ώστε να παρακινούνται οι φορείς εκμετάλλευσης να λαμβάνουν μέτρα και να αναπτύσσουν πρακτικές που να αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση των κινδύνων περιβαλλοντικής ζημιάς προκειμένου να μειώνεται η έκθεσή τους σε οικονομικές ευθύνες. (Σημείο 2 του προοιμίου)

Με δεδομένου ότι ο στόχος της παρούσας οδηγίας, ήτοι η δημιουργία κοινού πλαισίου για την πρόληψη και την αποκατάσταση περιβαλλοντικής

ζημίας με εύλογο κόστος για την κοινωνία, είναι αδύνατο να επιτευχθεί επαρκώς από τα κράτη μέλη και μπορεί, κατά συνέπεια, να επιτευχθεί καλύτερα σε κοινοτικό επίπεδο λόγω των διαστάσεων της παρούσας οδηγίας και των συνεπειών της για τη λοιπή κοινοτική νομοθεσία, η Κοινότητα μπορεί να λάβει μέτρα σύμφωνα με την αρχή της επικουρικότητας που διατυπώνεται στο άρθρο 5 της Συνθήκης. (Σημείο 3 του προοιμίου)

Επίσης, αναφέρεται ότι η παρούσα οδηγία αποσκοπεί στην πρόληψη και αποκατάσταση της περιβαλλοντικής ζημίας, και δε θίγει τα δικαιώματα αποζημίωσης για παραδοσιακές ζημιές, τα οποία παραχωρούνται σύμφωνα με οποιαδήποτε σχετική διεθνή συμφωνία περί αστικής ευθύνης. (Σημείο 11 του προοιμίου)

Βέβαια, δεν είναι δυνατόν να αποκατασταθούν όλες οι μορφές περιβαλλοντικής ζημίας μέσω του μηχανισμού της ευθύνης. Η αποτελεσματική χρήση του μηχανισμού αυτού προϋποθέτει ότι θα πρέπει να υφίστανται ένας ή περισσότεροι ρυπαντές οι οποίοι να μπορούν να εντοπισθούν, η ζημία θα πρέπει να είναι συγκεκριμένη και να μπορεί να αποδειχθεί η αιτιώδης συνάφεια μεταξύ της ζημίας και του ή των εντοπισθέντων ρυπαντών. Κατά συνέπεια, η ευθύνη δεν αποτελεί κατάλληλο μέσο για την αντιμετώπιση της ευρέως διαδεδομένης και διάχυτης ρύπανσης, εφόσον είναι αδύνατον να συνδεθούν οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις με πράξεις ή παραλείψεις συγκεκριμένων εξατομικευμένων παραγόντων. (Σημείο 13 του προοιμίου)

Η αποκατάσταση του περιβάλλοντος θα πρέπει να πραγματοποιείται με αποτελεσματικό τρόπο εξασφαλίζοντας ότι επιτυγχάνονται οι σχετικοί στόχοι αποκατάστασης. Προς τούτο, θα πρέπει να καθορισθεί ένα κοινό πλαίσιο και να ενοπτεύεται η ορθή εφαρμογή του από την αρμόδια αρχή. (Σημείο 16 του προοιμίου)

Σύμφωνα με την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει», κάθε φορέας εκμετάλλευσης που προκαλεί περιβαλλοντική ζημία ή άμεσο κίνδυνο ανάλογης ζημίας, θα πρέπει, κατ' αρχήν, να επωμίζεται το κόστος των απαραίτητων μέτρων πρόληψης ή αποκατάστασης. Στις περιπτώσεις, κατά τις οποίες η αρμόδια αρχή αυτενεργεί ή επεμβαίνει μέσω τρίτων αντί του φορέα εκμετάλλευσης, η αρχή αυτή θα πρέπει να εξασφαλίζει ότι το προκύπτον γι' αυτήν κόστος θα ανακτάται από τον φορέα εκμετάλλευσης. Κρίνεται επίσης σκόπιμο οι φορείς

εκμετάλλευσης να επωμίζονται τελικά το κόστος της εκτίμησης περιβαλλοντικής ζημίας και, κατά περίπτωση, την αξιολόγηση του άμεσου κινδύνου πρόκλησης τέτοιας ζημίας. (Σημείο 18 του προοιμίου)

Ο φορέας εκμετάλλευσης δε θα πρέπει να υποχρεούται να επωμισθεί το κόστος των δράσεων πρόληψης ή αποκατάστασης που πραγματοποιούνται σύμφωνα με την παρούσα οδηγία, σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η συγκεκριμένη ζημία ή ο κίνδυνος πρόκλησης τέτοιας ζημίας είναι το αποτέλεσμα συμβάντων εκτός ελέγχου του φορέα εκμετάλλευσης. Τα κράτη μέλη μπορούν να προβλέπουν ότι οι φορείς εκμετάλλευσης που δεν έχουν ενεργήσει εκ δόλου ή εξ αμελείας δεν επωμίζονται το κόστος των μέτρων αποκατάστασης σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η συγκεκριμένη ζημία είναι το αποτέλεσμα εκπομπών ή γεγονότων για τα οποία έχει εκδοθεί ρητή άδεια ή των οποίων θα ήταν αδύνατο να είναι γνωστή η εν δυνάμει καταστροφική φύση όταν πραγματοποιήθηκε το αντίστοιχο συμβάν ή εκπομπή. (Σημείο 20 του προοιμίου)

Τέλος, ορίζεται ότι η Οδηγία δε θα πρέπει να παρεμποδίζει τα κράτη μέλη να διατηρούν ή να εγκρίνουν αυστηρότερες διατάξεις σχετικά με την πρόληψη και την αποκατάσταση περιβαλλοντικής ζημίας, ούτε θα πρέπει να παρεμποδίζει τη θέσπιση εκ μέρους των κρατών μελών κατάλληλων μέτρων σε σχέση με περιπτώσεις όπου θα μπορούσε να προκύψει διπλή ανάκτηση κόστους ως αποτέλεσμα συντρέχουσας δράσης εκ μέρους μιας αρμόδιας αρχής βάσει της παρούσας οδηγίας και εκ μέρους προσώπου του οποίου περιουσιακό στοιχείο επλήγη από την περιβαλλοντική ζημία. (Σημείο 29 του προοιμίου)

Σκοπός της Οδηγίας, σύμφωνα με το άρθρο 1, είναι «να διαμορφώνει ένα πλαίσιο για την περιβαλλοντική ευθύνη βάσει της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει», με σκοπό την πρόληψη και την αποκατάσταση περιβαλλοντικής ζημίας.»

Ως «περιβαλλοντική ζημία» νοείται η ζημία προστατευόμενων ειδών και φυσικών οικοτόπων, η ζημία των υδάτων και η ζημία του εδάφους. Ως «ζημία», επίσης, νοείται η δυσμενής μεταβολή του φυσικού πόρου ή η υποβάθμιση υπηρεσίας συνδεδεμένης με φυσικό πόρο που όμως είναι μετρήσιμη. Τέλος, «επικείμενη απειλή ζημίας» νοείται η επαρκής πιθανότητα να προκληθεί περιβαλλοντική ζημία στο άμεσο μέλλον.

Αναγνωρίζονται δύο είδη ευθύνης που αφορούν τόσο την ευθύνη για ζημία όσο και την επικείμενη απειλή τέτοιας: Πρώτον, **αντικειμενική ευθύνη** για περιβαλλοντική ζημία ή επικείμενη απειλή τέτοιας που προκαλεί η άσκηση συγκεκριμένων επαγγελματικών δραστηριοτήτων, ανεξάρτητα αν αυτές είναι δημόσιες ή ιδιωτικές. Δεύτερον, **υποκειμενική ευθύνη** ειδικά για ζημία ή επικείμενη απειλή ζημίας προστατευόμενων ειδών ή φυσικών οικοτόπων συνέπεια οποιασδήποτε επαγγελματικής δραστηριότητας, κάθε φορά που ο φορέας εκμετάλλευσης ενήργησε εκ δόλου ή εξ αμελείας.

Καταρχήν λαμβάνονται από το φορέα εκμετάλλευσης η ανάληψη προληπτικής δράσης σε περίπτωση επικείμενης απειλής περιβαλλοντικής ζημίας, και δράσης αποκατάστασης σε περίπτωση περιβαλλοντικής ζημίας. Όταν ο φορέας εκμετάλλευσης δε συμμορφώνεται, δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί ή δεν υποχρεούται δύνανται να ληφθούν τόσο τα αναγκαία προληπτικά μέτρα όσο και τα αναγκαία μέτρα αποκατάστασης από αρμόδια αρχή, την οποία πρέπει να ορίσουν τα κράτη-μέλη.

Με το κόστος τόσο της πρόληψης όσο και της αποκατάστασης επιβαρύνεται ο φορέας εκμετάλλευσης. Αν για οποιοδήποτε λόγο κατέβαλε το κόστος η αρμόδια αρχή, το ανακτά από τον ίδιο μέσω ασφαλιστικής κάλυψης ή άλλων κατάλληλων εγγυήσεων. Κατά την αναγωγή, ο φορέας εκμετάλλευσης δε θα υποχρεωθεί να επωμισθεί το κόστος των δράσεων πρόληψης ή αποκατάστασης που ανέλαβε η αρμόδια αρχή, εάν μπορεί να αποδείξει ότι η περιβαλλοντική ζημία ή η επικείμενη απειλή τέτοιας ζημίας:

α) Προκλήθηκε από τρίτο και επήλθε παρά την ύπαρξη ενδεδειγμένων μέτρων ασφαλείας, ή

β) οφείλεται σε συμμόρφωση προς υποχρεωτική διαταγή ή εντολή λόγω εκπομπής ή συμβάντος που προκλήθηκε από τις δραστηριότητες του ίδιου φορέα εκμετάλλευσης.

Ειδικά και μόνο αναφορικά με το κόστος αποκατάστασης οι φορείς εκμετάλλευσης, σύμφωνα με την Οδηγία, το επωμίζονται και όταν η περιβαλλοντική ζημία προκλήθηκε από:

-εκπομπή ή συμβάν που επιτρέπονται ρητά από εξουσιοδότηση και είναι πλήρως σύμφωνα προς τους όρους της, η οποία παραχωρήθηκε από ή δόθηκε σύμφωνα με τις εφαρμοστέες εθνικές νομοθετικές και κανονιστικές διατάξεις, με τις οποίες εφαρμόζονται τα νομοθετικά μέτρα, τα οποία θεσπίζει η

Κοινότητα, όπως εφαρμόζονται κατά την ημερομηνία εκπομπής ή του συμβάντος και

-από εκπομπή ή δραστηριότητα ή οποιονδήποτε τρόπο χρήσης προϊόντος στο πλαίσιο δραστηριότητας, εφόσον ο φορέας εκμετάλλευσης αποδεικνύει ότι δεν είχε πιθανολογηθεί ότι θα προκαλούσαν περιβαλλοντική ζημία σύμφωνα με τις επιστημονικές και τεχνικές γνώσεις που ήταν διαθέσιμες κατά τον χρόνο που έλαβε χώρα η εκπομπή ή η δραστηριότητα.

Τέλος, προβλέπεται διαδικασία με την οποία φυσικά ή νομικά πρόσωπα (συμπεριλαμβανομένων και των Μη Κυβερνητικών Οργανώσεων) δικαιούνται να καλούν την αρμόδια αρχή να αναλάβει δράση για περιπτώσεις περιβαλλοντικής ζημίας ή επικείμενης απειλής τέτοιας και να προσφεύγουν κατά των αποφάσεων, πράξεων ή παραλείψεων της αρχής αναφορικά με τα σχετικά αιτήματά τους.⁽⁸⁾

Επίσης, σύμφωνα με το άρθρο 12 «κάθε φυσικό ή νομικό πρόσωπο το οποίο α) επηρεάζεται ή ενδέχεται να επηρεασθεί από περιβαλλοντική ζημία, ή β) έχει επαρκές συμφέρον από τη λήψη περιβαλλοντικής απόφασης σχετικά με τη ζημία ή, εναλλακτικά, γ) υποστηρίζει ότι επέρχεται προσβολή δικαιώματος, όταν αυτό απαιτείται ως προϋπόθεση από τη διοικητικό δικονομικό δίκαιο ενός κράτους μέλους, δικαιούται να υποβάλλει στην αρμόδια αρχή οποιεσδήποτε παρατηρήσεις σχετικά με περιπτώσεις περιβαλλοντικής ζημίας ή με επικείμενη απειλή τέτοιας ζημίας που έχουν υποπέσει στην αντίληψή του και έχει το δικαίωμα να καλεί την αρμόδια αρχή να αναλάβει δράση βάσει της παρούσας οδηγίας. Οι έννοιες «επαρκές συμφέρον» και «προσβολή δικαιώματος» καθορίζονται από τα κράτη μέλη.

-Εξαιρέσεις

Η Οδηγία περιέχει ένα ευρύ εξαιρετικό πεδίο, το οποίο περιέχεται στο άρθρο 4 και περιλαμβάνει την εξαίρεση στην κάλυψη από την Οδηγία περιβαλλοντικής ζημίας και επικείμενης απειλής τέτοιας που είναι συνέπεια ενόπλων συγκρούσεων, εξαιρετικού φυσικού φαινομένου, αναπότρεπτου και ακατανίκητου χαρακτήρα. Η Οδηγία δεν ισχύει, επίσης, «για τις δραστηριότητες, ο κύριος σκοπός των οποίων είναι η εξυπηρέτηση της εθνικής άμυνας ή της διεθνούς ασφάλειας, ούτε για τις δραστηριότητες ο

μόνος σκοπός των οποίων είναι η προστασία από φυσικές καταστροφές». Ιδιαίτερη σημασία στην εξαίρεση αυτή πρέπει να δοθεί στις φράσεις «κύριος σκοπός» και «μόνος σκοπός» που δηλώνουν ότι οι δραστηριότητες που έχουν και άλλους σκοπούς εκτός αυτών της προστασίας από φυσικές καταστροφές ή που ο κύριος σκοπός τους είναι άλλος από την εξυπηρέτηση της εθνικής άμυνας ή της διεθνούς ασφάλειας δεν περιλαμβάνονται στο εξαιρετικό πεδίο της Οδηγίας. Επιπλέον, «η οδηγία εφαρμόζεται σε περιβαλλοντική ζημία ή επικείμενη απειλή τέτοιας ζημίας, λόγω ρύπανσης διάχυτου χαρακτήρα, μόνον εφόσον είναι δυνατόν να αποδειχθεί η αιτιώδης συνάφεια μεταξύ της ζημίας και των δραστηριοτήτων μεμονωμένων φορέων εκμετάλλευσης».

Ιδιαίτερη σημασία στην παρούσα εργασία έχει η εξαίρεση που αφορά στη ρύπανση διάχυτου χαρακτήρα. Ενώ η Οδηγία βασίζεται στην εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει», στην πράξη καθίσταται ασαφής και προβληματική η εφαρμογή της, μιας και τα περισσότερα περιστατικά ρύπανσης είναι διάχυτου χαρακτήρα και είναι συχνά πολύ δύσκολο να διαπιστωθεί ο αιτιώδης σύνδεσμος μεταξύ της ζημίας και του γεγονότος που την προκάλεσε. Με τη χρήση του μοντέλου που παρουσιάζεται εδώ, φωτίζεται το αποδεικτικό σκέλος της αιτιώδους συνάφειας ζημίας και ρυπογόνου δραστηριότητας που υπάρχει στην περίπτωση της διάχυτης ρύπανσης. Αποτέλεσμα είναι ο περιορισμός του εξαιρετικού πεδίου της Οδηγίας, που χωρίς τη συνδρομή του προτεινόμενου μοντέλου θα ήταν αρκετά ευρύ. Έτσι, δηλαδή, αμβλύνεται η εξαιρετική ρήτρα της Οδηγίας και γίνεται ένα βήμα παραπέρα στην πιο αποτελεσματική προστασία του περιβάλλοντος.

3.2.4 Δικαστική Εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Η νομολογία του Δικαστηρίου των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων (ΔΕΚ) δεν έχει ασχοληθεί εκτενώς με την ερμηνεία και εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει», πέραν του ότι απλώς τη μνημονεύει.

Στην υπόθεση Inter-Huilles (C-172/82), το ΔΕΚ καταδίκασε τη γαλλική απαγόρευση εξαγωγής χρησιμοποιημένων ορυκτελαίων εκτός Γαλλίας ως αντίθετη προς το άρθρο 30 της Συνθήκης. Το Δικαστήριο του Λουξεμβούργου απέρριψε το οικονομικό επιχείρημα των γαλλικών αρχών, αιτιολογώντας ότι η κοινοτική οδηγία (75/439) τους παρείχε τη δυνατότητα, χωρίς να εμποδιστούν οι εξαγωγές, να χορηγήσουν αποζημιώσεις στους οικονομικούς συντελεστές, οι οποίες θα χρηματοδοτούνταν σύμφωνα με την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει».⁽⁹⁾ Η απόφαση αυτή αποτελεί «προάγγελο» της θέσπισης της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» και κάνει φανερό τον καθοδηγητικό χαρακτήρα της κοινοτικής οδηγίας.

Επίσης, στην απόφαση C-155/91, της 17^{ης} Μαρτίου 1993, το ΔΕΚ αναφέρει απλώς ότι η οδηγία 91/156/ΕΟΚ, σχετικά με τη διαχείριση των απορριμμάτων, στοχεύει στην υλοποίηση και εφαρμογή της αρχής χωρίς περαιτέρω εξέταση.⁽⁹⁾

Τέλος, στην απόφαση Standley της 29^{ης} Απριλίου 1999 (C-293/97), το ΔΕΚ κάνει μια πρώτη προσπάθεια να εμβαθύνει περισσότερο στην ερμηνεία της αρχής. Η υπόθεση αυτή αφορούσε τη συμβατότητα της οδηγίας 91/676/ΕΚ για την προστασία των υδάτων κατά της νιτρορρύπανσης με υπέρτερους κανόνες του κοινοτικού δικαίου, ζήτημα το οποίο τέθηκε με προδικαστική παραπομπή από το Βρετανικό High Court of Justice. Οι ενάγοντες στην κύρια δίκη θεωρούσαν ότι η επίδικη Οδηγία ήταν αντίθετη με την αρχή της αναλογικότητας και την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει», διότι σε ορισμένες περιπτώσεις επέβαλε στους αγρότες να φέρουν το αποκλειστικό βάρος της επανόρθωσης της οικολογικής ισορροπίας, παρά το ότι η ισορροπία αυτή δεν είχε διαταραχθεί αποκλειστικά και μόνο από γεωργικές χρήσεις, αλλά και από άλλες δραστηριότητες. Το ΔΕΚ δε δέχτηκε την ερμηνευτική προσέγγιση των εναγόντων της κύριας δίκης με τις εξής σκέψεις: Σύμφωνα με το προοίμιο της οδηγίας, η γεωργική παραγωγή είναι η κυριότερη αιτία για τη ρύπανση των

υδάτων από νιτρικά ιόντα. Επομένως, δεν μπορεί να υποστηριχθεί ότι υπάρχει παράβαση της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» μιας και το κόστος της αποκατάστασης της βλάβης ανατίθεται σε φορείς που ευθύνονται για τη συγκεκριμένη ρύπανση, αφού οι γεωργοί αποτελούν τη σημαντικότερη πηγή ρύπανσης. Από τις σκέψεις αυτές προκύπτει ότι η εφαρμογή της αρχής δεν οδηγεί στην αναγνώριση συγκεκριμένης υποχρέωσης των κοινοτικών οργάνων να λαμβάνουν μέτρα επιβολής χρηματικών κυρώσεων σε βάρος όλων όσων ρυπαίνουν το περιβάλλον. Ωστόσο, το να επιβαρυνθούν αποκλειστικά και μόνο οι κύριοι υπαίτιοι και να απαλλαγούν οι υπόλοιποι υπαίτιοι, συνιστά μάλλον εσφαλμένη εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» από τις αρμόδιες εθνικές αρχές, στο μέτρο που δεν λαμβάνεται υπόψη η αρχή της αναλογικότητας ή η παραβίαση της αρχής της ισότητας. Αναγνωρίζεται, λοιπόν, ότι η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» θα πρέπει να εφαρμόζεται συμπληρωματικά με την αρχή της αναλογικότητας, με σκοπό την ορθή απονομή της δικαιοσύνης. Τα μέτρα που θα λαμβάνονται σε βάρος ενός προσώπου ή μιας κατηγορίας προσώπων θα πρέπει να αντιστοιχούν μόνο στο μέρος της ζημίας που μπορεί να καταλογισθεί σε αυτό ή σε αυτά τα πρόσωπα.⁽⁹⁾

Η χρήση της αρχής της αναλογικότητας έρχεται να λειτουργήσει ως στοιχείο συμπληρωματικό και ερμηνευτικό που αίρει την αοριστία που χαρακτηρίζει την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει», μιας και συνιστά μια γενικότερη αρχή, η οποία διαποτίζει τις υπόλοιπες, με στόχο να τις εξειδικεύσει, είτε περιορίζοντας είτε διευρύνοντας το πεδίο εφαρμογής τους.

Από τη νομολογία του ΔΕΚ προκύπτει ότι η εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» οδηγεί στην αναγνώριση συγκεκριμένης υποχρέωσης των κοινοτικών οργάνων να λαμβάνουν μέτρα επιβολής χρηματικών επιβαρύνσεων σε βάρος αυτών που ρυπαίνουν το περιβάλλον, αλλά όχι απαραίτητως σε βάρος όλων των υπαιτίων. Άρα καταγράφεται η βούληση για πλήρη εντοπισμό του ή των υπαιτίων, προκειμένου έτσι, να υπάρχει γενικότερα ορθότερη απονομή της δικαιοσύνης.⁽¹⁰⁾

3.3 Η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» στην Εθνική Νομοθεσία

3.3.1 Το Σύνταγμα

Στην ελληνική νομοθεσία, το ζήτημα της προστασίας του περιβάλλοντος τέθηκε για πρώτη φορά στο άρθρο 24 του Συντάγματος του 1975. Οι απαιτήσεις της εποχής για την προστασία του συνεχώς και με επικίνδυνους ρυθμούς υποβαθμιζόμενου περιβάλλοντος, οδήγησαν το νομοθέτη να εντάξει το ζήτημα αυτό στο μέρος του Συντάγματος που αφορά στα ατομικά και κοινωνικά δικαιώματα. Το άρθρο 24 υπήρξε πρωτοποριακό για την εποχή του και αποτέλεσε θεμελιώδη τομή στα θέματα προστασίας του περιβάλλοντος.

Σύμφωνα με το άρθρο 24 παρ.1 του Συντάγματος, όπως αναθεωρήθηκε από την Ζ' Αναθεωρητική Βουλή των Ελλήνων στις 6 Απριλίου του 2001:

«1. Η προστασία του φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος αποτελεί υποχρέωση του Κράτους και δικαίωμα του καθενός. Για τη διαφύλαξή του το Κράτος έχει υποχρέωση να παίρνει ιδιαίτερα προληπτικά ή κατασταλτικά μέτρα στο πλαίσιο της αρχής της αειφορίας. Νόμος ορίζει τα σχετικά με την προστασία των δασών και των δασικών εκτάσεων. Η σύνταξη δασολογίου συνιστά υποχρέωση του Κράτους. Απαγορεύεται η μεταβολή του προορισμού των δασών και των δασικών εκτάσεων, εκτός αν προέχει για την Εθνική Οικονομία η αγροτική εκμετάλλευση ή άλλη τους χρήση, που την επιβάλλει το δημόσιο συμφέρον.»

Η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» δεν αναφέρεται στο ελληνικό Σύνταγμα. Επειδή, όμως, ισχύει στο ευρωπαϊκό δίκαιο, ισχύει και στην ελληνική έννομη τάξη.

3.3.2 Η κοινή νομοθεσία

3.3.2.1 Το άρθρο 29 του Ν.1650/1986

Έντεκα χρόνια μετά τη συνταγματική καθιέρωση της προστασίας του περιβάλλοντος, ψηφίστηκε από την Ελληνική Βουλή ο Νόμος 1650/1986 για την προστασία του περιβάλλοντος. Ο νόμος αυτός είναι μια προσπάθεια σφαιρικής προσέγγισης των περιβαλλοντικών ζητημάτων και αποτελεί έναν

νόμο-πλαίσιο, η εφαρμογή του οποίου επαφίεται στην έκδοση σειράς Προεδρικών Διαταγμάτων και Υπουργικών Αποφάσεων.

Στο άρθρο 29 του Ν.1650/1986, εισάγεται η αστική ευθύνη σε περίπτωση περιβαλλοντικής ζημίας. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο άρθρο: «Οποιοδήποτε φυσικό ή νομικό πρόσωπο, προκαλεί ρύπανση ή άλλη υποβάθμιση του περιβάλλοντος ευθύνεται σε αποζημίωση, εκτός αν αποδείξει ότι η ζημία οφείλεται σε ανώτερη βία ή ότι προήλθε από υπαίτια ενέργεια τρίτου που ενήργησε δολίως».

Η διάταξη αυτή δεν έχει αξιοποιηθεί από τη νομολογία, καθώς μέχρι στιγμής δεν έχει δημοσιευθεί στο νομικό περιοδικό τύπο καμία δικαστική απόφαση που να την εφαρμόζει. Η μη εφαρμογή της διατάξεως οφείλεται στην αόριστη διατύπωσή της, η οποία και καθιστά δυσχερή την εξειδίκευση των προϋποθέσεων εφαρμογής της και την πρακτική αξιοποίησή της. Επίσης, η μη εφαρμογή του άρθρου 29 οφείλεται επίσης στην έλλειψη επαρκούς επιστημονικής επεξεργασίας της διάταξης, με συνέπεια την ασάφεια ως προς το βεληνεκές του προστατευτικού της πεδίου.

Η ρήτρα του άρθρου 29 έχει γενικό χαρακτήρα, με την έννοια ότι περιλαμβάνει τόσο τη ρύπανση και τη μόλυνση του περιβάλλοντος όσο και την υποβάθμισή του, δηλαδή την «πρόκληση από ανθρώπινες δραστηριότητες ρύπανσης ή οποιασδήποτε άλλης μεταβολής του περιβάλλοντος, η οποία είναι πιθανόν να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην ιστορική και πολιτιστική κληρονομιά ή στις αισθητικές αξίες» (άρθρο 2, παρ.4).

Η γενικότητα της ρήτρας συνίσταται, αφενός, στο ότι περιλαμβάνει τόσο το φυσικό όσο και το πολιτιστικό περιβάλλον και τις αισθητικές αξίες, και αφετέρου, στο ότι στις προσβολές του φυσικού περιβάλλοντος περικλείονται και αντιμετωπίζονται με ενιαίο τρόπο ενέργειες που ξεκινούν από την ήπια και σχετικά ανώδυνη προσβολή ενός φυσικού αγαθού και φτάνουν μέχρι και την οριστική κατάλυση των οικολογικών ισορροπιών.

Η διάταξη του άρθρου 29 Ν 1650/1986 προϋποθέτει την επέλευση ζημίας εις βάρος του ενάγοντος. Ως ζημία δε νοείται απλώς και μόνο η ρύπανση ή η υποβάθμιση μέσω της οποίας θίγεται το περιβάλλον ως κοινό αγαθό, αλλά απαιτείται, λόγω αυτής, να προκληθείκε περιουσιακή ζημία σε προστατευόμενο έννομο αγαθό ή συμφέρον του ενάγοντος.

Το άρθρο 29 Ν 1650/1986 δεν καθιερώνει ποσοτικό ή άλλο περιορισμό στην αποκατάσταση της ζημίας και, συνεπώς, ισχύει ο κανόνας πλήρους αποζημίωσης. Για τον υπολογισμό της αποκαταστατέας ζημιάς εφαρμόζονται τα άρθρα 207 επ. ΑΚ, τα οποία θεσπίζουν γενικές ρυθμίσεις του δικαίου της αποζημίωσης. Στη ζημία περιλαμβάνεται τόσο η θετική ζημία, δηλαδή μείωση της περιουσίας του δανειστή, όσο και το διαφυγόν κέρδος, δηλαδή ματαίωση της αύξησής της υπό την προϋπόθεση ότι πρόκειται για κέρδος που προσδοκά κανείς με πιθανότητα, σύμφωνα με τη συνηθισμένη πορεία των πραγμάτων ή τις ειδικές περιστάσεις και, ιδίως τα προπαρασκευαστικά μέτρα που έχουν ληφθεί (ΑΚ 298 εδ. 2).

Το άρθρο 29 Ν 1650/1986 προήλθε από την ανάγκη της καθιέρωσης ευθύνης από διακινδύνευση του φορέα δραστηριοτήτων που συνεπάγονται αυξημένους κινδύνους πρόκλησης περιβαλλοντικών ζημιών. Η καθιέρωση της ευθύνης από διακινδύνευση προτείνεται, τόσο στο διεθνές και κοινοτικό δίκαιο όσο και στις εθνικές έννομες τάξεις, ενόψει των δυσχερειών που προκύπτουν από την αδυναμία του ζημιωθέντος να αποδείξει, αφενός, την υπαιτιότητα του ζημιώσαντος, και αφετέρου, τον αιτιώδη σύνδεσμο μεταξύ παράνομης και υπαίτιας συμπεριφοράς και περιβαλλοντικής ζημιάς. Παρόλα αυτά, όμως, θα πρέπει να προστεθεί και το ότι η διακινδύνευση, ως κριτήριο καταλογισμού, έτσι όπως διατυπώνεται γενικά και αόριστα, δεν είναι δικαιολογημένη ούτε απαραίτητη, μιας και η αρχή της διακινδύνευσης προϋποθέτει ιδιαίτερους ή αυξημένους κινδύνους, οι οποίοι δεν συντρέχουν σε όλες τουλάχιστον τις περιπτώσεις που καλύπτει η διάταξη. ⁽¹¹⁾

3.3.2.2 Το άρθρο 926 ΑΚ

Πολύ συχνά, η οικολογική ζημία είναι συνέπεια αθροίσματος παράνομων προσβολών και όχι μιας μόνο ενέργειας, οπότε υπάρχει αντικειμενική δυσκολία για να διαπιστωθεί τίνος η συμπεριφορά προκάλεσε τη ζημία στο περιβάλλον. Κατά το ελληνικό αστικό δίκαιο μια τέτοιου είδους συμπεριφορά αντιμετωπίζεται ως ενιαία, χωρίς να εξετάζεται η επιμέρους συμμετοχή σε αυτή καθενός από τους ζημιώσαντες, σύμφωνα με το άρθρο 926ΑΚ, αφού ενέχονται όλοι εις ολόκληρον:

«Αν από κοινή πράξη περισσότερων προήλθε ζημία ή αν για την ίδια ζημία ευθύνεται παράλληλα περισσότεροι, ενέχονται όλοι εις ολόκληρον. Το ίδιο ισχύει και αν έχουν ενεργήσει περισσότεροι συγχρόνως ή διαδοχικά και δεν μπορεί να εξακριβωθεί τίνος η πράξη επέφερε τη ζημία.»

Ως «κοινή πράξη» θεωρείται κάθε μορφή συμμετοχή στην τέλεση της πράξης ή την πρόκληση ζημίας, άσχετα από το αν οι ενέργειες των περισσότερων προσώπων έγιναν ταυτόχρονα, παράλληλα ή διαδοχικά. Αρκεί να υπάρχει αιτιώδης σύνδεσμος μεταξύ της ενέργειας και του αποτελέσματος. Η συμβολή του καθενός από τους εμπλεκόμενους στη ζημία δεν λαμβάνεται υπόψη στη θεμελίωση της εις ολόκληρον ευθύνης. Παράλληλη ευθύνη πολλών για την ίδια ζημία υπάρχει όταν ευθύνονται από το νόμο περισσότερα πρόσωπα αυτοτελώς το καθένα για την αποκατάσταση της ίδιας ζημίας.

Η διάταξη του άρθρου 926 ΑΚ, λοιπόν, ρυθμίζει την περίπτωση που η ζημία επήλθε από αυτοτελείς ενέργειες περισσότερων από ενός προσώπων, οι οποίες αποτελούν όλες δυνατές προϋποθέσεις για την πρόκληση της ζημίας, χωρίς να μπορεί να εξακριβωθεί ποια απ' αυτές προκάλεσε στην πραγματικότητα τη ζημία. Ενώ κάθε μία από τις ενέργειες αυτές θα μπορούσε να προκαλέσει μόνη της ολόκληρη τη ζημία, δεν μπορεί να καθοριστεί ποιος είναι αυτός που πραγματικά προξένησε τη ζημία ή ποιο είναι το ποσοστό της συμβολής του καθενός στο ζημιογόνο αποτέλεσμα.⁽¹²⁾

Βλέπουμε, λοιπόν, ότι ενώ την εποχή που συντάχθηκε ο Αστικός Κώδικας δεν υπήρχε η έννοια των περιβαλλοντικών αγαθών, ο νομοθέτης καταλήγει ότι στην περίπτωση πολλαπλών δραστηριοτήτων που προκαλούν ζημία, είναι υποχρεωμένοι να συμμετέχουν όλοι στην αποκατάστασή της, άσχετα από τη συμβολή του καθενός στο ζημιογόνο αποτέλεσμα. Κάτι τέτοιο όμως δε συμβάλλει, κατά τη γνώμη μας, στη δίκαιη κατανομή των ευθυνών στους υπαιτίους τους. Έτσι, στο πλαίσιο μιας διεπιστημονικής θεώρησης και με εργαλείο τις τεχνικές μεθόδους που παρουσιάζονται στην εργασία, μπορεί να υποστηριχθεί η άποψη ότι αυτές λειτουργούν ως πραγματογνωμοσύνη για την εξειδίκευση του άρθρου 926 ΑΚ. Με αυτόν τον τρόπο, στη περίπτωση που συμβάλλουν παραπάνω από μία πηγές στη ρύπανση, μέσω της πραγματογνωμοσύνης διευκολύνεται η αποδεικτική διαδικασία και ο δικαστής μπορεί να προβεί σε επιμερισμό ή και αποκλεισμό ευθυνών, αφού το

ουσιώδες ζήτημα του αιτιώδους συνδέσμου μπορεί με σχετικά μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας να αποδειχθεί. Έτσι, εφαρμόζοντας τη διάταξη του άρθρου 926ΑΚ, είναι δυνατόν να καθορισθεί το ποσοστό συμβολής της κάθε πηγής στη ρύπανση.

3.3.4 Νομολογία των ελληνικών δικαστηρίων

3.3.4.1 Περιβαλλοντική ζημία ως προσβολή της προσωπικότητας (άρθρο 57 ΑΚ) – Ιστορική διαδρομή της νομολογίας των πολιτικών δικαστηρίων

Η χρήση και η απόλαυση των κοινών σε όλους και των κοινόχρηστων πραγμάτων του ζωτικού χώρου, συντελεί στην ελεύθερη ανάπτυξη της προσωπικότητας μέσα από τη συμμετοχή στην κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη της χώρας. Επομένως, κάθε προσβολή της κοινής χρήσης και ωφέλειας των πραγμάτων αυτών του ζωτικού χώρου σημαίνει και προσβολή της προσωπικότητας του ανθρώπου, η οποία προστατεύεται ρητά από το Σύνταγμα στα άρθρα 2 παρ. 1, 5 παρ. 1 και 24. Στα άρθρα αυτά αντιστοιχεί το δικαίωμα της προσωπικότητας, μέσα από το πρίσμα του οποίου ερμηνεύονται οι διατάξεις του ΑΚ. Κεντρική θέση όμως κατέχει το άρθρο 57 ΑΚ, με το οποίο καθιερώνεται μια «σφαιρική προστασία της προσωπικότητας» σε σχέση με το σύνολο των προστατευτέων από το ιδιωτικό δίκαιο έννομων αγαθών.

Αν και το περιβάλλον δεν αποτελεί ξεχωριστό έννομο αγαθό, η οποιαδήποτε προσβολή του ερμηνεύεται ως προσβολή της προσωπικότητας, αφού η παρεμπόδιση της κοινής ωφέλειας ή η καταστροφή πραγμάτων του ζωτικού χώρου δυσχεραίνει, αν όχι αποκλείει, την ανάπτυξη της προσωπικότητας, πράγμα ανεπίτρεπτο στα πλαίσια μιας δημοκρατικά διαρθρωμένης χώρας.

Καθένας έχει έννομο συμφέρον και δικαίωμα να απολαμβάνει και να χρησιμοποιεί ελεύθερα τα περιβαλλοντικά αγαθά, εξασφαλίζοντας έτσι μια ποιοτική ζωή και τις προϋποθέσεις εκείνες που χρειάζονται για την ολοκλήρωση της προσωπικότητάς του. Είναι λοιπόν λογικό, σε περιπτώσεις ζημιών του περιβάλλοντος να θίγεται το δικαίωμά του αυτό. Έχει το έννομο συμφέρον να ζητήσει την άρση και μη επανάληψή της στο μέλλον, καθώς και την αποκατάσταση της ζημίας- υλικής και ηθικής- που έχει υποστεί από την αρνητική επέμβαση στο φυσικό περιβάλλον.⁽¹³⁾

Η νομολογία των πολιτικών δικαστηρίων, με μια σειρά από αποφάσεις (ΜπρΝάξου 58/1989, ΜπρΒόλου 1097/229/1989, ΜπρΣερρών 12/94, ΜπρΜεσολογγίου 134/97, ΜπρΙωαννίνων 471/96, ΜπρΜεσολογγίου 361/2002) αναγνωρίζει το δικαίωμα της χρήσης, απόλαυσης και ωφέλειας των κοινών σε όλους πραγμάτων, στα οποία περιλαμβάνονται και τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά αγαθά, ως εκδήλωση του δικαιώματος της προσωπικότητας. Μέσω των αποφάσεων αυτών, διευκρινίζεται η έννοια της προσωπικότητας, η οποία εκτείνεται σε όλα τα αγαθά, τα οποία είναι αναπόσπαστα συνδεδεμένα με αυτήν και στα οποία συμπεριλαμβάνονται, μεταξύ άλλων η ζωή, η υγεία, η σωματική ακεραιότητα και η ελευθερία (ΜΠρΚορίνθου 301/92, ΜπρΣερρών 12/94). Τα αγαθά αυτά εξαρτώνται άμεσα από το περιβάλλον και βλαπτικές επιδράσεις σε αυτό τα επηρεάζουν (ΜΠρΚορίνθου 301/92). Κάθε προσβολή, που προέρχεται από πράξεις που βλάπτουν το περιβάλλον, έχει σαν συνέπεια την ενεργοποίηση και εφαρμογή των διατάξεων του ΑΚ για την προστασία της προσωπικότητας του ατόμου, αφού σκοπός των διατάξεων αυτών είναι η ευνοϊκή ανάπτυξη της προσωπικότητάς του μέσα σε ένα οικοσύστημα διαμορφωμένο με ορθό τρόπο, η προστασία του οποίου είναι αναγκαία για τη ζωή και την υγεία του ανθρώπου (ΜπρΜεσολογγίου 134/97). Επομένως, η νομολογία των πολιτικών δικαστηρίων, ανάγοντας το περιβάλλον ρητά σε αγαθό, που σχετίζεται στενά με την προσωπικότητα του ατόμου, αναγνωρίζει στο άτομο εναγώγιμη αξίωση από τη διάταξη του άρθρου 57 ΑΚ εναντίον εκείνου, από τη δράση του οποίου προέρχεται βλαπτική ενέργεια, που αποτελεί την αιτία επιβάρυνσης ή υποβάθμισης του περιβάλλοντος (ΜπρΣερρών 12/94). Συγκεκριμένα, οι αξιώσεις που δημιουργούνται από την εφαρμογή των σχετικών διατάξεων του ΑΚ σε περίπτωση παρεμπόδισης άσκησης του δικαιώματος χρήσης των κοινών σε όλους και των κοινόχρηστων πραγμάτων ως περιβαλλοντικών αγαθών, συνίστανται σε άρση της προσβολής στο μέλλον και στην αξίωση για ηθική βλάβη λόγω διατάραξης της ηθικής ισορροπίας του ατόμου (ΜΠρΚορίνθου 301/92, ΜπρΣερρών 12/94).

Χωρίς αμφιβολία, η παραδοχή της προστασίας του δικαιώματος χρήσης των περιβαλλοντικών αγαθών από τη νομολογία των πολιτικών δικαστηρίων ως έκφανσης του δικαιώματος της προσωπικότητας από βλαπτικές ενέργειες, συμβάλλει στην αποτελεσματικότερη προστασία τους. Επιπλέον, οι διατάξεις

του άρθρου 57 επ. ΑΚ φωτίζονται από τις συνταγματικές διατάξεις των άρθρων 24 και 5 παρ. 1, ενδυναμώνονται αλλά και διευρύνονται ουσιαστικά, με αποτέλεσμα να αναγνωρίζονται ως εφαρμοστέες στις περιπτώσεις προσβολής του δικαιώματος χρήσης, απόλαυσης και ωφέλειας των κοινών σε όλους και των κοινόχρηστων πραγμάτων ως περιβαλλοντικών αγαθών.⁽¹⁴⁾

3.3.4.2 Η υπόθεση 12/94 του Μονομελούς Πρωτοδικείου Σερρών για ρύπανση που προκαλείται από περισσότερους του ενός φορέων

Στην ελληνική νομολογία, δεν υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου να εμπλέκονται περισσότεροι από ένας φορείς σε περιστατικό ρύπανσης. Η μοναδική τέτοια περίπτωση εκδικάστηκε από το Μονομελές Πρωτοδικείο Σερρών το 1994 και αφορούσε στη ρύπανση της περιοχής από τη λειτουργία βιομηχανικών μονάδων παραγωγής ασφαλτομίγματος.

Με την αίτηση που αρχικά κατατέθηκε, 38 αιτούντες ζήτησαν τη λήψη ασφαλιστικών μέτρων για την προστασία του προσβαλλόμενου δικαιώματός στην προσωπικότητά τους και την προσωρινή ρύθμιση της κατάστασης που είχε δημιουργηθεί, ώστε να διαταχθεί η σφράγιση και η απαγόρευση της λειτουργίας των βιομηχανικών μονάδων παραγωγής ασφαλτομίγματος και η απομάκρυνσή τους από την περιοχή. Η λειτουργία τους εκεί, χωρίς τη νόμιμη άδεια λειτουργίας, προκαλεί έντονα προβλήματα ρύπανσης στην περιοχή με σοβαρές επιπτώσεις, τόσο στις καλλιέργειες αγροτικών προϊόντων όσο και στην υγεία των κατοίκων της περιοχής.

Από τις καταθέσεις των μαρτύρων που εξετάστηκαν νόμιμα στο ακροατήριο, τα έγγραφα που προσκόμισαν οι διάδικοι και τη γενική συζήτηση της υπόθεσης πιθανολογήθηκαν, κατά την κρίση του δικαστηρίου τα εξής: Σε συγκεκριμένη περιοχή, 7 χλμ. από την πόλη των Σερρών λειτουργούσαν από τις αρχές της δεκαετίας του '80 τρεις βιομηχανικές μονάδες παραγωγής ασφαλτομίγματος, στις οποίες προστέθηκε και μια τέταρτη στα τέλη του 1992, η οποία τέθηκε σε πλήρη λειτουργία στις αρχές του 1993. Οι μονάδες αυτές εξορύγνυαν ασβεστολιθικά πετρώματα από την περιοχή, και μετά από κατάλληλη επεξεργασία παρήγαγαν ασφαλτομίγμα και άλλα συναφή προϊόντα και τα διέθεταν στην κατανάλωση. Οι τρεις

πρώτες από τις παραπάνω μονάδες λειτουργούσαν χωρίς άδεια, ενώ η τέταρτη λειτουργούσε με άδεια που έληγε στις 3.2.1994. Από τις υπόλοιπες τρεις μόνο η μία είχε πάρει άδεια λειτουργίας, η οποία έληξε στις 2.5.1984 και από κει και πέρα δεν ανανεώθηκε.

Μετά την πρώτη εγκατάσταση των βιομηχανικών μονάδων εκφράστηκαν διαμαρτυρίες και παράπονα από τους κατοίκους και τους ιδιοκτήτες ακινήτων της περιοχής για υπερβολική ρύπανση του περιβάλλοντος. Η ρύπανση αυτή είχε σαν συνέπεια αφενός την υποβάθμιση της ποιότητας των αγροτικών προϊόντων που παράγονταν στην περιοχή, και αφετέρου την αύξηση των ασθενειών και των θανάτων των κατοίκων, πράγμα που επιβεβαιώθηκε από σχετική έρευνα που έγινε στα αρχεία του Νοσοκομείου Σερρών. Λόγω των προβλημάτων αυτών, που προκλήθηκαν στην καθημερινή ζωή των κατοίκων της περιοχής από τη λειτουργία των βιομηχανικών μονάδων, αυτοί άρχισαν ήδη από το 1982 να απευθύνονται προς τις αρμόδιες αρχές, αλλά και προς τις ίδιες τις επιχειρήσεις, προκειμένου να ενεργήσουν παίρνοντας μέτρα για την προστασία του περιβάλλοντος. Τότε, λοιπόν, άρχισε αλληλογραφία μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών με την οποία διακινήθηκαν δεκάδες έγγραφα πολλών δημοσίων αρχών, με τα οποία αναγνωρίστηκε το πρόβλημα της ρύπανσης της περιοχής από τη λειτουργία των εργοστασίων και οι συνέπειες αυτής στην υγεία των κατοίκων και στην ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων της περιοχής, διαπιστώθηκε η αναγκαιότητα λήψης μέτρων από τις βιομηχανίες για τον έλεγχο της ρύπανσης, αξιώθηκε η λήψη τους και απειλήθηκε η παύση λειτουργίας τους επειδή αυτές δε συμμορφώθηκαν. Επιπλέον επιβλήθηκαν πρόστιμα εις βάρος των βιομηχανιών συνολικού ύψους 1.250.000 δρχ. Τέλος, στην προσκομιζόμενη έκθεση ελεγκτή από το Σώμα Ελεγκτών Δημόσιας Διοίκησης, μετά από έρευνα επιτόπιων συνθηκών, προτείνεται η οριστική διακοπή της λειτουργίας των προαναφερόμενων μονάδων και η απαγόρευση λειτουργίας παρόμοιων επιχειρήσεων στην επίμαχη περιοχή. Τελικά, το Δικαστήριο, δικάζοντας με τη διαδικασία των ασφαλιστικών μέτρων, έκανε δεκτή την αγωγή και διέταξε την παύση της λειτουργίας και των τεσσάρων βιομηχανιών.⁽¹⁵⁾

Παρότι η απόφαση αφορά αγωγή με νομική βάση το άρθρο 57 ΑΚ για την προσβολή της προσωπικότητας, θα μπορούσε κατ' αναλογία να ισχύσει και για αγωγή αποζημίωσης με νομική βάση το άρθρο 926 ΑΚ.

Παρατηρείται επομένως ότι και σε αυτήν την περίπτωση, εφαρμόζεται η λογική της ευθύνης εις ολόκληρον και όλοι οι συμμετέχοντες στη ρύπανση αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο, διατάσσεται δε η παύση της λειτουργίας όλων των μονάδων, άσχετα από το ποσοστό που συνέβαλε η καθεμία στη ρύπανση. Αντιθέτως, με τη χρήση του μοντέλου που παρουσιάζεται εδώ, θα μπορούσε να εντοπισθεί ποιος πραγματικά ευθύνεται καθώς και το ποσοστό συμβολής του καθενός, και να αποφασιστεί η άρση της λειτουργίας μόνο αυτού ή αυτών, γεγονός που καταδεικνύει και τη χρησιμότητα του συγκεκριμένου εργαλείου στην οικονομική ζωή της κάθε επίδικης περιοχής.

3.4 Η συνύπαρξη και αλληλεπίδραση των δύο θεωρήσεων της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» - τεχνικής και θεσμικής- μέσω του μοντέλου PTC

Κατά την ανάλυση της θεσμικής θεώρησης της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει», έγινε φανερό ότι βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή της, είναι η ύπαρξη αιτιώδους συνάφειας μεταξύ της περιβαλλοντικής ζημίας και της δραστηριότητας που την προκάλεσε. Είναι απαραίτητο, δηλαδή, σε κάθε περίπτωση να αποδεικνύεται η υπαιτιότητα του ρυπαίνοντος και ο αιτιώδης σύνδεσμος μεταξύ της ρυπογόνου δραστηριότητας και του αποτελέσματος που προκαλεί. Αυτό δεν είναι πάντα εφικτό, μιας και πολλές φορές η ρύπανση είναι διάχυτης φύσης και συνήθως εμπλέκονται σε αυτήν περισσότεροι από ένας ρυπαίνοντες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η απόδειξη του αιτιώδους συνδέσμου γίνεται ακόμα πιο δύσκολη, αφού δεν είναι πάντα σαφές ποιος προκάλεσε τη ρύπανση ή κατά πόσο συνέβαλε σε αυτήν, όταν πρόκειται για συνολικό αποτέλεσμα πολλών δραστηριοτήτων.

Κατά τη δικαστική διαδικασία, όπου εκδικάζονται τέτοιες περιπτώσεις διάχυτης ή/ και συλλογικής ρύπανσης, για την απόδοση ευθύνης στους ρυπαίνοντες, υπάρχει ο κίνδυνος το δικαστήριο να απορρίψει την αγωγή του ζημιωθέντος από τη ρύπανση, λόγω αοριστίας στην αποδεικτική διαδικασία, αφού είναι αδύνατο να προσδιοριστεί ποιος προκάλεσε την εν λόγω ζημία. Αποτέλεσμα αυτής της απόρριψης είναι η συνέχιση της υποβάθμισης του περιβάλλοντος από τη ρυπογόνα δραστηριότητα, με τον ζημιωθέντα να αδικείται, αφού δεν προστατεύεται το δικαίωμά του αποζημίωσης από περιβαλλοντικές προσβολές ή το δικαίωμά του στην προσωπικότητα, που θίγεται από την υποβάθμιση αυτή. Όπως είδαμε από τη σχετική νομολογία, η οποία όμως αφορά μόνο περιπτώσεις αγωγών με νομική βάση το άρθρο 57 ΑΚ, μέχρι στιγμής, τέτοιου είδους περιπτώσεις αντιμετωπίζονται από τα δικαστήρια με την απόδοση της ευθύνης «εις ολόκληρον», δηλαδή την επίρριψη ευθυνών σε όλους τους εν δυνάμει ρυπαντές, πράγμα εξίσου άδικο για αυτούς που δε σχετίζονται στην πραγματικότητα με τη ρύπανση.

Εμφανίζεται, λοιπόν, η ανάγκη για ένα μέσο, το οποίο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα δικαστήρια, ως πραγματογνωμοσύνη, κατά την αποδεικτική διαδικασία του υπαίτιου ή των υπαίτιων της περιβαλλοντικής

ζημίας. Δηλαδή, όταν το δικαστήριο δε θα μπορεί να αποφανθεί, λόγω ελλείψεως στοιχείων, για τον προσδιορισμό των υπαίτιων της ρύπανσης, θα μπορεί να απευθυνθεί σε ομάδα πραγματογνωμόνων που, με τη χρήση ενός τεχνικού μέσου, θα μπορούν να δώσουν στο δικαστήριο τα απαραίτητα στοιχεία για τη λήψη μιας δίκαιης απόφασης. Πιο συγκεκριμένα, με την πραγματογνωμοσύνη αυτή, θα πρέπει να προσδιορίζεται ποιος προκάλεσε τη ρύπανση και, στην περίπτωση που εμπλέκονται περισσότεροι του ενός ρυπαίνοντες, να καθορίζεται ο βαθμός στον οποίο ο καθένας ευθύνεται για το ζημιογόνο αποτέλεσμα. Έτσι, θα προσδιορίζεται ο αιτιώδης σύνδεσμος μεταξύ της ζημίας και της ρυπογόνου δραστηριότητας και θα γίνεται δυνατή η σωστή εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει», και μάλιστα ασχέτως αν πρόκειται για αντικειμενική ή υποκειμενική ευθύνη.

Ως τέτοιο μέσο πραγματογνωμοσύνης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο PTC, που παρουσιάζεται στη παρούσα εργασία. Πρόκειται για ένα **δυναμικό** μοντέλο προσομοίωσης της ροής των υπογείων υδάτων και της μεταφοράς ρύπων μέσα σ' αυτά. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων που δίνει το μοντέλο είναι συνάρτηση της ακρίβειας των δεδομένων που εισάγουμε σ' αυτό, καθώς και του χρονικού διαστήματος για το οποίο γίνεται η προσομοίωση της μεταφοράς της ρύπανσης μέσα στον υπόγειο υδροφορέα. Δηλαδή, για όσο περισσότερο χρόνο προσομοιωθεί η κίνηση της ρύπανσης μέσα στον υδροφορέα, τόσο πιο αξιόπιστα και πιο κοντά στην πραγματικότητα είναι τα αποτελέσματα που εξάγει το μοντέλο. Η δυναμικότητά του, έγκειται στη δυνατότητα συνεχούς εισαγωγής νέων δεδομένων, με συνέπεια την ανάλογη μεταβολή στα αποτελέσματα.

Στην περίπτωση, λοιπόν, ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα από διάφορες δραστηριότητες, γίνεται δυνατός, με τη χρήση του μοντέλου PTC, ο προσδιορισμός του βαθμού στον οποίο ευθύνεται, αν ευθύνεται, η κάθε δραστηριότητα για τη συγκεκριμένη ζημία. Η ρύπανση του υπόγειου υδροφορέα είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα πολυπαραγοντικής και διάχυτης ρύπανσης, λόγω της πολυπλοκότητας του μηχανισμού διασποράς της στους υπόγειους υδροφορείς, που κάνει το πρόβλημα του προσδιορισμού της γενεσιουργού αιτίας ακόμα δυσκολότερη. Στην περίπτωση, λοιπόν, που το δικαστήριο εκδικάζει μία τέτοια περίπτωση ρύπανσης, για την απόδοση ευθύνης στους εν δυνάμει ρυπαντές, γίνεται δυνατή η χρήση των

αποτελεσμάτων, που δίνει το συγκεκριμένο μοντέλο από την προσομοίωση της ρύπανσης στην επίδικη περιοχή, ως αποδεικτικών στοιχείων για την αναγνώριση ή όχι της συμβολής του καθενός από τους εναγόμενους στο φαινόμενο της ρύπανσης, σύμφωνα με την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει».

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, γίνεται η χρήση του μοντέλου PTC σε τέσσερις περιπτώσεις ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα, στις οποίες, κάθε φορά, συμβάλλουν περισσότεροι του ενός ρυπαίνοντες. Μέσω των αποτελεσμάτων του μοντέλου προσδιορίζεται σε κάθε περίπτωση η συμβολή του καθενός στην υποβάθμιση των υπογείων υδάτων και γίνεται έτσι εμφανής η συμβολή του συγκεκριμένου μοντέλου στη δίκαιη απόδοση ευθύνης από το δικαστήριο.

4. Εισαγωγή και επεξεργασία των δεδομένων

4.1 Στοιχεία εισόδου στο μοντέλο PTC

Για τη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και μεταφοράς της ρύπανσης, το μοντέλο PTC απαιτεί την εισαγωγή δεδομένων που αφορούν στην υδρογεωλογία της περιοχής (υδραυλική αγωγιμότητα, βροχόπτωση), στον τύπο του υδροφορέα, στις οριακές και αρχικές συνθήκες, καθώς και στον χρόνο προσομοίωσης. Το μοντέλο υπολογίζει τα υδραυλικά ύψη, τη συγκέντρωση της ρυπαντικής ουσίας μέσα στο υπόγειο νερό, καθώς και την ταχύτητα του υπογείου νερού κατά τους άξονες x και y .

Στη συγκεκριμένη μελέτη, θεωρούμε μία περιοχή, στην οποία τοποθετούμε εικονικές πηγές ρύπανσης και πηγάδια άντλησης, ανάλογα με την περίπτωση, και εξετάζουμε τόσο τη μεταφορά της ρύπανσης από την πηγή προς την ευρύτερη περιοχή, όσο και τη μεταβολή στα υδραυλικά ύψη. Τα υδρογεωλογικά δεδομένα που εισάγουμε στο μοντέλο, ελήφθησαν από τα δεδομένα της λεκάνης Καστελίου-Θραψανού του Νομού Ηρακλείου.

Οι οριακές συνθήκες για τη ροή λαμβάνονται από τις πληροφορίες που δίνουν τα πηγάδια παρατήρησης της περιοχής και είναι 340m για το άνω όριο και 210m για το κάτω όριο και είναι πρώτου είδους. Οριακές συνθήκες δεύτερου είδους αποτελούν τα πηγάδια άντλησης.

Το πάχος του στρώματος είναι 360 m και λαμβάνεται από γεωλογικά καρότα της περιοχής. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής, ο οποίος εισήχθη στο μοντέλο μας έδωσε πληροφορίες για τη γεωλογία της περιοχής, οποία αποτελείται κυρίως από ασβεστολιθικά πετρώματα (λατυποπαγείς και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους)

Η προσομοίωση γίνεται για ένα χρόνο, ο οποίος χωρίζεται σε δύο περιόδους, τη θερινή (1^η περίοδος) και τη χειμερινή (2^η περίοδος). Κατά τη θερινή περίοδο η βροχόπτωση θεωρείται μηδενική, ενώ για τη χειμερινή περίοδο η τιμή για τη βροχόπτωση λαμβάνεται ίση με 0,0018 m/d.

4.2 Περιγραφή σεναρίων

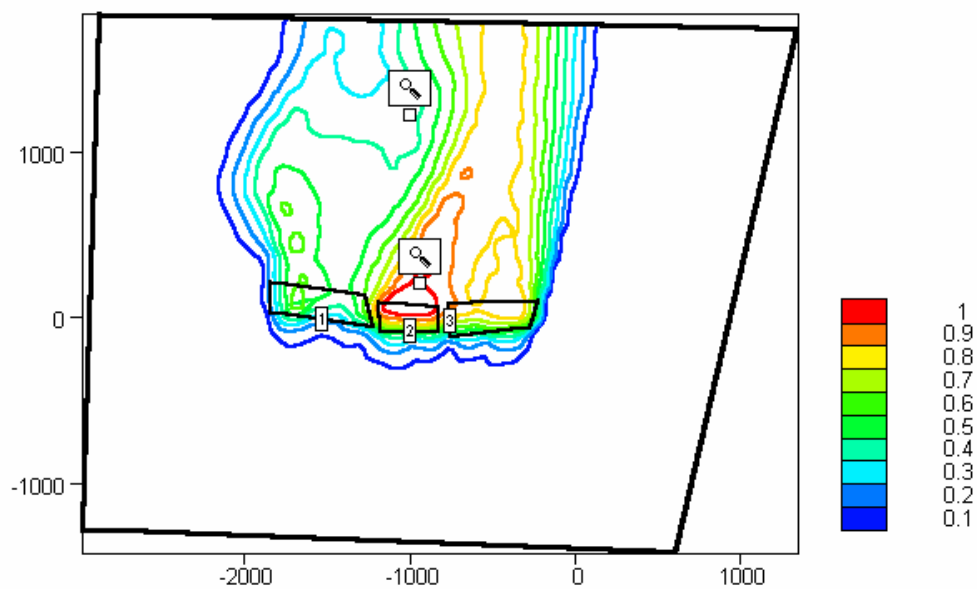
Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη περιπτώσεων ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα, όπου εμπλέκονται περισσότεροι από ένας ρυπαντές ή ακόμα και περιπτώσεις όπου η κατάσταση της ρύπανσης επιδεινώνεται με εξάπλωσή της, που προκαλείται από άλλους παράγοντες, πέραν από την ίδια την πηγή ρύπανσης.

4.2.1 1^η Περίπτωση

Θεωρούμε μία Βιομηχανική Περιοχή (ΒΙ.ΠΕ.) στην οποία τρεις βιομηχανίες επιβαρύνουν τον υπόγειο υδροφορέα με ρυπαντικά φορτία. Στο εξής, οι τρεις βιομηχανίες θα αναφέρονται ως πηγές ρύπανσης 1, 2 και 3 αντίστοιχα. Για απλοποίηση της μελέτης θα εφαρμοσθεί η αρχή της κανονικοποίησης των συγκεντρώσεων, δηλαδή δε θα γίνει χρήση μονάδων. Σύμφωνα με την αρχή της κανονικοποίησης, η μέγιστη συγκέντρωση είναι ίση με 1, ενώ η ελάχιστη ίση με 0.

Η πηγή 1 εκλύει ρύπους με αρχική συγκέντρωση ίση με 0,5, η πηγή 2 με αρχική συγκέντρωση ίση με 1 και η πηγή 3 με αρχική συγκέντρωση ίση με 0,8. Η συγκέντρωση της ρυπαντικής ουσίας στον υπόγειο υδροφορέα, μετά από έναν χρόνο συνεχούς ρύπανσης από τις βιομηχανικές μονάδες φαίνεται στην εικόνα 4-1.

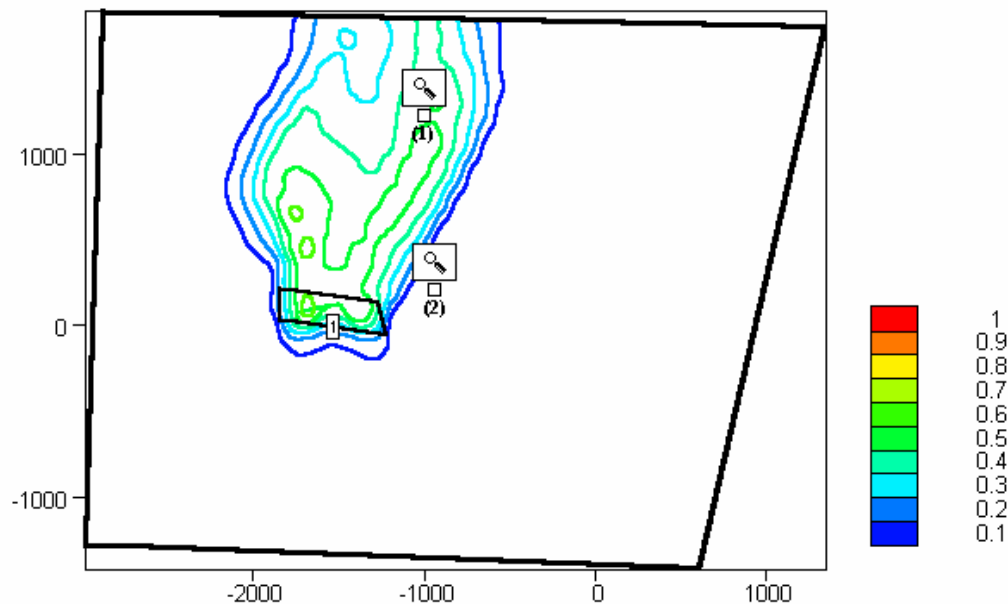
Η κλίμακα των συγκεντρώσεων είναι ανάλογη της κλίμακας των χρωμάτων, με τη μέγιστη συγκέντρωση (ίση με 1) να αναλογεί στην κόκκινη γραμμή, ενώ η ελάχιστη συγκέντρωση (ίση με 0,1) να αναλογεί στη σκούρα μπλε γραμμή. Στην εικόνα 4-1 φαίνονται και δύο πηγάδια παρατήρησης που τοποθετούμε στις αντίστοιχες θέσεις (1) και (2) για τον έλεγχο της ποιότητας του νερού στον υπόγειο υδροφορέα. Για να ελέγξουμε την επίδραση που έχει η κάθε πηγή ρύπανσης στα σημεία όπου βρίσκονται τα πηγάδια παρατήρησης εξετάζουμε πιθανούς συνδυασμούς λειτουργίας των τριών πηγών.



Εικόνα 4-1: Συγκέντρωση των ρύπων στον υπόγειο υδροφορέα μετά από ένα χρόνο συνεχούς ρύπανσης από τις τρεις βιομηχανικές μονάδες.

4.2.1.1 Σενάριο 1^ο

Υποθέτουμε ότι ρυπαίνει μόνο η πηγή 1. Η ρύπανση του υπόγειου υδροφορέα που προκαλείται από την πηγή αυτή, μετά από ένα χρόνο λειτουργίας της, φαίνεται στην εικόνα 4-2

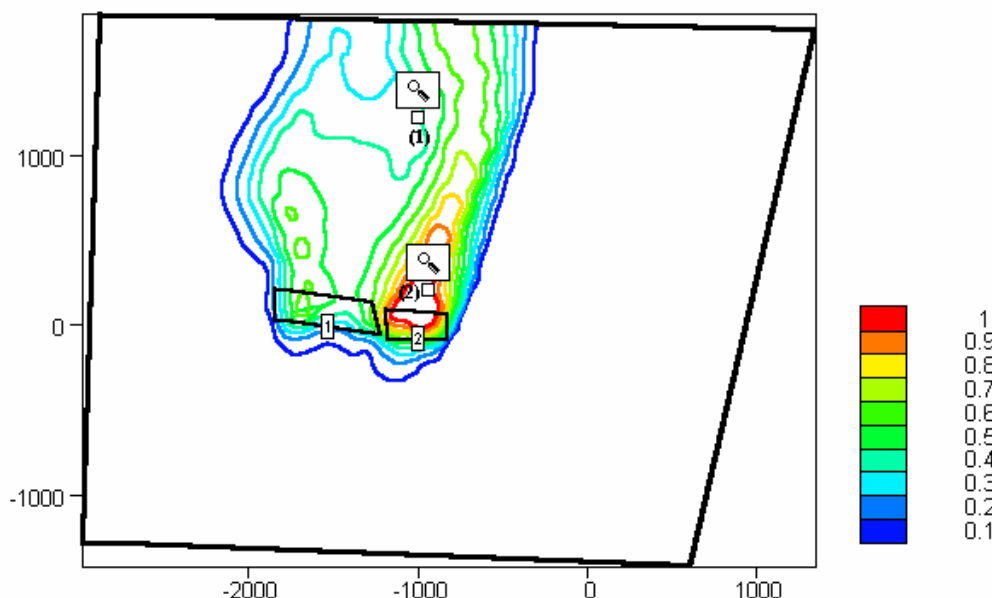


Εικόνα 4-2: Συγκέντρωση των ρύπων στον υπόγειο υδροφορέα μετά από ένα χρόνο συνεχούς ρύπανσης από την πηγή (1).

Όπως είναι φανερό, η ρύπανση που προέρχεται από την πηγή 1 επηρεάζει την ποιότητα του υπογείου νερού μόνο στη θέση (1).

4.2.1.2 Σενάριο 2^ο

Στο σενάριο αυτό θα εξετάσουμε την επίδραση που έχει στον υδροφορέα η ταυτόχρονη λειτουργία των πηγών 1 και 2. Το αποτέλεσμα μετά από ένα χρόνο λειτουργίας φαίνεται στην εικόνα 4-3.

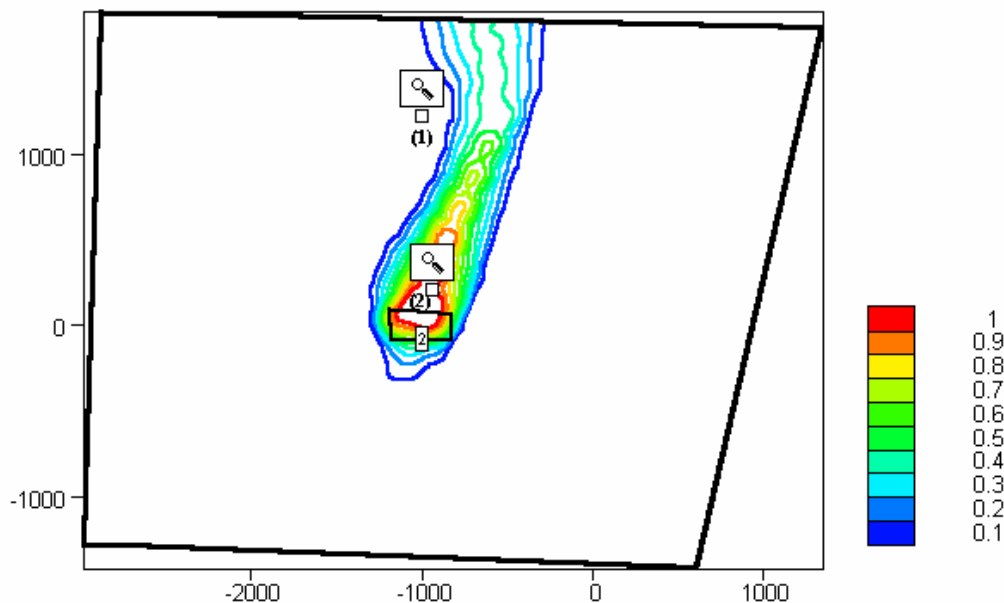


Εικόνα 4-3: Συγκέντρωση των ρύπων στον υπόγειο υδροφορέα μετά από ένα χρόνο συνεχούς ρύπανσης από τις πηγές (1) και (2).

Από αυτήν παρατηρείται ότι η ταυτόχρονη λειτουργία των πηγών 1 και 2 επηρεάζει την ποιότητα του υπογείου νερού και στα δύο πηγάδια. Όπως διαπιστώθηκε από το προηγούμενο σενάριο, η πηγή 1 δεν επηρεάζει την κατάσταση στο πηγάδι (2), επομένως συμπεραίνουμε ότι για την κατάσταση στο πηγάδι αυτό ευθύνεται μόνο η πηγή 2, στην περίπτωση αυτή. Αυτό που δεν έχει γίνει φανερό ακόμα είναι αν για τη ρύπανση στο πηγάδι (1) ευθύνεται μόνο η πηγή 1 ή εμπλέκεται και η πηγή 2. Αυτό το ενδεχόμενο θα εξετάσουμε στο επόμενο σενάριο.

4.2.1.3 Σενάριο 3^ο

Παύουμε τη λειτουργία της πηγής 1 και θεωρούμε ότι λειτουργεί μόνο η πηγή 2. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 4-4.

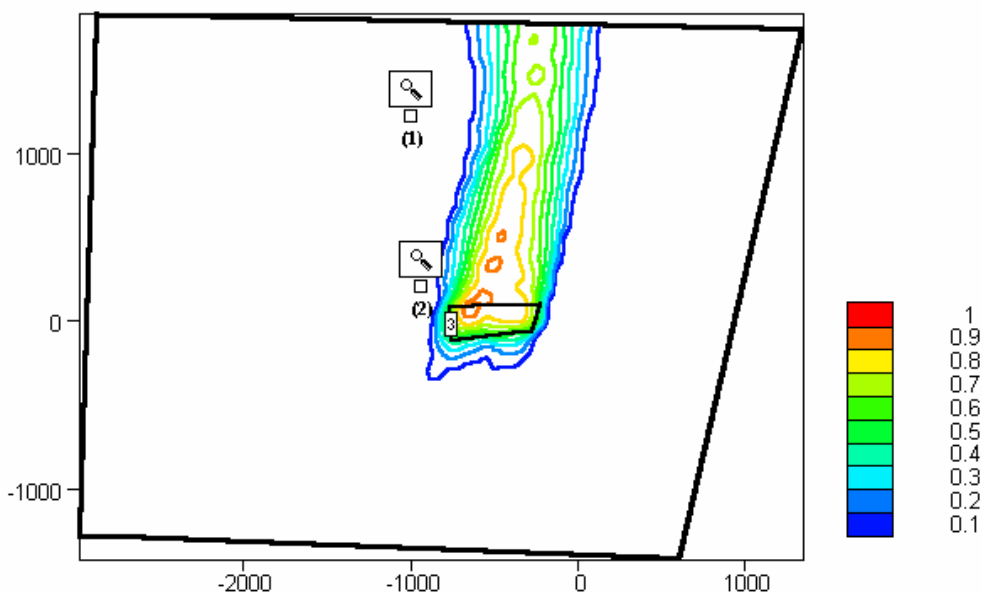


Εικόνα 4-4: Συγκέντρωση των ρύπων στον υπόγειο υδροφορέα μετά από ένα χρόνο συνεχούς ρύπανσης από την πηγή (2).

Με την παύση της λειτουργίας της πηγής 1, παρατηρούμε ότι στο πηγάδι (1) δεν υπάρχει ρύπανση. Επομένως συμπεραίνουμε ότι η ρύπανση στο συγκεκριμένο σημείο οφείλεται μόνο στην πηγή 1, παρόλο που θα περιμέναμε να εμπλέκεται και η πηγή 2 αφού βρίσκεται ακριβώς ανάντη του σημείου αυτού. Το φαινόμενο αυτό θα εξηγηθεί παρακάτω.

4.2.1.4 Σενάριο 4^ο

Μένει να εξετάσουμε την επίδραση που έχει η λειτουργία της πηγής 3 στη ρύπανση που εμφανίζεται στα σημεία παρατήρησης. Αν υποθέσουμε ότι η πηγή 3 λειτουργεί μόνη της, τότε η ρύπανση του υδροφορέα θα έχει τη μορφή που φαίνεται στην εικόνα 4-5.

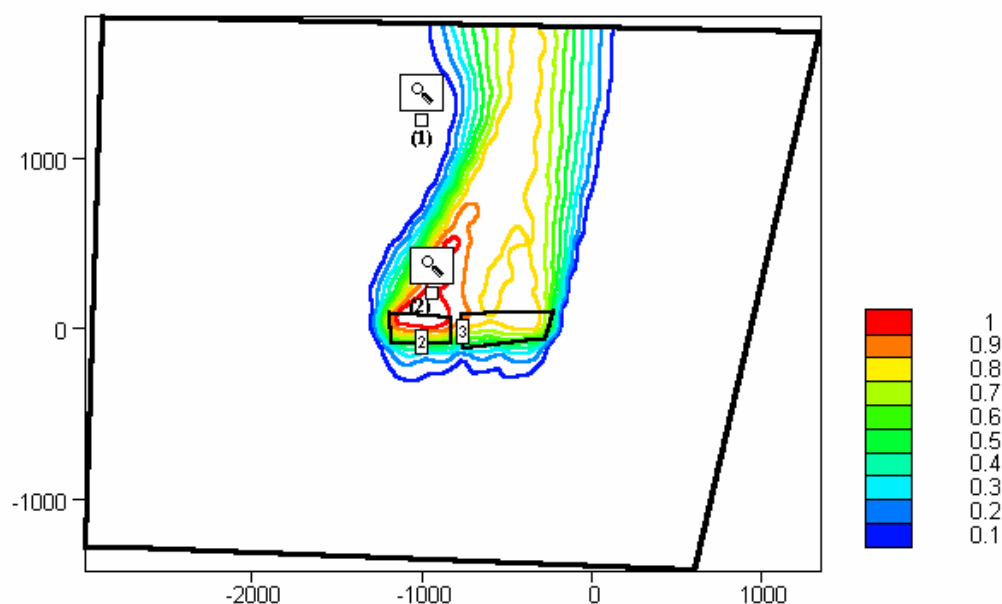


Εικόνα 4-5: Συγκέντρωση των ρύπων στον υπόγειο υδροφορέα μετά από ένα χρόνο συνεχούς ρύπανσης από την πηγή (3).

Παρατηρείται ότι με τη λειτουργία μόνο της πηγής 3, δεν εμφανίζεται ρύπανση στα πηγάδια παρατήρησης, επομένως συμπεραίνουμε ότι η συγκεκριμένη πηγή δε συμβάλλει στη ρύπανση των συγκεκριμένων πηγαδιών.

4.2.1.5 Ανακεφαλαίωση

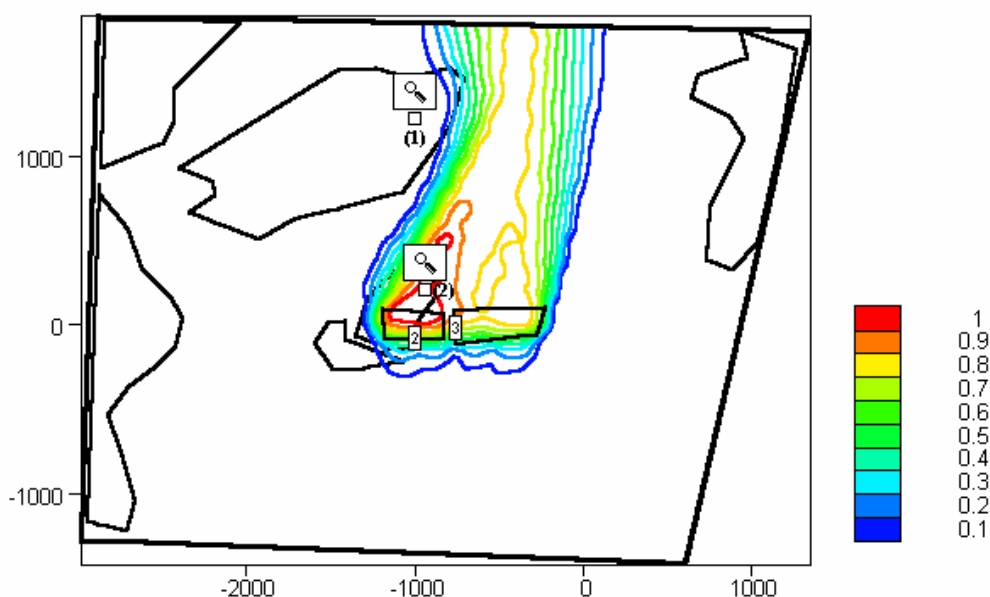
Από τα παραπάνω, λοιπόν προκύπτει ότι για τη ρύπανση στο πηγάδι (1) ευθύνεται αποκλειστικά η πηγή 1, πράγμα που φαίνεται πιο καθαρά στη εικόνα 4-6. Έχοντας παύσει η λειτουργία της πηγής 1 και ενώ οι άλλες 2 πηγές λειτουργούν, στο συγκεκριμένο σημείο δεν εμφανίζεται ρύπανση.



Εικόνα 4-6: Συγκέντρωση των ρύπων στον υπόγειο υδροφορέα μετά από ένα χρόνο συνεχούς ρύπανσης από τις πηγές (2) και (3).

Το αποτέλεσμα αυτό δεν ήταν το αναμενόμενο, κυρίως λόγω της θέσης του πηγαδιού (1). Καταρχήν, σχεδόν ισαπέχει από τις τρεις πηγές, κι έπειτα βρίσκεται ακριβώς κατάντη της πηγής 2, οπότε κάποιος θα περίμενε να επηρεάζεται τουλάχιστον και από την πηγή 2. Επιπλέον, η πηγή 1 είναι αυτή που εκλύει ρύπους με τη μικρότερη συγκέντρωση σε σχέση με τις άλλες δύο, όποτε είναι και η λιγότερο ύποπτη. Ο παράγοντας όμως, που καθορίζει τη μεταφορά της υπόγειας ρύπανσης εδώ είναι προφανώς η γεωλογία της περιοχής, αφού μεταξύ της πηγής 2 και του σημείου παρατήρησης

παρεμβάλλεται ένας «φακός» χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας, που αναγκάζει το πλούμιο της ρύπανσης να «παρακαμφθεί» και το εμποδίζει να φτάσει ως εκεί. Στην εικόνα 4-7 φαίνονται τα πετρώματα της περιοχής μελέτης. Το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής αποτελείται από λατυποπαγείς ασβεστόλιθους υδραυλικής αγωγιμότητας 4,16 m/d, ενώ ο εν λόγω «φακός» είναι μαργαϊκός ασβεστόλιθος υδραυλικής αγωγιμότητας 0,18 m/d. Η χαμηλή αγωγιμότητα είναι αυτή που αναγκάζει τη ρύπανση να ακολουθήσει μία παράκαμψη και να μην μπορέσει να φτάσει στο πηγάδι παρατήρησης (1).

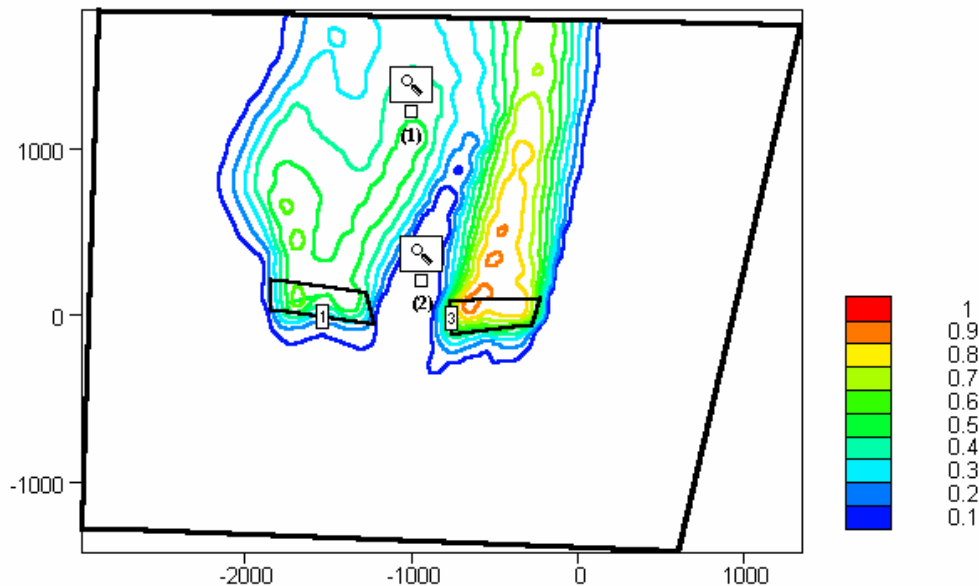


Εικόνα 4-7: Συγκέντρωση των ρύπων στον υπόγειο υδροφόρα μετά από ένα χρόνο συνεχούς ρύπανσης από τις πηγές (2) και (3) σε συνδυασμό με τους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής μελέτης

Όσον αφορά, τώρα, στο πηγάδι παρατήρησης (2), η ρύπανση εκεί οφείλεται αποκλειστικά στην πηγή 2, όπως φαίνεται ξεκάθαρα στην εικόνα 4-8. Η πηγή 2 έχει σταματήσει τη λειτουργία της και ενώ οι πηγές 1 και 3 λειτουργούν, στο σημείο αυτό η συγκέντρωση του ρύπου είναι μηδενική.

Και πάλι, εδώ θα περίμενε κανείς να εμπλέκονται στη ρύπανση και οι υπόλοιπες πηγές, μιας και το συγκεκριμένο σημείο βρίσκεται πολύ κοντά και στις τρεις βιομηχανικές μονάδες. Για άλλη μια φορά, το φαινόμενο αυτό εξηγείται από τη γεωλογία της περιοχής. Το πηγάδι παρατήρησης (2), καθώς

και η πηγή (2), κατά το μεγαλύτερο μέρος της, βρίσκονται πάνω σε πέτρωμα πολύ χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας. Αυτό, όπως είναι φυσικό, εμποδίζει τους ρύπους που προέρχονται από τις παραπλήσιες πηγές, να προσεγγίσουν το πηγάδι (2), κι έτσι εμφανίζεται το παράδοξο, η ρύπανση που εντοπίζεται στο πηγάδι (2) να προέρχεται αποκλειστικά από την πηγή (2).



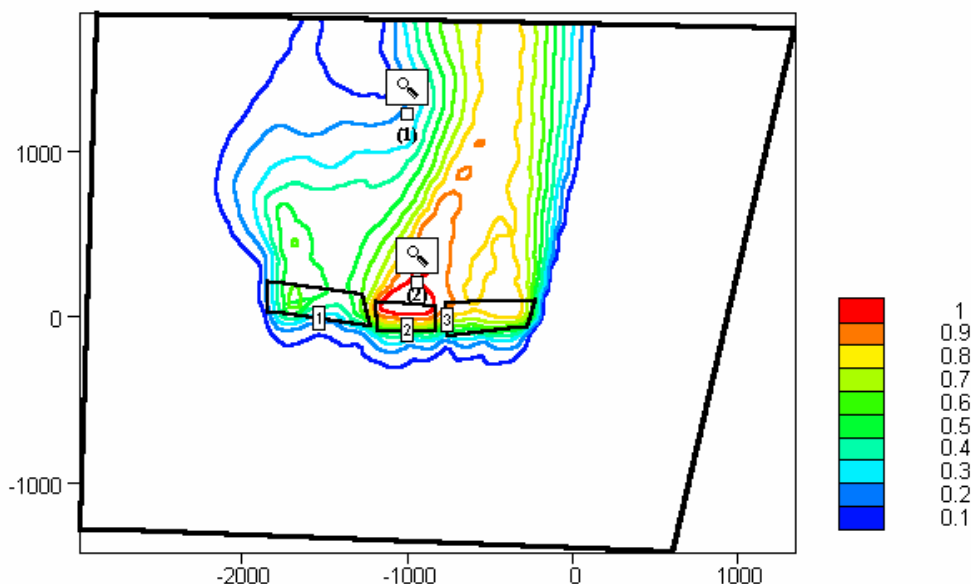
Εικόνα 4-8: Συγκέντρωση των ρύπων στον υπόγειο υδροφόρα μετά από ένα χρόνο συνεχούς ρύπανσης από τις πηγές (1) και (3)

4.2.2 2^η Περίπτωση

Θεωρούμε και πάλι τις τρεις βιομηχανικές μονάδες της ίδιας ΒΙ.ΠΕ., με τη διαφορά ότι σε αυτήν την περίπτωση δε ρυπαίνουν όλες ταυτόχρονα. Θα εξετάσουμε την προέλευση της ρύπανσης στα σημεία παρατήρησης όταν οι υπαίτιες πηγές που προέκυψαν παραπάνω, δε ρυπαίνουν σε όλη τη διάρκεια του χρόνου παρά μόνο κατά τη χειμερινή (2^η περίοδο) περίοδο.

4.2.2.1 Σενάριο 5^ο

Θεωρούμε ότι μόνο οι πηγές 2 και 3 ρυπαίνουν σε όλη τη διάρκεια του χρόνου, ενώ η πηγή 1 ρυπαίνει μόνο κατά τη χειμερινή περίοδο (2^η περιόδος). Η ρύπανση του υπόγειου υδροφορέα στο τέλος της χειμερινής περιόδου φαίνεται στην εικόνα 4-9.



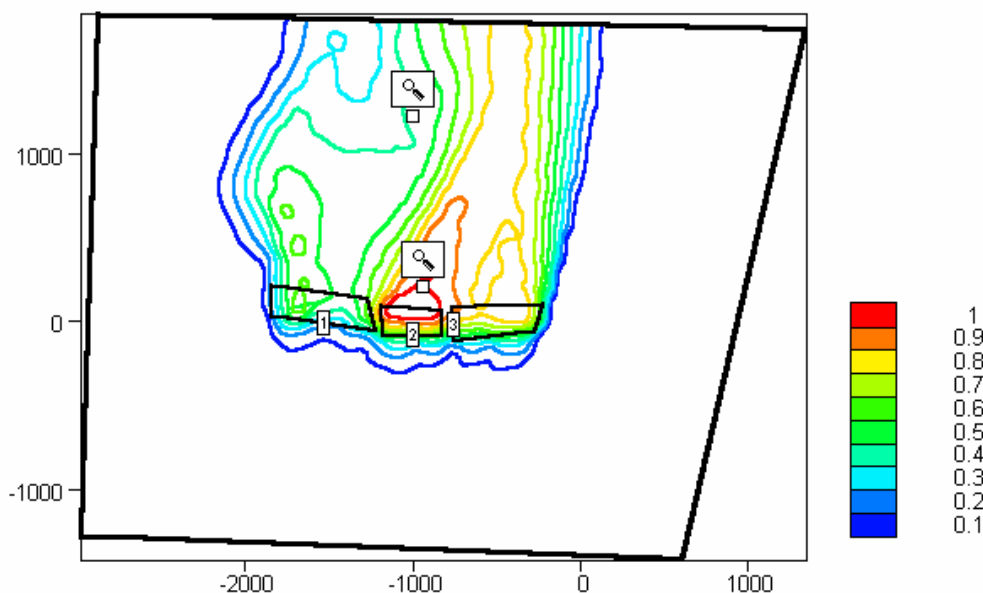
Εικόνα 4-9: Συγκέντρωση των ρύπων στον υπόγειο υδροφόρα μετά από ένα χρόνο συνεχούς ρύπανσης από τις πηγές (2) και (3) και μισό χρόνο από την πηγή (1)

Παρατηρούμε ότι η εικόνα της ρύπανσης δεν αλλάζει πολύ σε σχέση με αυτή του 1^{ου} σεναρίου της προηγούμενης περίπτωσης.

Παρόλο, δηλαδή, που στη συγκεκριμένη περίπτωση η πηγή 1 επιβαρύνει μόνο για μισό χρόνο τον υδροφορέα, και πάλι στο πηγάδι παρατήρησης (1) εμφανίζεται ρύπανση, με την ίδια πηγή να ευθύνεται γι' αυτή. Βέβαια, πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκέντρωση της ρύπανσης στο πηγάδι αυτό εμφανίζεται πολύ μικρότερη σε σχέση με τη συγκέντρωση στο ίδιο πηγάδι, στο σενάριο 1. Είναι φανερό ότι η ρύπανση, κατά τη διάρκεια μισού χρόνου δεν έχει προλάβει να εξαπλωθεί τόσο όσο εξαπλώνεται σε ένα χρόνο, με αποτέλεσμα η συγκέντρωση του ρύπου στο πηγάδι (1) να είναι μικρότερη.

4.2.2.2 Σενάριο 6^ο

Θεωρούμε ότι η πηγή 2 ρυπαίνει μόνο κατά τη χειμερινή (δεύτερη) περίοδο, ενώ οι πηγές 1 και 3 ρυπαίνουν καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Η ρύπανση του υπόγειου υδροφορέα, σε αυτή την περίπτωση μετά από ένα χρόνο φαίνεται στην εικόνα 4-10.



Εικόνα 4-10: Συγκέντρωση των ρύπων στον υπόγειο υδροφορέα μετά από ένα χρόνο συνεχούς ρύπανσης από τις πηγές (1) και (3) και μισό χρόνο από την πηγή (2)

Παρατηρούμε ότι το γεγονός ότι η πηγή 2 επιβαρύνει τον υδροφορέα μόνο κατά τη διάρκεια του μισού χρόνου, δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα στο πηγάδι παρατήρησης (2). Έτσι, η πηγή 2 παραμένει η μοναδική αιτία εμφάνισης ρύπανσης στο συγκεκριμένο σημείο.

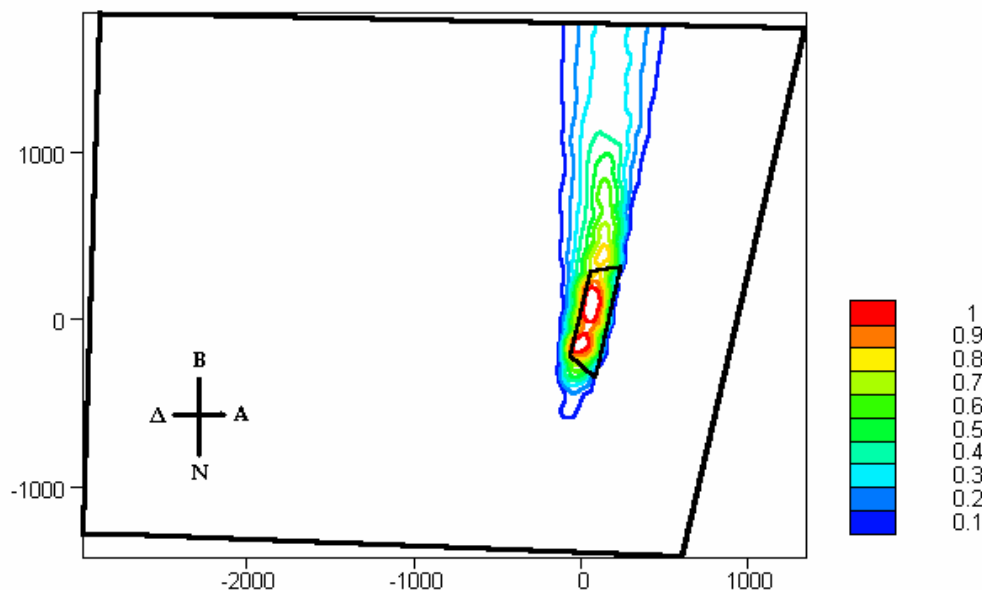
4.2.2.3 Ανακεφαλαίωση

Το συμπέρασμα που βγαίνει λοιπόν από τη μελέτη των δύο τελευταίων σεναρίων είναι ότι, παρόλο που οι πηγές που είναι υπεύθυνες για τη ρύπανση του υδροφορέα σε συγκεκριμένο σημείο μειώνουν το χρονικό διάστημα κατά το οποίο εκλύουν τους ρύπους, αυτό δεν τους δίνει ελαφρυντικό για την ενοχή τους. Και πάλι παραμένουν οι υπαίτιοι για τη ρύπανση στα συγκεκριμένα πηγάδια, με τη διαφορά όμως ότι η συγκέντρωση της ρύπανσης εμφανίζεται μικρότερη. Ο ένας χρόνος, κατά τον οποίο γίνεται η προσομοίωση, είναι πολύ μικρό χρονικό διάστημα έτσι ώστε η ελάττωσή του στο μισό να δώσει πολύ διαφορετικά αποτελέσματα. Επομένως, σε μία τέτοια περίπτωση, εφόσον αποδειχθεί ότι για το συγκεκριμένο αποτέλεσμα ευθύνεται μία συγκεκριμένη πηγή, θα χρειαστεί άρση της λειτουργίας της για μεγάλο χρονικό διάστημα, προκειμένου να μη έχουμε δυσμενή αποτελέσματα.

4.2.3 3^η Περίπτωση

Θεωρούμε μία μεμονωμένη πηγή ρύπανσης στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, η οποία εκλύει ρυπαντική ουσία με αρχική συγκέντρωση ίση με τη μέγιστη (1).

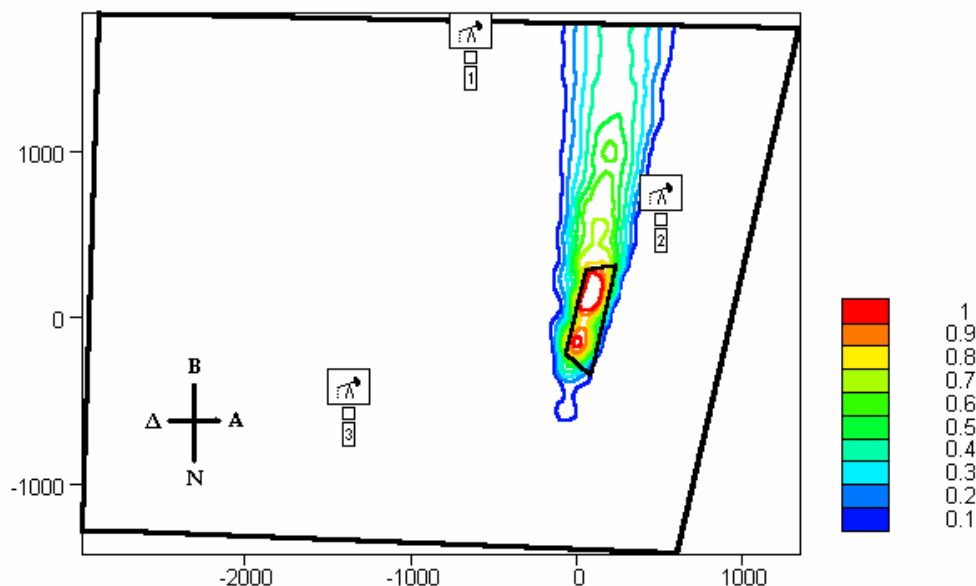
Η κατάσταση ρύπανσης που επικρατεί στην περιοχή, μετά στο τέλος του χρόνου προσομοίωσης φαίνεται στην εικόνα 4-11.



Εικόνα 4-11: Συγκέντρωση των ρύπων στον υπόγειο υδροφόρα, μετά από ένα χρόνο συνεχούς ρύπανσης από την πηγή

Στην περιοχή, υπάρχουν εγκατεστημένα τρία πηγάδια άντλησης, τα οποία αντλούν νερό από τον υπόγειο υδροφόρα μόνο κατά τη θερινή περίοδο, για να εξυπηρετήσουν ανάγκες άρδευσης της περιοχής. Ονομάζουμε τα πηγάδια 1, 2 και 3 με αντίστοιχους ρυθμούς άντλησης: $25 \text{ m}^3/\text{h}$, $42 \text{ m}^3/\text{h}$ και $15 \text{ m}^3/\text{h}$. Η άντληση από τα πηγάδια αυτά προκαλεί πτώση του υδραυλικού ύψους στη γύρω περιοχή, που έχει σαν αποτέλεσμα τη μετατόπιση της ρύπανσης που προέρχεται από την παρακείμενη πηγή προς τα πηγάδια και κατά συνέπεια την εξάπλωσή της.

Η ρύπανση στην περίπτωση αυτή, στο τέλος του χρόνου (στο τέλος της χειμερινής περιόδου) φαίνεται στην εικόνα 4-12.



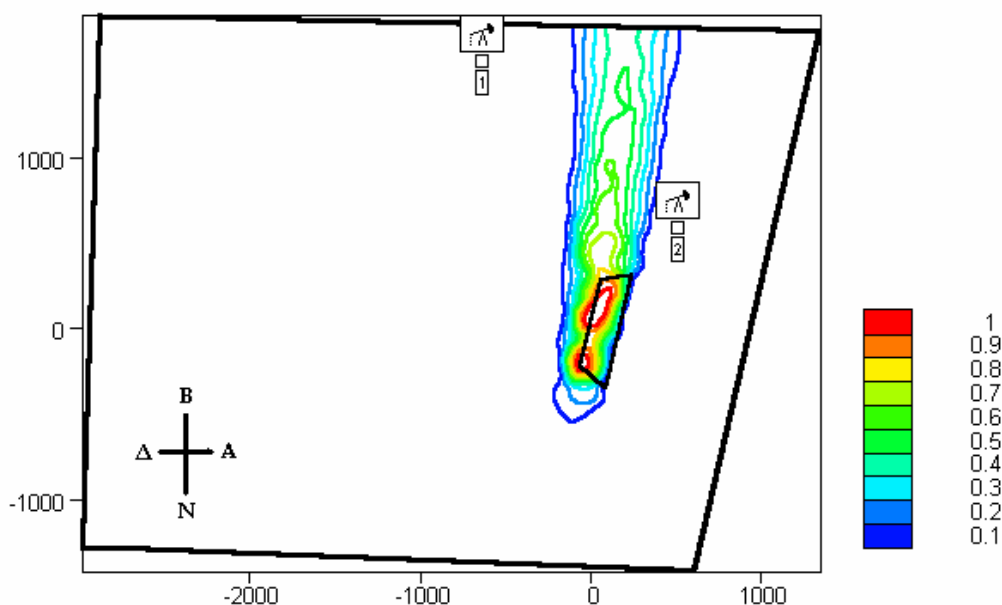
Εικόνα 4-12: Συγκέντρωση των ρύπων στον υπόγειο υδροφορέα, μετά από ένα χρόνο συνεχούς ρύπανσης από την πηγή και άντληση από τα πηγάδια 1,2 και 3 κατά την καλοκαιρινή περίοδο

Η επίδραση της άντλησης στην εξάπλωση της ρύπανσης είναι προφανής. Η εξάπλωση είναι έντονη κυρίως προς τα βόρεια και βορειοανατολικά της πηγής (προς το πηγάδι 2). Μια μικρή εξάπλωση παρατηρείται, επίσης και προς τα νότια της πηγής.

Στα σενάρια που ακολουθούν, θα εξετασθεί η επίδραση της άντλησης από συνδυασμούς των πηγαδιών ανά δύο, για να ερευνηθεί αν και με ποιο τρόπο συμβάλλει κάθε πηγάδι στην εξάπλωση της ρύπανσης.

4.2.3.1 Σενάριο 7^ο

Θεωρούμε ότι κατά τους καλοκαιρινούς μήνες αντλούν νερό από τον υπόγειο υδροφόρα μόνο τα πηγάδια 1 και 2. Η εξάπλωση της ρύπανσης που προκαλούν φαίνεται στην εικόνα 4-13.

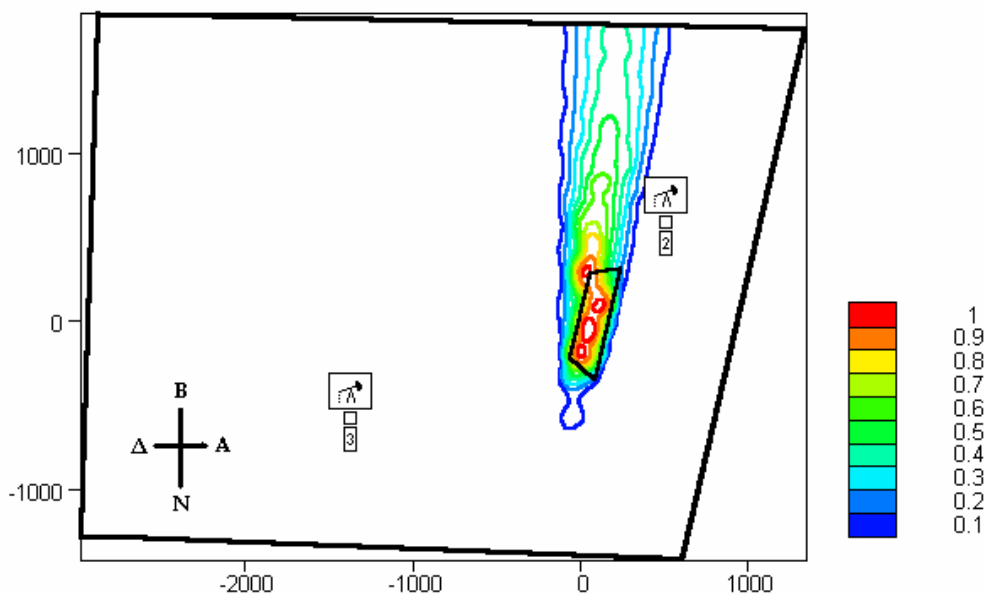


Εικόνα 4-13: Συγκέντρωση των ρύπων στον υπόγειο υδροφόρα, μετά από ένα χρόνο συνεχούς ρύπανσης από την πηγή και άντληση κατά την καλοκαιρινή περίοδο από τα πηγάδια 1 και 2

Παρατηρούμε ότι η ρύπανση που είχε εξαπλωθεί νότια της πηγής περιορίζεται, ενώ η ρύπανση εξαπλώνεται τώρα περισσότερο προς τα βόρειο τμήμα της περιοχής. Συμπεραίνουμε επομένως ότι η συμβολή της άντλησης από το πηγάδι 3 είναι στη μετατόπιση του πλουμίου της ρύπανσης προς τα νότια.

4.2.3.2 Σενάριο 8^ο

Θεωρούμε ότι κατά τους καλοκαιρινούς μήνες αντλούν νερό από τον υπόγειο υδροφόρα μόνο τα πηγάδια 2 και 3. Η εξάπλωση της ρύπανσης που προκαλούν φαίνεται στην εικόνα 4-14.

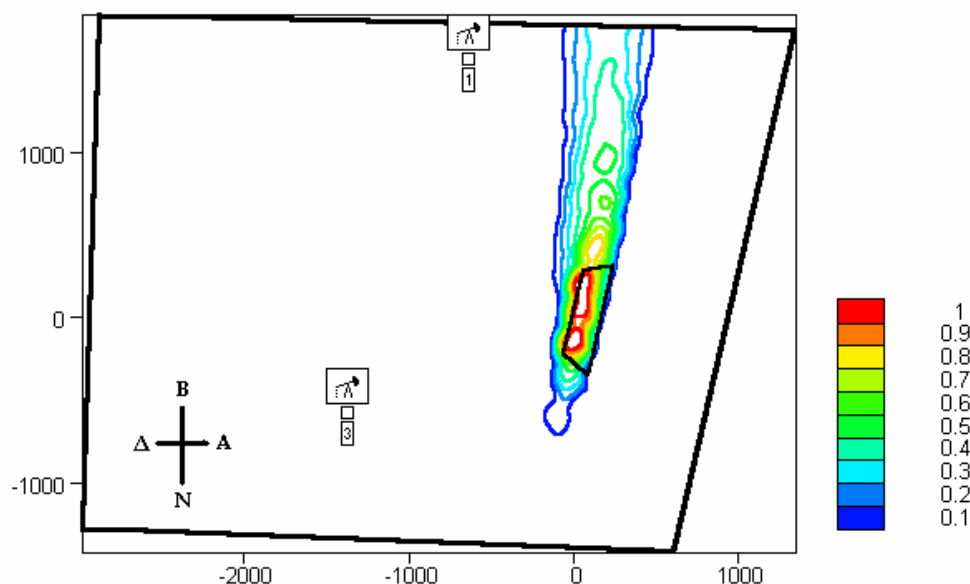


Εικόνα 4-14: Συγκέντρωση των ρύπων στον υπόγειο υδροφόρα, μετά από ένα χρόνο συνεχούς ρύπανσης από την πηγή και άντληση κατά την καλοκαιρινή περίοδο από τα πηγάδια 2 και 3

Συγκρίνοντας την εικόνα 4-14 με την εικόνα 4-12, που δείχνει την εξάπλωση της ρύπανσης που προκαλείται από την ταυτόχρονη άντληση και από τα τρία πηγάδια, δεν παρατηρείται καμία ουσιαστική διαφορά. Επομένως, συμπεραίνουμε ότι η άντληση από το πηγάδι 1 δεν προκαλεί καμία αλλαγή στην εξάπλωση της ρύπανσης μέσα στον υπόγειο υδροφόρα όταν γίνεται άντληση από τα άλλα δύο πηγάδια.

4.2.3.3 Σενάριο 9^ο

Θεωρούμε ότι κατά τους καλοκαιρινούς μήνες αντλούν νερό από τον υπόγειο υδροφορέα μόνο τα πηγάδια 1 και 3. Η εξάπλωση της ρύπανσης που προκαλούν φαίνεται στην εικόνα 4-15.



Εικόνα 4-15: Συγκέντρωση των ρύπων στον υπόγειο υδροφορέα, μετά από ένα χρόνο συνεχούς ρύπανσης από την πηγή και άντληση κατά την καλοκαιρινή περίοδο από τα πηγάδια 1 και 3

Με την παύση της λειτουργίας του πηγαδιού 2, παρατηρούμε ότι η εξάπλωση της ρύπανσης στη διεύθυνση δυτικά-ανατολικά περιορίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό, σε όλο το μήκος του πλουμίου, και η κατάσταση σε αυτή τη διεύθυνση είναι πάρα πολύ κοντά στην αρχική κατάσταση της ρύπανσης που παρουσιάζεται στην εικόνα 4-12, όπου κανένα από τα πηγάδια άντλησης δε λειτουργεί. Επίσης, περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό και η εξάπλωση της ρύπανσης προς τα βόρεια. Καταλήγουμε επομένως στο συμπέρασμα, ότι το πηγάδι 2 ευθύνεται για την εξάπλωση της ρύπανσης στη διεύθυνση δυτικά-ανατολικά, καθώς και προς τα βόρεια.


4.2.3.4 Ανακεφαλαίωση

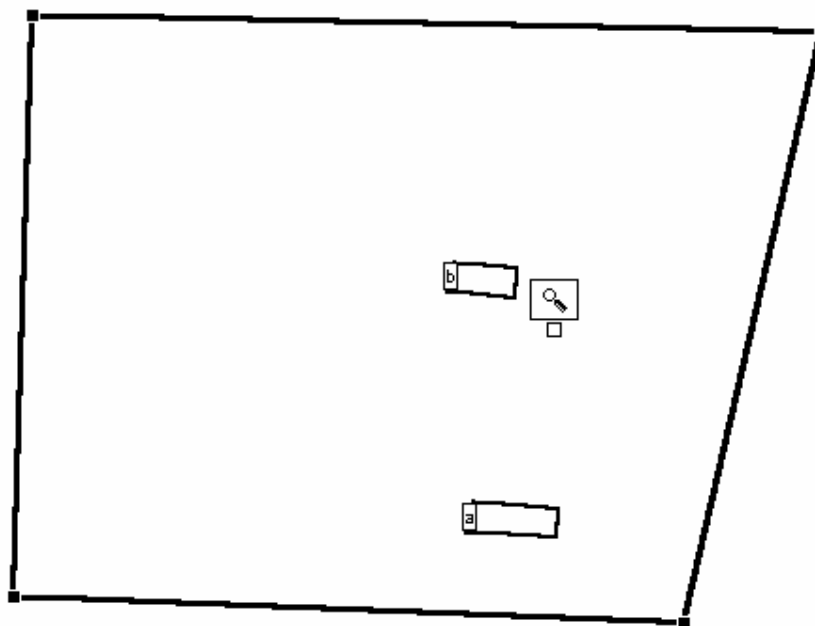
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τους διάφορους συνδυασμούς άντλησης από τα πηγάδια, συμπεραίνουμε πόσο πολύπλοκος είναι ο μηχανισμός της εξάπλωσης της υπόγειας ρύπανσης, και κυρίως όταν εμπλέκονται σε αυτόν πολλοί παράγοντες. Γιατί ενώ κύρια αιτία της ύπαρξης ρύπανσης στην περιοχή είναι η ίδια η πηγή που εκλύει τους ρύπους στον υδροφόρο, η κατάσταση επιδεινώνεται πολύ με την παρουσία γειτονικών πηγαδιών άντλησης. Μία σημαντική, λοιπόν, αιτία εμφάνισης ρύπανσης σε συγκεκριμένα σημεία του υδροφόρου είναι η άντληση από τα συγκεκριμένα πηγάδια.

Από τις περιπτώσεις που εξετάσαμε, συμπεραίνουμε ότι το πηγάδι που περισσότερο συμβάλλει στην εξάπλωση της ρύπανσης κατά την ταυτόχρονη άντληση από τα τρία πηγάδια είναι το πηγάδι 2, ενώ το πηγάδι 1 είναι αυτό που δεν προκαλεί καμία αλλαγή στην εξάπλωση της ρύπανσης. Η συμβολή του πηγαδιού 3 στην εξάπλωση της ρύπανσης είναι περιορισμένη και αφορά κυρίως στη μετατόπιση της ρύπανσης προς τα νότια της πηγής.

4.2.4. 4^η Περίπτωση

Στην τελευταία περίπτωση που θα εξετάσουμε, θεωρούμε στην ίδια περιοχή μελέτης δύο βιομηχανικές μονάδες, α και β, οι οποίες βρίσκονται σε αρκετά μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, όπως φαίνεται στην εικόνα 4-19.

Οι δύο βιομηχανίες εκλύουν ρύπους με τους οποίους επιβαρύνουν τον υπόγειο υδροφόρα, η μεν βιομηχανία α με αρχική συγκέντρωση ίση με 0,1 , ενώ η β με αρχική συγκέντρωση ίση με 0,4, σύμφωνα με την αρχή κανονικοποιημένης συγκέντρωσης που εξηγήσαμε στη αρχή του κεφαλαίου. Σε σημείο πλησίον της βιομηχανίας β, υπάρχει πηγάδι παρατήρησης, το οποίο σημειώνεται στην εικόνα με  , όπου γίνεται έλεγχος της ποιότητας του υπογείου νερού, το οποίο και προκύπτει ρυπασμένο.

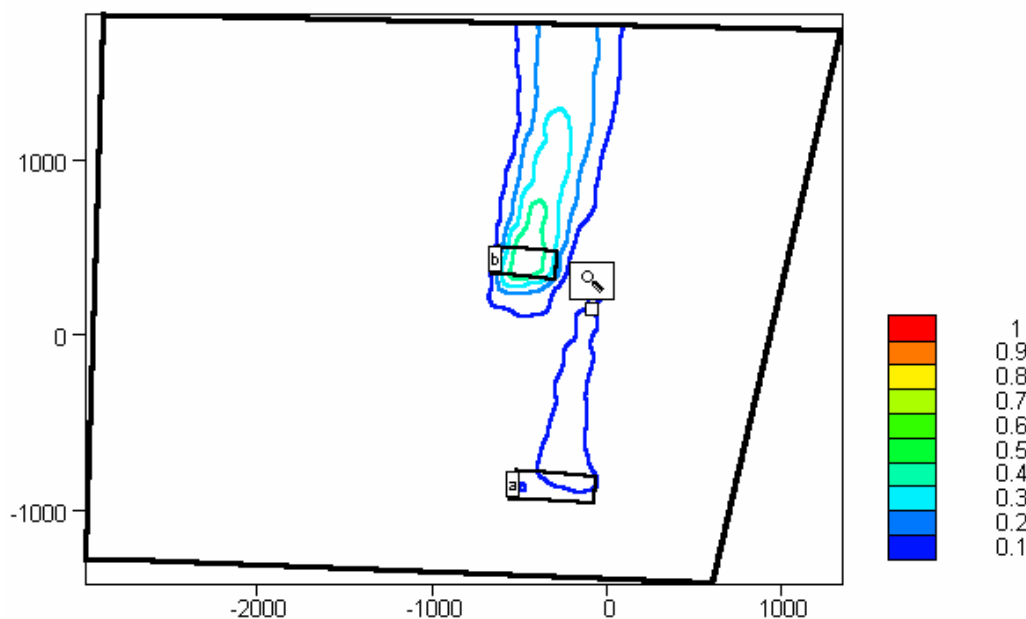


Εικόνα 4-16: Η θέση των πηγών ρύπανσης και του πηγαδιού παρατήρησης

Με μια πρώτη εκτίμηση, θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι αφού πλησιέστερα στο σημείο δειγματοληψίας βρίσκεται η βιομηχανία β, η οποία

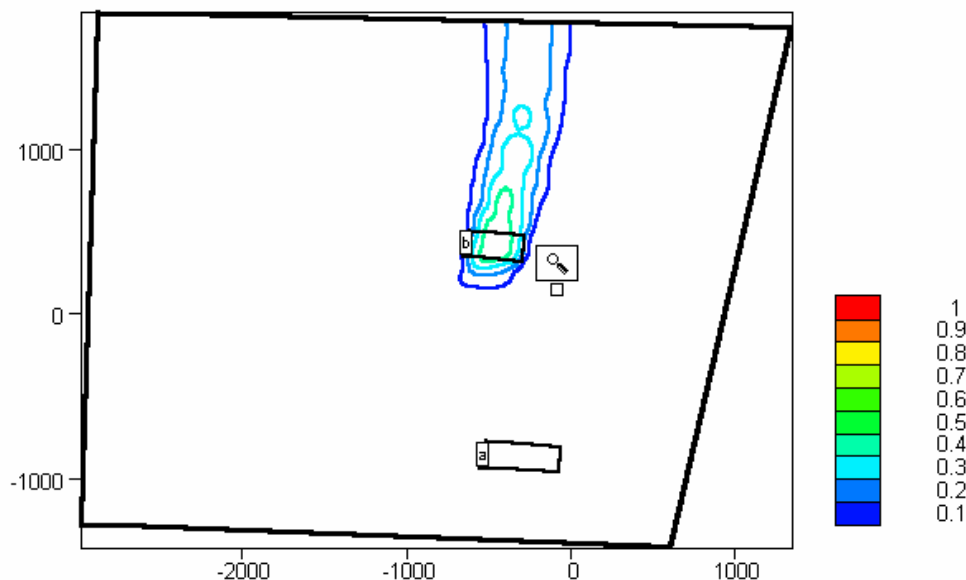
μάλιστα εκλύει στον υδροφορέα μεγαλύτερη ποσότητα ρύπου σε σχέση με τη βιομηχανία α, θα είναι αυτή από την οποία θα προέρχεται η ρύπανση που ανιχνεύεται στη δειγματοληψία.

Προσμοιώνοντας τη μεταφορά της υπόγειας ρύπανσης που προέρχεται από τις δύο πηγές, για ένα χρόνο, παίρνουμε το παρακάτω αποτέλεσμα:



Εικόνα 4-17: Συγκέντρωση των ρύπων στον υπόγειο υδροφορέα, μετά από ένα χρόνο συνεχούς ρύπανσης από τις πηγές α και β.

Είναι φανερό, από το αποτέλεσμα του έδωσε το μοντέλο, ότι η ρύπανση που εντοπίζεται στο σημείο δειγματοληψίας προέρχεται από τη βιομηχανία α και όχι από τη β. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται αν μελετήσουμε το ενδεχόμενο η βιομηχανία β να σταματήσει τη λειτουργία της και επομένως την έκχυση ρύπων. Τότε το μοντέλο μας δίνει την εικόνα 4-18:



Εικόνα 4-18: Συγκέντρωση των ρύπων στον υπόγειο υδροφόρα, μετά από ένα χρόνο συνεχούς ρύπανσης από την πηγή b

Παρατηρούμε από την παραπάνω εικόνα, ότι όταν η βιομηχανία a σταματήσει τη ρύπανση, η συγκέντρωση των ρύπων στο πηγάδι παρατήρησης είναι μηδενική. Επομένως, επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα ότι για τη ρύπανση στη συγκεκριμένη θέση του υδροφόρα ευθύνεται αποκλειστικά η βιομηχανία a. Παρόλο, δηλαδή, που φαινομενικά η βιομηχανία b ήταν αυτή που προκαλούσε τη ρύπανση στο συγκεκριμένο σημείο, συνηγορώντας σε αυτή την υπόθεση τόσο η θέση της όσο και η ποσότητα των ρύπων που εκλύει, αποδεικνύουμε ότι τη ρύπανση την προκαλεί η πιο απομακρυσμένη και λιγότερο ρυπογόνα βιομηχανία. Αυτό, προφανώς έχει να κάνει με τον πολύπλοκο μηχανισμό μεταφοράς της υπόγειας ρύπανσης ο οποίος επηρεάζεται από παράγοντες που δεν είναι εμφανείς σε έναν απλό παρατηρητή.

5. Συμπεράσματα

Η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» είναι μια ρεαλιστική αρχή κυρίως οικονομικού χαρακτήρα, η οποία προσεγγίζει το πρόβλημα της ρύπανσης του περιβάλλοντος στην πραγματική του διάσταση. Είναι ένα οικονομικό εργαλείο που αναζητά τη «γέφυρα» μεταξύ της ανθρώπινης δραστηριότητας και του περιβάλλοντος, περιέχει, όμως, πολλές αδυναμίες και ελλείψεις ως προς την ερμηνεία και εφαρμογή της.

Στην ελληνική έννομη τάξη, εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» αποτελεί το άρθρο 29 του νόμου 1650/86, όπου εισάγεται η αστική ευθύνη σε περίπτωση περιβαλλοντικής ζημίας. Η διάταξη αυτή παρουσιάζει ελλείψεις ως προς τη διατύπωσή της και την ερμηνεία της, μιας και δεν έχει αξιοποιηθεί και εφαρμοσθεί από τη νομολογία.

Σε κοινοτικό επίπεδο, η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» εμφανίστηκε για πρώτη φορά στη Σύσταση 75/436 του Συμβουλίου, και μαζί με τις αρχές της πρόληψης, της προφύλαξης και της επανόρθωσης στην πηγή, συμπληρώνει την ενότητα των αρχών στην οποία στηρίζεται το ευρωπαϊκό περιβαλλοντικό δίκαιο. Εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει», στην κοινοτική νομοθεσία, αποτελεί η Οδηγία που εκδόθηκε πρόσφατα για την

περιβαλλοντική ευθύνη (όσον αφορά στην πρόληψη και την αποκατάσταση περιβαλλοντικής ζημιάς), η οποία εντάσσει τη αρχή σε περιβαλλοντική βάση, παρά την οικονομική της χαρακτήρα. Η Οδηγία περιέχει ένα ευρύ εξαιρετικό πεδίο στο οποίο σημαντική θέση κατέχει η εξαίρεση από την ευθύνη σε περίπτωση διάχυτης ρύπανσης, όταν δεν είναι δυνατόν να αποδειχθεί η αιτιώδης συνάφεια μεταξύ της ζημιάς και των δραστηριοτήτων που την προκαλούν.

Το πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε στην περίπτωση της διάχυτης ρύπανσης είναι η δυσκολία να προσδιοριστεί ποιος την προκάλεσε, ή στην περίπτωση που αποδεικνύεται ότι συμβάλλουν σε αυτήν περισσότεροι από ένας, σε ποιο ποσοστό ανέρχεται η συμβολή του καθενός. Μέχρι στιγμής, τέτοιες περιπτώσεις αντιμετωπίζονται με την εφαρμογή της «ευθύνης εις ολόκληρον», δηλαδή της επίρριψης της ευθύνης για τη ζημιά σε όλους τους υπόπτους για την πρόκλησή της. Η «ευθύνη εις ολόκληρον» εμπεριέχεται στο δίκαιο πολλών κρατών, ενώ στην ελληνική έννομη τάξη εμφανίζεται στο άρθρο 926 του Αστικού Κώδικα. Με την «ευθύνη εις ολόκληρον» είναι πολύ εύκολο να διαπραχθούν αδικίες προς αυτούς που, είτε δε σχετίζονται στην πραγματικότητα με τη ρύπανση, είτε η συμβολή τους σε αυτήν είναι πολύ μικρή σε σχέση με τους υπόλοιπους, οπότε είναι άδικο να αντιμετωπιστούν ισάξια. Τα δικαστήρια, λοιπόν, σε τέτοιες περιπτώσεις, μπροστά στην αδυναμία να αποδείξουν τον πραγματικό υπαίτιο ή υπαίτιους της ρύπανσης, είναι δυνατόν είτε να εφαρμόζουν την «εις ολόκληρον ευθύνη», είτε, να απορρίψουν την αγωγή του προσβαλλόμενου από τη ρύπανση για αοριστία.

Η αδυναμία αυτή καθιστά αναγκαία τη χρήση εργαλείων δανεισμένων από τις θετικές επιστήμες ως μέσων πραγματογνωμοσύνης, με την οποία θα ξεπερνιέται η τυχόν αδυναμία του δικαστηρίου να κατανείμει σωστά την ευθύνη, σύμφωνα με την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει».

Ως τέτοιο μέσο- εργαλείο προτείνεται το μοντέλο PTC, με το οποίο έγινε μία προσέγγιση του προβλήματος αυτού στην περίπτωση της ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα, που είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα πολυπαραγοντικής και διάχυτης ρύπανσης, λόγω της πολυπλοκότητας του μηχανισμού διασποράς της στους υπόγειους υδροφορείς. Με τη μελέτη διαφόρων περιπτώσεων, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι, στην περίπτωση που εμπλέκονται στη ρύπανση πάνω από ένας ρυπαντές, δεν είναι

απαραίτητο ο πλέον ύποπτος για αυτή, να αποδειχθεί ότι είναι και ο πραγματικός υπαίτιος της ρύπανσης. Πολύ συχνά, τα αποτελέσματα του μοντέλου μας ανατρέπουν την πρώτη εντύπωση και την αρχική υπόθεση για το ποιος είναι αυτός που προκαλεί τη ρύπανση, ή για το βαθμό που συνεισφέρει σ' αυτή ο καθένας από τους υπόπτους.

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση μιας βιομηχανικής περιοχής (ΒΙ.ΠΕ.) όπου υπάρχουν πολλές πηγές ρύπανσης (1^η περίπτωση), και φαινομενικά όλες συμβάλλουν ισοδύναμα στη ρύπανση που παρατηρείται στην περιοχή, με το μοντέλο διερευνάται η συμβολή της κάθε πηγής, στη ρύπανση που εμφανίζεται σε δύο συγκεκριμένα σημεία του υπόγειου υδροφορέα. Έτσι, προκύπτει ότι για κάθε ένα από τα σημεία αυτά, ευθύνη φέρει μόνο μία από τις πηγές, ενώ η τρίτη πηγή ρύπανσης δεν ευθύνεται καθόλου. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε ρυπαντής μπορεί να αντιμετωπιστεί ξεχωριστά, και να του αποδοθεί ευθύνη μόνο για το βαθμό στον οποίο εμπλέκεται στη ρύπανση της συγκεκριμένης περιοχής, με αποτέλεσμα μια σωστότερη απόδοση δικαιοσύνης.

Στη δεύτερη περίπτωση που εξετάστηκε, ισχύουν τα ίδια με παραπάνω, με τη διαφορά ότι τώρα, οι φορείς των πηγών που αποδείχθηκαν υπαίτιες στην προηγούμενη περίπτωση, θεωρητικά λαμβάνουν μέτρα αντιμετώπισης της ρύπανσης. Ένα από αυτά τα μέτρα είναι η λειτουργία των βιομηχανικών μονάδων αυτών μόνο κατά τη διάρκεια μισού χρόνου και επομένως η επιβάρυνση του υπόγειου υδροφορέα με ρύπους μειώνεται χρονικά στο μισό. Το μοντέλο, λαμβάνοντας το νέο δεδομένο υπόψη του, εξάγει αποτελέσματα με τα οποία συμπεραίνουμε ότι το μέτρο αυτό που λήφθηκε δεν ήταν αρκετό για την εξάλειψη της ρύπανσης στα υπό μελέτη σημεία και η ρύπανση σε αυτά, παρά την ποσοτική της μείωση, έχει και πάλι την ίδια προέλευση όπως προηγουμένως. Και σε αυτήν την περίπτωση, δηλαδή, η μοντελοποίηση της ρύπανσης συμβάλει στην εφαρμογή ενός δίκαιου συστήματος εντοπισμού και απόδοσης ευθύνης.

Εκτός, όμως, από την ίδια την πηγή ρύπανσης που είναι η γενεσιουργός αιτία της επιβάρυνσης του υδροφορέα με ρύπους, υπάρχουν και παράγοντες που μπορούν να συμβάλλουν στην εξάπλωσή της. Στην 3^η περίπτωση που εξετάζεται, τέτοιοι παράγοντες είναι τα παρακείμενα στην πηγή τρία πηγάδια άντλησης, τα οποία αντλώντας νερό από τον υπόγειο υδροφορέα, προκαλούν

πτώση του υδραυλικού ύψους και κατά συνέπεια μετατόπιση της ρύπανσης προς τα πηγάδια αυτά, με αποτέλεσμα να επιβαρύνεται με ρύπους μεγαλύτερη έκταση του υδροφορέα. Εξετάζοντας, μέσω του μοντέλου, πιθανούς συνδυασμούς άντλησης από τα τρία πηγάδια, καθορίζεται με ποιον τρόπο συμβάλλει η άντληση από κάθε πηγάδι στην εξάπλωση της ρύπανσης. Έτσι, προκύπτει ότι το ένα από αυτά δεν επιδρά καθόλου στη εξάπλωση, αφού, σταματώντας τη λειτουργία του, το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι το ίδιο με αυτό που προκύπτει από την ταυτόχρονη άντληση και από τα τρία πηγάδια. Για τα άλλα δύο πηγάδια, καθορίζεται για ποιες περιοχές της εξάπλωσης της ρύπανσης ευθύνεται το καθένα από αυτά. Επομένως, ρυπαντές στην περίπτωση αυτή της διάχυτης ρύπανσης, θεωρούνται και τα δύο από τα τρία πηγάδια, και έτσι αποδεικνύεται ο αιτιώδης σύνδεσμος μεταξύ της επερχόμενης ζημίας και των δραστηριοτήτων της άντλησης των συγκεκριμένων φορέων εκμετάλλευσης

Η τελευταία περίπτωση που εξετάστηκε, είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα όπου ο πλέον ύποπτος για τη ρύπανση είναι αυτός που τελικά αποδεικνύεται αμέτοχος, ενώ ο πραγματικός υπαίτιος είναι αυτός που με μία πρόχειρη πρώτη εκτίμηση θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι δε σχετίζεται με κανέναν τρόπο με τη συγκεκριμένη ρύπανση. Επομένως για άλλη μία φορά, το μοντέλο χρησιμοποιείται για να αποδείξει ποιος είναι ο πραγματικός υπαίτιος για τη ζημία και έτσι να καταλογισθεί σε αυτόν δίκαια η ευθύνη. Χωρίς τη μοντελοποίηση αυτή, η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» είτε δε θα μπορούσε να εφαρμοσθεί, αφού δε θα ήταν δυνατό να αποδειχθεί ποιος πραγματικά προκαλεί τη ζημία, είτε θα εφαρμοζόταν λάθος, αφού η απόδειξη του ενόχου θα στηριζόταν σε ενδείξεις και υποθέσεις, οι οποίες με τη χρήση του μοντέλου αναιρούνται και διαψεύδονται.

Συμπερασματικά, λοιπόν, η μοντελοποίηση της υπόγειας ρύπανσης, όπως πραγματοποιήθηκε στην εργασία αυτή, μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για να «φωτιστούν» τα «σκοτεινά» σημεία της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει», σε περιπτώσεις όπου εμπλέκονται στη ρύπανση περισσότεροι από ένας εν δυνάμει ρυπογόνοι παράγοντες. Συμβάλλει στην απόδειξη της αιτιώδους συνάφειας μεταξύ της ζημίας και της δραστηριότητας που την προκαλεί, αποδεικνύοντας με αρκετά μεγάλη ακρίβεια, που είναι συνάρτηση του αριθμού της ακρίβειας των δεδομένων που εισάγονται στο

μοντέλο, αν συμβάλλει στη ρύπανση και σε ποιο βαθμό κάθε παράγοντας. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μια ορθότερη και δικαιότερη εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» στο πλαίσιο της δικαστικής διαδικασίας.

Η έννοια της μοντελοποίησης υπάρχει και στις άλλες μορφές ρύπανσης πέρα της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων (ρύπανση αέρα, εδάφους, επιφανειακών υδάτων). Επομένως με τη χρήση αντίστοιχων μοντέλων για τις μορφές αυτές, υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής της μεθοδολογίας που παρουσιάσαμε για να αποδειχθεί ο αιτιώδης σύνδεσμος μεταξύ ρυπογόνου δραστηριότητας και ζημίας και να επιτευχθεί ορθότερη και δικαιότερη εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» και σε τέτοιες μορφές προσβολής του περιβάλλοντος.

Τελικά, ο συνδυασμός δύο επιστημονικών πεδίων, που φαινομενικά δε συμπίπτουν ως προς τη θεματολογία τους, μπορεί να οδηγήσει στην καλύτερη και δικαιότερη αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προβλημάτων και επομένως στην αποτελεσματικότερη προστασία του περιβάλλοντος, επιβεβαιώνοντας ταυτόχρονα τον διεπιστημονικό χαρακτήρα του περιβάλλοντος και της προστασίας του.

Βιβλιογραφία

1. Mary P. Anderson, William W. Woessner, Applied Groundwater Modeling, Academic Press, 1992
2. Babu et al., Chemical transport by three dimensional groundwater flows, 1997
3. Rafael Valenzuela, "El que contamina, paga" Revista de la CEPAL, No 45, Naciones Unidas- Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Santiago de Chile, 12/1991
4. Ιωάννης Κ. Καράκωστας, «Η κοινοτική αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» (άρθρο 174 ΣυνθΕΚ) στο πλαίσιο της αστικής ευθύνης», Περιβάλλον και Δίκαιο 1/2002
5. Ευπραξία-Αίθρα Μαριά, «Περιβαλλοντική και τεχνική νομοθεσία»- Πανεπιστημιακές παραδόσεις, 2002
6. Nicolas de Sadeleer, "Environmental principles from political slogans to legal rules", Oxford University Press, 2001
7. Ιωάννης Καράκωστας-Αλέξανδρος Καλαβρός, «Η Λευκή Βίβλος της επιτροπής των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων για την ευθύνη λόγω ζημιών από τη ρύπανση του περιβάλλοντος», Περιβάλλον & Δίκαιο, Απρίλιος 2000
8. Αντώνιος Σηφάκης, «Ο ρυπαίνων πληρώνει για περιβαλλοντική ζημία», Περιβάλλον & Δίκαιο, Ιούνιος 2004
9. Τάκης Νικολόπουλος, «Οι αρχές του κοινοτικού δικαίου περιβάλλοντος», Νόμος και Φύση 2000
10. Α. Γκιζάρης, «Οι νέοι μηχανισμοί περιβαλλοντικής πολιτικής στην Ε.Ε.»
11. Ιωάννης Καράκωστας, Περιβάλλον & Δίκαιο , Εκδ. Σάκκουλα 2000
12. Γεωργιάδης, Σχολιασμένος Αστικός Κώδικας
13. Σοφία Σταθούλη, «Δημόσιο και ιδιωτικό δίκαιο: Δύο αλληλοσυγκρουόμενα δίκαια στα πλαίσια της προστασίας περιβάλλοντος;», Περιβάλλον & Δίκαιο 1/1999
14. Ευπραξία-Αίθρα Μαριά, «Η νομική προστασία των δασών»
15. Νομικό Βήμα, τόμος 42, 1994

Άλλη πηγή: www.europa.eu.int