

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

Διευθυντής: Επικ. Καθηγητής Ε.Π. Χίνης

**ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΜΕΤΑΝΑΣΤΕΥΣΗΣ ΤΟΥ Cs-137
ΣΤΟ ΕΛΑΦΟΣ**

**CRITICAL REVIEW OF Cs-137 VERTICAL
MIGRATION MODELS IN SOIL**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ
ΜΠΙΛΑΛΗ ΓΕΩΡΓΙΑΣ**

Σπουδάστριας της Σχολής
Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών ΕΜΠ
Κατεύθυνση Φυσικός

Επίβλεψη: Λέκτορας Ν.Π. Πετρόπουλος
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

ΑΘΗΝΑ 2007

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	viii
ABSTRACT	x
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή στην κριτική ανασκόπηση των κυριότερων μοντέλων κατακόρυφης μετανάστευσης του Cs-137 στο έδαφος	
1.1 Γενικά	1-1
1.2 Μοντέλα κατακόρυφης μετανάστευσης	1-3
1.3 Θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο	1-4
1.4 Εφαρμογές θεωρητικού - αναλυτικού μοντέλου	1-4
1.5 Περιγραφή και εφαρμογές των διαμερισματικών μοντέλων	1-5
1.6 Περιγραφή και εφαρμογές των εμπειρικών μοντέλων	1-6
1.7 Προσομοίωση με την βοήθεια του κώδικα GoldSim	1-7
1.8 Τελικά συμπεράσματα	1-7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Διεργασίες κατακόρυφης μετανάστευσης ραδιενεργών ρύπων στο επιφανειακό έδαφος και περιγραφή του θεωρητικού – αναλυτικού μοντέλου	
2.1 Διεργασίες της κατακόρυφης μετανάστευσης	2-1
2.2 Θεωρητικό - αναλυτικό μοντέλο	2-4
2.3 Περαιτέρω παραδοχές για το θεωρητικό - αναλυτικό μοντέλο	2-6
2.3.1 Το κατά μάζα μοντέλο	2-6
2.3.2 Η διάχυση των ραδιοϊσοτόπων και η κίνηση του νερού	2-7
2.3.3 Η γραμμική προσρόφιση – απορρόφιση	2-7
2.3.4 Η μόνιμη κατάσταση προσρόφισης – απορρόφισης	2-8
2.3.5 Τα "hot particles"	2-8
2.3.6 Το μοντέλο ψευδο-διάχυσης	2-9
2.4 Οριακές συνθήκες	2-9
2.5 Λύσεις	2-9
2.6 Ιδιότητες των λύσεων	2-10
2.7 Βιβλιογραφική έρευνα	2-11
Διαγράμματα του 2^{ου} Κεφαλαίου	2-13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Εφαρμογές θεωρητικού – αναλυτικού μοντέλου κατακόρυφης μετανάστευσης

3.1 Εισαγωγή	3-1
3.2 Εφαρμογή θεωρητικού-αναλυτικού μοντέλου από τον Ivanov (1997).....	3-1
3.2.1 Γενικά.....	3-1
3.2.2 Αποτελέσματα - Φαινόμενοι συντελεστές D και ν	3-2
3.2.3 Προβλέψεις	3-4
3.2.4 Συζήτηση.....	3-4
3.2.5 Συμπεράσματα.....	3-5
3.2.6 Περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων.....	3-6
3.3 Εφαρμογή θεωρητικού - αναλυτικού μοντέλου από τον Szerbin (1999).....	3-6
3.3.1 Γενικά.....	3-6
3.3.2 Αποτελέσματα - Φαινόμενοι συντελεστές D και ν	3-7
3.3.3 Προβλέψεις	3-8
3.3.4 Περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων.....	3-8
3.4 Εφαρμογή θεωρητικού - αναλυτικού μοντέλου από τον Krstic' (2004).....	3-9
3.4.1 Γενικά.....	3-9
3.4.2 Αποτελέσματα - Φαινόμενοι συντελεστές D και ν	3-10
3.4.3 Περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων.....	3-11
3.5 Εφαρμογή θεωρητικού - αναλυτικού μοντέλου από τον Bossew (2004β).....	3-11
3.5.1 Γενικά.....	3-11
3.5.2 Αποτελέσματα - Φαινόμενοι συντελεστές D και ν	3-12
3.6 Συμπεράσματα και σχόλια.....	3-13
Πίνακες του 3 ^{ου} Κεφαλαίου.....	3-16
Διαγράμματα του 3 ^{ου} Κεφαλαίου	3-17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Περιγραφή και εφαρμογές των διαμερισματικών μοντέλων

4.1 Εισαγωγή	4-1
4.2 Το απλό διαμερισματικό μοντέλο.....	4-2
4.3 Εφαρμογή του απλού διαμερισματικού μοντέλου από τον Rühm (1996; 1997).....	4-4
4.4 Εφαρμογή του απλού διαμερισματικού μοντέλου στις μετρήσεις του Ivanov (1997)	4-6
4.5 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων της παραγράφου 4.4.....	4-8

4.6	Σύνθετο διαμερισματικό μοντέλο.....	4-10
4.7	Αναλυτικό διαμερισματικό μοντέλο.....	4-12
4.7.1	Εισαγωγή.....	4-12
4.7.2	Οι κυριότερες συναρτήσεις $\varphi(t)$	4-14
4.7.3	Η λύση.....	4-14
4.8	Συμπεράσματα και σχόλια.....	4-14
	Πίνακες του 4 ^{ου} Κεφαλαίου.....	4-16
	Διαγράμματα του 4 ^{ου} Κεφαλαίου.....	4-18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Περιγραφή και εφαρμογές των εμπειρικών μοντέλων		
5.1	Εισαγωγή.....	5-1
5.2	Εφαρμογή δυναμικού εμπειρικού μοντέλου από τον Bossew (2004a).....	5-1
5.3	Εφαρμογή δυναμικού εμπειρικού μοντέλου στις μετρήσεις του Ivanov (1997).....	5-3
5.4	Εφαρμογή στατικού εμπειρικού μοντέλου από τον Dahm (2002).....	5-10
5.5	Εφαρμογή στατικού εμπειρικού μοντέλου στις μετρήσεις του Ivanov (1997).....	5-11
5.6	Σχόλια και συμπεράσματα.....	5-14
	Πίνακες του 5 ^{ου} Κεφαλαίου.....	5-16
	Διαγράμματα του 5 ^{ου} Κεφαλαίου.....	5-31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Μοντελοποίηση με τη βοήθεια του κώδικα GoldSim		
6.1	Ο κώδικας GoldSim – γενικά.....	6-1
6.2	Κατηγορίες προσομοιωτών και κώδικας GoldSim.....	6-2
6.3	Ντετερμινιστική και στοχαστική προσομοίωση.....	6-4
6.4	Προσομοίωση ραδιενεργού ρύπανσης με τον κώδικα GoldSim.....	6-5
6.4.1	Γενικά.....	6-5
6.4.2	Εφαρμογές.....	6-6
6.5	Παράδειγμα προσομοίωσης ραδιενεργού ρύπανσης GoldSim.....	6-7
6.5.1	Οδηγίες χρήσης.....	6-7
6.5.2	Παράδειγμα προβλήματος.....	6-8
6.5.3	Προσομοίωση του προβλήματος.....	6-8
6.6	Συμπεράσματα για τον κώδικα GoldSim.....	6-18
	Διαγράμματα του 6 ^{ου} Κεφαλαίου.....	6-20

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Επίλογος

7.1 Ανακεφαλαίωση..... 7-1

7.2 Προσομοίωση και διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα 7-3

7.3 Προτάσεις για συνέχεια της έρευνας..... 7-5

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ B-1

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ivanov Y.A, Lewyckij N., Levchuk F.C., Prister B.S., Firsakova S.K., Arkhipov N.P., Arkhipov A.N., Kruglov S.V., Alexakhin R.M., Sandalls J. and Askbrant S., "Migration of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr from Chernobyl Fallout in Ukrainian, Belarussian and Russian Soils", Journal of Environmental Radioactivity, 35(1):1-21, 1997

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Μετά το ατύχημα στο Chernobyl, και τη συνεπακόλουθη απελευθέρωση προϊόντων σχάσεως, όπως το Cs-137, και την σε μεγάλες περιοχές του πλανήτη απόθεσή του στο επιφανειακό έδαφος, παρουσιάστηκε η ανάγκη για την λεπτομερή χαρτογράφηση της απόθεσης αυτής. Το έργο αυτό, στις χώρες της σημερινής Ευρωπαϊκής Ένωσης και της πρώην Σοβιετικής Ένωσης ανέλαβαν, Εθνικοί Οργανισμοί, Εθνικά Εργαστήρια και μεμονωμένες Ερευνητικές Μονάδες, που κατόρθωσαν, τους πρώτους μήνες μετά την απόθεση (άνοιξη – καλοκαίρι 1986) να μετρήσουν την απόθεση αυτή σε χιλιάδες σημεία επιφανειακού εδάφους. Η επεξεργασία των μετρήσεων αυτών χρησίμευσε στην συγκρότηση βάσεων δεδομένων γεωγραφικών πληροφοριών, οι οποίες τελικά οδήγησαν μετά από πολύ χρόνο και επεξεργασία στην δημιουργία χαρτών επιφανειακής απόθεσης του Cs-137 από το ατύχημα στο Chernobyl (βλ. και De Cort, 1998). Στην Ελλάδα αντίστοιχη ερευνητική εργασία πραγματοποίησε το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ, και κατά δεύτερο λόγο το Εργαστήριο Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος του Ινστιτούτου Πυρηνικής Τεχνολογίας και Ακτινοπροστασίας του ΕΚΕΦΕ "Δημόκριτος". Σε ό,τι αφορά στις μετρήσεις του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ, που πραγματοποιήθηκαν αμέσως μετά το ατύχημα, αυτές παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά από τον Simopoulos (1989). Το σύνολο αυτών των μετρήσεων προέκυψε από την εργαστηριακή ανάλυση 1244 δειγμάτων επιφανειακού εδάφους βάθους περί το 1 εκατοστό. Η πρώτη ακριβής χαρτογραφική απεικόνιση για την επιφανειακή απόθεση του Cs-137 στα ελληνικά εδάφη προέκυψε από αυτά τα αποτελέσματα το 1995 και δημοσιεύθηκε από τον Petropoulos (1996). Ακολούθησαν και περαιτέρω χαρτογραφικές επεξεργασίες των ίδιων δεδομένων και για άλλα ισότοπα της απόθεσης εκτός του Cs-137 (βλ. π.χ. Petropoulos 2001).

Μετά τις πρώτες βροχές του φθινοπώρου του 1986, σε κανένα σημείο δειγματοληψίας της ανοίξεως – καλοκαιριού δεν μπορούσαν πλέον να ληφθούν μετρήσεις επιφανειακής συγκέντρωσης του Cs-137 στο έδαφος, οι οποίες να είναι αντιπροσωπευτικές της καταστάσεως του Μαΐου 1986, διότι με την πρώτη βροχή (ή άρδευση) ξεκίνησε η κατακόρυφη μετανάστευση του ραδιοϊσοτόπου αυτού προς το βαθύτερο έδαφος. Επομένως από το χρονικό αυτό σημείο (φθινόπωρο 1986) και μετά τυχόν δειγματοληψίες εδαφών προκειμένου να είναι πλήρεις και αντιπροσωπευτικές της πραγματικής καταστάσεως σχετικά με την κατανομή της συγκέντρωσης του Cs-137

κατά βάθος, πρέπει να συμπεριλαμβάνουν δείγματα και από διάφορα βάθη στο ίδιο σημείο. Αυτό τουλάχιστον για την πολυπληθή δειγματοληψία των ελληνικών εδαφών που πραγματοποιήθηκε το 1986, από τον Καθηγητή του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας κ. Σ.Ε. Σιμόπουλο, σημαίνει ότι τα σημεία δειγματοληψίας έπρεπε να διερευνηθούν ως προς την κατά βάθος συγκέντρωση του Cs-137, πολλαπλώς σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, πράγμα πολύ δύσκολο, πολύ ακριβό και χρονοβόρο και πέρα από τις ανθρωποδυνατότητες του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ.

Σήμερα (2007), είκοσι και πλέον έτη μετά το ατύχημα του Chernobyl, και δεδομένου, ότι τέτοιες λεπτομερείς δειγματοληψίες στα σημεία δειγματοληψίας των ελληνικών εδαφών δεν έγιναν, παρά μόνο αποσπασματικά, γεννάται το ερώτημα αν μπορεί να εκτιμηθεί σήμερα κυρίως σε ποια βάθη των εδαφών της τότε δειγματοληψίας βρίσκονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις Cs-137, και δευτερευόντως ποια είναι η εκτιμώμενη κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης του Cs-137 σε κάθε τέτοιο έδαφος. Για την απάντηση αυτού του ερωτήματος πρέπει να συντρέχουν δύο κύριες προϋποθέσεις:

(α) Να είναι γνωστό το μοντέλο, με βάση το οποίο μεταναστεύει κατακόρυφα στο έδαφος το Cs-137, και

(β) Να υπάρχει διαθέσιμος και φιλικός κώδικας για την προσομοίωση της σημερινής και της μελλοντικής καταστάσεως της κατά βάθος συγκέντρωσης του Cs-137 σε τυχόν έδαφος με βάση το γνωστό αυτό μοντέλο.

Η διεθνής ερευνητική βιβλιογραφία παρουσιάζει έναν αριθμό από τέτοια μοντέλα. Η κριτική ανασκόπησή τους είναι πολύ σημαντική για να διερευνηθεί η εφαρμοσιμότητά τους και να διευκολυνθεί η σχετική επιλογή του καταλληλότερου. Αυτό είναι και το κύριο αντικείμενο της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας.

Σχετικά με τον κώδικα της προσομοίωσης, μπορεί κανείς κατ'αρχήν να πει ότι αρκεί, μετά την επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου για την κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137 στο έδαφος, να χρησιμοποιούνται λογιστικά φύλλα για τους σχετικούς αναγκαίους υπολογισμούς. Παρόλαυτά, τα λογιστικά φύλλα δεν έχουν τη δυνατότητα να συμπεριλάβουν στοχαστικές μεταβλητές στην προσομοίωση. Για το σκοπό αυτό υπάρχουν διαθέσιμοι άλλοι κώδικες προσομοίωσης, οι οποίοι διατίθενται τόσο για ακαδημαϊκή χρήση, χωρίς κόστος, όσο και για επαγγελματική χρήση μετά από αγορά

δικαιωμάτων. Γνωριμία, με έναν από αυτούς του κώδικες γίνεται σε ένα από τα Κεφάλαια της Διπλωματικής Εργασίας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Λέκτορα κ. Ν.Π. Πετρόπουλο για τη βοήθειά του καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας και ειδικά για τη συμβολή του στη διαμόρφωση του τελικού κειμένου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας για τη τεχνική βοήθεια και την συμπαράστασή τους, όπου χρειάστηκε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ
ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΜΕΤΑΝΑΣΤΕΥΣΗΣ ΤΟΥ Cs-137 ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Διπλωματική Εργασία της Γ. Μπιλάλη

Η κατακόρυφη μετανάστευση των ραδιενεργών ρύπων στο επιφανειακό έδαφος αποτελεί αντικείμενο ερευνών, από την εποχή που διαπιστώθηκαν οι πρώτες ραδιενεργές εκλύσεις τεχνητών ραδιοϊσοτόπων στην ατμόσφαιρα. Υπενθυμίζεται ότι οι κυριότερες αιτίες αυτών των εκλύσεων ήταν κατά κύριο λόγο οι ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές ατομικών όπλων και δευτερευόντως τα ατυχήματα σε πυρηνικούς αντιδραστήρες. Ως χαρακτηριστικότερα από αυτά, αναφέρονται το ατύχημα στον αντιδραστήρα Windscale, στο Ηνωμένο Βασίλειο (1957) και το ατύχημα στον πυρηνοληκτρικό σταθμό του Chernobyl, στην πρώην Σοβιετική Ένωση (1986). Τα ραδιοϊσότοπα από τη στιγμή που θα εκλυθούν στην ατμόσφαιρα είναι μικρά μεταλλικά ή οξειδωμένα μεταλλικά σωματίδια, προϊόντα της σχάσης ή νετρονικά ενεργοποιημένοι πυρήνες ή πυρήνες από τη σχάσιμη ύλη της βόμβας ή το πυρηνικό καύσιμο του αντιδραστήρα. Ως μεταλλικά θραύσματα, έχουν μικρή μάζα, και ξεκινούν βαρυτική πορεία προς την επιφάνεια της γης. Η πορεία αυτή ονομάζεται κατακρήμνιση. Το αποτέλεσμα της κατακρήμνισης είναι η απόθεση των εκλυθέντων ραδιοϊσοτόπων στο επιφανειακό έδαφος. Από τη στιγμή της απόθεσης των εκλυθέντων ραδιοϊσοτόπων στο επιφανειακό έδαφος, διαπιστώνεται ότι υπάρχει και κινητική τους επί του εδάφους, η οποία έχει φυσικά δύο βασικές συνιστώσες: την οριζόντια και την κατακόρυφη μετανάστευση. Από τις δύο αυτές συνιστώσες σημαντικότερη είναι η κατακόρυφη μετανάστευση και πρακτικά η μοναδική που έχει μελετηθεί και προσομοιωθεί με επάρκεια με τη βοήθεια μοντέλων που περιγράφουν την κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου, ως συνάρτηση του χρόνου που έχει μεσολαβήσει από την αρχική επιφανειακή απόθεση. Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι τέτοιων μοντέλων: (α) Το "θεωρητικό – αναλυτικό", (β) τα "διαμερισματικά" και (γ) τα "εμπειρικά". Ο πρώτος τύπος (α) κάνει εύλογες υποθέσεις για τους φυσικοχημικούς μηχανισμούς σε ομογενές και ισότροπο έδαφος κατά το βάθος x , στους οποίους οφείλεται η μετανάστευση. Αυτοί οι μηχανισμοί αναπαριστώνται με τη μορφή μερικών διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν τα φαινόμενα διαχύσεως και μεταφοράς των ραδιοϊσοτόπων κατά βάθος. Σύμφωνα με το τύπο μοντέλων (β) το έδαφος γενικά δεν είναι ομογενές και ισότροπο

κατά το βάθος x . Για την μοντελοποίηση της μετανάστευσης των πυρήνων ενός ραδιοϊσοτόπου σε ένα τέτοιο έδαφος, αυτό μπορεί να διαχωρίζεται κατά βάθος σε διαδοχικά οριζόντια εδαφολογικά στρώματα με κοινές ιδιότητες –τα διαμερίσματα- μικρού ή γενικά κατάλληλου πάχους (1 – 3 εκ.). Το μεταναστεύον ραδιοϊσότοπο κινείται μέσα από τα διαμερίσματα και η κινητική του μπορεί να περιγράφεται με συνήθεις διαφορικές εξισώσεις 1^{ης} τάξης. Ο τρίτος τύπος μοντέλων (γ) προσπαθεί να εξηγήσει την κατά βάθος κατανομή ενός ισοτόπου στο έδαφος, εμπειρικά με τη χρήση μαθηματικών προσεγγίσεων των λύσεων των μοντέλων (α) και (β). Αυτές οι προσεγγίσεις περιγράφουν με σχετική επιτυχία την κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου, είτε σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή από την επιφανειακή απόθεση, είτε ως συνάρτηση του χρόνου που έχει παρέλθει από τη στιγμή της αρχικής επιφανειακής απόθεσης. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, παρουσιάζεται κυρίως μία κριτική ανασκόπηση μοντέλων κατακόρυφης μετανάστευσης ραδιοϊσοτόπων στο έδαφος, βασισμένη σε πειραματικά αποτελέσματα και θεωρητικές εκτιμήσεις που αφορούν στο Cs-137.

ABSTRACT

CRITICAL REVIEW OF CS-137 VERTICAL MIGRATION MODELS IN SOIL

Diploma Dissertation of G. Bilali

The physicochemical mechanisms, which govern the vertical migration of radioisotopes in soils, are being investigated since the first radioisotope releases in the environment due to atmospheric nuclear weapons tests. Another source of rather uncontrolled such releases were certain accidents in nuclear power plants like the one in Windscale, UK (1957) and most important the one at Chernobyl, Former Soviet Union (1986). Radioisotopes released in the atmosphere due to these sources are small or very small particles of metallic or metallic oxides matter, the majority of which are fission fragments, neutron activated nuclei or nuclei of the nuclear fuel. Once in the atmosphere these isotopes because of their mass, are gradually being deposited on the surface soil. As a result the so-called radioisotope fallout covers the surface soil. Fallout isotopes soil kinetics comprise of two main components: vertical and horizontal migration, the most prominent of the two being the vertical migration. Therefore vertical migration in soil has been extensively studied experimentally and simulated in models describing the depth concentration distribution of the isotopes as a function of the time elapsed after the initial fallout. There exist three main types of such models: (a) the "theoretical – analytical", (b) the "compartmental" and (c) the "empirical". Through model (a) scientists have put an effort to describe radioisotope vertical migration using reasonable justifiable assumptions regarding the physicochemical processes occurring in a homogenous and isotropic soil as a function of soil depth. These processes are presented in the form of partial differential equations, which account for the phenomena of radioisotope diffusion and advection towards deeper soil. In model (b) soil is not considered to be homogenous and isotropic as a whole. Therefore, in this case soil is divided in horizontal layers of small thickness (1 – 3 cm), which have their own properties and are called "compartments". Migrating radioisotopes proceed through these successive soil compartments. Radioisotope kinetics in these soil layers is represented by 1st order common differential equations. Regarding the empirical models (c), these are literally approximations of the solutions provided by models (a) and (b). These approximations may successfully describe the depth concentration distribution of the vertically migrating

isotopes, either at a certain time or even predict the depth concentration distribution as a function of time. The main scope of this Diploma Dissertation, is the presentation of a critical review for all three types of radioisotope vertical migration models in soil based on experimental results and theoretical considerations for Cs-137.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΜΕΤΑΝΑΣΤΕΥΣΗΣ ΤΟΥ Cs-137 ΣΤΟ ΕΛΑΦΟΣ

1.1 Γενικά

Η κατακόρυφη μετανάστευση των ραδιενεργών ρύπων στο επιφανειακό έδαφος αποτελεί αντικείμενο ερευνών, που απασχολεί την επιστημονική κοινότητα από την εποχή που διαπιστώθηκαν οι πρώτες ραδιενεργές επιπτώσεις από την έκλυση τεχνητών ραδιοϊσοτόπων στην ατμόσφαιρα. Υπενθυμίζεται ότι οι κυριότερες αιτίες αυτών των εκλύσεων ήταν κατά κύριο λόγο οι πολεμικές χρήσεις της πυρηνικής τεχνολογίας (ατομικές βόμβες στη Hiroshima και στο Nagasaki, στην Ιαπωνία, 1945), οι ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές ατομικών όπλων (1945 - 1980), οι υπόγειες και υποθαλάσσιες πυρηνικές δοκιμές (1951 έως και πρακτικά σήμερα) και δευτερευόντως τα πυρηνικά ατυχήματα σε πυρηνικούς αντιδραστήρες. Ως χαρακτηριστικότερα από αυτά τα πυρηνικά ατυχήματα, που οδήγησαν σε μεγάλες και ανεξέλεγκτες εκλύσεις ραδιοϊσοτόπων αναφέρονται το ατύχημα στον πυρηνικό αντιδραστήρα Windscale, στο Ηνωμένο Βασίλειο (1957 – σήμερα ονομάζεται Shellafield) και το ατύχημα στον πυρηνοληλεκτρικό σταθμό του Chernobyl, στην πρώην Σοβιετική Ένωση (1986). Οι εκλύσεις ραδιοϊσοτόπων στην ατμόσφαιρα από τις πυρηνικές δοκιμές διαφέρουν από τις αντίστοιχες εκλύσεις των πυρηνικών ατυχημάτων διότι οι πρώτες θεωρούνται γενικά προσχεδιασμένες και ελεγχόμενες και συνήθως διασπείρονται με τη βοήθεια και των κατάλληλων μετεωρολογικών συνθηκών σε μεγάλες και μάλλον ακατοίκητες περιοχές. Οι δεύτερες λόγω κυρίως του ατυχούς γεγονότος που τις προκαλεί δεν είναι ελεγχόμενες και διασπείρονται εντοπισμένα στην ευρύτερη γειτονιά του πυρηνικού αντιδραστήρα που τις προκάλεσε. Με δεδομένο ότι οι πυρηνικοί αντιδραστήρες βρίσκονται σχεδόν πάντα κοντά σε κατοικήσιμες περιοχές οι συνέπειες από τις εκλύσεις ραδιοϊσοτόπων στην ατμόσφαιρα εξαιτίας πυρηνικού ατυχήματος σε πυρηνικό αντιδραστήρα μπορεί να είναι πολύ σημαντικές, όταν μάλιστα υπάρχει συνέργεια με μη ευνοϊκές για την ευρεία διασπορά μετεωρολογικές συνθήκες.

Τα ραδιοϊσότοπα από τη στιγμή που θα εκλυθούν στην ατμόσφαιρα (και ανεξάρτητα από την αιτία της έκλυσης) είναι μικρά σωματίδια από το υλικό και τη σχάσιμη ύλη της

βόμβας ή το υλικό και το πυρηνικό καύσιμο του πυρηνικού αντιδραστήρα. Πρόκειται στην πλειοψηφία τους για θραύσματα σχάσης και κατά δεύτερο λόγο για νετρονικά ενεργοποιημένα ραδιοϊσότοπα, τα περισσότερα των οποίων κατατάσσονται χημικώς στα μέταλλα ή στα μεταλλικά οξείδια. Δεδομένου ότι ως μεταλλικά θραύσματα, έχουν, έστω πολύ μικρή, μάζα, ξεκινούν την βαρυτική πορεία τους προς την επιφάνεια της γης. Η πορεία αυτή ονομάζεται κατακρήμνιση (στα αγγλικά deposition). Η κατακρήμνιση μπορεί να είναι ξηρή (dry deposition) ή να υποβοηθείται από την κινητική της υγρασίας της ατμόσφαιρας ή ακόμα και από τη βροχή, και τότε μιλάμε για υγρή κατακρήμνιση (wet deposition). Το αποτέλεσμα της κατακρήμνισης αυτής είναι η επιφανειακή απόθεση (fallout) των εκλυθέντων ραδιοϊσοτόπων στο επιφανειακό έδαφος.

Από τη στιγμή της απόθεσης των εκλυθέντων ραδιοϊσοτόπων στο επιφανειακό έδαφος, διαπιστώνεται ότι υπάρχει και κινητική τους επί του εδάφους, η οποία έχει φυσικά δύο βασικές συνιστώσες: την οριζόντια και την κατακόρυφη μετανάστευση (horizontal and vertical migration). Από τις δύο αυτές συνιστώσες σημαντικότερη είναι η κατακόρυφη μετανάστευση και πρακτικά η μοναδική που έχει μελετηθεί και προσομοιωθεί με επάρκεια με τη βοήθεια μοντέλων. Γίνεται κατανοητό ότι η κατακόρυφη μετανάστευση μπορεί να είναι σχετικά αργή ή σχετικά γρήγορη. Στην περίπτωση της σχετικά αργής κατακόρυφης μετανάστευσης (στο εξής απλά μετανάστευσης), τα ραδιοϊσότοπα της απόθεσης παραμένουν στην ανώτερη επιφάνεια του εδάφους για σημαντικό χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα την εξωτερική ακτινοβολία των έμβιων όντων -και του ανθρώπου- που διαβιούν στη γειτονιά της επιφανειακής απόθεσης. Στην περίπτωση της σχετικά γρήγορης μετανάστευσης τα ραδιοϊσότοπα προοδεύουν προς το βάθος με αποτέλεσμα να φθάνουν και μέχρι το βάθος που αναπτύσσεται το ριζικό σύστημα των φυτών και ως εκ τούτου να απορροφούνται από αυτά (root uptake). Το αποτέλεσμα της απορρόφησης ραδιοϊσοτόπων από το ριζικό σύστημα των βρώσιμων φυτών είναι η εσωτερική ακτινοβολία των έμβιων μηρυκαστικών και παμφάγων όντων. Στις εξαιρετικές περιπτώσεις ποσοτικά μεγάλης επιφανειακής απόθεσης ραδιοϊσοτόπων και υπό ειδικές συνθήκες πολύ γρήγορης μετανάστευσής τους σε μεγάλο βάθος μικρό ποσοστό των ραδιοϊσοτόπων μπορεί να ρυπάνουν και το υδάτινο απόθεμα, κυρίως με τη βοήθεια της συστηματικής άρδευσης. Η κατανόηση των διεργασιών, οι οποίες αφορούν στον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η μετανάστευση, είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την προσομοίωση τους με μοντέλα και ως εκ τούτου για την πρόβλεψη

της κατανομής της συγκέντρωσης ραδιοϊσοτόπων που προέρχονται από επιφανειακή απόθεση κατά το βάθος, σε συνάρτηση μάλιστα και με το χρόνο που έχει μεσολαβήσει από την αρχική επιφανειακή απόθεσή τους.

1.2 Μοντέλα κατακόρυφης μετανάστευσης

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι μοντέλων. Ο πρώτος τύπος κάνει εύλογες υποθέσεις για τους φυσικοχημικούς μηχανισμούς σε ομογενές και ισότροπο έδαφος κατά το βάθος x , στους οποίους οφείλεται η μετανάστευση. Αυτοί οι μηχανισμοί αναπαριστώνται με τη μορφή μερικών διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν τα φαινόμενα διαχύσεως και μεταφοράς των ραδιοϊσοτόπων κατά βάθος. Το προκύπτον μοντέλο ονομάζεται **"θεωρητικό - αναλυτικό"** και έχει διάφορες εκφράσεις. Ο δεύτερος τύπος μοντέλων βασίζεται στη παραδοχή της ύπαρξης **"οριζοντίων εδαφικών διαμερισμάτων"**. Σύμφωνα με αυτά το έδαφος γενικά δεν είναι ομογενές και ισότροπο κατά το βάθος x . Προκειμένου λοιπόν για την προσομοίωση της μετανάστευσης των πυρήνων ενός ραδιοϊσοτόπου σε ένα τέτοιο έδαφος, αυτό μπορεί να διαχωρίζεται κατά βάθος σε οριζόντια εδαφολογικά στρώματα –τα διαμερίσματα- μικρού ή γενικά κατάλληλου πάχους (1 – 3 εκ.), στο εσωτερικό των οποίων το έδαφος θεωρείται ομογενές και ισότροπο και προς την κατεύθυνση x . Από την περιγραφή αυτή προκύπτει και η ονομασία των μοντέλων που βασίζονται στα οριζόντια εδαφικά διαμερίσματα ως **"διαμερισματικά"**. Το μεταναστεύον ραδιοϊσότοπο κινείται μέσα από τα διαμερίσματα και η κινητική του μπορεί να περιγράφεται με συνήθεις διαφορικές εξισώσεις 1^{ης} τάξης. Ο τρίτος τύπος μοντέλων προσπαθεί να εξηγήσει την κατά βάθος κατανομή ενός ισοτόπου στο έδαφος, εμπειρικά με τη χρήση μαθηματικών προσεγγίσεων χωρίς απαραίτητα μεγάλη φυσική έννοια. Οι μαθηματικές αυτές προσεγγίσεις είναι στην ουσία τους προσεγγίσεις των λύσεων που προκύπτουν από τις διαφορικές εξισώσεις του θεωρητικού – αναλυτικού μοντέλου ή/και των διαμερισματικών μοντέλων. Τα προκύπτοντα μοντέλα ονομάζονται **"εμπειρικά"**. Οι προσεγγίσεις αυτές περιγράφουν με σχετική επιτυχία την κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου, είτε σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή από την επιφανειακή απόθεση, είτε ως συνάρτηση του χρόνου που έχει παρέλθει από τη στιγμή της αρχικής επιφανειακής απόθεσης.

1.3 Θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο

Στο 2^ο Κεφάλαιο της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας παρουσιάζεται με πληρότητα το θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο κατακόρυφης μετανάστευσης ενός ραδιοϊσοτόπου. Για το θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο και για τα βάρη που ενδιαφέρουν στην κατακόρυφη μετανάστευση πυρήνων ραδιοϊσοτόπων, το έδαφος μπορεί να θεωρηθεί ως μοναδικό ομογενές και ισότροπο κατά x , διαμέρισμα. Με αυτό το πλαίσιο, η περιγραφή του φαινομένου της κατακόρυφης μετανάστευσης των ραδιοϊσοτόπων βασίζεται κυρίως στην έκφραση της κατακόρυφης κινητικότητας τους με όρους Διάχυσης και Μεταφοράς με διάφορους παραπλήσιους τρόπους. Για τις εκφράσεις αυτές χρησιμοποιούνται μερικές διαφορικές εξισώσεις και οριακές συνθήκες, με την βοήθεια των οποίων προκύπτουν λύσεις για την κατακόρυφη κατανομή των ραδιοϊσοτόπων κατά βάθος εδάφους, αν είναι γνωστοί, ο συντελεστής διάχυσης και η ταχύτητα μεταφοράς. Το θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο, αγνοεί μία σειρά από άλλα φαινόμενα που επηρεάζουν την κατακόρυφη μετανάστευση ραδιοϊσοτόπων στο έδαφος. Τα κυριότερα από αυτά, συνοψίζονται στον επόμενο κατάλογο ως εξής: (α) η διήθηση, (β) η οριζόντια μετανάστευση και (γ) η αποσάθρωση του εδάφους και οι μετεωρολογικές επιδράσεις. Επιπλέον, το θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο συνήθως διατυπώνεται: (ι) για ραδιοϊσότοπα μεγάλου χρόνου ημιζωής και (ii) για ραδιοϊσότοπα που δεν δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της μετανάστευσης. Επίσης για αυτό το μοντέλο, η απόθεση στο επιφανειακό έδαφος θεωρείται "στιγμιαία" και συμβαίνει πάντα στη χρονική στιγμή μετανάστευσης $t = 0$ έτη. Ο συντελεστής διάχυσης και η ταχύτητα μεταφοράς θεωρούνται παράμετροι σταθερές κατά βάθος και ανεξάρτητες του χρόνου. Υπάρχει έμμεση εξάρτηση των παραμέτρων αυτών από το χρόνο αλλά η εξάρτηση αυτή δεν μπορεί να συμπεριληφθεί στο θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο και αγνοείται. Τέλος, όπως είναι εξάλλου φυσικό, το θεωρητικό - αναλυτικό μοντέλο δεν μπορεί να προσεγγίσει την κατακόρυφη μετανάστευση μεγάλων θραυσμάτων του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου.

1.4 Εφαρμογές θεωρητικού - αναλυτικού μοντέλου

Στο 3^ο Κεφάλαιο περιγράφονται τέσσερις εφαρμογές παραπλήσιων εκφράσεων του θεωρητικού- αναλυτικού μοντέλων διάχυσης – μεταφοράς, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με σχετική επιτυχία για την εκτίμηση του συντελεστή διάχυσης και της ταχύτητας μεταφοράς -όπως αυτοί ορίστηκαν στο προηγούμενο 2^ο Κεφάλαιο- του

ραδιοϊσοτόπου Cs-137 που αποτέθηκε στο επιφανειακό έδαφος από το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl. Οι εφαρμογές αυτές βασίζονται σε πειραματικές μετρήσεις σε αδιατάρακτα εδάφη κοντά στην περιοχή του πυρηνοληκτρικού σταθμού του Chernobyl, εδάφη της Ουγγαρίας, εδάφη της Σερβίας και εδάφη της Αυστρίας. Οι τιμές των εκτιμώμενων συντελεστών παρουσιάζονται σε πινακοποιημένη και διαγραμματική μορφή. Γίνονται επιπλέον σχόλια για την ακρίβειά τους και για το ποιες εκτιμάται ότι είναι οι αντίστοιχες τιμές αυτών των συντελεστών στα ελληνικά εδάφη.

1.5 Περιγραφή και εφαρμογές των διαμερισματικών μοντέλων

Δεδομένου ότι το έδαφος γενικά δεν είναι ομογενές και ισότροπο κατά το βάθος x και προκειμένου για την αποτελεσματική και ακριβή περιγραφή της μετανάστευσης των πυρήνων ενός ραδιοϊσοτόπου σε ένα τέτοιο έδαφος, αυτό μπορεί να διαχωρίζεται κατά βάθος σε οριζόντια εδαφολογικά στρώματα μικρού ή γενικά κατάλληλου πάχους (π.χ. 1 – 3 cm), στο εσωτερικό των οποίων το έδαφος θεωρείται ομογενές και ισότροπο και προς την κατεύθυνση του x . Γενικά η διαμερισματική μοντελοποίηση, δεν μπορεί να λειτουργήσει με ικανοποιητική απόδοση στην πράξη, διότι η κατακόρυφη μετανάστευση ενός ραδιοϊσοτόπου δεν φθάνει γενικά σε μεγάλα βάθη και περιορίζεται έως την τάξη μεγέθους των μερικών εκατοστών (το πολύ γύρω στα 20) σε περίοδο 10 – 20 ετών. Αυτά τα λίγα εκατοστά δεν μπορούν να διαχωριστούν με ακρίβεια κατά οριζόντια εδαφικά διαμερίσματα μικρού πάχους με κοινές ιδιότητες. Επιπλέον η λεπτή διαμερισματική μοντελοποίηση κρύβει μέσα της την παραδοχή ότι η μετανάστευση γίνεται μόνο με μεταφορά, πράγμα που είναι καταφανώς λανθασμένο από φυσική άποψη. Αν επιχειρηθεί μία κατηγοριοποίηση τα διαμερισματικά μοντέλα διακρίνονται σε απλά, σύνθετα και αναλυτικά. Για τα απλά μπορεί κανείς να λέει ότι γενικά αφορούν σε διαδοχικά διαμερίσματα, τα οποία είναι τοποθετημένα σε σειρά και για τα οποία η έξοδος μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου από το προηγούμενο, είναι η είσοδος μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου στο επόμενο. Αν το μεταναστεύον ραδιοϊσότοπο είναι το Cs-137, ο χρόνος παραμονής του σε ένα διαμέρισμα θεωρείται στο απλό διαμερισματικό μοντέλο πολύ μικρότερος από το χρόνο ημιζωής του (που είναι περίπου 30 έτη). Στο σύνθετο και στο αναλυτικό διαμερισματικό μοντέλο, οι παραπάνω υποθέσεις γενικά δεν ισχύουν. Εκεί παρατηρούνται και "είσοδοι" και "έξοδοι" του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου σε ένα διαμέρισμα οι οποίες δεν εξαρτώνται από την ύπαρξη και τη λειτουργία των προηγούμενων και των επόμενων διαμερισμάτων. Μάλιστα ακόμα και αν το

μεταναστεύον ραδιοϊσότοπο είναι το Cs-137, δεν γίνεται γενικά δεκτό ότι ο χρόνος παραμονής του σε ένα διαμέρισμα θεωρείται πολύ μικρότερος από το χρόνο ημιζωής του. Στο 4^ο Κεφάλαιο της Διπλωματικής Εργασίας περιγράφονται διάφορες απλές και πολυπλοκότερες προσεγγίσεις διαμερισματικών μοντέλων. Ελέγχεται επίσης πως ένα απλό διαμερισματικό μοντέλο θα μπορούσε κατ'αρχήν να εφαρμοσθεί σε πειραματικά αποτελέσματα από μετρήσεις της κατά βάθος συγκέντρωσης του Cs-137 σε διάφορα εδάφη σε διάφορες χρονικές στιγμές από την αρχική απόθεση.

1.6 Περιγραφή και εφαρμογές των εμπειρικών μοντέλων

Όταν εφαρμόζονται εμπειρικά μοντέλα, χρησιμοποιούνται στην ουσία μαθηματικές προσεγγίσεις χωρίς απαραίτητα μεγάλη φυσική έννοια των λύσεων που μπορούν να προκύψουν από εκφράσεις του θεωρητικού – αναλυτικού μοντέλου, ή των λύσεων που μπορούν να προκύψουν από τις διατυπώσεις των εξισώσεων που αφορούν στα διαμερισματικά μοντέλα. Αν αυτές οι μαθηματικές προσεγγίσεις έχουν κατάλληλη μορφή μπορεί να εκτιμηθούν οι τιμές του συντελεστή διάχυσης και της ταχύτητας μεταφοράς του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου σε ένα έδαφος σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Αν πάλι οι προσεγγίσεις αυτές δεν είναι αρκετά κοντά στη φυσική πραγματικότητα, μπορούν γενικά να περιγράψουν την κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης του εξεταζόμενου κατακόρυφα μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου. Οι περιγραφές αυτές είναι γενικά επιτυχείς ανεξάρτητα της χρονικής στιγμής (αλλά φυσικά οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται κάθε φορά στο εμπειρικό μοντέλο που είναι μαθηματική έκφραση χωρίς φυσική έννοια είναι διαφορετικές). Τα εμπειρικά μοντέλα μπορούν κατ' αρχήν να κατηγοριοποιούνται σε "δυναμικά" και "στατικά". Ένα δυναμικό εμπειρικό μοντέλο, αποδίδει την κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης ραδιοϊσοτόπου στο έδαφος ως συνάρτηση και του χρόνου, που έχει παρέρθει από τη στιγμή της αρχικής απόθεσης του ραδιοϊσοτόπου στο επιφανειακό έδαφος. Ένα στατικό εμπειρικό μοντέλο, αποδίδει την υπόψιν κατανομή για τη συγκεκριμένη και μόνο στιγμή που έγιναν οι κατά βάθος μετρήσεις της συγκέντρωσης και αγνοεί εντελώς τη χρονική στιγμή που συνέβη η αρχική απόθεση. Στο 5^ο Κεφάλαιο της Διπλωματικής Εργασίας περιγράφονται ένα δυναμικό και ένα στατικό εμπειρικό μοντέλο. Ελέγχεται επίσης πως τα εμπειρικά μοντέλα θα μπορούσαν κατ'αρχήν να εφαρμοσθούν σε πειραματικά αποτελέσματα από μετρήσεις της κατά βάθος συγκέντρωσης του Cs-137 σε διάφορα εδάφη σε διάφορες χρονικές στιγμές από την αρχική απόθεση.

1.7 Προσομοίωση με τη βοήθεια του κώδικα GoldSim

Αν έχει αποφασισθεί ποιο από τα παραπάνω αναλυόμενα μοντέλα που προσομοιώνουν την κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137 είναι το καταλληλότερο και έχει τις περισσότερες με καλή ακρίβεια γνωστές παραμέτρους, απομένει να επιλεγεί ένας κώδικας ο οποίος να μπορεί να υλοποιήσει την προσομοίωση της μετανάστευσης με βάση το αποδεκτό μοντέλο. Ο κώδικας πρέπει γενικά να είναι διαθέσιμος, φιλικός και να μην απαιτεί υπερβολικά υψηλές υπολογιστικές δυνατότητες. Μία επιλογή είναι να χρησιμοποιούνται λογιστικά φύλλα για τους σχετικούς αναγκαίους υπολογισμούς. Παρόλαυτά, τα λογιστικά φύλλα δεν έχουν τη δυνατότητα να συμπεριλάβουν στοχαστικές μεταβλητές στην προσομοίωση. Για το σκοπό αυτό υπάρχουν διαθέσιμοι άλλοι κώδικες προσομοίωσης, οι οποίοι διατίθενται τόσο για ακαδημαϊκή χρήση, χωρίς κόστος, όσο και για επαγγελματική χρήση μετά από αγορά δικαιωμάτων. Γνωριμία, με έναν από αυτούς του κώδικες γίνεται στο 6^ο Κεφάλαιο της Διπλωματικής Εργασίας. Πρόκειται για τον κώδικα με το όνομα "GoldSim" που είναι γενικευμένος κώδικας προσομοίωσης, ο οποίος σε αντίθεση με άλλους τέτοιους κώδικες προσομοίωσης, παρέχει δυνατότητες ανάπτυξης μοντέλων σε γραφικό - παραθυρικό περιβάλλον, πράγμα που διευκολύνει εξαιρετικά τον δημιουργό αλλά και τον μετέπειτα χρήστη του μοντέλου. Ο κώδικας GoldSim διατίθεται δωρεάν για Ακαδημαϊκή χρήση. Η υλοποίηση προσομοίωσης της κατακόρυφης μετανάστευσης Cs-137 με τη βοήθεια αυτού ή άλλου κώδικα αποδεικνύεται –όπως είναι φυσικό- πολύπλοκη διαδικασία για να καλυφθεί και αυτή από την παρούσα Διπλωματική Εργασία. Παρουσιάζεται μόνο ένα σχετικά απλό πρόβλημα ραδιενεργού ρύπανσης και ο τρόπος της προσομοίωσης του, όπως αυτός μπορεί να υλοποιείται με την βοήθεια του κώδικα GoldSim.

1.8 Τελικά συμπεράσματα

Στο 7^ο Κεφάλαιο της Διπλωματικής Εργασίας συγκεντρώνονται τα επιμέρους συμπεράσματα, από τις προηγούμενες ενότητες. Σε Παράρτημα δίδεται η εργασία του Ivanov (1997), οι πειραματικές μετρήσεις της οποίας, σχετικά με την κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης του Cs-137 σε διάφορα εδάφη, σε διάφορες χρονικές στιγμές, χρησιμοποιήθηκαν για την κριτική αποτίμηση των διαφόρων τύπων μοντέλων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΜΕΤΑΝΑΣΤΕΥΣΗΣ ΡΑΔΙΟΕΝΕΡΓΩΝ ΡΥΠΙΩΝ ΣΤΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟ ΕΔΑΦΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ – ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

2.1 Διεργασίες της κατακόρυφης μετανάστευσης

Προκειμένου για την ερμηνεία των φαινομένων κατακόρυφης μετανάστευσης με ποσοτικά (μαθηματικά) εργαλεία, πρέπει κατ'αρχήν να υποθεθούν τα ακόλουθα για κάθε ραδιοϊσότοπο που μεταναστεύει, σχετικά με τους παράγοντες και τις διεργασίες της μετανάστευσης (βλ. Διάγραμμα 2.1, στο οποίο x είναι το βάθος του εδάφους (cm), $x = 0$ cm, η επιφάνεια του εδάφους):

- (α) Υπάρχει ισοζύγιο πυρήνων ραδιοϊσοτόπου.
- (β) Ο ρυθμός μεταβολής του πλήθους των πυρήνων ραδιοϊσοτόπων σε ένα βάθος εδάφους που βρίσκεται μεταξύ x , και $x+dx$ εξαρτάται από:

(β1) Τον αριθμό πυρήνων του ραδιοϊσοτόπου που εισέρχονται στο συγκεκριμένο διάστημα βάθους από βάθη $< x$.

(β2) Τον αριθμό πυρήνων του ραδιοϊσοτόπου που εξέρχονται από το συγκεκριμένο διάστημα βάθους προς βάθη $> x+dx$

(β3) Τον αριθμό των πυρήνων του ραδιοϊσοτόπου που δημιουργούνται στο συγκεκριμένο διάστημα βάθους από φυσικές διαδικασίες (δηλ. από τη ραδιενεργό διάσπαση πατρικών ισοτόπων)

(β4) Τον αριθμό των πυρήνων του ραδιοϊσοτόπου που καταστρέφονται στο συγκεκριμένο διάστημα βάθους από φυσικές διαδικασίες (δηλ. από τη ραδιενεργό διάσπαση προς θυγατρικούς πυρήνες)

(β5) Τον αριθμό των πυρήνων του ραδιοϊσοτόπου που εισέρχονται στο συγκεκριμένο διάστημα βάθους από φυσικοχημικές διαδικασίες (δηλ. στην ουσία από την οριζόντια μετακίνηση των πυρήνων του ραδιοϊσοτόπου)

(β6) Τον αριθμό των πυρήνων του ραδιοϊσοτόπου που εξέρχονται από το συγκεκριμένο διάστημα βάθους από φυσικοχημικές διαδικασίες (δηλ. στην ουσία από την οριζόντια μετακίνηση των πυρήνων του ραδιοϊσοτόπου)

(β7) Τον αριθμό των πυρήνων που δεσμεύονται μόνιμα στο συγκεκριμένο διάστημα βάθους με φυσικοχημικές διαδικασίες γραμμικής προσρόφησης και απορρόφησης (adsorption και absorption) ή / και άλλες,

(γ) Οι αιτίες της κατακόρυφης μετανάστευσης των χημικά διαλυτών ενώσεων που περιέχουν πυρήνες του ραδιοϊσοτόπου είναι δύο, η διάχυση (diffusion) και η μεταφορά (convection).

(δ) Η αιτία της κατακόρυφης μετανάστευσης των χημικά αδιάλυτων ενώσεων που περιέχουν πυρήνες του ραδιοϊσοτόπου είναι η διήθησή τους (percolation) με τη βοήθεια της άρδευσης ή της βροχής. Οι χημικά αδιάλυτες αυτές ενώσεις μετασχηματίζονται αργά σε χημικά διαλυτές με την πρόοδο της διήθησης.

(ε) Οι χημικά διαλυτές και οι χημικά αδιάλυτες ενώσεις που περιέχουν πυρήνες του ραδιοϊσοτόπου και βρίσκονται στα ανώτερα επιφανειακά στρώματα του εδάφους υπόκεινται σε διεργασίες αποσάθρωσης λόγω μετεωρολογικών επιδράσεων (weathering), εξαιτίας δηλαδή του αέρα, των επιφανειακών νερών κλπ.

Για την απλοποίηση των μαθηματικών εργαλείων και την διευκόλυνση ανάπτυξης της μοντελοποίησης μπορούν να εισαχθούν ορισμένες εύλογες και βασικές παραδοχές και να γίνουν ορισμένα παραγωγικά σχόλια, ως εξής:

(i) Ενδιαφέρει η μετανάστευση ραδιοϊσοτόπων που έχουν ήδη δημιουργηθεί. Κατά συνέπεια ο πιο πάνω όρος (β3) θεωρείται πάντα αμελητέος.

(ii) Ενδιαφέρει η μετανάστευση ραδιοϊσοτόπων μεγάλου χρόνου ημιζωής. Κατά συνέπεια ο πιο πάνω όρος (β4) μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος στην περίπτωση που η μετανάστευση γίνεται σχετικά γρήγορα. Διευκρινίζεται ότι η μετανάστευση ραδιοϊσοτόπων μικρού χρόνου ημιζωής δεν ενδιαφέρει διότι πολύ απλά αυτά θα έχουν εκλείψει λόγω διάσπασης προτού ολοκληρωθεί η μεταφορά τους σε μεγάλο βάθος. Στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας το ισότοπο του οποίου η κατακόρυφη μετανάστευση θα εξετασθεί είναι το Cs-137, με χρόνο ημιζωής 30.17 έτη. Αυτός ο χρόνος ημιζωής θεωρείται μεγάλος αλλά όχι αρκετά μεγάλος για να αγνοηθεί πάντα ο όρος (β4).

(iii) Οι διεργασίες οριζόντιας μετανάστευσης ραδιοϊσοτόπων (κατά ψ και z), παρόλο που υπάρχουν θεωρούνται αμελητέες. Κατά συνέπεια οι πιο πάνω όροι (β5) και (β6) δεν λαμβάνονται υπόψιν. Σε αυτό το πλαίσιο το έδαφος θεωρείται ομογενές και ισότροπο,

προς τις κατευθύνσεις ψ και z , σε σχέση με όλες τις ιδιότητές του, που αφορούν στα εξεταζόμενα φαινόμενα. Οι διεργασίες οριζόντιας μετανάστευσης είναι τότε και μόνο σημαντικές,

- όταν υπάρχουν υψομετρικές διαφορές του εξεταζόμενου εδάφους σε σχέση με τα γειτονικά εδάφη
- όταν υπάρχουν μεγάλες διαφορές στη διαπερατότητα του εξεταζόμενου εδάφους σε σχέση με τα γειτονικά εδάφη, και τέλος
- όταν υπάρχουν μεγάλες διαφορές στην επιφανειακή απόθεση στο εξεταζόμενο έδαφος σε σχέση με τα γειτονικά εδάφη.

(iv) Οι διεργασίες γραμμικής προσρόφησης και απορρόφησης, θεωρείται ότι εξαρτώνται από το χρόνο μετανάστευσης t (years) και ότι εξελίσσονται γραμμικά κατά βάθος x (cm) ως εξής:

Το έδαφος θεωρείται ότι αποτελείται από νερό (L : liquid) και στερεά (S : solid) κατά τη λογική:

$$[\text{έδαφος}] = [\text{νερό}] + [\text{στερεά}]$$

τότε, αν είναι $C_L(x,t)$ η κατ' όγκο συγκέντρωση του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου στο νερό του εδάφους (Bq cm^{-3}), σε βάθος x την χρονική στιγμή t και $C_S(x,t)$ η κατ' όγκο συγκέντρωση του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου στα στερεά του εδάφους (Bq cm^{-3}), σε βάθος x την χρονική στιγμή t , τότε οι δύο αυτές κατ' όγκο συγκεντρώσεις συνδέονται με τη σχέση γραμμικής προσρόφησης – απορρόφησης:

$$C_S(x,t) = k_d(t)C_L(x,t) \quad (2.1)$$

όπου

$k_d(t)$ ένας αδιάστατος συντελεστής καταμερισμού (partition coefficient).

Αν είναι επιπλέον $C(x,t)$ η συνολική κατ' όγκο συγκέντρωση του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου στο σύνολο του εδάφους (Bq cm^{-3}), σε βάθος x την χρονική στιγμή t θα ισχύει:

$$C(x,t) = C_S(x,t) + w(t)C_L(x,t) \quad (2.2)$$

όπου

$w(t)$ η κατ' όγκο συγκέντρωση του νερού στο έδαφος σε $[\text{cm}^3 \text{ νερού}] / [\text{cm}^3 \text{ εδάφους}]$.

(v) Οι διεργασίες διήθησης και αποσάθρωσης είναι πολύ δύσκολο να μοντελοποιηθούν και λίγο ως πολύ αγνοούνται, εισάγοντας με αυτόν τον τρόπο σφάλματα στις υπάρχουσες τεχνικές μοντελοποίησης.

(vi) Η απόθεση στο επιφανειακό έδαφος θεωρείται "στιγμιαία" και συμβαίνει πάντα στη χρονική στιγμή μετανάστευσης $t=0$ έτη.

2.2 Θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο

Για τα βάθη που ενδιαφέρουν στην κατακόρυφη μετανάστευση πυρήνων ραδιοϊσοτόπων το έδαφος μπορεί να θεωρηθεί ως μοναδικό ομογενές και ισότροπο κατά x , διαμέρισμα. Με αυτό το πλαίσιο, το συνήθως χρησιμοποιούμενο θεωρητικό - αναλυτικό μοντέλο που έχει αναπτυχθεί για την περιγραφή του φαινομένου της κατακόρυφης μετανάστευσης των ραδιοϊσοτόπων ονομάζεται:

Μοντέλο Διάχυσης – Μεταφοράς με Γραμμική Προσρόφηση - Απορρόφηση.

Μετά από βιβλιογραφική έρευνα, που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας, τα αποτελέσματα της οποίας αναφέρονται στη τελευταία παράγραφο του παρόντος Κεφαλαίου, διαπιστώθηκε ότι πολύ καλή και αναλυτική περιγραφή του παραπάνω μοντέλου παρέχεται από τον Bossew (2004β). Σύνοψη του συγκεκριμένου μοντέλου θα ακολουθήσει στη συνέχεια. Το μοντέλο σχηματίζεται από το σύστημα των ακόλουθων τριών εξισώσεων (βλ. Διάγραμμα 2.1):

της εξίσωσης διάχυσης - μεταφοράς:

$$J(x,t) = -D'(x,t) \frac{\partial C_L(x,t)}{\partial x} + v'(x,t) C_L(x,t) \quad (2.3)$$

της εξίσωσης του ισοζυγίου:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial J(x,t)}{\partial x} - \lambda C(x,t) \quad (2.4)$$

και της διατυπωθείσας εξίσωσης της γραμμικής προσρόφησης – απορρόφησης:

$$C_S(x,t) = k_d(t) C_L(x,t) \quad (2.5)$$

Για την ερμηνεία του συστήματος των εξισώσεων (2.3), (2.4) και (2.5) σημειώνεται ότι για όσα μεγέθη δεν έχουν ορισθεί ακόμα είναι:

$J(x,t)$ η κατά το βάθος ροή (flux) του εξεταζόμενου ραδιοϊσοτόπου ($\text{Bq cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$),

$D'(x,t)$ ο συντελεστής διάχυσης (diffusion coefficient) του εξεταζόμενου ραδιοϊσοτόπου, ο οποίος περιλαμβάνει τη μοριακή διάχυση (molecular diffusion) και την υδροδυναμική διασπορά (hydrodynamic dispersion) ($\text{cm}^2 \text{a}^{-1}$),

$v'(x,t)$ η ταχύτητα μεταφοράς του νερού στο έδαφος (interstitial water flow velocity ή αλλιώς συντελεστής Darcy – Darcy coefficient) (cm a^{-1}), και

λ η σταθερά διάσπασης του εξεταζόμενου ραδιοϊσοτόπου (a^{-1}).

Αντικαθιστώντας από την εξίσωση (2.5) στις εξισώσεις (2.3) και (2.4) παράγεται ένα σύστημα γραμμικών διαφορικών εξισώσεων 1^{ης} τάξης το οποίο θα γίνει και η βάση της περαιτέρω ανάλυσης:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial J(x,t)}{\partial x} - \lambda C(x,t) \quad (2.6)$$

$$J(x,t) = -D(x,t) \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} + v(x,t)C(x,t) \quad (2.7)$$

Στο σύστημα των εξισώσεων (2.6) και (2.7) είναι:

$$D(x,t) = D'(x,t) / R_d(t) \quad (2.8)$$

και

$$v(x,t) = v'(x,t) / R_d(t) \quad (2.9)$$

όπου R_d συντελεστής (retardation factor) που ορίζεται ως:

$$R_d(t) = w(t) + k_d(t) \quad (2.10)$$

Είναι φυσικά γνωστό ότι το σύστημα αυτό γράφεται ως μία διαφορική εξίσωση δεύτερης τάξης ως εξής:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} - \frac{\partial \left[D(x,t) \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \right]}{\partial x} + \frac{\partial [v(x,t)C(x,t)]}{\partial x} + \lambda C(x,t) = 0 \quad (2.11)$$

Παρόλα αυτά, όπως σημειώνεται από τον Bossew (2004β), αλλά και σε πολλές άλλες επιστημονικές εργασίες είναι προτιμότερο να λύνεται το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων (2.6) και (2.7) διότι η διαφορική εξίσωση (2.11) είναι μάλλον αμφίσημη καθώς ισχύει κατά φυσικώς άκομψο τρόπο για δύο διαφορετικές συγκεντρώσεις του εξεταζόμενου μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου: Ισχύει δηλαδή (προφανώς) για την $C(x,t)$, που μπορεί να προσδιορίζεται με τη βοήθεια της δειγματοληψίας εδάφους, αλλά ισχύει και για την $J(x,t)$, η οποία είναι συνάρτηση της $C_L(x,t)$, η οποία μπορεί να προσδιορίζεται με τη βοήθεια της δειγματοληψίας νερού από το έδαφος. Οι δύο αυτές

κατ' όγκο συγκεντρώσεις του εξεταζόμενου ραδιοϊσοτόπου διαφέρουν, τόσο στη τάξη μεγέθους, όσο και στους φυσικοχημικούς μηχανισμούς που τις δημιουργούν.

2.3 Περαιτέρω παραδοχές για το θεωρητικό - αναλυτικό μοντέλο

2.3.1 Το κατά μάζα μοντέλο

Αν το θεωρητικό - αναλυτικό μοντέλο είναι απαραίτητο να διατυπωθεί με συγκεντρώσεις του εξεταζόμενου ραδιοϊσοτόπου κατά μάζα (συνολικού εδάφους, νερού στο έδαφος, στερεών του εδάφους) ορισμένες από τις παραπάνω εξισώσεις τροποποιούνται ως εξής:

Αν είναι $C'_L(x,t)$ η κατά μάζα συγκέντρωση του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου στο νερό του εδάφους ($Bq\ kg^{-1}$), σε βάθος x την χρονική στιγμή t και $C'_S(x,t)$ η κατά μάζα συγκέντρωση του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου στα στερεά του εδάφους ($Bq\ kg^{-1}$), σε βάθος x την χρονική στιγμή t , τότε οι δύο αυτές συγκεντρώσεις συνδέονται με τη σχέση γραμμικής προσρόφησης – απορρόφησης:

$$C'_S(x,t) = k'_d(t)C'_L(x,t) \quad (2.12)$$

όπου

$$C'_S(x,t) = C_S(x,t) / \rho_S(x) \quad (2.13)$$

με

$\rho_S(x)$ την πυκνότητα των στερεών του εδάφους ($kg\ cm^{-3}$)

$k'_d(t)$ ένας αδιάστατος συντελεστής καταμερισμού

Αν είναι επιπλέον $C'(x,t)$ η συνολική κατά μάζα συγκέντρωση του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου στο σύνολο του εδάφους ($Bq\ kg^{-1}$), σε βάθος x την χρονική στιγμή t θα ισχύει:

$$C'(x,t) = C'_S(x,t) + w'(t)C'_L(x,t) \quad (2.14)$$

όπου

$w'(t)$ η κατά μάζα συγκέντρωση του νερού στο έδαφος σε $[kg\ νερού] / [kg\ εδάφους]$, και

$$C'(x,t) = C(x,t) / \rho_b(x) \quad (2.15)$$

με

$\rho_b(x)$ την πυκνότητα του εδάφους (kg cm^{-3})

για την οποία ισχύει:

$$\rho_b(x) = [1 - \theta(x)]\rho_s(x) \quad (2.16)$$

με

$\theta(x)$ το πορώδες του εδάφους

Πάντως η χρήση του "κατά μάζα μοντέλου" δεν συστήνεται, σύμφωνα με τον Ιβανον (1996), δεδομένου ότι οι πυκνότητες $\rho_b(x)$ και $\rho_s(x)$, καθώς και το πορώδες $\theta(x)$, είναι άγνωστα. Επίσης οι παράγοντες αυτοί δεν μπορούν να ληφθούν σταθεροί. Αν γίνει αυτό η ρύπανση των κατωτέρων στρωμάτων εδάφους, που έχουν υψηλότερη πυκνότητα από τα ανώτερα που βρίσκονται στην επιφάνεια μπορεί να υποεκτιμηθεί κατά περίπου 2 έως 4 φορές.

2.3.2 Η διάχυση των ραδιοϊσοτόπων και η κίνηση του νερού

Οι συντελεστές D και v θεωρούνται σταθεροί κατά βάθος και ανεξάρτητοι του χρόνου (υπενθυμίζεται ότι στην μονοδιαμερισματική αντιμετώπιση του θεωρητικού – αναλυτικού μοντέλου το έδαφος θεωρείται ομογενές και ισότροπο κατά x). Δεν υπάρχει στη ουσία λόγος να θεωρηθεί ότι υπάρχει εξάρτηση από τον χρόνο των συντελεστών D' και v' . Παρόλαυτά εξάρτηση από τον χρόνο υπάρχει για τον συντελεστή k_d και άρα για τον R_d . Η εξάρτηση αυτή δεν έχει ακόμα μοντελοποιηθεί και προς το παρόν αγνοείται. Μετά και από αυτήν την τροποποίηση το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων (2.6) και (2.7) γράφεται:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial J(x,t)}{\partial x} - \lambda C(x,t) \quad (2.17)$$

$$J(x,t) = -D \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} + vC(x,t) \quad (2.18)$$

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η διαφορική εξίσωση (2.11) αυτή μετασχηματίζεται στην:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} - D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} + v \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} + \lambda C(x,t) = 0 \quad (2.19)$$

2.3.3 Η γραμμική προσρόφιση - απορρόφιση

Η γραμμικότητα της σχέσης (2.5) – η της (2.12)- είναι προφανής υπεραπλούστευση. Υπάρχουν σήμερα αρκετά πειραματικά αποτελέσματα που δείχνουν ότι σε ό,τι αφορά το

Cs-137 ο συντελεστής k_d εξαρτάται και από τη συγκέντρωση του στο έδαφος. Ούτε η εξάρτηση αυτή έχει ακόμα μοντελοποιηθεί επαρκώς και προς το παρόν αγνοείται.

2.3.4 Η μόνιμη κατάσταση προσρόφησης - απορρόφησης

Δεν μπορεί σε καμία απολύτως περίπτωση να θεωρείται ότι ισχύει η σχέση (2.5) – ή η (2.12)- και μάλιστα με $k_d = k_d(t) = const$, τις πρώτες ώρες μετά την απόθεση ενός ραδιοϊσοτόπου στο επιφανειακό έδαφος. Επιπλέον στο γραμμικό μοντέλο προσρόφησης – απορρόφησης, έχει υποθεθεί ότι υπάρχουν δύο συγκεντρώσεις για το εξεταζόμενο ραδιοϊσότοπο, η C_L και η C_S . Η προσροφηθείσα – απορροφηθείσα συγκέντρωση C_S μπορεί να επαναδιαλυθεί στο νερό, καθιστώντας τη διαδικασία που δίνεται από τη σχέση (2.5) ή (2.12) 100% αναστρέψιμη. Παρόλαυτά, ειδικά για το Cs-137 έχει διαπιστωθεί ότι ένα μέρος του προσροφάται στο στερεό έδαφος μη αναστρέψιμα. Για να ληφθεί αυτό το γεγονός υπόψιν, το σύστημα των δύο διαφορικών εξισώσεων (2.17) και (2.18) γράφεται:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial J(x,t)}{\partial x} - \lambda' C(x,t) \quad (2.20)$$

$$J(x,t) = -D \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} + vC(x,t) \quad (2.21)$$

με $\lambda' > \lambda$

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η διαφορική εξίσωση (2.11, 2.19) αυτή μετασχηματίζεται στην:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} - D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} + v \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} + \lambda' C(x,t) = 0 \quad (2.22)$$

2.3.5 Τα "hot particles"

Το "hot particle" ορίζεται ως τμήμα ραδιενεργού ύλης που συνήθως περιέχει πολλά ραδιενεργά ισότοπα και του οποίου οι διαστάσεις μπορούν να είναι μεγαλύτερες από 10 μm και μέχρι και μερικά mm. Το θεωρητικό - αναλυτικό μοντέλο δεν μπορεί να προσεγγίσει την κατακόρυφη μετανάστευση τέτοιων μεγάλων θραυσμάτων. Δεδομένου ότι συνήθως οι αποθέσεις εκλυθέντων ραδιοϊσοτόπων μακριά από την πηγή της έκλυσης γίνονται σε μικροσωματίδια μεγέθους από μερικά nm έως το πολύ 20 μm , γίνεται κατ' αρχήν δεκτό ότι το θεωρητικό αναλυτικό μοντέλο είναι κατάλληλο μόνο για τέτοιες αποθέσεις με λεπτό διαμερισμό.

2.3.6 Το μοντέλο ψευδο-διάχυσης

Η συνιστώσα μεταφοράς μπορεί να αγνοηθεί αν η διαφορική εξίσωση (2.11, 2.19) συμπεριλάβει στον όρο της διάχυσης και το φαινόμενο της μεταφοράς με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} - M \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} + \lambda C(x,t) = 0 \quad (2.23)$$

Το μοντέλο διάχυσης – μεταφοράς εκπίπτει τότε στο μοντέλο ψευδο-διάχυσης (quasi-diffusional) με έναν όρο καταστροφής, στο οποίο M είναι ο φαινόμενος συντελεστής μετανάστευσης (apparent migration coefficient) ($\text{cm}^2 \text{a}^{-1}$)

2.4 Οριακές συνθήκες

Για τις οριακές συνθήκες ορίζεται κατ' αρχήν ότι:

$$x, t \in [0, \infty)$$

Επιπλέον επειδή η λύση $C(x,t)$ είναι πεπερασμένη

$$C(x \rightarrow \infty, t) \rightarrow 0 \quad (2.24)$$

Ως οριακές συνθήκες ορίζονται:

$$C(x, 0) = C_0(x) \quad (2.25)$$

$$J(0, t) = J_0(t) \quad (2.26)$$

Οι οριακές συνθήκες απλοποιούνται ακόμα περισσότερο σε έδαφος, στο οποίο δεν έχει ξανασημειωθεί απόθεση – μετανάστευση. Όπως έχει σημειωθεί η απόθεση θεωρείται στιγμιαία.

$$C(x, 0) = 0 \quad (2.27)$$

$$J(0, 0) = J_0 \quad (2.28)$$

2.5 Λύσεις

Για τις οριακές συνθήκες (2.27) και (2.28) η λύση του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων (2.17) και (2.18) προσδιορίζεται ως:

$$C(x,t) = J_0 e^{-\lambda t} \left(\left(\frac{e^{\left(\frac{-(x-v)^2}{4Dt}\right)}}}{\sqrt{\pi Dt}} \right) - \left(\frac{v}{2D} \right) e^{\left(\frac{v \cdot x}{D}\right)} \operatorname{erfc} \left(\frac{v\sqrt{t}}{2\sqrt{D}} + \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (2.29)$$

ή προσεγγιστικά ως:

$$C(x,t) = \frac{J_0 e^{-\lambda t}}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{(x-vt)^2}{4Dt}\right) \quad (2.30)$$

Επιπλέον για τις ίδιες οριακές συνθήκες (2.27) και (2.28) η λύση της διαφορικής εξίσωσης ψευδο-διάχυσης (2.23) προσδιορίζεται ως:

$$C(x,t) = \frac{J_0}{\sqrt{\pi Mt}} \exp\left(\frac{x^2}{4Mt} - \lambda t\right) \quad (2.31)$$

2.6 Ιδιότητες των λύσεων

(α) Όλες οι παρουσιαζόμενες λύσεις τείνουν ασυμπτωτικά στην κατανομή Gauss για πολύ μεγάλους χρόνους μετανάστευσης.

(β) Οι παρουσιαζόμενες λύσεις είναι "ασυνεπείς" σε σχέση με το φυσικό φαινόμενο της κατακόρυφης μετανάστευσης ενός ραδιοϊσοτόπου στο έδαφος, διότι ακόμα και για πολύ μικρούς χρόνους μετανάστευσης, υπολογίζουν μικρή συγκέντρωση του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου σε μεγάλα βάθη, πράγμα που από μαθηματική άποψη δείχνει ότι υπάρχει διαλυτή συνιστώσα της αρχικής επιφανειακής απόθεσης του ραδιοϊσοτόπου, η οποία κινείται κατακόρυφα με άπειρη ταχύτητα. Για να αποφεύγονται τέτοια "λάθη" μπορεί να εισαχθεί και η επιπλέον οριακή συνθήκη:

$$C(x,t) = 0 \text{ όταν το βάθος } x \text{ είναι μεγαλύτερο από περίπου } v't + \sqrt{2Dt} \quad (2.32)$$

(γ) Η προσεγγιστική λύση (2.31) μπορεί να θεωρηθεί ως ακριβής μόνο στην περίπτωση που $t \gg 2D/v^2$. Για τις τυπικές τιμές $D = 0.1 \text{ cm}^2 \text{ a}^{-1}$ και $v = 0.1 \text{ cm a}^{-1}$, ο προκύπτων χρόνος για τον οποίο η λύση μπορεί να θεωρηθεί ακριβής είναι $t \gg 20$ έτη. Η προσεγγιστική λύση (2.31) γενικά υποεκτιμά την κατακόρυφη μετανάστευση ραδιοϊσοτόπου στο έδαφος. Το ίδιο φυσικά συμβαίνει και για την λύση του μοντέλου ψευδο-διάχυσης (2.23).

(δ) Για μικρές τιμές της του χρόνου μετανάστευσης t η λύση (2.29) εκπίπτει στην:

$$C(x,t) = J_0 \frac{1}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{(x-vt)^2}{4Dt}\right) \quad (2.33)$$

διότι ο όρος

$$\operatorname{erfc}\left(\frac{v\sqrt{t}}{2\sqrt{D}} + \frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (2.34)$$

γίνεται αμελητέος.

(ε) Από τις λύσεις δεν μπορούν να προκύψουν αναλυτικές διατυπώσεις για τη θέση x_m της κατά βάθος κατανομής της συγκέντρωσης του ραδιοϊσοτόπου όπου παρατηρείται μέγιστη συγκέντρωση, ή για τη θέση $x_{1/2}$ της κατά βάθος κατανομής της συγκέντρωσης του ραδιοϊσοτόπου πάνω από την οποία εξακολουθεί να υπάρχει το μισό του συνόλου του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου (βάθος ημίσειας συγκέντρωσης – half value depth). Ασυμπτωτικά για μεγάλους χρόνους μετανάστευσης οι δύο αυτές θέσεις ταυτίζονται στο βάθος $x_m = x_{1/2} = vt$. Για μικρούς χρόνους μετανάστευσης οι δύο αυτές θέσεις ταυτίζονται στο βάθος 0. Αποδεικνύεται ότι προσεγγιστικά είναι:

$$x_m(t) \approx vt \left(1 + \frac{0.8}{1.6 + v^2/D} \right) \quad (2.35)$$

και

$$x_{1/2} \approx vt + \frac{D}{t} \left(1 - \frac{0.801}{(0.0083 + (v^2 t)/(4D))^{0.0443}} \right) \quad (2.36)$$

2.7 Βιβλιογραφική έρευνα

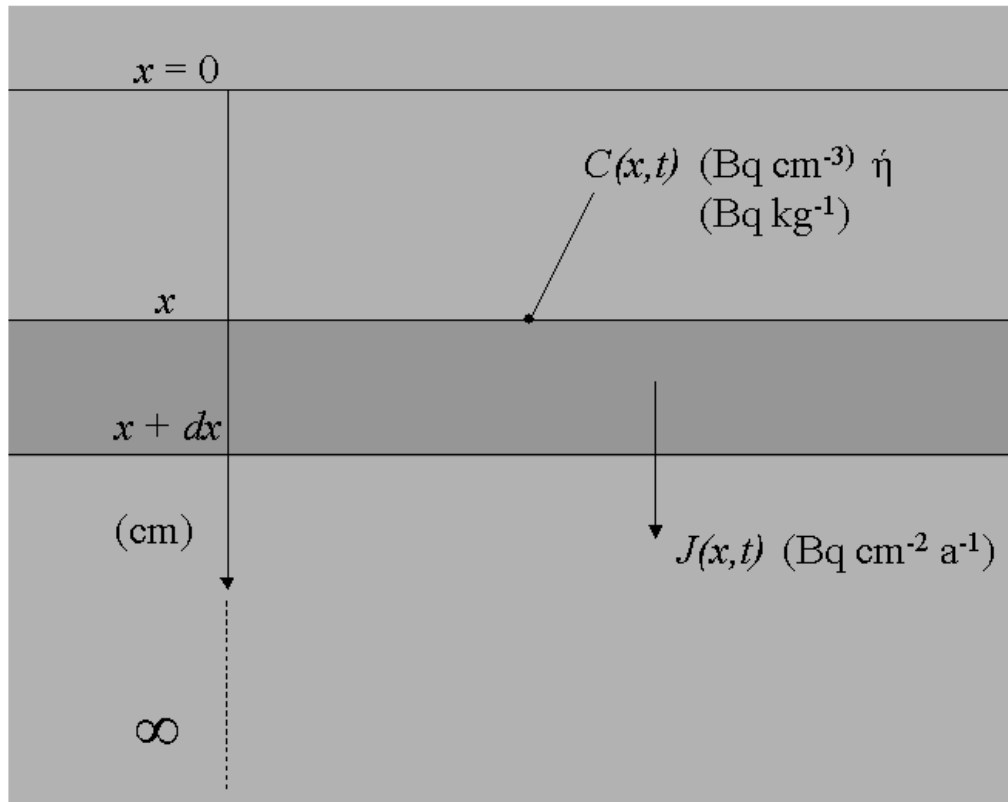
Σε ό,τι αφορά την εφαρμογή του θεωρητικού - αναλυτικού μοντέλου για την κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137 που αποτέθηκε εξαιτίας του ατυχήματος του Chernobyl σε διάφορα ευρωπαϊκά εδάφη, διερευνήθηκε η σχετική βιβλιογραφία κυρίως μέσω του διαδικτυακού εργαλείου www.scopus.com, του οποίου η χρήση είναι διαθέσιμη στα μέλη της Πολυτεχνειακής μας Κοινότητας χωρίς κόστος. Το εργαλείο αυτό αναπτύχθηκε από τον διεθνή εκδοτικό οίκο Elsevier, προκειμένου οι συμβεβλημένοι με αυτό χρήστες, να έχουν πρόσβαση στην περιγραφή και το περιεχόμενο, όλων των δημοσιεύσεων σε επιστημονικά περιοδικά που πραγματοποιούνται ανά τον κόσμο. Επιπλέον το υπόψιν εργαλείο επιτρέπει να παίρνει κανείς εικόνα της αποδοχής μιας τέτοιας επιστημονικής δημοσίευσης από τον επιστημονικό κόσμο με βάση τις αναφορές (citations) που γίνονται σε αυτή στο χρονικό διάστημα που ακολούθησε τη δημοσίευσή της, κατά τον τρόπο που πρώτα εισήχθηκε από την εταιρεία Science Citation Index των ΗΠΑ.

Με βάση αυτήν την βιβλιογραφική έρευνα, διαπιστώθηκε ότι με τα κριτήρια της επιστημονικής πληρότητας και της επιστημονικής αποδοχής οι πλέον σχετικές δημοσιεύσεις είναι οι ακόλουθες τέσσερις, – ο κατάλογος δίνεται με χρονολογική σειρά:

- Ivanov Y.A, Lewyckyj N., Levchuk F.C., Prister B.S., Firsakova S.K., Arkhipov N.P., Arkhipov A.N., Kruglov S.V., Alexakhin R.M., Sandalls J. and Askbrant S., "Migration of ^{137}Cs and ^{90}Sr from Chernobyl Fallout in Ukrainian, Belarussian and Russian Soils", *Journal of Environmental Radioactivity*, 35(1):1-21, 1997
- Szerbin P., Koblinger-Bokori E., Koblinger L., Vegvari I. and Urgan A., "Caesium-137 migration in Hungarian soils", *The Science of the Total Environment*, 227:215-227, 1999.
- Bossew P. and Kirchner G., "Modeling the vertical distribution of radionuclides in soil. Part 1: the convection – dispersion equation revisited" *Journal of Environmental Radioactivity*, 73:127-150, 2004.
- Krstic' D., Nikezic' D., Stevanovic' N. and Jelic' M., "Vertical profile of ^{137}Cs in soil", *Applied Radiation and Isotopes*, 61:1487-1492, 2004

Με βάση τις πιο πάνω δημοσιεύσεις θα εξετασθούν στο επόμενο 3^ο Κεφάλαιο, οι εφαρμογές του θεωρητικού αναλυτικού μοντέλου κατακόρυφης μετανάστευσης για το ραδιοϊσότοπο Cs-137 και θα εξαχθούν σχετικά ποιοτικά και ποσοτικά συμπεράσματα.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 2^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



Διάγραμμα 2.1

Διάγραμμα για την κατανόηση της μοντελοποίησης της κατακόρυφης μετανάστευσης ραδιοϊσοτόπου στο έδαφος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ - ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΜΕΤΑΝΑΣΤΕΥΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τέσσερις παραπλήσιες εφαρμογές θεωρητικού-αναλυτικού μοντέλου διάχυσης - μεταφοράς με ή χωρίς προσρόφιση – απορρόφιση, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με σχετική επιτυχία για την εκτίμηση του συντελεστή διάχυσης D και της ταχύτητας μεταφοράς (συντελεστής Darcy v ,) όπως αυτοί έχουν ορισθεί στο προηγούμενο 2^ο Κεφάλαιο, του Cs-137 που αποτέθηκε στο επιφανειακό έδαφος από το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl. Οι τιμές των εκτιμώμενων συντελεστών παρουσιάζονται σε πινακοποιημένη και διαγραμματική μορφή. Γίνονται επιπλέον σχόλια για το ποιες εκτιμάται ότι είναι οι αντίστοιχες τιμές αυτών των συντελεστών στα ελληνικά εδάφη. Όλες οι εφαρμογές που περιγράφονται βασίζονται σε πειραματικά αποτελέσματα μετρήσεων των συγκεντρώσεων του Cs-137 στο επιφανειακό και το κατά βάθος έδαφος σε συγκεκριμένη ή και σε διάφορες χρονικές στιγμές.

3.2 Εφαρμογή θεωρητικού – αναλυτικού μοντέλου από τον Ivanov (1997)

3.2.1 Γενικά

Ο Ivanov (1997) και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησε το θεωρητικό - αναλυτικό μοντέλο διάχυσης – μεταφοράς και το μοντέλο ψευδο-διάχυσης που παρουσιάστηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο, χωρίς να λάβει υπόψιν όρους γραμμικής προσρόφισης – απορρόφισης, προκειμένου να περιγράψει την κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137 σε 10 περίπου αδιάτάρακτα εδάφη που βρίσκονται στην "ζώνη αποκλεισμού" του Chernobyl, δηλ. στη ζώνη ακτίνας 30 km γύρω από τον πυρηνοληκτρικό σταθμό. Οι κατ'αρχήν διαπιστώσεις του δείχνουν ότι σε εδάφη με σημαντικό περιεχόμενο σε άμμο η κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137 περιορίζεται στα επιφανειακά στρώματα. Αντίθετα φαίνεται να διακρίνεται ότι σε εδάφη χωρίς άμμο, η κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137 φθάνει σε σχετικά μεγαλύτερα βάθη. Στην

εξεταζόμενη εφαρμογή των θεωρητικών – αναλυτικών μοντέλων ο Ivanov χρησιμοποιεί:

- την διαφορική εξίσωση (2.19).

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} - D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} + v \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} + \lambda C(x,t) = 0 \quad (3.1)$$

της οποίας την λύση προσδιορίζει στην (2.29)

$$C(x,t) = J_0 e^{-\lambda t} \left(\left(\frac{e^{\left(\frac{-xv}{4Dt}\right)}}{\sqrt{\pi Dt}} \right) - \left(\frac{v}{2D} \right) e^{\left(\frac{vx}{D}\right)} \operatorname{erfc} \left(\frac{v\sqrt{t}}{2\sqrt{D}} + \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (3.2)$$

για τις οριακές συνθήκες (2.27) και (2.28).

- και τη διαφορική εξίσωση (2.23)

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} - M \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} + \lambda C(x,t) = 0 \quad (3.3)$$

της οποίας την λύση προσδιορίζει στην (2.31):

$$C(x,t) = \frac{J_0}{\sqrt{\pi Mt}} \exp\left(\frac{x^2}{4Mt} - \lambda t\right) \quad (3.4)$$

3.2.2 Αποτελέσματα – Φαινόμενοι συντελεστές D και v

Μετά από μετρήσεις της συγκέντρωσης του Cs-137 (Bq cm^{-3}) σε διάφορα βάθη σε διάφορες χρονικές στιγμές σε συγκεκριμένες θέσεις δειγματοληψίας και τη χρήση των πιο πάνω μοντέλων εκτιμήθηκαν οι συντελεστές D και v σε κάθε περίπτωση. Προκειμένου να κατηγοριοποιηθεί ο τύπος του εδάφους στον οποίο έγιναν οι δειγματοληψίες μετρήθηκαν επίσης κυρίως το ποσοστό άμμου, το ποσοστό αργίλου, το ποσοστό οργανικής ύλης και το pH (KCl). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, και όπως ήταν αναμενόμενο, η κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137 φαίνεται να εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους αλλά και από την κίνηση του νερού μέσα σε αυτό.

Σχετικά με την εξάρτηση από την κίνηση του νερού, διαπιστώθηκε ότι τους πρώτους μήνες μετά την απόθεση (καλοκαίρι του 1986) το σύνολο του Cs-137 που αποτέθηκε παρέμεινε στα πρώτα 1 – 5 cm του επιφανειακού εδάφους, το οποίο ήταν εξαιρετικά στεγνό λόγω της θερινής ξηρασίας. Με την πάροδο του χρόνου και ήδη από το 1988 έγινε πια προφανές ότι υπήρξε στατιστικά σημαντική κατακόρυφη μετανάστευση του

υπόψιν ραδιοισοτόπου σε μεγαλύτερα βάθη, και ταυτόχρονη απομείωση της συγκέντρωσής του κοντά στην επιφάνεια. Περί το 1993, μάλιστα υπήρξαν σημεία δειγματοληψίας στα οποία διαπιστώθηκε η ύπαρξη Cs-137 σε βάθη που έφθαναν τα 30 – 40 cm.

Σχετικά με την εξάρτηση από τον τύπο του εδάφους, στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας συγκροτήθηκε, με βάση τα αποτελέσματα του Ivanov (1997), ο Πίνακας 3.1. Από τα στοιχεία του Πίνακα 3.1, διαπιστώνεται με βεβαιότητα ότι στα εδάφη με μεγάλο ποσοστό άμμου οι συντελεστές D και ν έχουν μάλλον μικρότερες τιμές από εκείνες που διαπιστώνονται σε εδάφη με μικρότερο ποσοστό άμμου. Στα εδάφη επομένως με μεγάλο ποσοστό άμμου η μετανάστευση του Cs-137 δεν είναι σημαντική. Το πιο πάνω συμπέρασμα παριστάνεται στα Διαγράμματα 3.1 και 3.2. Από τα υπόλοιπα στοιχεία του Πίνακα 3.1 δεν φαίνεται να είναι προφανής η εξάρτηση των συντελεστών D και ν από το ποσοστό του αργίλου, το ποσοστό της οργανικής ύλης και το pH. Το εύρος των τιμών που εκτιμήθηκε (με στοιχεία μετρήσεων πέρα από αυτά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1) για τους συντελεστές D και ν έχει ως εξής:

$$D = 0.057 - 0.691 \text{ cm}^2 \text{ a}^{-1}, \nu = 0.066 - 0.896 \text{ cm a}^{-1}$$

Σημειώνεται ότι στην "ζώνη αποκλεισμού" του Chernobyl αποτέθηκαν στο επιφανειακό έδαφος και πάρα πολλά "hot particles" με Cs-137, τα οποία, όπως σημειώθηκε στο 2^ο Κεφάλαιο, εξαιτίας του μεγαλύτερου μεγέθους τους, κινούνται κατακόρυφα προς το υπέδαφος με πολύ μικρότερες ταχύτητες από το Cs-137 που αποτέθηκε σε λεπτό διαμερισμό. Η συνέπεια αυτού του γεγονότος είναι ότι η κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137 γίνεται σε δύο φάσεις (είναι διφασική): την αργή που αφορά στα "hot particles" και την σχετικά γρηγορότερη που αφορά στο Cs-137 λεπτού διαμερισμού. Επειδή οι μετρήσεις της συγκέντρωσης του Cs-137 σε διάφορα βάθη δεν μπορούν να ξεχωρίσουν το Cs-137 των "hot-particles" από εκείνο του λεπτού διαμερισμού, και επειδή το θεωρητικό - αναλυτικό μοντέλο, όπως εκφράζεται από την διαφορική εξίσωση (3.1), δεν μπορεί να περιγράψει την μετακίνηση "hot particles", τα οποία όμως μετακινούνται έτσι και αλλιώς, γίνεται αντιληπτό ότι οι εκτιμώμενοι συντελεστές D και ν είναι "φαινόμενοι" (apparent) και όχι ακριβείς.

3.2.3 Προβλέψεις

Με βάση τις τιμές των συντελεστών D και ν και χρησιμοποιώντας το θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο διάχυσης - μεταφοράς, ο Ivanov (1997) κάνει προβλέψεις για την κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης του Cs-137 για μεταγενέστερες του 1996 χρονικές στιγμές. Στο Διάγραμμα 3.3 παριστάνονται οι σχετικές προβλέψεις κατανομών για το έδαφος "UIP-17" και το έδαφος "UIP-25" για τα έτη 2000 και 2010. Το πρώτο περιγράφεται σε ελεύθερη απόδοση ως υγρό αμμώδες έδαφος (στα αγγλικά ως soddy podsolie sand), ενώ το δεύτερο ως τυρφώδες λασπώδες (στα αγγλικά ως peaty podsolie gleic loamy sand). Όπως προκύπτει από τις προβλέψεις, για το έδαφος "UIP 17", το 2010, περίπου το 99% της συγκέντρωσης του Cs-137 εκτιμάται ότι θα έχει παραμείνει στα πρώτα 8 cm βάθους και ότι η μέγιστη συγκέντρωση θα βρίσκεται μόλις περί το 1.5 cm κάτω από την επιφάνεια. Αντίθετα, οι προβλέψεις για το δεύτερο έδαφος "UIP –25" είναι διαφορετικές. Η μέγιστη συγκέντρωση Cs-137 σε αυτή την περίπτωση εκτιμάται ότι το έτος 2010 θα βρίσκεται αρκετά βαθύτερα, στα 3 cm, ενώ το σύνολο σχεδόν του Cs-137 εκτιμάται ότι θα έχει εξαπλωθεί και μέχρι τα 12 cm βάθους.

3.2.4 Συζήτηση

Ο Ivanov (1997) αναγνωρίζει ότι η χρησιμοποιούμενη μοντελοποίηση πιθανόν να μην είναι δυνατόν να προβλέψει με ικανοποιητική αξιοπιστία την κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης του Cs-137 στο έδαφος σε μεγάλη χρονική απόσταση από την αρχική επιφανειακή απόθεση (> 15 έτη). Επισημαίνει επομένως ότι τέτοιες μοντελοποιήσεις είναι κατ'αρχήν σχετικά επιτυχεστέρες μέχρι τα 10 πρώτα έτη από την επιφανειακή απόθεση. Αν επιπλέον η μοντελοποίηση γίνεται με βάση το απλό θεωρητικό - αναλυτικό μοντέλο ψευδο-διάχυσης, που εκφράζεται από τις εξισώσεις (2.23), (3.3) και (3.4), τότε ακόμα και για τα 10 πρώτα έτη υπάρχει σχετική επιτυχία μόνο αν στα εδάφη που αυτό εφαρμόζεται η μετακίνηση του νερού δεν είναι έντονη.

Ο λόγος για την μακροπρόθεσμη ανεπάρκεια των μοντέλων είναι ότι βασικά στις μοντελοποιήσεις του Ivanov (1997) δεν συμπεριλαμβάνονται όροι προσρόφησης – απορρόφησης, ούτε λαμβάνονται υπόψιν άλλες φυσικοχημικές διεργασίες που οδηγούν στην χημική ένωση του Cs-137 με το πέτρωμα του εδάφους, που έχουν αποτέλεσμα τότε το Cs-137 να ακολουθεί την κινητική των πετρωμάτων. Επίσης δεν

λαμβάνεται υπόψιν η υπάρχουσα ετερογένεια (κατά x) του μοναδικού εδαφικού διαμερίσματος.

Μία επιπλέον αιτία είναι ότι δεν προβλέπεται στα πλαίσια των θεωρητικών - αναλυτικών μοντέλων ότι υπάρχει μείωση των συντελεστών D και ν , στο ίδιο έδαφος με την πάροδο του χρόνου. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν αρκετές φορές το αντίθετο και επομένως στην ουσία επαληθεύεται αυτό που ήδη σημειώθηκε στο 2^ο Κεφάλαιο, ότι δηλαδή για υψηλότερες συγκεντρώσεις Cs-137 οι D και ν είναι μεγαλύτεροι – όταν οι συγκεντρώσεις λόγω της μετανάστευσης απομειωθούν, ελαττώνονται και οι D και ν . Η υπόθεση επομένως της μη εξάρτησης των συντελεστών D και ν , από τον χρόνο, όπως διατυπώθηκε ήδη στο πλαίσιο του προηγούμενου 2^{ου} Κεφαλαίου δεν είναι πολύ ακριβής.

3.2.5 Συμπεράσματα

Παρόλα τα προβλήματα διακρίνεται από τα αποτελέσματα μια σχετικά προφανής εξάρτηση (που θα μπορούσε να εκτιμηθεί ίσως σε "εκθετική απομείωση 1^{ης} τάξης" – "1st order exponential decay") των συντελεστών D και ν από το ποσοστό της άμμου (και επομένως από τον τύπο του εδάφους –βλέπε και Πίνακα 3.1 και Διαγράμματα 3.1 και 3.2). Σύμφωνα με την σχετική ποσοτική επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, προέκυψε ότι οι συντελεστές D και ν είναι περίπου μία τάξη μεγέθους μεγαλύτεροι στα αμμώδη εδάφη από ότι στα λασπώδη εδάφη (βλ. π.χ. και Διάγραμμα 3.3)

Διαπιστώνεται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις των εδαφών που εξετάστηκαν το σύνολο του Cs-137 εντοπίζεται στα ανώτερα 10-15 cm. Επιπλέον διαπιστώνεται ότι ακόμα και μετά από 10 έτη μετά την απόθεση (το διάστημα δηλαδή 1986 – 1996) το μεγαλύτερο ποσοστό του Cs-137 εντοπίζεται στα πρώτα 5 cm κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Διαπιστώνεται τέλος ότι τον πρώτο χρόνο μετά την απόθεση (1987) οι συντελεστές D και ν είχαν την μέγιστη τιμή τους. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι δεν ήταν ακριβώς γνωστή η αρχική τιμή της απόθεσης του Cs-137 στο έδαφος αμέσως μετά το ατύχημα, με αποτέλεσμα την ελαφρή αλλοίωση των οριακών συνθηκών.

3.2.6 Περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Από το σύνολο των αποτελεσμάτων που παρουσιάζει ο Ivanov (1997) συγκροτήθηκαν τα Διαγράμματα 3.4 και 3.5, τα οποία παρουσιάζουν την κατανομή συχνότητας των υπολογιζόμενων συντελεστών D και ν . Με την βοήθεια των υπόψιν δύο Διαγραμμάτων, προσδιορίστηκαν στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας οι πιθανότερες τιμές των συντελεστών D και ν με τη βοήθεια της λογαριθμοκανονικής προσαρμογής και το λογισμικό Origin 5.0 ως:

$$D = 0.24 \text{ cm}^2 \text{ a}^{-1}, \nu = 0.14 \text{ cm a}^{-1}$$

3.3 Εφαρμογή θεωρητικού – αναλυτικού μοντέλου από τον Szerbin (1999)

3.3.1 Γενικά

Ο Szerbin (1999) και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησε το θεωρητικό- αναλυτικό μοντέλο διάχυσης – μεταφοράς χωρίς όρους γραμμικής προσρόφησης – απορρόφησης, προκειμένου να περιγράψει την κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137 σε 19 αδιατάρακτα εδάφη της Ουγγαρίας. Στην εξεταζόμενη εφαρμογή του μοντέλου ο Szerbin χρησιμοποιεί την διαφορική εξίσωση (2.19).

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} - D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} + \lambda C(x,t) = 0 \quad (3.5)$$

της οποίας την λύση προσδιορίζει στην (2.30)

$$C(x,t) = \frac{J_0 e^{-\lambda t}}{2\sqrt{\pi D t}} \exp\left(-\frac{(x - \nu t)^2}{4Dt}\right) \quad (3.6)$$

Δεδομένου ότι στην Ουγγαρία υπήρξε στο παρελθόν (προ του 1986) σημαντική επιφανειακή απόθεση Cs-137 εξαιτίας των ατμοσφαιρικών πυρηνικών δοκιμών, η λύση (3.6) κατά τον Szerbin πρέπει να τροποποιηθεί στην:

$$C(x,t) = \frac{J_{CH} e^{-\lambda t}}{2\sqrt{\pi D t}} \exp\left(-\frac{(x - \nu t)^2}{4Dt}\right) + \frac{J_{NT} e^{-\lambda(t+\tau)}}{2\sqrt{\pi D(t+\tau)}} \exp\left(-\frac{[x - \nu(t+\tau)]^2}{4D(t+\tau)}\right) \quad (3.7)$$

με πρακτική συνέπεια, με τη βοήθεια της λύσης (3.7), το μοντέλο να εκτιμά πέρα από τους συντελεστές D και ν και την αρχική επιφανειακή απόθεση του Cs-137, τόσο

εξαιτίας του ατυχήματος στο Chernobyl (1^{0s} σταθερός όρος J_{CH}), όσο και εξαιτίας των πυρηνικών δοκιμών (2^{0s} σταθερός όρος J_{NT}). Στην εξίσωση (3.7) ως τ ορίζεται ο χρόνος από την τελευταία ατμοσφαιρική δοκιμή έως το 1986. Γίνεται δεκτό ότι $\tau = 300$ μήνες.

3.3.2 Αποτελέσματα – Φαινόμενοι συντελεστές D και ν

Μετά από μετρήσεις της συγκέντρωσης του Cs-137 ($Bq\ kg^{-1}$) σε διάφορα βάθη σε διάφορες χρονικές στιγμές σε συγκεκριμένες θέσεις δειγματοληψίας και τη χρήση των πιο πάνω μοντέλων εκτιμήθηκαν οι συντελεστές D και ν σε κάθε περίπτωση. Παρόλο που οι μετρήσεις της συγκέντρωσης του Cs-137 εκτιμήθηκαν σε $Bq\ kg^{-1}$, προκειμένου να εξαλειφθεί η ανεπάρκεια του θεωρητικού μοντέλου διάχυσης – μεταφοράς, για την περιγραφή της κατακόρυφης μετανάστευσης ισοτόπου με δεδομένα κατά μάζας συγκέντρωσης, οι μετρήσεις κανονικοποιήθηκαν κατά το πραγματικό βάρος των εδαφών $g\ cm^{-2}$ στα διάφορα βάθη. Με τον τρόπο αυτό εξαλείφθηκε -όπως και χρειαζόταν, βλ. και 2^ο Κεφάλαιο- η επίδραση της διαφορετικής κατά βάθος πυκνότητας του εδάφους στην λειτουργία του μοντέλου. Προκειμένου να κατηγοριοποιηθεί ο τύπος του εδάφους στον οποίο έγιναν οι δειγματοληψίες μετρήθηκαν επίσης το pH (H_2O), το pH (KCl), το ποσοστό του ανθρακικού ασβεστίου ($CaCO_3$), το ποσοστό της οργανικής ύλης, η αγωγιμότητα, η ικανότητα εναλλαγής κατιόντων [δηλ. στην ουσία ο περιεχόμενος πηλός (clay) και το περιεχόμενο οργανικό λίπασμα (humus)], το ποσοστό του Ca με δυνατότητα συναλλαγής, το ποσοστό του K με δυνατότητα συναλλαγής και τέλος η κατανομή μεγέθους των κόκκων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, ο Szerbin (1999) διαπιστώνει κατ' αρχήν ότι για την Ουγγαρία η επιφανειακή απόθεση Cs-137 εξαιτίας των ατμοσφαιρικών πυρηνικών δοκιμών είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την επιφανειακή απόθεση Cs-137 από το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl. Στην δεκαετία μετά το ατύχημα, το σύνολο σχεδόν του αντίστοιχου εναποθεθέντος Cs-137 παραμένει στα πρώτα 5 cm από την επιφάνεια. Δεν φαίνεται να υπάρχουν ισχυρές συσχετίσεις των εκτιμηθέντων συντελεστών D και ν με τον τύπο του εδάφους. Οι εκτιμηθέντες συντελεστές D και ν έχουν εύρος τιμών ως εξής:

$$D = 0.081 - 1.460\ cm^2\ a^{-1}, \nu = 0.056 - 0.770\ cm\ a^{-1}$$

αποτελέσματα που βρίσκονται σε καλή συμφωνία με εκείνα του Ivanov (1997).

Από την εργασία του Szerbin (1999) χαρακτηριστικά μπορεί κανείς χαρακτηριστικά να αποσπάσει το Διάγραμμα 3.6 , το οποίο παρουσιάζει την κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης του Cs-137 σε ένα έδαφος της Ουγγαρίας με βάση πειραματικές μετρήσεις (ιστόγραμμα) και τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου (συνεχής γραμμή). Διακρίνονται δύο χαρακτηριστικές κορυφές (δύο δηλ. βάθη στα οποία οι συγκεντρώσεις του Cs-137, παρουσιάζουν τοπικό μέγιστο): Η πρώτη που βρίσκεται περί το βάθος των 3 cm αντιπροσωπεύει την κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137 που οφείλεται στο ατύχημα του Chernobyl και η δεύτερη που βρίσκεται περί το βάθος των 9 cm αντιπροσωπεύει την κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137 που οφείλεται στις ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές.

3.3.3 Προβλέψεις

Με βάση τις εκτιμηθείσες τιμές των συντελεστών D και ν και χρησιμοποιώντας το μοντέλο διάχυσης - μεταφοράς, ο Szerbin (1999) κάνει προβλέψεις για την κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης του Cs-137 για τα επόμενα 50 έτη μετά το ατύχημα. Με βάση τις προβλέψεις αυτές το 99% του επιφανειακά εναποτεθέντος Cs-137 του ατυχήματος θα βρίσκεται ακόμα στα πρώτα 10 cm βάθους του εδάφους και η μέγιστη συγκέντρωση θα εντοπίζεται περί το βάθος των 2 cm.

3.3.4 Περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Από το σύνολο των αποτελεσμάτων που παρουσιάζει ο Szerbin (1999) συγκροτήθηκαν τα Διαγράμματα 3.7 και 3.8, τα οποία παρουσιάζουν την κατανομή συχνότητας των υπολογιζόμενων συντελεστών D και ν . Με την βοήθεια των υπόψιν δύο Διαγραμμάτων, προσδιορίστηκαν στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας οι πιθανότερες τιμές των συντελεστών D και ν με τη βοήθεια της λογαριθμοκανονικής προσαρμογής και το λογισμικό Origin 5.0 ως:

$$D = 0.54 \text{ cm}^2 \text{ a}^{-1}, \nu = 0.25 \text{ cm a}^{-1}$$

3.4 Εφαρμογή θεωρητικού – αναλυτικού μοντέλου από τον Krstic' (2004)

3.4.1 Γενικά

Ο Krstic' (2004) και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησε το θεωρητικό -αναλυτικό μοντέλο διάχυσης – μεταφοράς χωρίς όρους γραμμικής προσρόφησης – απορρόφησης, προκειμένου να περιγράψει την κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137 σε 10 αδιατάρακτα εδάφη της περιοχής του Kragujevac στην κεντρική Σερβία. Στην εξεταζόμενη εφαρμογή του μοντέλου ο Krstic' χρησιμοποιεί την διαφορική εξίσωση (2.19).

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} - D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} + v \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} + \lambda C(x,t) = 0 \quad (3.6)$$

της οποίας την λύση προσδιορίζει στην (2.30)

$$C(x,t) = J_0 e^{-\lambda t} G_0(x,t) \quad (3.7)$$

όπου $G_0(x,t)$ είναι η συνάρτηση Green:

$$G_0(x,t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{(x-vt)^2}{4Dt}\right) \quad (3.8)$$

ή ακριβέστερα στην (2.29)

$$C(x,t) = J_0 e^{-\lambda t} G'_0(x,t) \quad (3.9)$$

όπου $G'_0(x,t)$ είναι μία άλλη συνάρτηση Green:

$$G'_0(x,t) = \left(\frac{e^{\left(\frac{-(x-vt)^2}{4Dt}\right)}}{\sqrt{\pi Dt}} \right) - \left(\frac{v}{2D} \right) e^{\left(\frac{v \cdot x}{D}\right)} \operatorname{erfc}(Z) \quad (3.10)$$

στην οποία

$$\operatorname{erfc}(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_Z^\infty e^{-t^2} dt \quad (3.11)$$

με

$$Z = \frac{v\sqrt{t}}{2\sqrt{D}} + \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (3.12)$$

Δεδομένου ότι στην Σερβία (όπως και στην Ουγγαρία) υπήρξε στο παρελθόν (προ του 1986) σημαντική επιφανειακή απόθεση Cs-137 εξαιτίας των ατμοσφαιρικών πυρηνικών δοκιμών, η λύση (3.7) κατά τον Krstic' (2004) πρέπει να τροποποιηθεί στην:

$$C(x,t) = J_{CH}e^{-\lambda t}G_0(x,t) + J_{NT}e^{-\lambda(t+\tau)}G_0(x,t+\tau) \quad (3.13)$$

ενώ η λύση (3.9) πρέπει να τροποποιηθεί στην:

$$C(x,t) = J_{CH}e^{-\lambda t}G'_0(x,t) + J_{NT}e^{-\lambda(t+\tau)}G'_0(x,t+\tau) \quad (3.14)$$

Η πρακτική συνέπεια είναι, όπως και με την ερευνητική δουλειά που παρουσίασε ο Szerbin (1999), ότι με τη βοήθεια της λύσης (3.13) ή της (3.14) το μοντέλο εκτιμά πέρα από τους συντελεστές D και v και την αρχική επιφανειακή απόθεση του Cs-137, τόσο εξαιτίας του ατυχήματος στο Chernobyl (1^{05} σταθερός όρος J_{CH}), όσο και εξαιτίας των πυρηνικών δοκιμών (2^{05} σταθερός όρος J_{NT}). Στις εξισώσεις (3.13) και (3.14) ως τ ορίζεται ο χρόνος από την τελευταία ατμοσφαιρική δοκιμή έως το 1986. Γίνεται δεκτό ότι $\tau = 430$ μήνες.

3.4.2 Αποτελέσματα – Φαινόμενοι συντελεστές D και v

Μετά από μετρήσεις της συγκέντρωσης του Cs-137 ($Bq\ kg^{-1}$) σε διάφορα βάθη σε διάφορες χρονικές στιγμές σε συγκεκριμένες θέσεις δειγματοληψίας και τη χρήση των πιό πάνω μοντέλων εκτιμήθηκαν οι συντελεστές D και v σε κάθε περίπτωση. Παρόλο που οι μετρήσεις της συγκέντρωσης του Cs-137 εκτιμήθηκαν σε $Bq\ kg^{-1}$, δεν είναι σαφές αν έγιναν μετρήσεις της πυκνότητας του εδάφους κατά βάθος, προκειμένου να εξαλειφθεί η ανεπάρκεια του θεωρητικού -αναλυτικού μοντέλου διάχυσης – μεταφοράς, για την περιγραφή της κατακόρυφης μετανάστευσης ισοτόπου με δεδομένα κατά μάζας συγκέντρωσης. Προκειμένου να κατηγοριοποιηθεί ο τύπος του εδάφους στον οποίο έγιναν οι δειγματοληψίες μετρήθηκαν επίσης το pH (H_2O), το ποσοστό του ανθρακικού ασβεστίου ($CaCO_3$), η συγκέντρωση του K_2O και το ποσοστό της οργανικής ύλης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, ο Krstic' (2004) διαπιστώνει κατ' αρχήν ότι δεν φαίνεται να υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά

μεταξύ του μοντέλου που περιγράφεται από την εξίσωση (3.13) και εκείνου που περιγράφεται από την εξίσωση (3.14). Όπως και στην έρευνα του Szerbin (1999) για την Ουγγαρία έτσι και για τη Σερβία διαπιστώνεται ότι η επιφανειακή απόθεση Cs-137 εξαιτίας των ατμοσφαιρικών πυρηνικών δοκιμών είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την επιφανειακή απόθεση Cs-137 από το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl. Επιπλέον μοιάζει να είναι στατιστικά σημαντική η συσχέτιση του εκτιμηθέντος συντελεστή D από το ποσοστό της οργανικής ύλης (συντελεστής συσχέτισης ~ 0.5). Οι εκτιμηθέντες συντελεστές D και ν έχουν εύρος τιμών ως εξής:

$$D = 0.24 - 1.47 \text{ cm}^2 \text{ a}^{-1}, \nu = 0.0 - 0.31 \text{ cm a}^{-1}$$

αποτελέσματα που βρίσκονται σε καλή συμφωνία με εκείνα του Ivanov (1997) και του Szerbin (1999). Μάλιστα μπορεί κανείς να σημειώσει ότι επειδή φαίνεται όλα τα εδάφη που εξετάστηκαν να είναι παραπλήσιου τύπου το εύρος τιμών που παρουσιάζει ο Krstic' (2004) για τους συντελεστές D και ν , φαίνεται να είναι σαφώς πιο περιορισμένο από το αντίστοιχο που δίνουν οι Ivanov (1997), Szerbin (1999) αλλά και ο Bossew (2004β) (βλ. και στη συνέχεια).

3.4.3 Περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Από το σύνολο των αποτελεσμάτων που παρουσιάζει ο Krstic' (2004) συγκροτήθηκαν τα Διαγράμματα 3.9 και 3.10, τα οποία παρουσιάζουν την κατανομή συχνότητας των υπολογιζόμενων συντελεστών D και ν . Με την βοήθεια των υπόψιν δύο Διαγραμμάτων, προσδιορίστηκαν στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας οι πιθανότερες τιμές των συντελεστών D και ν με τη βοήθεια της λογαριθμοκανονικής προσαρμογής και το λογισμικό Origin 5.0 ως:

$$D = 0.66 \text{ cm}^2 \text{ a}^{-1}, \nu = 0.13 \text{ cm a}^{-1}$$

3.5 Εφαρμογή θεωρητικού – αναλυτικού μοντέλου από τον Bossew (2004β)

3.5.1 Γενικά

Ο Bossew (2004β) και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησε το θεωρητικό - αναλυτικό μοντέλο διάχυσης – μεταφοράς με όρους γραμμικής προσρόφησης – απορρόφησης, προκειμένου να περιγράψει την κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137 σε

αδιατάρακτα εδάφη της Αυστρίας. Λόγω του μεγάλου πλήθους δειγμάτων και των πολλών τοποθεσιών που ερευνήθηκαν, προκειμένου να συγκεντρωθούν πειραματικά αποτελέσματα για την αξιολόγηση του μοντέλου, δεν στάθηκε δυνατόν να γίνουν αναλύσεις για τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των εδαφών που ερευνήθηκαν, προκειμένου να κατηγοριοποιηθεί με κάποιο τρόπο ο τύπος τους, όπως π.χ. αυτές που έκανε ο Ivanov (1996), ο Szerbin (1999) και ο Krstic' (2004).

3.5.2 Αποτελέσματα – Φαινόμενοι συντελεστές D και ν

Μόνο κατακόρυφες δειγματοληψίες εδαφών για τις οποίες εκτιμήθηκαν τελικά συντελεστές D και ν σημαντικά μεγαλύτεροι του μηδενός αξιολογούνται ως αποδεκτά τεκμήρια κατακόρυφης μετανάστευσης. Συνοπτικά μπορεί να ειπωθεί ότι το εύρος των τιμών που εκτιμήθηκε για τους συντελεστές D και ν έχει ως εξής:

$$D = 0.05 - 0.5 \text{ cm}^2 \text{ a}^{-1}, \nu = 0.1 - 0.5 \text{ cm a}^{-1}$$

αποτελέσματα που βρίσκονται σε καλή συμφωνία με εκείνα του Ivanov (1997), του Szerbin (1999) και του Krstic' (2004). Ειδικά για τον εκτιμώμενο συντελεστή ν παρατηρείται ότι ο συντελεστής μεταβολής του σε κατακόρυφες δειγματοληψίες που αφορούν την ίδια περιοχή είναι συστηματικά μικρότερος από τον αντίστοιχο συντελεστή του συνόλου των δειγματοληψιών, πράγμα που δείχνει ότι κάθε έδαφος που εξετάστηκε συμπεριφέρεται με δικό του τρόπο σε ό,τι αφορά την κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137. Η παρατήρηση αυτή επαληθεύεται από την κατανομή συχνότητας των τιμών για το συντελεστή ν , όπως αυτή παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.11. Η υπόψιν κατανομή δεν απέχει σημαντικά από εκείνες που υπολογίσθηκαν στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας με βάση τα αποτελέσματα του Szerbin (1999) (βλ. Διαγράμματα 3.7 και 3.8). Αξίζει να σημειωθεί εδώ, ότι τα Διαγράμματα που παρουσιάζουν την κατανομή της συχνότητας για τους συντελεστές D και ν , είναι στην πραγματικότητα στατιστικά εργαλεία που δείχνουν ότι αυτοί οι συντελεστές ως υπολογιζόμενες παράμετροι ενός θεωρητικού μοντέλου, είναι στην ουσία τους "φαινόμενοι" διότι πέρα από την κατακόρυφη διάχυση και την κατακόρυφη μεταφορά ενός ραδιοϊσοτόπου στο έδαφος, αναπαριστούν και άλλες φυσικοχημικές διεργασίες. (ΣΣ: Σε προηγούμενη παράγραφο του τρέχοντος Κεφαλαίου εντοπίστηκε ως μία από αυτές, η κατακόρυφη μετανάστευση των "hot particles". Στο 2^ο Κεφάλαιο σημειώνονται ως τέτοιες διεργασίες η διήθηση και η

αποσάθρωση). Ο Bossew (2004β) αποδίδει το γεγονός ότι σε εδάφη από την ίδια περιοχή, μακροσκοπικά του ίδιου τύπου, παρατηρούνται μη ερμηνεύσιμες διακυμάνσεις στους υπολογιζόμενους συντελεστές D και ν , στο ότι δεν κατέστη δυνατόν να διερευνηθεί και να κατηγοριοποιηθεί το έδαφος με κάποιον από τους διαθέσιμους τρόπους.

3.6 Συμπεράσματα και σχόλια

Οι εργασίες που παρουσιάστηκαν μπορούν να κριθούν μεταξύ άλλων με επιστημονικά ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια. Οπωσδήποτε από όλες ξεχωρίζει εκείνη του Ivanov (1997), τόσο για την ικανοποιητική θεωρητική παρουσίαση του χρησιμοποιούμενου μοντέλου, όσο και για το πραγματικά μεγάλο πλήθος των μετρήσεων. Η εργασία του Bossew (2004β) δίνει αρκετό βάρος στη θεωρία και λιγότερο στην επεξεργασία και την παρουσίαση ενός κατά τα άλλα ικανοποιητικά μεγάλου πλήθους πειραματικών μετρήσεων σε εδάφη. Υπάρχει πάντως σχετική ασάφεια, ως προς το αν ο Bossew (2004β) επεξεργάζεται τις μετρήσεις του, λαμβάνοντας υπόψιν και το Cs-137 των ατμοσφαιρικών πυρηνικών δοκιμών. Όσο για τις εργασίες του Szerbin (1999) και του Krstic' (2004), αυτές διακρίνονται για τον σαφή και κατηγορηματικό τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζουν και ερευνούν τη μετανάστευση και των δύο συνιστωσών του Cs-137 που φαίνεται να υπάρχουν στα ευρωπαϊκά εδάφη: εκείνη των ατμοσφαιρικών πυρηνικών δοκιμών και εκείνη από το ατύχημα του Chernobyl.

Η πλειοψηφία των εργασιών αυτών διερευνώντας την κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137 σε ποικιλία εδαφών, με τη χρήση του θεωρητικού – αναλυτικού μοντέλου καταλήγουν σε σημαντικό εύρος για τις τιμές των συντελεστών D και ν . Ως τέτοιες εργασίες μπορούν να θεωρηθούν οι τρεις από τις πιο πάνω τέσσερις εφαρμογές [δηλ. αυτές των Ivanov (1997), Szerbin (1999) και Bossew (2004β)]. Αντίθετα, η εφαρμογή του Krstic' (2004), στην οποία τα εδάφη που εξετάστηκαν και μοντελοποιήθηκαν είναι λίγο ως πολύ της ίδιας περιοχής (Kragujevac, Σερβία), το εύρος των τιμών των συντελεστών D και ν είναι αρκετά πιο περιορισμένο. Ειδικά για την εφαρμογή που παρουσίασε ο Krstic' (2004) διαπιστώνεται ότι η πιθανότερη τιμή του συντελεστή D , είναι σχετικά μεγάλη σε σχέση με τις εκτιμήσεις των άλλων ερευνητών. Στην ίδια εργασία διαπιστώνεται ότι η πιθανότερη τιμή του συντελεστή ν είναι σχετικά μικρή

σε σχέση με τις εκτιμήσεις των άλλων ερευνητών. Από αυτά οδηγείται κανείς στο συμπέρασμα ότι ο Krstic' (2004) έκανε μετρήσεις και εφάρμοσε το θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο σε εδάφη σχετικά ξηρά, στα οποία κυριαρχεί η διάχυση, ενώ η μεταφορά (δια του νερού) έχει δεύτερο λόγο. Είναι εύλογο να υποτεθεί ότι και τα αδιατάρακτα εδάφη της Καρδίτσας και της Νάουσας, στα οποία έχει διαπιστωθεί η μέγιστη απόθεση από το Cs-137 του ατυχήματος του Chernobyl (Σιμόπουλος 1986; 1987, Simopoulos 1989 και Petropoulos 2001) παρουσιάζουν πιθανότατα τους ίδιους συντελεστές D και ν , με αυτούς της εργασίας του Krstic' (2004), καθόσον είναι εδάφη που ανήκουν, στην ίδια ευρύτερη γεωγραφική περιοχή, δέχονται περίπου το ίδιο ύψος βροχής κατ' έτος και χρησιμοποιούνται με παρόμοιο τρόπο.

Σε ό,τι αφορά τώρα την φαινόμενη ταχύτητα με την οποία κινείται το Cs-137 προς το κατώτερο έδαφος, είτε λόγω της διάχυσης, είτε λόγω της μεταφοράς, είτε από άλλη αιτία, είναι φανερό ότι το θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο, δεν μπορεί να δώσει απάντηση και μάλιστα απάντηση που να δίνει την εξάρτηση της ταχύτητας αυτής από το βάθος x . Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιούνται τα διαμερισματικά μοντέλα.

Σε ό,τι αφορά τέλος την αποτίμηση του θεωρητικού – αναλυτικού μοντέλου, επισημαίνεται, ότι γενικά παρέχονται λίγες έως καθόλου πληροφορίες σχετικές με την ακρίβεια που αυτό προσεγγίζει / προσομοιώνει τα πειραματικά αποτελέσματα από τις μετρήσεις της κατά βάθος κατανομής της συγκέντρωσης του Cs-137 σε διάφορα εδάφη σε διάφορες χρονικές στιγμές. Δείκτες όπως ο συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού, ο συντελεστής πολλαπλής συσχέτισης και ο συντελεστής RMS, δεν χρησιμοποιούνται ή δεν παρουσιάζονται. Δεν παρουσιάζονται γενικά ούτε σχολιάζονται ειδικά τα σφάλματα των συντελεστών D και ν . Είναι φανερό ότι αυτό συμβαίνει διότι τα πειραματικά δεδομένα τα οποία χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση των μοντέλων αυτών είναι λίγα στον αριθμό για να περιορίζουν το σφάλμα των συντελεστών D και ν , σε αποδεκτά επίπεδα, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι το θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο αποτυγχάνει, ή δεν είναι έγκυρο.

Στο επόμενο 4^ο Κεφάλαιο θα ακολουθήσει μία κατ'αρχήν περιγραφή των διαμερισματικών μοντέλων, θα παρουσιασθούν σχετικές εφαρμογές τους και θα διερευνηθεί το πώς αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της

ταχύτητας μετακίνησης του Cs-137 κατά το βάθος, ως συνάρτηση του βάθους αυτού. Σημειώνεται πάντως ότι στα διαμερισματικά μοντέλα, η ταχύτητα μετακίνησης δίνεται ως ρυθμός εξόδου του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου από οριζόντιο εδαφικό διαμέρισμα μικρού πάχους που βρίσκεται σε ορισμένο βάθος.

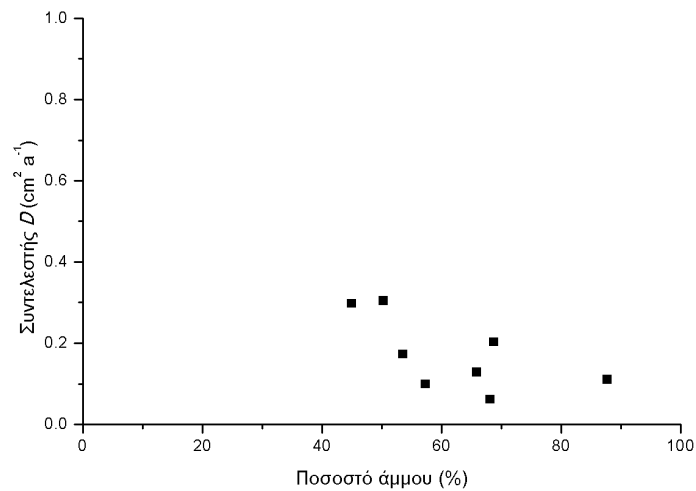
ΠΙΝΑΚΕΣ ΤΟΥ 3^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

<i>Έδαφος</i>	<i>Ποσοστό Άμμου (%)</i>	<i>Ποσοστό Αργίλου (%)</i>	<i>Ποσοστό Οργανικής Ύλης (%)</i>	<i>pH KCl</i>	<i>D (τυπική απόκλιση) cm² a⁻¹</i>	<i>ν (τυπική απόκλιση) cm a⁻¹</i>
1	87.7	5.6	1.2	4.7	0.11(-)	0.17(-)
2	68.7	6.1	0.3	4.6	0.202(-)	0.155(-)
3	68.1	<0.3	1	4.8	0.061(0.07)	0.085(0.12)
4	65.9	<0.3	1.1	6.1	0.128(0.043)	0.066(0.008)
5	57.3	0.3	4.5	4.2	0.098(0.036)	0.144(0.006)
6	45	1.6	7.5	4.8	0.297(0.11)	0.314(0.025)
7	53.5	2.9	2.9	4.6	0.172(0.113)	0.135(0.011)
8	50.3	4.9	6.8	4.9	0.304(0.077)	0.575(0.066)

Πίνακας 3.1

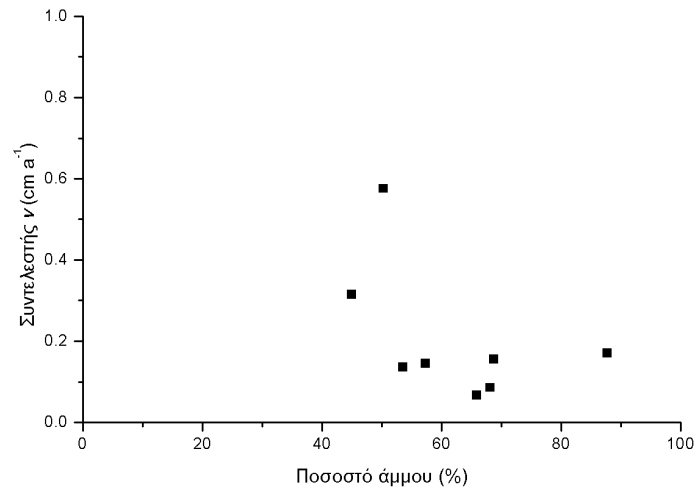
Συνοπτικές ιδιότητες εξετασθέντων εδαφών σε βάθος 0-20 cm και μέσες τιμές των εκτιμώμενων συντελεστών *D* και *ν* για την κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137 (Ivanov, 1997)

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 3^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



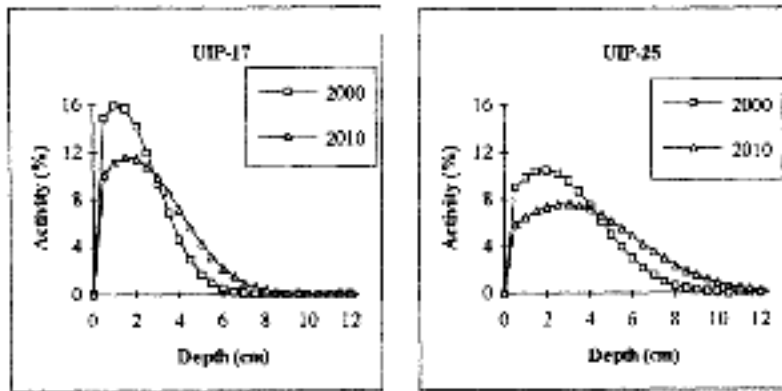
Διάγραμμα 3.1

Εξάρτηση του συντελεστή D για την κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137 σε βάθος 0-20 cm από το ποσοστό άμμου στο έδαφος, από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του Ιβανον (1997)



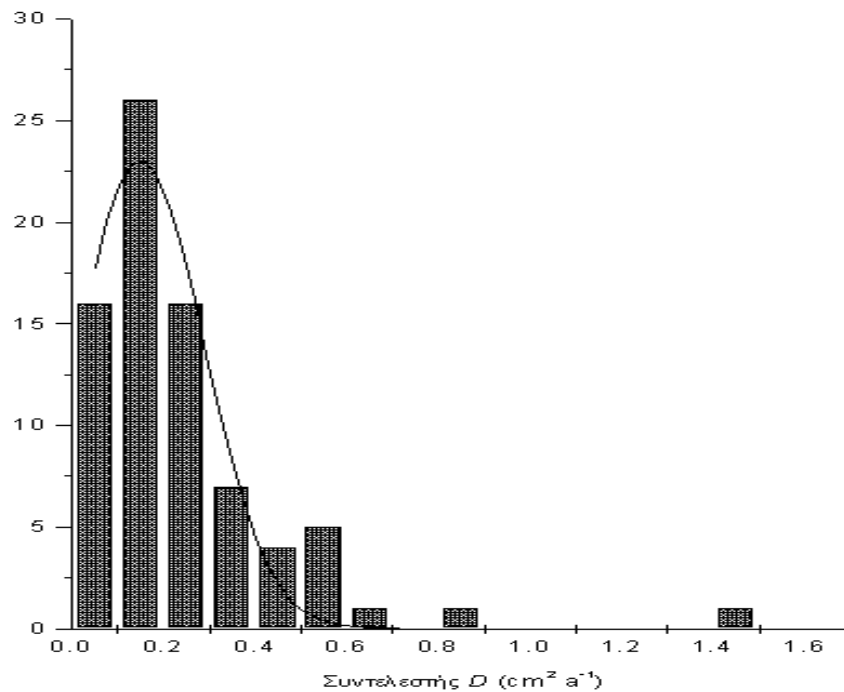
Διάγραμμα 3.2

Εξάρτηση του συντελεστή ν για την κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137 σε βάθος 0-20 cm από το ποσοστό άμμου στο έδαφος, από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του Ιβανον (1997)



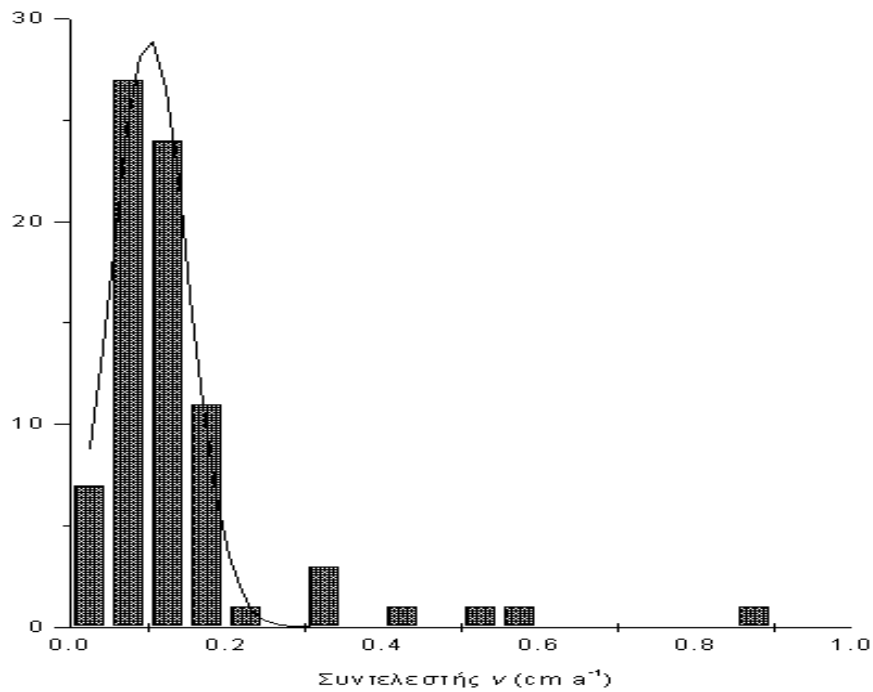
Διάγραμμα 3.3

Πρόβλεψη για την κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης του Cs-137 στα εδάφη "UIP-17" και "UIP-25" εντός της "ζώνης αποκλεισμού" του Chernobyl για τα έτη 2000 και 2010 (Ιβανον, 1997)



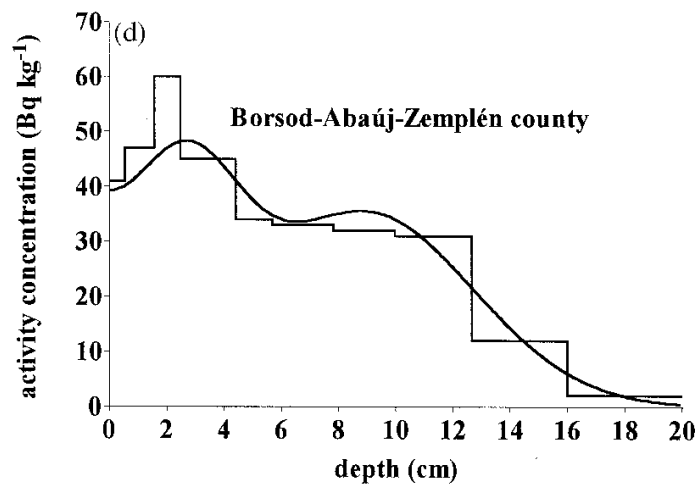
Διάγραμμα 3.4

Ιστογράμμο συντελεστή D , από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του Ιβανον (1997)



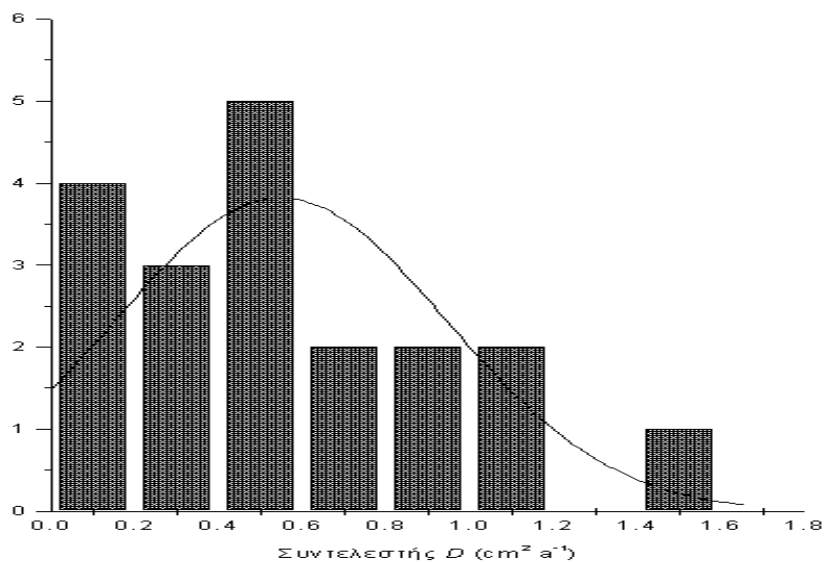
Διάγραμμα 3.5

Ιστόγραμμα συντελεστή ν , από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του Ιβανον (1997)



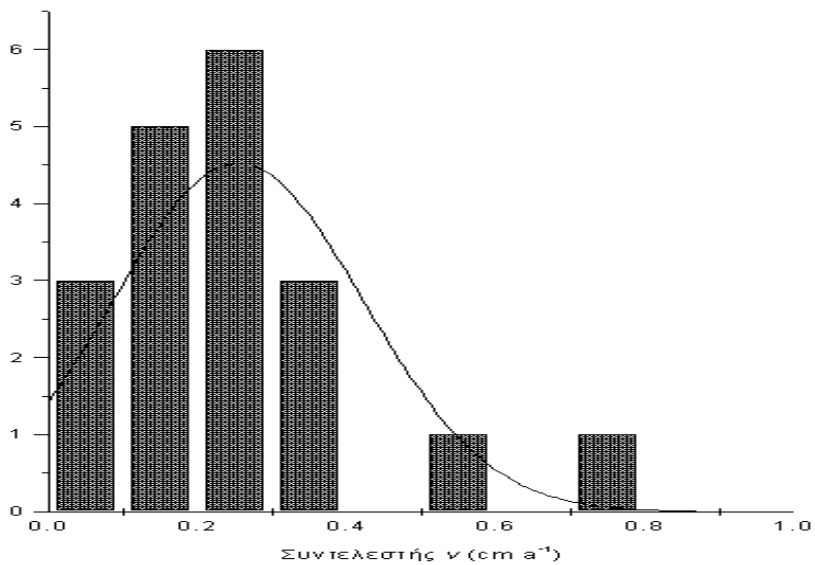
Διάγραμμα 3.6

Κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης του Cs-137 σε έδαφος της Ουγγαρίας με βάση πειραματικές μετρήσεις (ιστόγραμμα) και τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου (συνεχής γραμμή) (Szerbin, 1999).



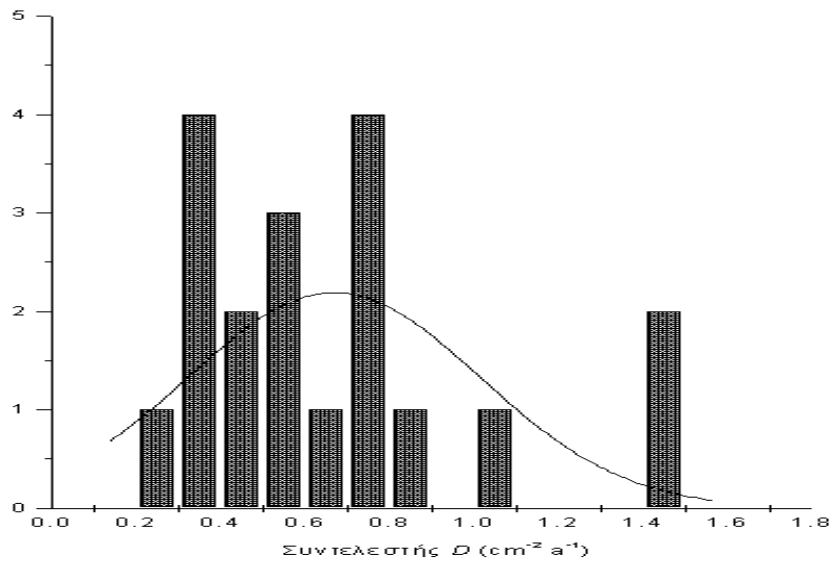
Διάγραμμα 3.7

Ιστόγραμμα συντελεστή D , από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του Szerbin (1999)



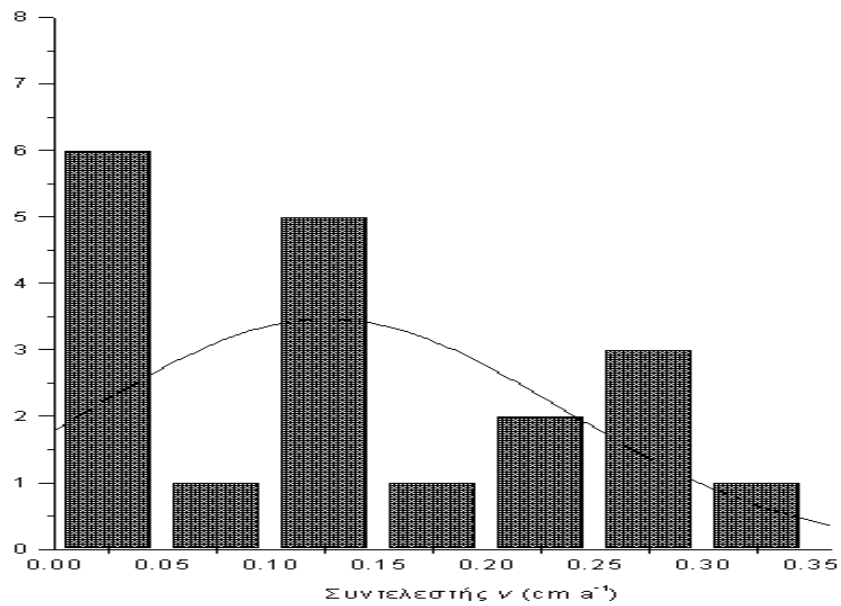
Διάγραμμα 3.8

Ιστόγραμμα συντελεστή ν , από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του Szerbin (1999)



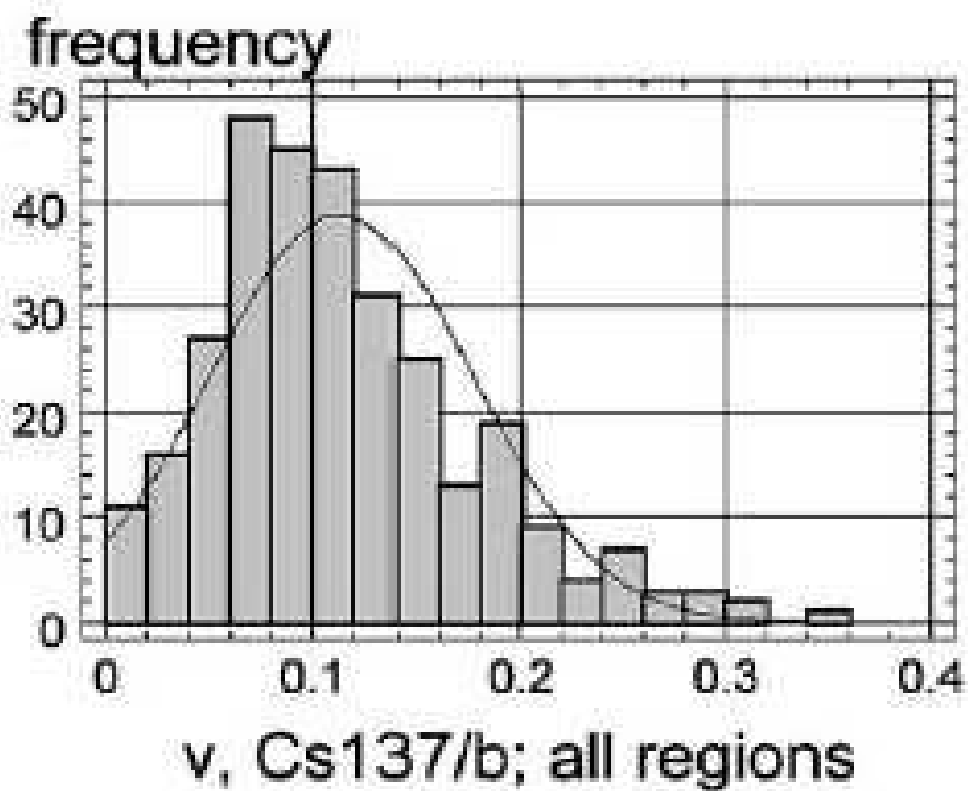
Διάγραμμα 3.9

Ιστόγραμμα συντελεστή D , από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του Krstic' (2004)



Διάγραμμα 3.10

Ιστόγραμμα συντελεστή ν , από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του Krstic' (2004)



Διάγραμμα 3.11

Ιστόγραμμα συντελεστή ν , από την εργασία του Bossew (2004β)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και στο 1^ο Κεφάλαιο, έχουν διατυπωθεί μοντέλα κατ' αρχήν κατάλληλα για την περιγραφή της κατακόρυφης μετανάστευσης ραδιοϊσοτόπου στο έδαφος, τα οποία βασίζονται στη παραδοχή της ύπαρξης διαδοχικών **"οριζοντίων εδαφικών διαμερισμάτων"** συνήθως μικρού πάχους (της τάξεως των 1 – 3 cm). Δηλαδή, δεδομένου ότι το έδαφος γενικά δεν είναι ομογενές και ισότροπο κατά το βάθος x και προκειμένου για την αποτελεσματική και ακριβή περιγραφή της μετανάστευσης των πυρήνων ενός ραδιοϊσοτόπου σε ένα τέτοιο έδαφος, αυτό μπορεί να διαχωρίζεται κατά βάθος σε οριζόντια εδαφολογικά στρώματα μικρού ή γενικά κατάλληλου πάχους, στο εσωτερικό των οποίων το έδαφος θεωρείται ομογενές και ισότροπο και προς την κατεύθυνση x . Τα οριζόντια αυτά εδαφολογικά στρώματα ονομάζονται διαμερίσματα (compartments). Από την περιγραφή αυτή προκύπτει, όπως έχει σημειωθεί, και η ονομασία των μοντέλων που βασίζονται στα οριζόντια εδαφικά διαμερίσματα ως **"διαμερισματικά"** (compartmental modeling). Στα (οριζόντια) σύνορα των εδαφικών διαμερισμάτων ισχύουν οριακές συνθήκες που εξασφαλίζουν το ισοζύγιο των πυρήνων των εξεταζόμενων ραδιοϊσοτόπων που μεταναστεύουν.

Γενικά η διαμερισματική μοντελοποίηση, παρόλο που μοιάζει να είναι ορθότερη επιστημονικά, δεν μπορεί να λειτουργήσει με ικανοποιητική απόδοση στην πράξη, διότι η εμπειρία δείχνει ότι η κατακόρυφη μετανάστευση ενός ραδιοϊσοτόπου δεν φθάνει γενικά σε μεγάλα βάθη και περιορίζεται έως την τάξη μεγέθους των μερικών εκατοστών (το πολύ γύρω στα 20) σε περίοδο 10 –20 ετών (Παπαδάκος, 2006). Αυτά τα λίγα εκατοστά κατακόρυφης μετανάστευσης δεν μπορούν να διαχωριστούν με ακρίβεια κατά οριζόντια εδαφικά διαμερίσματα μικρού πάχους με κοινές ιδιότητες. Επιπλέον η λεπτή διαμερισματική μοντελοποίηση κρύβει μέσα της την παραδοχή ότι η μετανάστευση γίνεται μόνο με μεταφορά, καθώς για λεπτά εδαφολογικά στρώματα δεν μπορεί να νοείται διάχυση, πράγμα που είναι καταφανώς λανθασμένο από φυσική άποψη. Εχει γίνει σαφές βέβαια από την άλλη μεριά, ότι για τα βάθη που ενδιαφέρουν στην κατακόρυφη μετανάστευση πυρήνων ραδιοϊσοτόπων το θεωρητικό - αναλυτικό μοντέλο,

στις διάφορες εκφράσεις του, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο 2^ο και το 3^ο Κεφάλαιο επίσης καταφανώς λανθασμένα δέχεται ότι το έδαφος μπορεί να θεωρηθεί ως μοναδικό ομογενές και ισότροπο κατά x , διαμέρισμα.

4.2 Το απλό διαμερισματικό μοντέλο

Έστω ότι για την διευκόλυνση της συνέχειας της διαπραγμάτευσης που θα ακολουθήσει, το κατακόρυφο έδαφος μπορεί να χωρισθεί σε πέντε (5) οριζόντια στρώματα μικρού πάχους, δηλαδή σε πέντε (5) διαμερίσματα, τα οποία για διευκόλυνση του αναγνώστη ονομάζονται για τις ανάγκες αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, "1" έως και "5". Τα υπόψιν διαμερίσματα διακρίνονται στο Διάγραμμα 4.1. Για τη διατύπωση απλών διαφορικών εξισώσεων που να αποδίδουν τη συγκέντρωση ενός ραδιοϊσοτόπου που μεταναστεύει κατακόρυφα με την πάροδο του χρόνου διασχίζοντας τα πέντε αυτά διαμερίσματα γίνονται οι ακόλουθες τρεις κύριες υποθέσεις:

(α) Η φυλλοροή δεν αυξάνει τη συγκέντρωση της ραδιενέργειας του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου στο 1^ο διαμέρισμα.

(β) Η απορρόφηση του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου από τις ρίζες των δένδρων και των φυτών (το λεγόμενο στα Αγγλικά root uptake) αγνοείται.

(γ) Η με κάποιο τρόπο μόνιμη "πρόσδεση" του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου σε συγκεκριμένο βάθος μέσω κυρίως φαινομένων γραμμικής προσρόφησης – απορρόφησης αγνοείται.

Για τις υποθέσεις (α) και (β) σημειώνονται τα εξής:

Η υπόθεση (α) μπορεί να ισχύει κυρίως σε εδάφη που δεν ανήκουν σε δάσος, ή ακόμα και σε δασικές εκτάσεις αειθαλών δένδρων, στις οποίες δεν βρέχει συχνά. Σε αντίθετη περίπτωση, φύλλα δένδρων στα οποία έχει αποτεθεί ραδιοϊσότοπο πέφτοντας στο έδαφος με την πάροδο του χρόνου αλλοιώνουν τις αρχικές συνθήκες, διότι προσθέτουν συνεχώς και νέες ποσότητες ραδιοϊσοτόπου στο 1^ο διαμέρισμα. Επίσης φύλλα δένδρων, στα οποία έχει αποτεθεί ραδιοϊσότοπο και τα οποία ξεπλένει η βροχή επίσης αλλοιώνουν τις αρχικές συνθήκες, διότι η βροχή παρασύρει συνεχώς και νέες ποσότητες ραδιοϊσοτόπου προς το 1^ο διαμέρισμα.

Η υπόθεση (β) ισχύει γενικά για εδάφη όπου τα ριζικά συστήματα αναπτύσσονται σε βάθη μεγαλύτερα από 10 – 15 cm και διαμερισματικά μοντέλα τα οποία ισχύουν για βάθη μικρότερα από αυτό το όριο.

Με βάση τα παραπάνω μπορεί να διατυπώνεται το ακόλουθο απλό σύστημα διαφορικών εξισώσεων:

$$\frac{dC_1}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda')C_1(t) \quad (4.1)$$

$$\frac{dC_2}{dt} = \lambda_1 C_1(t) - (\lambda_2 + \lambda')C_2(t) \quad (4.2)$$

$$\frac{dC_3}{dt} = \lambda_2 C_2(t) - (\lambda_3 + \lambda')C_3(t) \quad (4.3)$$

$$\frac{dC_4}{dt} = \lambda_3 C_3(t) - (\lambda_4 + \lambda')C_4(t) \quad (4.4)$$

$$\frac{dC_5}{dt} = \lambda_4 C_4(t) \quad (4.5)$$

όπου φυσικά:

$C_i(t)$ η συγκέντρωση του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου στο i -οστό διαμέρισμα (π.χ. σε % του συνόλου ή σε $Bq\text{m}^{-3}$ ή σε $Bq\text{m}^{-2}$ ή σε $Bq\text{kg}^{-1}$ ή σε άλλο) ως συνάρτηση του χρόνου,

λ' ο ρυθμός διασπάσεως του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου (a^{-1}), και

$\lambda_i + \lambda'$ ο ρυθμός καταστροφής του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου στο i -οστό διαμέρισμα (a^{-1}) – δηλαδή η έξοδος από το διαμέρισμα και η ραδιενεργός διάσπαση.

Η λύση του παραπάνω συστήματος διαφορικών εξισώσεων (4.1) – (4.5) είναι γνωστή αν όλα τα λ_i είναι διαφορετικά μεταξύ τους, και μπορεί να διατυπώνεται ως εξής:

$$C_1(t) = N_{11}e^{-(\lambda_1 + \lambda')t} \quad (4.6)$$

$$C_2(t) = N_{21}e^{-(\lambda_1 + \lambda')t} + N_{22}e^{-(\lambda_2 + \lambda')t} \quad (4.7)$$

και γενικά:

$$C_i(t) = N_{i1}e^{-(\lambda_1 + \lambda')t} + N_{i2}e^{-(\lambda_2 + \lambda')t} + \dots + N_{ii}e^{-(\lambda_i + \lambda')t} \quad (4.8)$$

όπου:

N σταθερές, που αν όλα είναι γνωστά μπορούν να υπολογίζονται από την αναδρομική σχέση:

$$N_{im} = N_{i-1,m} \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i - \lambda_m} \quad (4.9)$$

με $i = 2, 3, \dots, (n-1)$ και $i > m = 1, 2, \dots, (i-1)$

Οι σταθερές $N_{ij}, i=1, \dots, n, j=1, \dots, i$ πρέπει προφανώς να ικανοποιούν την συνθήκη:

$$C_i(t=0) = N_{i1} + N_{i2} + \dots + N_{ii} \quad (4.10)$$

Το άθροισμα των σταθερών N_{ij} αντιπροσωπεύει την αρχική συγκέντρωση του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου στο διαμέρισμα i τη χρονική στιγμή της αρχής των χρόνων ($t = 0$). Τέτοιες συγκεντρώσεις μπορούν να υπάρχουν αν ταυτόχρονα με τις ποσότητες ραδιοϊσοτόπων που οφείλονται σε απόθεση λόγω ατυχήματος, μεταναστεύουν κατακόρυφα και ποσότητες ραδιοϊσοτόπου που οφείλονται σε ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές.

Αν δεν υπάρχουν ποσότητες ραδιοϊσοτόπου που οφείλονται σε ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές τότε οι μοναδικές ποσότητες ραδιοϊσοτόπου που μεταναστεύουν είναι εκείνες που οφείλονται σε απόθεση λόγω ατυχήματος. Σε αυτήν την ειδική περίπτωση ισχύει:

$$C_i(t=0) = N_{i1} + N_{i2} + \dots + N_{ii} = 0, \quad i > 1 \quad (4.11)$$

4.3 Εφαρμογή του απλού διαμερισματικού μοντέλου από τον Rühm (1996; 1997)

Ο Rühm (1996; 1997) δέχεται ότι ένα απλό διαμερισματικό μοντέλο, μπορεί να έχει πέντε διαμερίσματα, τα γνωστά από την αμέσως προηγούμενη παράγραφο, "1" έως και "5". Τα υπόμιν διαμερίσματα διακρίνονται στο Διάγραμμα 4.1. Για τη διατύπωση απλών διαφορικών εξισώσεων που να αποδίδουν τη συγκέντρωση ενός ραδιοϊσοτόπου που μεταναστεύει κατακόρυφα με την πάροδο του χρόνου διασχίζοντας τα πέντε αυτά διαμερίσματα γίνονται δεκτές επίσης οι υποθέσεις (α), (β) και (γ) της προηγούμενης παραγράφου. Με βάση τα παραπάνω ο Rühm (1996; 1997) διατυπώνει το ακόλουθο απλό σύστημα διαφορικών εξισώσεων:

$$\frac{dC_1}{dt} = -\lambda_1 C_1(t) \quad (4.12)$$

$$\frac{dC_2}{dt} = \lambda_1 C_1(t) - \lambda_2 C_2(t) \quad (4.13)$$

$$\frac{dC_3}{dt} = \lambda_2 C_2(t) - \lambda_3 C_3(t) \quad (4.14)$$

$$\frac{dC_4}{dt} = \lambda_3 C_3(t) - \lambda_4 C_4(t) \quad (4.15)$$

$$\frac{dC_5}{dt} = \lambda_4 C_4(t) \quad (4.16)$$

όπου φυσικά:

$C_i(t)$ η συγκέντρωση του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου στο i -οστό διαμέρισμα (π.χ. σε % του συνόλου ή σε $Bq\text{m}^{-3}$ ή σε $Bq\text{m}^{-2}$ ή σε $Bq\text{kg}^{-1}$ ή σε άλλο) ως συνάρτηση του χρόνου, και

λ_i ο ρυθμός καταστροφής του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου στο i -οστό διαμέρισμα (a^{-1})

Η λύση του παραπάνω συστήματος διαφορικών εξισώσεων (4.12) – (4.16) είναι γνωστή αν όλα τα λ_i είναι διαφορετικά μεταξύ τους, και μπορεί να διατυπώνεται ως εξής (βλ. π.χ. Αγγελόπουλος, 1981):

$$C_1(t) = N_{11}e^{-\lambda_1 t} \quad (4.17)$$

$$C_2(t) = N_{21}e^{-\lambda_1 t} + N_{22}e^{-\lambda_2 t} \quad (4.18)$$

και γενικά:

$$C_i(t) = N_{i1}e^{-\lambda_1 t} + N_{i2}e^{-\lambda_2 t} + \dots + N_{ii}e^{-\lambda_i t} \quad (4.19)$$

όπου:

N σταθερές που αν όλα είναι γνωστά μπορούν να υπολογίζονται από την αναδρομική σχέση (4.9):

$$N_{im} = N_{i-1,m} \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i - \lambda_m}$$

με $i = 2, 3, \dots, (n-1)$ και $i > m = 1, 2, \dots, (i-1)$

Οι σταθερές N_{ij} , $i=1, \dots, n$, $j=1, \dots, i$ πρέπει προφανώς να ικανοποιούν την συνθήκη (4.10):

$$C_i(t=0) = N_{i1} + N_{i2} + \dots + N_{ii}$$

Και εδώ το άθροισμα των σταθερών N_{ij} αντιπροσωπεύει την αρχική συγκέντρωση του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου στο διαμέρισμα i τη χρονική στιγμή της αρχής των χρόνων ($t = 0$). Έχει σημειωθεί ήδη ότι τέτοιες συγκεντρώσεις μπορούν να υπάρχουν αν ταυτόχρονα με τις ποσότητες ραδιοϊσοτόπων που οφείλονται σε απόθεση λόγω

ατυχήματος, μεταναστεύουν κατακόρυφα και ποσότητες ραδιοϊσοτόπου που οφείλονται σε ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές.

Είναι προφανές ότι το υπόψιν σύστημα διαφορικών εξισώσεων (4.12) – (4.16) και η λύση του (4.17) – (4.19) ισχύει μόνο αν η μοναδική αιτία καταστροφής του ραδιοϊσοτόπου στο διαμέρισμα i είναι η μετανάστευσή του κατακόρυφα προς το διαμέρισμα $i + 1$. Αυτό βέβαια συμβαίνει μόνο όταν η πιθανότητα διασπάσεως του ισοτόπου είναι σαφώς μικρότερη από την πιθανότητα μεταναστεύσεώς του. Για την περίπτωση του Cs-137 θα πρέπει δηλαδή να είναι:

$$\lambda_i \gg \lambda_{Cs-137} \quad (4.20)$$

Αυτό θεωρείται ότι είναι πολύ πιθανό, παρόλαυτά δεν είναι σαφές πως το αξιοποιεί στην εργασία του ο Rühm (1996; 1997), κυρίως διότι απουσιάζουν από το σχετικό κείμενο τα πρωτογενή πειραματικά αποτελέσματα και δευτερευόντως διότι οι υπολογισμοί που πραγματοποιούνται αφορούν στο Cs-134, για το οποίο η συνθήκη (4.20) δεν ισχύει.

Και εδώ αν δεν υπάρχουν ποσότητες ραδιοϊσοτόπου που οφείλονται σε ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές τότε οι μοναδικές ποσότητες ραδιοϊσοτόπου που μεταναστεύουν είναι εκείνες που οφείλονται σε απόθεση λόγω ατυχήματος. Σε αυτήν την ειδική περίπτωση ισχύει πάλι η σχέση (4.11):

$$C_i(t=0) = N_{i1} + N_{i2} + \dots + N_{ii} = 0, \quad i > 1$$

4.4 Εφαρμογή του απλού διαμερισματικού μοντέλου στις μετρήσεις του Ivanov (1997)

Μπορεί να υποθεθεί ότι η μετανάστευση του Cs-137, ως ραδιοϊσοτόπου με μεγάλο χρόνο ημιζωής είναι δυνατόν να μοντελοποιείται με βάση το απλό διαμερισματικό μοντέλο, όπως αυτό διατυπώθηκε στην παράγραφο 4.2. Στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας εφαρμόστηκε η υπόψιν μοντελοποίηση στα πειραματικά αποτελέσματα του Ivanov (1997) ώστε να εξετασθούν οι εκτιμώμενες τιμές των συντελεστών λ_i . Παρατίθεται ο Πίνακας 4.1, ο οποίος είναι απόσπασμα από τα πρωτογενή πειραματικά αποτελέσματα του Ivanov (1997) για ένα έδαφος σε πέντε (5) βάθη, προκειμένου να χρησιμεύσει για την παρουσίαση του τρόπου εργασίας που ακολουθήθηκε.

Παρατηρώντας συγκεκριμένα τον υπόψιν Πίνακα, βλέπει κανείς ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων του έτους 1987 για την επί τοις εκατό κατανομή της κατά βάθος

συγκέντρωσης του Cs-137 για το έδαφος με κωδικό UIP-16, αναφέρονται σε εντελώς άλλα βάθη εδάφους σε σχέση με τα λοιπά αποτελέσματα των μετρήσεων των ετών 1990, 1992, 1993 και 1994. Επιπλέον διαπιστώνεται ότι ακόμα και για τα αποτελέσματα των μετρήσεων των ετών 1990, 1992, 1993 και 1994, τα βάθη στα οποία έγινε η έρευνα χωρίς να είναι πολύ διαφορετικά δεν είναι και ακριβώς ίδια.

Με βάση τα όσα παρατηρούνται σε αυτό το απόσπασμα από τα πειραματικά αποτελέσματα και για την πρόοδο της εφαρμογής της μοντελοποίησης πέραν των υποθέσεων (α), (β) και (γ) της παραγράφου 4.2 γίνεται ακόμα δεκτό ότι:

(i) Λαμβάνονται μόνο υπόψιν τα πειραματικά αποτελέσματα για έτη στα οποία τα βάθη που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις είναι παρόμοια. Επομένως στην περίπτωση του εδάφους UIP-16 (Πίνακας 4.1) τα αποτελέσματα του έτους 1987 δεν πρέπει να εξετασθούν και αγνοούνται.

(ii) Κάθε διαμέρισμα λογίζεται ως "πρώτο".

Με βάση την παραδοχή (i) μετατρέπεται ο Πίνακας 4.1 για το έδαφος UIP-16 (και κάθε άλλος αντίστοιχος ως παρόμοιο απόσπασμα από τα πειραματικά αποτελέσματα) στον επόμενο απλούστερο Πίνακα 4.2, ο οποίος κατατάσσει τις πειραματικές μετρήσεις συγκέντρωσης του εξεταζόμενου Cs-137 σε διάφορα βάθη κατά διαμερίσματα σχετικά μικρού πάχους και κατά έτη.

Με βάση την παραδοχή (ii) γίνεται αντιληπτό ότι για κάθε διαμέρισμα (π.χ. τα διαμερίσματα του Πίνακα 4.2) για την εφαρμογή της διαμερισματικής μοντελοποίησης πρέπει να εξετασθεί η προσαρμογή της εξίσωσης (4.6). Στόχος της προσαρμογής είναι να εκτιμηθεί η παράμετρος λ_i για κάθε διαμέρισμα και για κάθε έδαφος, αν είναι δυνατόν, για το οποίο παρέχει πειραματικά αποτελέσματα ο Ivanov (1997). Λαμβάνεται ότι $\lambda' = \lambda_{Cs-137} = 0.0229 \text{ a}^{-1}$.

Εφαρμόζοντας τα παραπάνω και με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα του Ivanov (1997) διαμορφώνεται ο Πίνακας 4.3, ο οποίος περιέχει τις ζητούμενες εκτιμώμενες τιμές για την παράμετρο λ_i . Π.χ. η εκτιμηθείσα τιμή της παραμέτρου λ_i για το 1^ο διαμέρισμα του εδάφους UIP-16 προέκυψε από την προσαρμογή της (4.6) στα σκιασμένα πειραματικά δεδομένα της πρώτης γραμμής του Πίνακα 4.2 και υπολογίζεται σε $0.025 \pm 0.004 \text{ a}^{-1}$, όπως διακρίνεται στο 1^ο πάνω αριστερά σκιασμένο κελί του Πίνακα 4.3. Συνολικά, ο Πίνακας 4.3 παρέχει εκτιμώμενες τιμές για την παράμετρο λ_i

για εννέα (9) από τα δώδεκα (12) εδάφη, για τα οποία ο Ivanov (1997) παρέχει πειραματικά αποτελέσματα για την κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης του Cs-137 στο διάστημα 1987 έως 1994. Οι εκτιμήσεις έγιναν με τη χρήση του λογισμικού QtiPlot 0.9.0-rc2, το οποίο αποτελεί κλώνο του λογισμικού τύπου Origin.

4.5 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων της παραγράφου 4.4

Αβίαστα, οδηγείται κανείς, εξετάζοντας τον Πίνακα 4.3, στο συμπέρασμα ότι τα πειραματικά αποτελέσματα τα οποία έχει συγκεντρώσει ο Ivanov (1997), δεν είναι ποσοτικά αρκετά για την καλή εφαρμογή του διαμερισματικού μοντέλου με αποτέλεσμα οι εκτιμήσεις που γίνονται για τις τιμές της παραμέτρου λ_i να μην είναι καλής ακρίβειας. Σε αντιδιαστολή παρατηρείται ότι ο Rühm (1996;1997), συγκέντρωσε πολλά περισσότερα αποτελέσματα σε λιγότερα εδάφη με αποτέλεσμα να πετύχει καλύτερη ακρίβεια. Βέβαια ο Rühm (1996;1997) έλυσε με βάση της μετρήσεις του το σύστημα των εξισώσεων (4.19). Στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής δεν αποπειράθηκε τέτοια λύση. Γίνεται πάντως φανερό ότι η εφαρμογή του διαμερισματικού μοντέλου απαιτεί αρκετές περισσότερες μετρήσεις από την εφαρμογή του θεωρητικού – αναλυτικού. Ως αποτέλεσμα η εφαρμογή του διαμερισματικού μοντέλου στα πειραματικά αποτελέσματα του Ivanov (1997), οδηγεί μάλλον σε ποιοτικές παρά σε ποσοτικές εκτιμήσεις. Σημειώνεται μάλιστα ότι τα κενά στον Πίνακα 4.3 οφείλονται σε εκτιμήσεις για την παράμετρο λ_i των οποίων είτε το σφάλμα απείχε τάξεις μεγέθους από την υπολογιζόμενη τιμή από την προσαρμογή, είτε ο συντελεστής συσχέτισης ήταν πάρα πολύ χαμηλός.

Οι εκτιμήσεις που γίνονται για τις τιμές της παραμέτρου λ_I στο πρώτο διαμέρισμα δεν έχουν γενικά μεγάλα σφάλματα. Η τάξη μεγέθους των τιμών της παραμέτρου λ_I στο πρώτο διαμέρισμα δεν διαφέρει γενικά από την τάξη μεγέθους της πιθανότητας διασπάσεως του Cs-137. Διαπιστώνεται βέβαια μία εκτίμηση όπου $\lambda_I < 1$ (βλ. Πίνακα 4.3, έδαφος 3) και επίσης δύο περιπτώσεις όπου το λ_I δεν μπορεί να προσδιορισθεί. (βλ. Πίνακα 4.3, έδαφος 5 και 7). Είναι πολύ πιθανό ότι αυτά οφείλονται σε φυλλορροή μολυσμένης με Cs-137 βλάστησης προς το έδαφος, ή σε βροχή που ξεπλένει την υπερκείμενη βλάστηση από το Cs-137 και το οδηγεί στο επιφανειακό έδαφος. Επομένως παρατηρείται ότι η υπόθεση (α) που διατυπώθηκε στην παράγραφο 4.2 δεν ισχύει πάντα.

Στην πλειοψηφία των υπολοίπων διαμερισμάτων οι εκτιμήσεις που γίνονται για τις τιμές της παραμέτρου λ_i είναι αρνητικές εκτιμώνται με μεγάλα σφάλματα, πράγμα που υποδεικνύει ότι:

- υπάρχει είσοδος με έντονο ρυθμό του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου Cs-137 στα διαμερίσματα i , με $i > 1$
- ο ενλόγω ρυθμός εισόδου είναι σαφέστερος, όταν παρουσιάζει μεγάλες τιμές και μικρό σφάλμα (π.χ. 2^ο διαμέρισμα εδάφους γενικά).
- είναι μάλλον απίθανο το έδαφος στα διαμερίσματα i , με $i > 1$, να είναι απαλλαγμένο από Cs-137, που να οφείλεται στις ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές. Ένδειξη για αυτό αποτελεί ότι τα λ_i δεν συνεχίζουν αρνητικά μετά το 3^ο διαμέρισμα, όπως ίσως θα περίμενε κανείς.
- το γεγονός ότι δεν είναι σαφές σε ποιο διαμέρισμα (2^ο, 3^ο, 4^ο ή 5^ο) παρουσιάζονται τα απολύτως μεγαλύτερα αρνητικά λ_i δηλώνει, ότι το φαινόμενο της μετανάστευσης βρίσκεται σε εξέλιξη.
- το γεγονός ότι κατά κανόνα το 5^ο διαμέρισμα δεν φαίνεται να συγκεντρώνει –όσο μπορεί να πει κανείς– μεγάλες απόλυτες τιμές των αρνητικών λ_i , προεξοφλεί πρακτικά ότι το φαινόμενο μετανάστευσης εξελίσσεται και σε επόμενο 6^ο διαμέρισμα που δεν έχει ληφθεί υπόψιν στην εφαρμογή αυτή. Είναι φανερό ότι αν πράγματι το 5^ο διαμέρισμα είναι το τελευταίο, τότε επειδή ισχύει η διαφορική εξίσωση (4.5) ή σχεδόν ισοδύναμα η (4.16), η συγκέντρωση του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου θα έπρεπε να αυξάνει απότομα και εκθετικά.

Συνολικά εξετάζοντας τις εκτιμηθείσες τιμές, μπορεί κανείς να πει ότι γενικά η παράμετρος λ_i στα περισσότερα από τα εξεταζόμενα διαμερίσματα πλην του πρώτου, παρουσιάζει τιμές που είναι μία συνήθως τάξη μεγέθους μεγαλύτερες από την πιθανότητα διασπάσεως του Cs-137 (υπενθυμίζεται $\lambda_{Cs-137} = 0.0229 \text{ a}^{-1}$). Αυτό το γεγονός δικαιολογεί την διατύπωση του απλού διαμερισματικού μοντέλου, όπως αυτή παρουσιάστηκε από τον Rühm (1996; 1997) και δίνεται από τη λύση (4.19). Τα αποτελέσματα τα σχετικά με αυτόν τον ρυθμό εισόδου στα διάφορα διαμερίσματα μπορούν να αλλάξουν σημαντικά μετά από συμπληρωματικές δειγματοληψίες στα ίδια εδάφη στα ίδια διαμερίσματα σε επόμενες χρονικές στιγμές καταδεικνύοντας έτσι φυσικά την εξάρτηση της παραμέτρου λ_i από τον χρόνο, ή ισοδύναμα των συντελεστών

D και ν που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια επίσης από τον χρόνο. Το Διάγραμμα 4.2 αποτυπώνει γραφικά τόσο την λύση (4.8) όσο και τη λύση (4.19) σε προσεγγιστική γραφιστική αναπαράσταση. Η αρχική συγκέντρωση του μεταναστεύοντος Cs-137 στα διαμερίσματα 2 έως 4 θεωρείται "0", ισχύει δηλαδή η σχέση (4.11). Σε αντίθετη περίπτωση, που προϋπάρχει της αρχής των χρόνων Cs-137 στα διαμερίσματα $i > 1$ οι καμπύλες που περιγράφουν την μεταβολή της συγκέντρωσης του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου σε αυτά, δεν θα ξεκινούσαν στο Διάγραμμα 4.2 από το σημείο $(0,0)$ αλλά από άλλο $(0, y_i)$, $y_i = C_i(t=0) > 0$, $i > 1$. Διακρίνονται στο υπόψιν γράφημα τόσο η "έξοδος" του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου από το πρώτο διαμέρισμα όσο και η "είσοδος" του στα επόμενα διαμερίσματα. Φαίνεται και γραφικά, ότι το χρονικό διάστημα που συλλέχθηκαν τα περισσότερα πειραματικά αποτελέσματα εντάσσεται στην σκιασμένη περιοχή του γραφήματος. Εξαιρείται ίσως το έδαφος "5" (UIP-20) για το οποίο φαίνεται ότι το χρονικό διάστημα της πειραματικής διερεύνησης το βρίσκει σε πλήρη μετανάστευση προς τα βαθύτερα τμήματα του εδάφους. Πράγματι, αν ανατρέξει κανείς στην εφαρμογή του θεωρητικού-αναλυτικού μοντέλου για αυτό το έδαφος διαπιστώνει ότι παρουσιάζονται εκεί σχετικά μεγαλύτεροι συντελεστές D και ν . Έτσι λοιπόν για το έδαφος UIP-20, η χρήση του διαμερισματικού μοντέλου επαληθεύει τη σχετικά μικρότερη (ταχύτερη) κλίμακα χρόνου στην οποία εξελίσσονται εκεί τα φαινόμενα μετανάστευσης.

4.6 Σύνθετο διαμερισματικό μοντέλο

Το φαινόμενο που κυρίως αγνοείται στο απλό διαμερισματικό μοντέλο είναι τα φαινόμενα προσρόφησης – απορρόφησης του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου σε κάθε ένα οριζόντιο εδαφολογικό διαμέρισμα. Δευτερευόντως αγνοείται η συνεχής απόθεση επιπλέον ραδιοϊσοτόπου στο 1^ο οριζόντιο εδαφικό διαμέρισμα, η οποία είναι βέβαιο ότι συμβαίνει, για το πρώτο κυρίως χρονικό διάστημα μετά από ένα ατύχημα, κυρίως σε δάση, μέσω της φυλλορροής και λόγω της απόπλυσης της υπερκείμενης βλάστησης από την βροχή. Για το λόγο αυτό διατυπώθηκαν σύνθετα διαμερισματικά μοντέλα, τα οποία κατά κανόνα επιδέχονται αριθμητικής επίλυσης. Ένα από αυτά τα μοντέλα θα παρουσιασθεί εδώ προκειμένου να δοθεί πληρέστερη εικόνα των διαθέσιμων εργαλείων μοντελοποίησης.

Στη διαπραγμάτευση που θα ακολουθήσει στην συνέχεια και σε όλες τις επόμενες παραγράφους θεωρούνται γνωστές όλες οι μεταβλητές των οποίων οι συμβολισμοί έχουν

ήδη αναφερθεί σε αυτό ή προηγούμενα Κεφάλαια. Περιγράφονται μόνο οι αναγκαίες νεότερες που εισάγονται για πρώτη φορά.

Αν υποθεθεί ότι ο ρυθμός κατακόρυφης μετανάστευσης του ραδιοϊσοτόπου είναι πολύ μεγαλύτερος από τον ρυθμό ραδιενεργού διάσπασης τότε στο πρώτο διαμέρισμα, η διαφορική εξίσωση της μεταβολής της συγκέντρωσης $C_1(t)$ του ελεύθερου προς μετανάστευση ραδιοϊσοτόπου με το χρόνο γράφεται ως:

$$\frac{dC_1}{dt} = [\text{εισοδος "0"}] + [\text{εξοδος "A"}] + [\text{εισοδος "B"}] \quad (4.21)$$

όπου:

$$[\text{εισοδος "0"}] = \lambda_b \sum_1^{N_B} C_1(t) \quad (4.22)$$

$$[\text{εξοδος "A"}] = -(\lambda_{m,1} + \lambda_{f,1})C_1(t) \quad (4.23)$$

$$[\text{εισοδος "B"}] = \lambda_{d,1}f_1(t) \quad (4.24)$$

$$\frac{df_1}{dt} = \lambda_{f,1}C_1(t) - \lambda_{d,1}f_1(t) \quad (4.25)$$

Για την [είσοδο "0"]:

λ_b είναι ο ρυθμός εισόδου ραδιοϊσοτόπου στο 1^ο εδαφολογικό διαμέρισμα (a^{-1})

Για τη διαπίστωση του ρυθμού εισόδου πρέπει να εξετάζονται μέχρι και N_B υπερκείμενα του εδάφους στρώματα φύλλων – νερού.

Για την [έξοδο "A"]:

$\lambda_{m,1}$ και γενικά $\lambda_{m,i}$ είναι ο ρυθμός εξόδου του ραδιοϊσοτόπου από το i διαμέρισμα προς το $i + 1$ διαμέρισμα (a^{-1})

$\lambda_{f,1}$ και γενικά $\lambda_{f,i}$ είναι ο ρυθμός εξόδου του ραδιοϊσοτόπου από το i διαμέρισμα λόγω προσρόφησης – απορρόφησης στο ίδιο διαμέρισμα (a^{-1}). Δεν πρόκειται φυσικά για πραγματική έξοδο. Το ποσοστό του ραδιοϊσοτόπου που συμμετέχει σε αυτή τη διεργασία "προσδένεται" στο i διαμέρισμα και δεν είναι πλέον διαθέσιμο προς κατακόρυφη μετακίνηση. Πρόκειται λοιπόν για "έξοδο" από το συνολικό φαινόμενο της μετανάστευσης.

Για την [είσοδο "B"]:

$f_i(t)$ και γενικά $f_i(t)$ είναι συνάρτηση του χρόνου που εκφράζει τον τρόπο με τον οποίο το ραδιοϊσότοπο προσροφάται – απορροφάται στο i διαμέρισμα

$\lambda_{d,i}$ και γενικά $\lambda_{d,i}$ είναι ο ρυθμός αναστροφής της προσρόφησης – απορρόφησης (δηλ. της απελευθέρωσης για μετανάστευση) του ραδιοϊσοτόπου στο i διαμέρισμα (a^{-1})

Στο i -οστό ($i > 2$) διαμέρισμα η διαφορική εξίσωση (4.21) τροποποιείται στην:

$$\frac{dC_i}{dt} = \lambda_{m,i-1}C_{i-1}(t) - (\lambda_{m,i} + \lambda_{f,i})C_i(t) + \lambda_{d,i}f_i(t) \quad (4.26)$$

με

$$\frac{df_i}{dt} = \lambda_{f,i}C_i(t) - \lambda_{d,i}f_i(t) \quad (4.27)$$

Το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων (4.21), (4.25), (4.26) και (4.27) μπορεί να λύνεται αριθμητικά με βάση πειραματικά αποτελέσματα και οριακές συνθήκες, για τον προσδιορισμό των σταθερών λ . Το σύνθετο διαμερισματικό μοντέλο έχει δοκιμασθεί για δασικά εδάφη, όπου μπορούν να γίνονται δειγματοληψίες σε μικρά κατά βάθος βήματα πάχους ενός – δύο εκατοστόμετρων ώστε να συγκεντρώνονται πειραματικές μετρήσεις για 15 έως και 25 διαμερίσματα. Σύμφωνα με την Environmental – Studies (2007α; 2007β) που δοκίμασε το μοντέλο αυτό:

$$\lambda_{m 1, 2, 3} = 0.59 \pm 0.12 a^{-1} \text{ για το βάθος } 0 \text{ έως } 6 \text{ cm}$$

$$\lambda_{m 4-15} = 0.50 \pm 0.10 a^{-1} \text{ για το βάθος } > 6 \text{ cm}$$

Παρατηρείται ότι οι τιμές αυτές δεν διαφέρουν σημαντικά από εκείνες του Πίνακα 4.3. Επίσης σύμφωνα με τους ίδιους μελετητές:

$$\lambda_f = 0.59 \pm 0.18 a^{-1} \quad \lambda_d = 0.68 \pm 0.23 a^{-1}$$

Το Διάγραμμα 4.3 παρουσιάζει σχηματική παράσταση του σύνθετου διαμερισματικού μοντέλου.

4.7 Αναλυτικό διαμερισματικό μοντέλο

4.7.1 Εισαγωγή

Το αναλυτικό διαμερισματικό μοντέλο είναι εξέλιξη του σύνθετου μοντέλου, στην κατεύθυνση της ένταξης και άλλων φυσικών διεργασιών που επηρεάζουν το φαινόμενο.

Για το σύνθετο διαμερισματικό μοντέλο με μεγάλες ταχύτητες μετανάστευσης σε σχέση με το χρόνο ημιζωής του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου στο i – ιοστό διαμέρισμα, η διαφορική εξίσωση της μεταβολής της συγκέντρωσής του με το χρόνο είναι η (4.26):

$$\frac{dC_i}{dt} = \lambda_{m,i-1}C_{i-1}(t) - (\lambda_{m,i} + \lambda_{f,i})C_i(t) + \lambda_{d,i}f_i(t)$$

Είναι δυνατόν να προστεθούν όροι καταστροφής "Κ" ή δημιουργίας "Δ", όπως:

- "Κ" η ραδιενεργός διάσπαση του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου, οπότε η (4.26) γράφεται:

$$\frac{dC_i}{dt} = \lambda_{m,i-1}C_{i-1}(t) - (\lambda_{m,i} + \lambda_{f,i} + \lambda')C_i(t) + \lambda_{d,i}f_i(t) \quad (4.28)$$

- "Δ" η ραδιενεργός διάσπαση πατρικών του εξεταζόμενου ραδιοϊσοτόπου πυρήνων, που ενδεχόμενα βρίσκονται μέσα στο υπόψιν διαμέρισμα, έχουν συγκέντρωση $C_{p,i}(t)$, και σταθερή διασπάσεως λ_p , οπότε η (4.28) γράφεται:

$$\frac{dC_i}{dt} = \lambda_{m,i-1}C_{i-1}(t) - (\lambda_{m,i} + \lambda_{f,i} + \lambda')C_i(t) + \lambda_{d,i}f_i(t) + \lambda_p C_{p,i}(t) \quad (4.29)$$

- "Δ" η τυχόν απευθείας είσοδος του εξεταζόμενου ραδιοϊσοτόπου στο i – οστό διαμέρισμα χωρίς να συμμετέχουν φυσικοχημικές διεργασίες που έχουν να κάνουν με αυτά που συμβαίνουν στο διαμέρισμα $i - 1$, στο i ή στο $i + 1$, οπότε η (4.29) γράφεται:

$$\frac{dC_i}{dt} = \lambda_{m,i-1}C_{i-1}(t) - (\lambda_{m,i} + \lambda_{f,i} + \lambda')C_i(t) + \lambda_{d,i}f_i(t) + \lambda_p C_{p,i}(t) + S_i(t) \quad (4.30)$$

όπου η συνάρτηση $S_i(t)$ έχει τις διαστάσεις του $[C_i(t)] \times [a^{-1}]$

- "Κ" και "Δ", άλλες είσοδοι και έξοδοι του ραδιοϊσοτόπου οι οποίες οφείλονται σε j φαινόμενα που είναι δύσκολο να περιγραφούν όπως π.χ. η διήθηση, οπότε η (4.30) γράφεται:

$$\frac{dC_i}{dt} = \lambda_{m,i-1}C_{i-1}(t) - (\lambda_{m,i} + \lambda_{f,i} + \lambda')C_i(t) + \lambda_{d,i}f_i(t) + \lambda_p C_{p,i}(t) + S_i(t) + \sum_j \phi_j \quad (4.31)$$

όπου η συνάρτηση $\phi_j(t)$ έχει τις διαστάσεις του $[C_i(t)] \times [a^{-1}]$

4.7.2 Η κυριότερες συναρτήσεις $\phi(t)$

Από όλες τις συναρτήσεις $\phi(t)$ που ενδιαφέρουν η πλέον σημαντικότερες είναι η διάχυση και η μεταφορά. Σε ό,τι αφορά τη μεταφορά από το διαμέρισμα $i - 1$ στο i , μπορεί κανείς να πει με ασφάλεια, ότι εκφράζεται με τον γενικευμένο όρο,

$$\lambda_{m,i-1}C_{i-1}(t)$$

ο οποίος "κρύβει" έναν σημαντικό αριθμό φαινομένων, των οποίων οι λεπτομέρειες δεν είναι σκόπιμο να αναφερθούν.

Σε ό,τι αφορά τη διάχυση αν θεωρηθεί ότι το μεταναστεύον ραδιοϊσότοπο στο έδαφος είναι διάλυμα στερεού σε στερεό τότε η συνάρτηση $\phi_j(t)$ ($j =$ διάχυση) θεωρείται ότι είναι:

$$\phi(t) = -d(C_i(t) - C_{i+1}(t)) \quad (4.32)$$

όπου d συντελεστής διάχυσης του ραδιοϊσοτόπου (a^{-1})

Έτσι τελικά η (4.31) γίνεται:

$$\frac{dC_i}{dt} = \lambda_{m,i-1}C_{i-1}(t) - (\lambda_{m,i} + \lambda_{f,i} + \lambda')C_i(t) + \lambda_{d,i}f_i(t) + \lambda_p C_{p,i}(t) + S_i(t) - d(C_i(t) - C_{i+1}(t)) \quad (4.33)$$

4.7.3 Η λύση

Το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων (4.33) μπορεί να διατυπωθεί σε μορφή πινάκων ως εξής:

$$\left[\frac{dC}{dt}\right] = [L][C] + [S] \quad (4.34)$$

όπου $[L]$ ένας πίνακας που περιέχει όλους τους συντελεστές που καταστρέφουν ή δημιουργούν συγκεντρώσεις του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου στα διάφορα διαμερίσματα.

Το σύστημα (4.34) επιδέχεται αριθμητικής λύσης αν είναι πλήρως γνωστός ο πίνακας $[L]$.

4.8 Συμπεράσματα και σχόλια

Τα διαμερισματικά μοντέλα είναι κατάλληλα για την μοντελοποίηση της κατακόρυφης μετανάστευσης ραδιοϊσοτόπου στο έδαφος. Είναι μάλιστα χρήσιμα για την διαπίστωση της προόδου της μετανάστευσης σε συγκεκριμένο βάθος. Παρόλαυτά, για να

λειτουργήσουν σωστά και να αποδώσουν χρειάζονται πολλές και ακριβείς μετρήσεις στο έδαφος σε βάθη που αυξάνουν κατά μικρά βήματα. Δυστυχώς ούτε εύκολες είναι αυτές οι μετρήσεις, ούτε φθηνές. Επιπλέον η ακρίβειά τους είναι αμφισβητούμενη όταν οι συγκεντρώσεις του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου είναι μικρές ή τα βήματα βάθους είναι μεγαλύτερα από όσο θα έπρεπε (βλ. και την διαπραγμάτευση που ακολούθησε την συγκρότηση του Πίνακα 4.3, στο προηγούμενο κείμενο). Με άλλα λόγια η προσομοίωση με βάση τα διαμερισματικά μοντέλα αποδίδει πολύ περισσότερο αν η αρχική απόθεση του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου στο επιφανειακό έδαφος είναι ποσοτικά πολύ ισχυρή. Αν από την άλλη μεριά χρησιμοποιείται το διαμερισματικό μοντέλο, ας πούμε υπό τη μορφή του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων (4.33) για την πρόβλεψη της μετανάστευσης κατά βάθος, είναι τελικά ποσοτικά πολλοί εκείνοι οι γενικά άγνωστοι συντελεστές τις τιμές των οποίων πρέπει κανείς να εντοπίσει, προκειμένου να έχει ικανοποιητική ακρίβεια στην πρόβλεψή του. Σε αντιδιαστολή τα θεωρητικά – αναλυτικά μοντέλα είναι πολύ απλούστερα και λειτουργούν αρκετά ικανοποιητικά για προβλέψεις σε βάθος χρόνου, αρκεί να είναι γνωστές οι τιμές δύο και μόνο συντελεστών: του D και του ν . Όπως πάντως σημειώθηκε και στο 3^ο Κεφάλαιο τα σφάλματα προσδιορισμού των υπόψιν συντελεστών από την προσαρμογή του θεωρητικού – αναλυτικού μοντέλου σε διαθέσιμες μετρήσεις κατά βάθος συγκέντρωσης δεν διατίθενται σε ικανοποιητική πληρότητα από την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Ενδεχόμενα μάλιστα τα σφάλματα αυτά να είναι αρκετά μεγάλα ώστε από κάποια χρονική στιγμή και μετά να αρκεί η εφαρμογή κάποιου εμπειρικού μοντέλου για να περιγράψει την κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου. Η περιγραφή αυτή είναι δυνατόν να ισχύει για μεγάλο χρονικό διάστημα μέσα στα πλαίσια του σφάλματος του εμπειρικού μοντέλου. Εφαρμογές εμπειρικών μοντέλων θα εξετασθούν στο 5^ο Κεφάλαιο.

ΠΙΝΑΚΕΣ ΤΟΥ 4^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Έδαφος UIP-16								
βάθος [cm]	1987	βάθος [cm]	1990	1992	βάθος [cm]	1993	βάθος [cm]	1994
0-1	65.4	0-2	88.7	84.9	0-2	72.9	0-2	75.2
1-2	30	2-5	10.4	13.7	2-4	33.6	2-4	17.4
2-3	3.9	5-10	0.6	0.9	4-7	2.6	4-6	5
3-4	0.7	10-15	0.2	0.14	7-10	0.8	6-10	1.3
4-5	0	15-20	0.2	0.12	10-15	0.3	10-15	0.2

Πίνακας 4.1

Η επί τοις εκατό (%) κατανομή της κατά βάθος συγκέντρωσης του Cs-137 για το έδαφος με κωδικό "UIP-16", για διάφορα έτη (Ιvanov, 1997)

Έδαφος UIP-16				
Διαμερίσματα	1990	1992	1993	1994
1 ^ο	88.7	84.9	72.9	75.2
2 ^ο	10.4	13.7	33.6	17.4
3 ^ο	0.6	0.9	2.6	5
4 ^ο	0.2	0.14	0.8	1.3
5 ^ο	0.2	0.12	0.3	0.2

Πίνακας 4.2

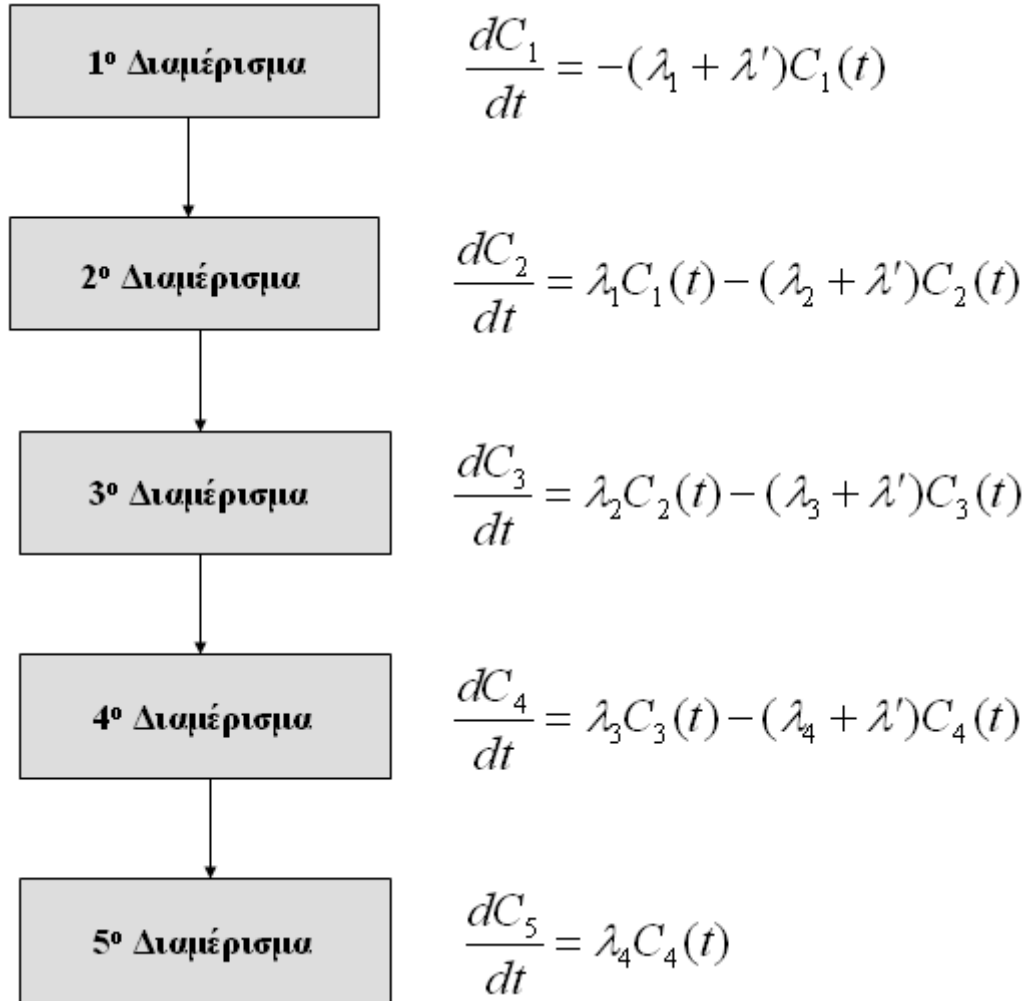
Η επί τοις εκατό (%) κατανομή της κατά βάθος συγκέντρωσης του Cs-137 για το έδαφος με κωδικό "UIP-16", για διάφορα έτη και κατά βάθος οριζόντια εδαφολογικά διαμερίσματα μικρού πάχους, όπως προκύπτουν από τον Πίνακα 4.1 (Ιvanov, 1997)

		Διαμερίσματα				
α/α	Έδαφος	1°	2°	3°	4°	5°
1	UIP-16	0.025 ± 0.004	-0.16 ± 0.02	-0.7 ± 0.3	-	-
2	UIP-17	0.016 ± 0.002	-0.22 ± 0.02	-1.0 ± 0.6	0.2 ± 0.5	-
3	UIP-18	-0.005 ± 0.004	-0.27 ± 0.05	-	-	-
4	UIP-19	0.30 ± 0.01	-0.37 ± 0.02	-0.2 ± 0.1	-0.5 ± 0.2	-0.8 ± 0.4
5	UIP-20	-	-	-	0.2 ± 0.4	0.2 ± 0.6
6	UIP-21	0.043 ± 0.004	-	-0.2 ± 0.1	-0.2 ± 0.3	-0.3 ± 0.5
7	UIP-23	-	-0.09 ± 0.02	0.11 ± 0.08	-	-0.2 ± 0.6
8	UIP-24	0.079 ± 0.006	-0.73 ± 0.05	-0.8 ± 0.4	-	0.2 ± 0.6
9	UIP-25	0.056 ± 0.005	-0.06 ± 0.01	-0.4 ± 0.4	-0.4 ± 0.5	-0.3 ± 0.5

Πίνακας 4.3

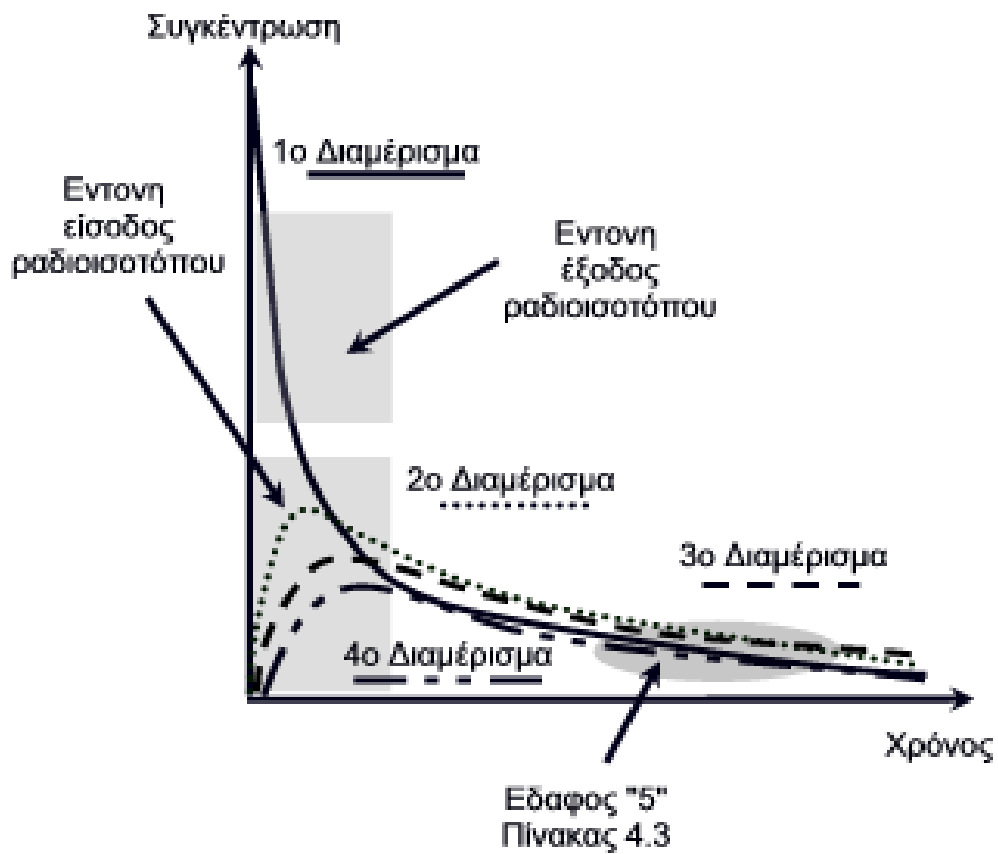
Εκτιμώμενες τιμές για την παράμετρο λ_i (a^{-1}) στα διάφορα διαμερίσματα διαφόρων εδαφών με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα του Ιβανον (1997)

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 4^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



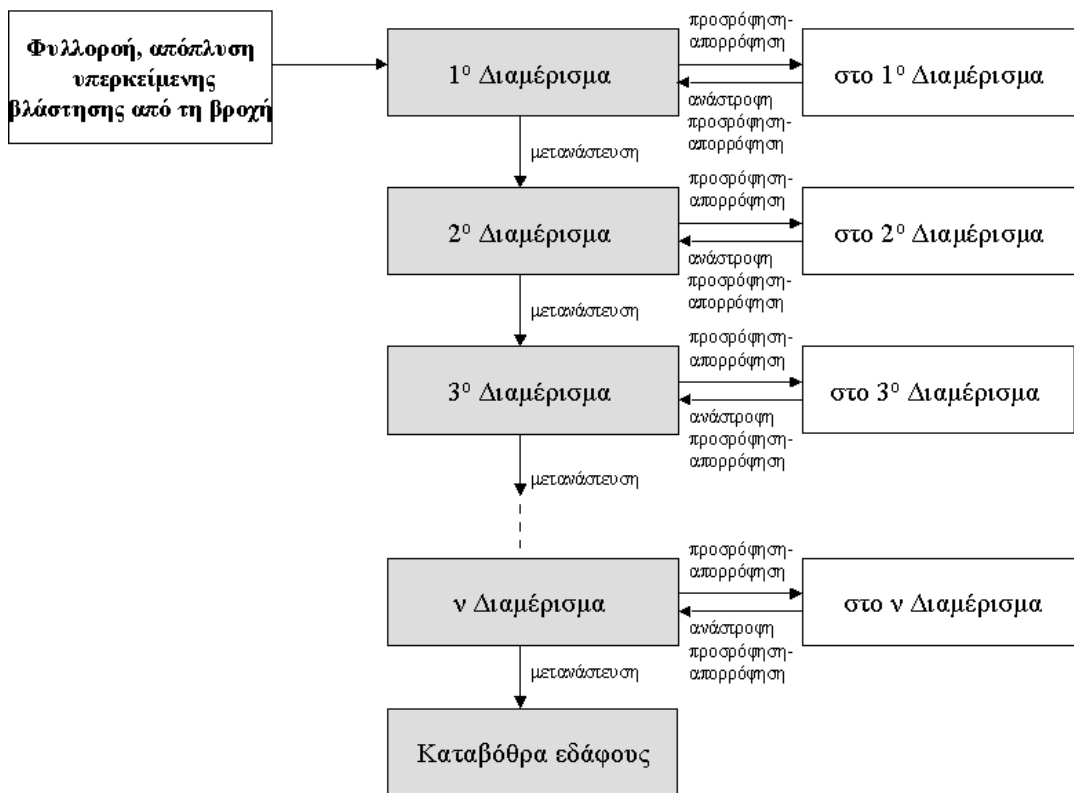
Διάγραμμα 4.1

Το απλό διαμερισματικό μοντέλο κατακόρυφης μετανάστευσης ραδιοϊσοτόπου πιθανότητας διασπάσεως λ' με πέντε οριζόντια εδαφολογικά διαμερίσματα, και οι αντίστοιχες διαφορικές εξισώσεις για τη μεταβολή της συγκέντρωσης του ισοτόπου κατά διαμέρισμα.



Διάγραμμα 4.2

Ποιοτική γραφική αναπαράσταση της μεταβολής συγκέντρωσης μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου σε διαδοχικά κατακόρυφα διαμερίσματα 1 – 4, σύμφωνα με το απλό διαμερισματικό μοντέλο. Σύνδεση με τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.3.



Διάγραμμα 4.3

Σχηματική γραφική αναπαράσταση του σύνθετου διαμερισματικού μοντέλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και στο 1^ο Κεφάλαιο έχουν διατυπωθεί εμπειρικά μοντέλα κατ' αρχήν κατάλληλα για την περιγραφή της κατακόρυφης κατανομής της συγκέντρωσης ραδιοϊσοτόπου στο έδαφος, σε δεδομένη χρονική στιγμή. Με τα εμπειρικά αυτά μοντέλα μπορεί να εκτιμηθούν οι τιμές των συντελεστών D και ν που ισχύουν την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Τα εμπειρικά μοντέλα μπορούν κατ' αρχήν να κατηγοριοποιούνται σε "δυναμικά" και "στατικά". Ένα δυναμικό εμπειρικό μοντέλο, αποδίδει την κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης ραδιοϊσοτόπου στο έδαφος ως συνάρτηση και του χρόνου, που έχει παρέρθει από τη στιγμή της αρχικής απόθεσης του ραδιοϊσοτόπου στο επιφανειακό έδαφος. Ένα στατικό εμπειρικό μοντέλο, αποδίδει την υπόψιν κατανομή για τη συγκεκριμένη και μόνο στιγμή που έγιναν οι κατά βάθος μετρήσεις της συγκέντρωσης και αγνοεί εντελώς τη χρονική στιγμή που συνέβη η αρχική απόθεση. Τα εμπειρικά μοντέλα, δυναμικά και στατικά, είναι προφανώς απαλλαγμένα από τις πολλές οριακές συνθήκες και τους περιορισμούς που πρέπει να τηρούνται στις διάφορες εκφράσεις του θεωρητικού – αναλυτικού μοντέλου και στα διαμερισματικά μοντέλα. Σημειώνεται όμως ότι πρέπει οπωσδήποτε να τηρούνται οι:

$$\int_0^{\infty} C(x) dx = J_0 \quad (5.1)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} C(x) = 0 \quad (5.2)$$

με J_0 ποσότητα που έχει ορισθεί στη σχέση (2.28) στο 2^ο Κεφάλαιο ως η κατά το βάθος ροή (flux) του εξεταζόμενου ραδιοϊσοτόπου ($\text{Bq cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), στο βάθος x τη χρονική στιγμή $t = 0$.

Στη συνέχεια θα εξετασθεί η εφαρμογή ενός δυναμικού και ενός στατικού μοντέλου.

5.2 Εφαρμογή δυναμικού εμπειρικού μοντέλου από τον Bossew (2004α)

Ο Bossew (2004α) μέτρησε την κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης διαφόρων ραδιοϊσοτόπων μέσα στη ζώνη αποκλεισμού του Chernobyl, σε πέντε θέσεις σε μία περιοχή περί τα 8 km ΝΑ του σταθμού. Το μέγιστο βάθος που διερευνήθηκε ήταν στην

τάξη των 10 έως 13 cm. Η κατ' όγκο συγκέντρωση ενός ραδιοϊσοτόπου σε διάφορα βάθη μπορεί να προσεγγίζεται από ένα δυναμικό εμπειρικό μοντέλο ως συνάρτηση με γενική μορφή:

$$C(x, t) = f(a, b, c, \dots, x, t)$$

όπου:

a, b, c, \dots είναι παράμετροι που χρειάζεται να προσδιορισθούν

x είναι το βάθος, και

t είναι η χρονική στιγμή της αρχικής απόθεσης του εξεταζόμενου ραδιοϊσοτόπου στο επιφανειακό έδαφος.

Ο Bossew (2004a) δέχεται ότι η συνάρτηση αυτή μπορεί να είναι:

$$C(x, t) = C_o \exp\left(-\frac{(x - vt)^2}{4Dt}\right) \quad (5.3)$$

όπου:

x το βάθος σε cm

t ο χρόνος 14.39 a (χρονική στιγμή μετά το ατύχημα του Chernobyl, στην οποία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις)

D ένας φαινόμενος συντελεστής διάχυσης ($\text{cm}^2 \text{a}^{-1}$)

v μία φαινόμενη ταχύτητα μεταφοράς (cm a^{-1}), και

C_o συντελεστής με κατάλληλη τιμή (Bq cm^{-3})

Κατά τον Bossew (2004a) αυτή η τύπου-Gauss συνάρτηση είναι κατάλληλη για να προσαρμόζεται στις κατά βάθος μετρήσεις της συγκέντρωσης και έχει τις εξής ιδιότητες:

α) Ο συντελεστής v εκτιμάται από τη θέση της μέγιστης κατά βάθος συγκέντρωσης του ραδιοϊσοτόπου δηλ. την $x = vt$.

β) Η (5.1) είναι απλοποιημένη έκφραση του πρώτου όρου της λύσης (2.29) του θεωρητικού – αναλυτικού μοντέλου.

γ) Η συνάρτηση αυτή μπορεί να έχει τις ιδιότητες (5.1) και (5.2).

Ο Πίνακας 5.1 δίνει τις τιμές των συντελεστών D και ν για την κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137, όπως αυτές προκύπτουν από τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Τα σφάλματα των συντελεστών εκτιμώνται μεταξύ 5% και 35% για τον D και μεταξύ 1% και 10% για τον ν . Το Διάγραμμα 5.1 δίνει μια εικόνα της ποιότητας με την οποία το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο προσεγγίζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Ο Bossew (2004a) σημειώνει ότι ο Ivanov (1997), του οποίου η εργασία αναλύθηκε σε γενικές γραμμές στα πλαίσια του Κεφαλαίου 3, υπολόγισε χρησιμοποιώντας το θεωρητικό αναλυτικό μοντέλο, για εδάφη που βρίσκονται κοντά στη θέση που εξετάζονται εδώ ότι $D = 0.202 \text{ cm}^2 \text{ a}^{-1}$ και ότι $\nu = 0.155 \text{ cm a}^{-1}$. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τα εδώ παρουσιαζόμενα μόνο στον συντελεστή ν . Αν στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας επιχειρηθεί μία ερμηνεία της ομοιότητας και της διαφοράς, μπορεί κανείς να πει ότι εδάφη που βρίσκονται σε κοντινές γεωγραφικές θέσεις, δεν παρουσιάζουν απαραίτητα την ίδια σύνθεση και μάλιστα το ένα μπορεί να έχει διαφορετικό αριθμό "hot particles" από το άλλο (άρα έχουν διαφορετική κινητική του ραδιοϊσοτόπου και διαφορετικούς συντελεστές διάχυσης D) αλλά μάλλον δέχονται την ίδια ποσότητα βροχής (και επομένως παρουσιάζουν παρόμοιες ταχύτητες μεταφοράς ν). Από μία άλλη οπτική γωνία μπορεί όμως κανείς να ισχυρίζεται ότι οι διαφορές αυτές όπου παρατηρούνται μεταξύ του δυναμικού εμπειρικού μοντέλου και του θεωρητικού – αναλυτικού, οφείλονται στον τρόπο που προσεγγίζουν το φαινόμενο και όχι στις πιθανά διαφορετικές ποιότητες των εδαφών. Από την άποψη αυτή το θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο πρέπει να γίνεται πιο πιστευτό διότι ενσωματώνει στις εκφράσεις την μαθηματική διατύπωση των διεργασιών που γίνονται στο έδαφος σε σχέση με τα μεταναστεύοντα ραδιοϊσότοπα.

5.3 Εφαρμογή δυναμικού εμπειρικού μοντέλου στις μετρήσεις του Ivanov (1997)

Ο Ivanov (1997) περιλαμβάνει στην εργασία του, πέρα από τις εκτιμώμενες τιμές των συντελεστών D και ν με βάση το θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο και ορισμένες από τις πειραματικές μετρήσεις του για τις συγκεντρώσεις του Cs-137 στο επιφανειακό και κατά βάθος έδαφος. Στις μετρήσεις αυτές, όπως γίνεται κατανοητό, βασίσθηκε και η επεξεργασία που παρουσιάσθηκε στο Κεφάλαιο 4, σχετικά με την εφαρμοσιμότητα των διαμερισματικών μοντέλων σε πρωτογενή αποτελέσματα. Σημειώνεται, ότι τέτοια

πρωτογενή πειραματικά αποτελέσματα, δεν παρέχουν στις εργασίες τους ούτε ο Szerbin (1999), ούτε ο Krstic' (2004), ούτε ο Bossew (2004β). Στους Πίνακες 5.2 και 5.3 συνοψίζονται οι κατά Ivanov (1997) εκτιμώμενες τιμές των συντελεστών D και ν για τα εδάφη για τα οποία παρουσιάζονται και αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις.

Χρησιμοποιώντας:

- τις πρωτογενείς πειραματικές μετρήσεις του Ivanov (1997) για τις συγκεντρώσεις του Cs-137 στο επιφανειακό και κατά βάθος έδαφος,
- το λογισμικό QtiPlot 0.9.0-rc2, το οποίο αποτελεί κλώνο του λογισμικού τύπου Origin, και τις δυνατότητες μη γραμμικής προσαρμογής σε πειραματικά δεδομένα, με τη χρήση του αλγορίθμου Levenberg – Marquadt, που αυτό διαθέτει, και,
- το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο, όπως αυτό εκφράζεται με την σχέση (5.3), ως την συνάρτηση την οποία επιδιώκεται να προσαρμοσθεί στα πειραματικά δεδομένα.

και έχοντας υπόψιν ότι για την αρχικοποίηση του αλγορίθμου:

- ο χρόνος t σε έτη, λαμβάνεται σταθερός και είναι η χρονική στιγμή μετά το ατύχημα του Chernobyl, στην οποία συλλέχθηκαν τα πειραματικά δεδομένα [δηλ. $t = 1$ για το πρώτο έτος μετά το ατύχημα (1987), $t = 2$ για το 2^ο έτος (1988), κ.οκ.],
- η αρχική τιμή του συντελεστή D μπορεί να λαμβάνεται από τον Πίνακα 5.2, και,
- η αρχική τιμή του συντελεστή ν μπορεί να λαμβάνεται από τον Πίνακα 5.3

είναι δυνατόν να καταλήξει κανείς στα αποτελέσματα των Πινάκων 5.4 και 5.5.

Σημειώνεται ότι σε αυτούς τους δύο Πίνακες:

- τα κενά "κελιά" αντιστοιχούν στα κενά "κελιά" των Πινάκων 5.2 και 5.3,
- τα "κελιά" με "παύλες" αντιστοιχούν σε πειραματικά δεδομένα για τα οποία, δεν κατέστη δυνατή η εξέταση της προσαρμογής του δυναμικού εμπειρικού μοντέλου, και,
- οι "παύλες" σε παρενθέσεις αντιστοιχούν σε σφάλματα των συντελεστών D και ν , όπως αυτά προκύπτουν από τον αλγόριθμο της προσαρμογής, των οποίων η τάξη μεγέθους ξεπερνά την τάξη μεγέθους των τιμών των συντελεστών αυτών

Δεδομένου ότι, όπως φαίνεται από τους Πίνακες 5.4 και 5.5, και όπως ήδη σχολιάζεται, τα σφάλματα των προσδιοριζόμενων από τον αλγόριθμο προσαρμογής στο δυναμικό

εμπειρικό μοντέλο συντελεστών D και ν , είναι στις περισσότερες των περιπτώσεων πολύ υψηλά, χρειάζεται να αξιολογηθούν ορισμένοι δείκτες για την ποιότητα της προσαρμογής, προκειμένου να μην κριθεί χωρίς έλεγχο, θετικά ή αρνητικά η εφαρμοσιμότητα του δυναμικού εμπειρικού μοντέλου σε πρωτογενή πειραματικά δεδομένα. Για το σκοπό αυτό, τίθενται τα εξής ερωτήματα:

- (i) ποιες είναι οι τιμές του συντελεστή πολλαπλού προσδιορισμού;
- (ii) είναι δόκιμο και σκόπιμο να εξετασθεί η ποιότητα της προσαρμογής με βάση τον συντελεστή RMS;
- (iii) υπάρχουν άλλοι δείκτες, με βάση τους οποίους, και για αυτήν και μόνο την περίπτωση, μπορεί να εκφρασθεί γνώμη για την ποιότητα της προσαρμογής;

Για να απαντηθεί το (i) ερώτημα, κατασκευάστηκε, ο Πίνακας 5.6, για τον συντελεστή πολλαπλού προσδιορισμού, ο οποίος φαίνεται να έχει γενικά πολύ ικανοποιητικές τιμές από 0.69 έως και 0.99, με την εξαίρεση μόλις τεσσάρων περιπτώσεων, οι οποίες σημειώνονται σε σκιασμένα "κελιά", όπου ο συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού δεν φαίνεται να είναι ο επιθυμητός (δηλ. είναι 0.38, 0.43, 0.51 και 0.65).

Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού (Σιμόπουλος, 1989) υπολογίζεται ως:

$$R^2 = \frac{\sum_i [C_i(x_i) - \hat{C}_i(x_i)]^2}{\sum_i [C_i(x_i) - \bar{C}_i]^2} \quad (5.4)$$

με

$C_i(x_i)$ μέτρηση της συγκέντρωσης του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου σε βάθος x_i

$\hat{C}_i(x_i)$ εκτίμηση της συγκέντρωσης του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου σε βάθος x_i , και

\bar{C}_i μέση τιμή των $C_i(x_i)$

Υπενθυμίζεται επιπλέον ότι ο συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού είναι το τετράγωνο του συντελεστή πολλαπλής συσχέτισης.

Σχετικά με το (ii) ερώτημα, δεν μπορεί κανείς εύκολα να υιοθετήσει, στην περίπτωση αυτή, ότι ο συντελεστής RMS, θα ήταν αποτελεσματικός. Ο κυριότερος λόγος είναι ότι, τα πειραματικά δεδομένα βάθους εδάφους, στα οποία επιχειρείται η προσαρμογή του

δυναμικού εμπειρικού μοντέλου είναι πολύ λίγα κατά περίπτωση και συγκεκριμένα βρίσκονται σε ομάδες των οποίων το πλήθος κυμαίνεται από 4 έως το πολύ 9. Δεύτερος εξίσου κύριος λόγος είναι ότι το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο, έχει –όπως διαπιστώνεται από τη σχέση (5.3), ένα σημαντικό πλήθος από παραμέτρους, οι οποίες ζητείται να προσδιορισθούν ή είναι σταθερές. Οι παράμετροι αυτές είναι τέσσερις (4), ως εξής:

$$C_o, D, \nu \text{ και } t$$

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι, ο συντελεστής RMS δίνεται από τη σχέση:

$$RMS = 100 \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_i \frac{(C_i(x_i) - \hat{C}_i(x_i))^2}{(\hat{C}_i(x_i))^2}} \quad (\%) \quad (5.5)$$

με

$C_i(x_i)$ μέτρηση της συγκέντρωσης του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου σε βάθος x_i

$\hat{C}_i(x_i)$ εκτίμηση της συγκέντρωσης του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου σε βάθος x_i

n οι βαθμοί ελευθερίας υπολογιζόμενοι ως [πλήθος πειραματικών δεδομένων (δηλ. 4 έως 9)] – [πλήθος ζητούμενων παραμέτρων (δηλ. 4)]

γίνεται άμεσα αντιληπτό, ότι ακόμα και πραγματικά μικρές αποκλίσεις μεταξύ $C_i(x_i)$ και $\hat{C}_i(x_i)$, οδηγούν σε πολύ μεγάλες τιμές του συντελεστή RMS, καθόσον ο παρονομαστής " $n - 2$ " γίνεται πολύ μικρός ή μηδενίζεται.

Τέλος, δεδομένου ότι, ο δείκτης συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού δεν είναι από μόνος του ικανός (παρότι αναγκαίως) για να δείξει την ποιότητα της προσαρμογής και ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση, δεν είναι σκόπιμη / δόκιμη, όπως φαίνεται, η εξέταση του συντελεστή RMS, απαντώντας στο (iii) ερώτημα, μπορεί κανείς εναλλακτικά να εξετάσει ως δείκτη την επιφάνεια που δημιουργείται κάθε φορά κάτω από την "καμπάνα" του δυναμικού εμπειρικού μοντέλου (βλ. και Διάγραμμα 5.1). Η επιφάνεια αυτή, πρέπει σύμφωνα με την οριακή συνθήκη (5.1) και τα πειραματικά δεδομένα που παρέχει ο Ivanov (1997), να αθροίζει σε "100". Υπενθυμίζεται εδώ, ότι αυτά τα πειραματικά δεδομένα συγκεντρώσεων Cs-137 κατά βάθος εδάφους σε μία θέση, έχουν κανονικοποιηθεί από τον Ivanov (1997) ως ποσοστά της αθροιστικής συγκέντρωσης του Cs-137 από όλα τα βάθη σε αυτή τη θέση.

Σχηματίζεται ο επόμενος Πίνακας 5.7, ο οποίος περιέχει τις εκτιμώμενες τιμές της C_o και το σφάλμα τους, όπως αυτές προέκυψαν από την προσαρμογή του δυναμικού εμπειρικού μοντέλου στα εξεταζόμενα πειραματικά αποτελέσματα. Για τον Πίνακα 5.7 ισχύουν οι απλοί κανόνες που ισχύουν και για ορισμένους προηγούμενους Πίνακες, δηλ.

- τα κενά "κελιά" αντιστοιχούν στα κενά "κελιά" των Πινάκων 5.2 και 5.3,
- τα "κελιά" με "παύλες" αντιστοιχούν σε πειραματικά δεδομένα για τα οποία, δεν κατέστη δυνατή η εξέταση της προσαρμογής του δυναμικού εμπειρικού μοντέλου, και,
- οι "παύλες" σε παρενθέσεις αντιστοιχούν σε σφάλματα, όπως αυτά προκύπτουν από τον αλγόριθμο της προσαρμογής, των οποίων η τάξη μεγέθους ξεπερνά την τάξη μεγέθους των τιμών των εκτιμώμενων τιμών της C_o .

Ακολούθως και με βάση τις τιμές που έχουν συγκεντρωθεί από την προσαρμογή, στους Πίνακες 5.4, 5.5 και 5.7 και με τη βοήθεια της σχέσεως (5.3), υπολογίζεται η επιφάνεια κάτω από την "καμπάνα". Τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5.8.

Είναι εύλογο να δεχθεί κανείς ότι για το φαινόμενο που μοντελοποιείται εδώ, αποκλίσεις από το "100" της τάξης του $\pm 25\%$ είναι μάλλον αποδεκτές. Ως εκ τούτου φαίνεται, από τη συνολική εκτίμηση των αποτελεσμάτων ότι, το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο, μπορεί να αναπαραστήσει ικανοποιητικά τις καταστάσεις κατακόρυφης μετανάστευσης Cs-137 που σημειώνονται στα μαυρισμένα "κελιά" των Πινάκων 5.2 έως και 5.8.

Συμπεράσματα Α'

- (i) Δεν είναι προφανές ότι η κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης μεταναστεύοντος Cs-137 μπορεί να προσεγγίζεται στη βάση ενός δυναμικού εμπειρικού μοντέλου, όπως αυτό της σχέσεως (5.3), η οποία προτείνεται από τον Bossew (2004a).
- (ii) Φαίνεται κατ' αρχήν ότι τέτοιες προσεγγίσεις είναι δυνατές πολλά έτη μετά την επιφανειακή απόθεση. Στο παράδειγμα που εξετάζεται εδώ, ο αριθμός των ετών αυτών υπολογίζεται σε επτά (τελευταία στήλη του Πίνακα 5.8 – μαυρισμένα "κελιά").

- (iii) Στο ενδιάμεσο χρονικό διάστημα, φαίνεται ότι, όλες οι δυνατές τιμές των συντελεστών C_o , D και ν της σχέσεως (5.3) που ικανοποιούν την αρχική συνθήκη (5.1) και ερμηνεύουν τα πειραματικά δεδομένα με καλό συντελεστή πολλαπλού προσδιορισμού είναι παράμετροι του δυναμικού εμπειρικού μοντέλου χρήσιμοι για την ικανοποιητική προσομοίωση της μετανάστευσης. Το μεγάλο πλήθος των δυνατών και αποδεκτών συνδυασμών των C_o , D και ν οφείλεται στην υψηλή κινητικότητα του Cs-137, στο βάθος 0 – 10 cm, όπως υποδεικνύεται από την εξέταση των σχετικών πειραματικών δεδομένων του Ivanov (1997) που πραγματοποιήθηκε στο 4^ο Κεφάλαιο σε συνάρτηση με την εφαρμογή των διαμερισματικών μοντέλων.
- (iv) Το προηγούμενο σημείο (iii) οδηγεί και στην έμμεση επαλήθευση της απόψεως του Antonopoulos (1995), σύμφωνα με την οποία – σε ελεύθερη μετάφραση:
- "Το κατακόρυφο προφίλ της συγκέντρωσης του Cs-137, στα πρώτα 30 cm αδιατάρακτου εδάφους, που εξετάστηκε πειραματικά, βρέθηκε να παραμένει σταθερό το διάστημα 1987 – 1994".*
- (v) Όπου οι προσεγγίσεις με το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο φαίνονται κατ'αρχήν δυνατές οι τιμές του συντελεστή D είναι κυρίως στην περιοχή $0.1 - 0.2 \text{ cm}^2 \text{ a}^{-1}$, και οι τιμές του συντελεστή ν είναι κυρίως στην περιοχή $0.1 - 0.2 \text{ cm a}^{-1}$.
- (vi) Δεδομένου ότι ο Ivanov (1997), αλλά και οι περισσότεροι από τους άλλους ερευνητές που παρουσιάστηκαν εδώ (Κεφάλαιο 3^ο), αποφεύγουν σχεδόν συστηματικά να αναφερθούν σε σφάλματα των συντελεστών D και ν , όπως αυτοί εκτιμώνται από το θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο, εικάζεται ότι τα σφάλματα αυτά πρέπει γενικά να είναι πολύ υψηλά. Συνήθως τα σφάλματα στα οποία αναφέρονται κάποιοι από τους ερευνητές αυτούς αφορούν σε εδάφη, στα οποία η κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137 επάγεται εργαστηριακά. Επιθυμητό θα ήταν –αν είναι δυνατόν- να ληφθεί μία εικόνα αυτών των σφαλμάτων για τους συντελεστές D και ν όπως αυτοί προκύπτουν από το θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο και από τις πειραματικές μετρήσεις του Ivanov (1997) σε πραγματικά εδάφη.

Για το σκοπό αυτό ακολουθείται το εξής σκεπτικό:

Αφού η σχέση (5.3) είναι στην ουσία της η πρώτη προσέγγιση του θεωρητικού - αναλυτικού μοντέλου, αντικαθιστώντας σε αυτήν τους συντελεστές D και ν , που παρουσιάζει ο Ivanov (1997) για κάθε ένα από τα εδάφη που εξετάζει, είναι δυνατόν να προσδιορισθεί η χρονική στιγμή t στην οποία οι συντελεστές αυτοί ικανοποιούν την (5.3). Ο προσδιορισμός αυτός μπορεί να γίνει και πάλι με τη χρήση του λογισμικού QtiPlot 0.9.0-rc2, και των δυνατοτήτων μη γραμμικής προσαρμογής σε πειραματικά δεδομένα, με τη χρήση του αλγορίθμου Levenberg – Marquadt, που αυτό διαθέτει. Ως πειραματικά δεδομένα λαμβάνονται οι μετρήσεις της συγκέντρωσης του Cs-137 κατά βάθος, όπως αυτές δίνονται από τον Ivanov (1997) για τα διάφορα εδάφη. Θεωρητικά, αν οι συντελεστές D και ν , όπως δίνονται έχουν μικρά σφάλματα, τότε η χρονική στιγμή t που θα προσδιορισθεί, δεν πρέπει να διαφέρει από την πραγματική, δηλαδή τη στιγμή συλλογής των δειγμάτων εδάφους. Με το πιοπάνω σκεπτικό προέκυψε ο Πίνακας 5.9.

Τα σκιασμένα "κελιά" του Πίνακα 5.9 αντιπροσωπεύουν προφανώς τα εδάφη για τα οποία οι προσδιοριζόμενοι συντελεστές D και ν εκτιμώνται από τον Ivanov (1997) χωρίς σημαντικά σφάλματα. Στα "κελιά" αυτά η χρονική στιγμή t που προσδιορίζεται, δεν διαφέρει σημαντικά από την πραγματική. Το μέτρο της αξιοπιστίας αυτής της πληροφορίας δίνεται αν συνεκτιμηθούν οι Πίνακες 5.10 και 5.11.

Ο Πίνακας 5.10 περιέχει τις εκτιμώμενες τιμές της C_0 και το σφάλμα τους, όπως αυτές προέκυψαν από την προσαρμογή του δυναμικού εμπειρικού μοντέλου στα εξεταζόμενα πειραματικά αποτελέσματα για σταθερούς συντελεστές D και ν (αυτούς που δίνει σε κάθε περίπτωση ο Ivanov).

Ο Πίνακας 5.11 περιέχει την επιφάνεια κάτω από την "καμπάνα" (5.3) αν όπου t αντικατασταθεί ο χρόνος σε έτη από τον Πίνακα 5.9, και όπου D και ν αντικατασταθούν οι αντίστοιχοι συντελεστές που δίνει ο Ivanov (1997). Υπενθυμίζεται ότι η επιφάνεια αυτή, πρέπει σύμφωνα με την οριακή συνθήκη (5.1) και τα πειραματικά δεδομένα που παρέχει ο Ivanov (1997), να αθροίζει σε "100".

Είναι εύλογο να δεχθεί κανείς – όπως έγινε και προηγούμενα, ότι για το φαινόμενο που μοντελοποιείται εδώ, αποκλίσεις από το "100" της τάξης του ± 25 % είναι μάλλον αποδεκτές. Οι αποδεκτοί ως προς αυτόν τον περιορισμό συντελεστές D και ν , που εκτιμώνται από τον Ivanov, είναι μόνο αυτοί που αντιστοιχούν στα εδάφη με τα μαυρισμένα "κελιά" του Πίνακα 5.11. Ως εκ τούτου φαίνεται εμμέσως, από τη συνολική

εκτίμηση των αποτελεσμάτων των Πινάκων 5.9 – 5.11 ότι, μόνο οι συντελεστές D και ν , των εδαφών που αντιστοιχούν στον κοινό τόπο των σκιασμένων "κελιών" του Πίνακα 5.9 και των μαυρισμένων "κελιών" του Πίνακα 5.11, παρουσιάζουν ικανοποιητικά μικρό σφάλμα. Πρόκειται συγκεκριμένα για τις θέσεις δειγματοληψίας UIP 16, 17, 20, 21, 23 και UIP27. Τα δείγματα εδάφους αυτών των θέσεων για τις οποίες οι συντελεστές D και ν παρουσιάζουν ανεκτό σφάλμα λήφθηκαν όλα το 1993, επτά δηλαδή έτη μετά το ατύχημα στο Chernobyl.

Συμπεράσματα Β'

- (vii) Διακρίνεται ότι, τόσο η εφαρμογή του θεωρητικού – αναλυτικού μοντέλου, όσο και η εφαρμογή του δυναμικού εμπειρικού μοντέλου εμπεριέχει μεγάλα σφάλματα, τα οποία προέρχονται κυρίως από το περιορισμένο πλήθος και την μεγάλη κύμανση των πειραματικών μετρήσεων της συγκέντρωσης του Cs-137 κατά βάθος.
- (viii) Δοκιμότερη και σκοπιμότερη φαίνεται η εφαρμογή του θεωρητικού - αναλυτικού μοντέλου ή / και του δυναμικού εμπειρικού σε καταστάσεις εδαφών, στις οποίες έχει περάσει ικανός χρόνος από την αρχική απόθεση. Δεν είναι κατά πάσα πιθανότητα τυχαίο το γεγονός, ότι ο Szerbin (1999) και ο Krstic' (2004), μοντελοποιούν μέσω του θεωρητικού –αναλυτικού μοντέλου, μετρήσεις συγκέντρωσης Cs-137 κατά βάθος, που πραγματοποιήθηκαν μετά το 1995.

5.4 Εφαρμογή στατικού εμπειρικού μοντέλου από τον Dahm (2002)

Ο Dahm (2002) σκέφθηκε ότι (και φυσικά δεν ήταν ο μόνος), στην πράξη, ένα κατακόρυφα μεταναστεύον ραδιοϊσότοπο προϊόντος του χρόνου φθάνει και σε βάθη μεγαλύτερα των 10 – 20 πρώτων εκατοστώμετρων. Παρόλαυτά οι συγκεντρώσεις του ραδιοϊσοτόπου σε αυτά τα "μεγαλύτερα" βάθη είναι πάρα πολύ μικρές και συνήθως κάτω από τα κατώτερα όρια ανίχνευσης πολλών από τις διαθέσιμες ανιχνευτικές διατάξεις. Αυτό επομένως που κατά τον Dahm (2002) χρειάζεται για την στατική περιγραφή της κατακόρυφης κατανομής της συγκέντρωσης του ραδιοϊσοτόπου σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι μία συνάρτηση που να τηρεί την (5.1), να προεκβάλλει (extrapolate) μικρές (πολύ μικρές) τιμές για τη συγκέντρωση του ραδιοϊσοτόπου σε "μεγαλύτερα" βάθη και τέλος να έχει την αναμενόμενη μορφή

"καμπάνας" που έχει διαπιστωθεί και πειραματικά. Με βάση αυτό το σκεπτικό δέχθηκε ότι με τη βοήθεια της κατανομής Weibull μπορεί να υποθέσει:

$$C(x) = C_0 a n x^{n-1} \exp(-a x^n) \quad (5.6)$$

Ο Dahm (2002) εξετάζει την ισχύ της υπόθεσής του με βάση μετρήσεις που πραγματοποίησε σε εδάφη του Λουξεμβούργου. Ο συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού στον οποίο κατέληξε μετά την επεξεργασία μετρήσεων από 18 δείγματα βάθους κυμαίνεται μεταξύ 99.26 και 99.9%.

5.5 Εφαρμογή στατικού εμπειρικού μοντέλου στις μετρήσεις του Ivanov (1997)

Χρησιμοποιώντας:

- τις πρωτογενείς πειραματικές μετρήσεις του Ivanov (1997) για τις συγκεντρώσεις του Cs-137 στο επιφανειακό και κατά βάθος έδαφος,
- το λογισμικό QtiPlot 0.9.0-rc2, το οποίο αποτελεί κλώνο του λογισμικού τύπου Origin, και τις δυνατότητες μη γραμμικής προσαρμογής σε πειραματικά δεδομένα, με τη χρήση του αλγορίθμου Levenberg – Marquadt, που αυτό διαθέτει, και,
- το στατικό εμπειρικό μοντέλο, όπως αυτό εκφράζεται με την σχέση (5.6), ως την συνάρτηση την οποία επιδιώκεται να προσαρμοσθεί στα πειραματικά δεδομένα.

και έχοντας υπόψιν ότι για την βέλτιστη αρχικοποίηση του αλγορίθμου¹:

- η αρχική τιμή του παράγοντα C_0 μπορεί να λαμβάνεται ως ίση με τη μέγιστη παρατηρούμενη συγκέντρωση του Cs-137, σε όποιο βάθος και αν αυτή εμφανίζεται,
- η αρχική τιμή του παράγοντα a μπορεί να λαμβάνεται ως "0.1", και,
- η αρχική τιμή του παράγοντα – εκθέτη n μπορεί να λαμβάνεται ως "1"

είναι δυνατόν να καταλήξει κανείς στα αποτελέσματα των Πινάκων 5.12, 5.13, 5.14 και 5.15. Ο Πίνακας 5.12 περιέχει τις εκτιμώμενες τιμές για τον παράγοντα C_0 , ο 5.13 περιέχει τις εκτιμώμενες τιμές για τον παράγοντα a και ο Πίνακας 5.14 περιέχει τις εκτιμώμενες τιμές για τον παράγοντα – εκθέτη n . Ο Πίνακας 5.15 περιέχει τις εκτιμώμενες επιφάνειες κάτω από την "καμπάνα" της σχέσης (5.6), όπως αυτή

¹ Ο τρόπος της βέλτιστης αρχικοποίησης βρέθηκε μετά από δοκιμές

υπολογίζεται με βάση τα C_0 , a και n των Πινάκων 5.12, 5.13 και 5.14. Για τους ίδιους λόγους που αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 5.5, οι επιφάνειες του Πίνακα 5.15, πρέπει να έχουν τιμή "100". Σημειώνεται ότι σε αυτούς τους τέσσερις Πίνακες:

- τα κενά "κελιά" αντιστοιχούν στα κενά "κελιά" των Πινάκων 5.2 και 5.3,
- τα "κελιά" με "παύλες" αντιστοιχούν σε πειραματικά δεδομένα για τα οποία, δεν κατέστη δυνατή η εξέταση της προσαρμογής του στατικού εμπειρικού μοντέλου, και,
- οι "παύλες" σε παρενθέσεις αντιστοιχούν σε σφάλματα των C_0 , a και n , όπως αυτά προκύπτουν από τον αλγόριθμο της προσαρμογής, των οποίων η τάξη μεγέθους ξεπερνά την τάξη μεγέθους των τιμών των παραγόντων αυτών

Δεδομένου ότι, όπως φαίνεται από τους Πίνακες 5.12, 5.13 και 5.14, και όπως ήδη σχολιάζεται, τα σφάλματα των προσδιοριζόμενων από τον αλγόριθμο προσαρμογής στο στατικό εμπειρικό μοντέλο C_0 , a και n , είναι στις περισσότερες των περιπτώσεων πολύ υψηλά, χρειάζεται να αξιολογηθούν ορισμένοι δείκτες για την ποιότητα της προσαρμογής, προκειμένου να μην κριθεί χωρίς έλεγχο, θετικά ή αρνητικά η εφαρμοσιμότητα του στατικού εμπειρικού μοντέλου σε πρωτογενή πειραματικά δεδομένα. Για το σκοπό αυτό, τίθενται και πάλι τα τρία γνωστά ερωτήματα:

(i) ποιες είναι οι τιμές του συντελεστή πολλαπλού προσδιορισμού;

(ii) είναι δόκιμο και σκόπιμο να εξετασθεί η ποιότητα της προσαρμογής με βάση τον συντελεστή RMS;

(iii) υπάρχουν άλλοι δείκτες, με βάση τους οποίους, και για αυτήν και μόνο την περίπτωση, μπορεί να εκφρασθεί γνώμη για την ποιότητα της προσαρμογής;

Για να απαντηθεί το (i) ερώτημα, κατασκευάστηκε, ο Πίνακας 5.16, για τον συντελεστή πολλαπλού προσδιορισμού, ο οποίος φαίνεται να έχει γενικά πολύ ικανοποιητικές τιμές 0.99, με την εξαίρεση μόλις μίας περίπτωσης, η οποία σημειώνεται σε σκιασμένο "κελί", όπου ο συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού δεν φαίνεται να είναι ο επιθυμητός (δηλ. είναι 0.28).

Σχετικά με το (ii) ερώτημα, δεν μπορεί κανείς εύκολα να υιοθετήσει, στην περίπτωση αυτή, ότι ο συντελεστής RMS, θα ήταν αποτελεσματικός. Αυτό συμβαίνει για τους ίδιους λόγους που σημειώθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο 5.5, στο αντίστοιχο σημείο της εκεί ανάλυσης.

- Δεδομένων ότι, ο δείκτης συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού δεν είναι από μόνος του ικανός (παρότι αναγκαίος) για να δείξει την ποιότητα της προσαρμογής και ότι ούτε στη συγκεκριμένη περίπτωση, δεν είναι σκόπιμη / δόκιμη, όπως φαίνεται, η εξέταση του συντελεστή RMS, απαντώντας στο (iii) ερώτημα, μπορεί κανείς εναλλακτικά να εξετάσει ως δείκτη την επιφάνεια που δημιουργείται κάθε φορά κάτω από την "καμπάνα" του στατικού εμπειρικού μοντέλου (Weibull). Η επιφάνεια αυτή, πρέπει σύμφωνα με την οριακή συνθήκη (5.1) και τα πειραματικά δεδομένα που παρέχει ο Ivanov (1997), να αθροίζει σε "100".

Είναι εύλογο να δεχθεί κανείς ότι για το φαινόμενο που μοντελοποιείται εδώ, αποκλίσεις από το "100" της τάξης του $\pm 25\%$ είναι μάλλον αποδεκτές. Ως εκ τούτου φαίνεται, από τη συνολική εκτίμηση των αποτελεσμάτων ότι, το στατικό εμπειρικό μοντέλο, μπορεί να αναπαραστήσει ικανοποιητικά τις καταστάσεις κατακόρυφης μετανάστευσης Cs-137 που σημειώνονται στα μαυρισμένα "κελιά" των Πινάκων 5.12 έως και 5.16.

Συμπεράσματα Γ'

- (ix) Δεν είναι προφανές ότι η κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης μεταναστεύοντος Cs-137 μπορεί να προσεγγίζεται στη βάση ενός στατικού εμπειρικού μοντέλου, όπως αυτό της σχέσεως (5.6), η οποία προτείνεται από τον Dahm (2002).
- (x) Φαίνεται κατ' αρχήν ότι τέτοιες προσεγγίσεις είναι όμως γενικά δυνατές και δεν φαίνεται να εξαρτώνται από τη χρονική στιγμή της δειγματοληψίας εδάφους. (Πίνακας 5.15 – μαυρισμένα "κελιά").
- (xi) Φαίνεται ακόμα ότι, όλες οι δυνατές τιμές των παραγόντων C_0 , a και n της σχέσεως (5.6) που ικανοποιούν την αρχική συνθήκη (5.1) και ερμηνεύουν τα πειραματικά δεδομένα με καλό συντελεστή πολλαπλού προσδιορισμού είναι παράμετροι του στατικού εμπειρικού μοντέλου χρήσιμοι για την ικανοποιητική προσομοίωση της μετανάστευσης. Το μεγάλο πλήθος των δυνατών και αποδεκτών συνδυασμών των C_0 , a και n οφείλεται στην υψηλή κινητικότητα του Cs-137, στο βάθος 0 – 10 cm, όπως υποδεικνύεται από την εξέταση των σχετικών πειραματικών δεδομένων του Ivanov (1997) που πραγματοποιήθηκε στο 4^ο Κεφάλαιο σε συνάρτηση με την εφαρμογή των διαμερισματικών μοντέλων.

- (xii) Όπου οι προσεγγίσεις με το στατικό εμπειρικό μοντέλο φαίνονται κατ'αρχήν δυνατές οι τιμές του παράγοντα a είναι κατά μέσο όρο στη γειτονιά του "0.9", και οι τιμές του παράγοντα - εκθέτη n είναι κατά μέσο όρο στη γειτονιά του "1.1". Οι τιμές αυτές διαφέρουν σημαντικά από τις αντίστοιχες που δίνει στην εργασία του ο Dahm (2002), για τα εδάφη στα οποία πειραματίστηκε.
- (xiii) Διακρίνεται ότι, τόσο η εφαρμογή του θεωρητικού – αναλυτικού μοντέλου, όσο και η εφαρμογή του στατικού εμπειρικού μοντέλου εμπεριέχει μεγάλα σφάλματα, τα οποία προέρχονται κυρίως από το περιορισμένο πλήθος και την μεγάλη κύμανση των πειραματικών μετρήσεων της συγκέντρωσης του Cs-137 κατά βάθος.

5.6 Σχόλια και συμπεράσματα

Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να επαναληφθούν τα κυριότερα από τα συμπεράσματα των προηγούμενων παραγράφων. Όπου είναι δυνατόν παρατίθεται και συμπληρωματική αξιολόγησή τους.

Δεν είναι προφανές ότι η κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης μεταναστεύοντος Cs-137 μπορεί να προσεγγίζεται στη βάση ενός δυναμικού εμπειρικού μοντέλου, όπως αυτό της σχέσεως (5.3), η οποία προτείνεται από τον Bossew (2004a). Φαίνεται κατ' αρχήν ότι τέτοιες προσεγγίσεις είναι δυνατές πολλά έτη μετά την επιφανειακή απόθεση. Στο παράδειγμα που εξετάζεται εδώ, ο αριθμός των ετών αυτών υπολογίζεται σε επτά (τελευταία στήλη του Πίνακα 5.8 – μαυρισμένα "κελιά"). Στο ενδιάμεσο χρονικό διάστημα, φαίνεται ότι, όλες οι δυνατές τιμές των συντελεστών C_0 , D και ν της σχέσεως (5.3) που ικανοποιούν την αρχική συνθήκη (5.1) και ερμηνεύουν τα πειραματικά δεδομένα με καλό συντελεστή πολλαπλού προσδιορισμού, είναι παράμετροι του δυναμικού εμπειρικού μοντέλου χρήσιμοι για την ικανοποιητική προσομοίωση της μετανάστευσης. Το μεγάλο πλήθος των δυνατών και αποδεκτών συνδυασμών των C_0 , D και ν οφείλεται στην υψηλή κινητικότητα Cs-137, στο βάθος 0 – 10 cm. Όπου οι προσεγγίσεις με το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο φαίνονται κατ'αρχήν δυνατές οι τιμές του συντελεστή D είναι κυρίως στην περιοχή 0.1 – 0.2 cm² a⁻¹, και οι τιμές του συντελεστή ν είναι κυρίως στην περιοχή 0.1 – 0.2 cm a⁻¹. Αν γίνει δεκτό ότι τα εδάφη και οι χρόνοι δειγματοληψίας που αντιστοιχούν στα μαυρισμένα "κελιά" του Πίνακα 5.11, είναι εκείνα στα οποία το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο είναι περισσότερο

αντιπροσωπευτικό, τότε από τα αντίστοιχα μαυρισμένα "κελιά" του Πίνακα 5.4 και του Πίνακα 5.5 μπορούν να κατασκευασθούν τα Διαγράμματα 5.2 και 5.3. Το Διάγραμμα 5.2 οδηγεί στο επιπλέον συμπέρασμα ότι σχετικά με τον συντελεστή D παρατηρείται γενικά μια πολύ χαλαρή αρνητική γραμμική εξάρτηση με τον χρόνο από την απόθεση του Cs-137 στο επιφανειακό έδαφος (συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού 0.17). Το Διάγραμμα 5.3 οδηγεί στο επιπλέον συμπέρασμα ότι σχετικά με τον συντελεστή ν παρατηρείται γενικά μία ισχυρή αρνητική γραμμική εξάρτηση με τον χρόνο από την απόθεση του Cs-137 (συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού 0.77). Τα Διαγράμματα 5.2 και 5.3 επαληθεύουν κατά κάποιο τρόπο ανάλογες ατεκμηρίωτες παρατηρήσεις της βιβλιογραφίας.

Σε σχέση με το στατικό εμπειρικό μοντέλο δεν είναι προφανές ότι η κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης μεταναστεύοντος Cs-137 μπορεί να προσεγγίζεται από τη σχέση (5.6). Φαίνεται κατ' αρχήν ότι τέτοιες προσεγγίσεις είναι όμως γενικά δυνατές και δεν φαίνεται να εξαρτώνται από τη χρονική στιγμή της δειγματοληψίας εδάφους. (Πίνακας 5.15 – μαυρισμένα "κελιά"), δηλαδή αντίστοιχα από τη χρονικό διάστημα που έχει παρέλθει από την επιφανειακή απόθεση του Cs-137. Φαίνεται ακόμα ότι, όλες οι δυνατές τιμές των παραγόντων C_0 , a και n της σχέσεως (5.6) που ικανοποιούν την αρχική συνθήκη (5.1) και ερμηνεύουν τα πειραματικά δεδομένα με καλό συντελεστή πολλαπλού προσδιορισμού είναι παράμετροι του στατικού εμπειρικού μοντέλου χρήσιμοι για την ικανοποιητική προσομοίωση της μετανάστευσης. Το μεγάλο πλήθος των δυνατών και αποδεκτών συνδυασμών των C_0 , a και n οφείλεται στην υψηλή κινητικότητα του Cs-137, στο βάθος 0 – 10 cm. Αν γίνει δεκτό ότι τα εδάφη και οι χρόνοι δειγματοληψίας που αντιστοιχούν στα μαυρισμένα "κελιά" του Πίνακα 5.15, είναι εκείνα στα οποία το στατικό εμπειρικό μοντέλο είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικό, τότε από τα αντίστοιχα μαυρισμένα "κελιά" του Πίνακα 5.13 και του Πίνακα 5.14 μπορούν να κατασκευασθούν τα Διαγράμματα 5.4 και 5.5. Τόσο από το Διάγραμμα 5.4, όσο και από το Διάγραμμα 5.5 προκύπτει ότι οι παράγοντες a και n του στατικού εμπειρικού μοντέλου δεν εξαρτώνται με κάποιο στατιστικά σημαντικό τρόπο από το χρόνο που έχει περάσει από την απόθεση του Cs-137 στο επιφανειακό έδαφος. Τα Διαγράμματα 5.4 και 5.5 επαληθεύουν έτσι κατά κάποιο τρόπο τις ανάλογες παρατηρήσεις του Dahm (2002). Με τη βοήθεια των Διαγραμμάτων 5.4 και 5.5 μπορεί κανείς να πει με στατιστικά πιο αυστηρό τρόπο ότι στην περίπτωση των εδαφών που

εξετάσθηκαν εδώ με τη βοήθεια των σχετικών πειραματικών μετρήσεων του Ιβανον (1997) για την εφαρμογή του στατικού εμπειρικού μοντέλου της σχέσεως (5.6), ο παράγοντας a έχει τιμές γύρω στο 1.1 και ο παράγοντας – εκθέτης n έχει τιμές γύρω στο 1.2.

ΠΙΝΑΚΕΣ ΤΟΥ 5^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

α/α	D	ν
1	0.036	0.141
2	0.060	0.225
3	0.074	0.175

Πίνακας 5.1

Συντελεστές D ($\text{cm}^2 \text{a}^{-1}$) και ν (cm a^{-1}) για τη μετανάστευση του Cs-137 σε εδάφη πλησίον του Chernobyl, σύμφωνα με το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο (Bossew, 2004α)

	Συντελεστής Διάχυσης D ($\text{cm}^2 \text{a}^{-1}$)					
	1987	1988	1990	1991	1992	1993
Έδαφος						
UIP16	0.568		0.139		0.139	0.161
UIP17		0.189	0.117		0.117	0.155
UIP18		0.221	0.095		0.076	
UIP19					0.315	0.315
UIP20	0.192		0.095	0.066	0.079	0.057
UIP21	0.252	0.189			0.252	0.202
UIP23	0.167				0.107	0.155
UIP24	0.189		0.126		0.076	0.259
UIP25	0.284		0.249		0.300	0.202
UIP26	0.268					0.063
UIP27	0.410					0.177

Πίνακας 5.2

Συντελεστές D ($\text{cm}^2 \text{a}^{-1}$) για τη μετανάστευση του Cs-137 σε εδάφη πλησίον του Chernobyl, σύμφωνα με τις μετρήσεις του Ιβανον (1997) και το θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο.

	Συντελεστής Darcy ν (cm a ⁻¹)					
	1987	1988	1990	1991	1992	1993
Έδαφος						
UIP16	0.170		0.073		0.022	0.069
UIP17		0.126	0.047		0.041	0.050
UIP18		0.158	0.079		0.132	
UIP19					0.095	0.079
UIP20	0.126		0.060	0.057	0.148	0.123
UIP21	0.347	0.410			0.505	0.155
UIP23	0.035				0.126	0.050
UIP24	0.129		0.101		0.151	0.101
UIP25	0.079		0.063		0.066	0.155
UIP26	0.035					0.095
UIP27	0.079					0.050

Πίνακας 5.3

Συντελεστές ν (cm a⁻¹) για τη μετανάστευση του Cs-137 σε εδάφη πλησίον του Chernobyl, σύμφωνα με τις μετρήσεις του Ιβανον (1997) και το θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο.

	Συντελεστής Διάχυσης D (cm^2a^{-1}) - σε παρένθεση το σφάλμα προσαρμογής για τον υπόψιν συντελεστή-					
	1987	1988	1990	1991	1992	1993
Έδαφος						
UIP16	0.40 (0.08)		0.044 (-)		0.1 (-)	0.1 (0.2)
UIP17		0.3 (-)	-		0.4 (0.5)	0.1 (0.3)
UIP18		-	0.1 (-)		0.2 (-)	
UIP19					1.3 (0.2)	1.5 (0.4)
UIP20	1 (-)		0.2 (-)	0.1 (-)	0.2 (-)	0.08 (-)
UIP21	10 (3)	1.1 (0.5)			0.28 (0.01)	0.31 (0.06)
UIP23	-				0.2 (-)	0.1 (0.3)
UIP24	0.1 (0.7)		0.2 (-)		0.1 (-)	0.35 (0.06)
UIP25	0.4 (0.1)		0.3 (-)		0.6 (0.2)	-
UIP26						0.1 (-)
UIP27	-					0.1 (-)

Πίνακας 5.4

Συντελεστές D ($\text{cm}^2 \text{a}^{-1}$) για τη μετανάστευση του Cs-137 σε εδάφη πλησίον του Chernobyl, σύμφωνα με τις μετρήσεις του Ivanov (1997) και το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο (Bossew, 2004α)

	Συντελεστής Darcy ν (cm a^{-1}) - σε παρένθεση το σφάλμα προσαρμογής για τον υπόψιν συντελεστή-					
	1987	1988	1990	1991	1992	1993
Έδαφος						
UIP16	0.37 (0.14)		0.1 (0.2)		0.2 (-)	0.1 (0.2)
UIP17		0.5 (-)	-		0.2 (0.3)	0.1 (0.4)
UIP18		-	0.25 (-)		0.2 (-)	
UIP19					0.14 (0.09)	0.1 (0.1)
UIP20	0.5 (-)		0.2 (-)	0.2 (-)	0.2 (-)	0.1 (-)
UIP21	0.5 (0.8)	0.6 (0.2)			0.61 (0.01)	0.12 (0.04)
UIP23	-				0.2 (-)	0.1 (0.4)
UIP24	0.5 (-)		0.2 (-)		0.2 (-)	0.08 (0.04)
UIP25	0.4 (0.2)		0.2 (-)		0.0 (0.1)	-
UIP26						0.1 (-)
UIP27	-					0.1 (-)

Πίνακας 5.5

Συντελεστές ν (cm a^{-1}) για τη μετανάστευση του Cs-137 σε εδάφη πλησίον του Chernobyl, σύμφωνα με τις μετρήσεις του Ιβανov (1997) και το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο (Bossew, 2004α)

	Συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού μετρήσεων Ιβανον (1997) – δυναμικού εμπειρικού μοντέλου (Bossew, 2004α)					
	1987	1988	1990	1991	1992	1993
Έδαφος						
UIP16	0.99		0.65		0.98	0.99
UIP17		0.92	-		0.51	0.97
UIP18		-	0.99		0.90	
UIP19					0.74	0.43
UIP20	0.99		0.99	0.84	0.99	0.87
UIP21	0.38	0.99			0.99	0.96
UIP23	-				0.94	0.95
UIP24	0.80		0.97		0.98	0.99
UIP25	0.72		0.98		0.99	-
UIP26						0.78
UIP27	-					0.69

Πίνακας 5.6

**Συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού μετρήσεων μετανάστευσης Cs-137
(Ιβανον, 1997) – δυναμικού εμπειρικού μοντέλου (Bossew, 2004α)**

	Συντελεστής C_o σχέσεως (5.3) σε $Bq\ cm^{-3}$ - σε παρένθεση το σφάλμα προσαρμογής -					
	1987	1988	1990	1991	1992	1993
Έδαφος						
UIP16	66(2)		43(1)		75(71)	72(3)
UIP17		70(-)	-		29(1)	65(1)
UIP18		-	91(-)		61(9)	
UIP19					33(1)	18.4(0.9)
UIP20	80(62)		83(-)	61(50)	78(57)	58(6)
UIP21	22(1)	64(1)			65(1)	50(1)
UIP23	-				66(40)	61(1)
UIP24	52(1)		74(-)		73(77)	61(2)
UIP25	41(1)		68(1)		66(3)	-
UIP26						51(10)
UIP27	-					43(14)

Πίνακας 5.7

Συντελεστές C_o ($Bq\ cm^{-3}$) –σχέση (5.3)- για τη μετανάστευση του Cs-137 σε εδάφη πλησίον του Chernobyl, σύμφωνα με τις μετρήσεις του Ivanov (1997) και το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο (Bossew, 2004a)

	Επιφάνεια κάτω από την "καμπάνα" της σχέσεως (5.3)					
	1987	1988	1990	1991	1992	1993
Έδαφος						
UIP16	66		32		127	118
UIP17		94	-		76	102
UIP18		-	118		108	
UIP19					157	108
UIP20	142		123	81	134	77
UIP21	121	181			277	123
UIP23	-				114	96
UIP24	35		108		124	141
UIP25	42		139		176	-
UIP26						66
UIP27	-					55

Πίνακας 5.8

Επιφάνεια κάτω από την "καμπάνα" της σχέσεως (5.3)- για τη μετανάστευση του Cs-137 σε εδάφη πλησίον του Chernobyl, σύμφωνα με τις μετρήσεις του Ιβανον (1997) και το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο (Bossew, 2004α)

	Χρονική στιγμή στιγμιότυπου της μετανάστευσης, σε έτη μετά το ατύχημα του Chernobyl					
	1987 1ο έτος μετά το ατύχημα	1988 2ο έτος μετά το ατύχημα	1990 4ο έτος μετά το ατύχημα	1991 5ο έτος μετά το ατύχημα	1992 6ο έτος μετά το ατύχημα	1993 7ο έτος μετά το ατύχημα
Έδαφος						
UIP16	1 (1)		1.5 (4)		11 (6)	7 (7)
UIP17		4 (2)	8 (4)		13 (6)	7 (7)
UIP18		4 (2)	8 (4)		9 (6)	
UIP19					7 (6)	7 (7)
UIP20	5 (1)		10 (4)	7 (5)	9 (6)	8 (7)
UIP21	4 (1)	4 (2)			7 (6)	7 (7)
UIP23	6 (1)				8 (6)	7 (7)
UIP24	1 (1)		6 (4)		8 (6)	8 (7)
UIP25	1 (1)		7 (4)		10 (6)	-
UIP26						8 (7)
UIP27	1 (1)					2 (7)

Πίνακας 5.9

Χρονική στιγμή στιγμιότυπου της μετανάστευσης, σε έτη μετά το ατύχημα του Chernobyl, με βάση το εμπειρικό δυναμικό μοντέλο (Bossew, 2004a) και τις μετρήσεις του Ιβανον (1997). Σε παρένθεση, η ίδια χρονική ποσότητα με βάση το θεωρητικό αναλυτικό μοντέλο και με τη χρήση των ίδιων μετρήσεων.

	Συντελεστής C_o σχέσεως (5.3) σε $Bq\ cm^{-3}$ - σε παρένθεση το σφάλμα προσαρμογής -					
	1987	1988	1990	1991	1992	1993
Έδαφος						
UIP16	69(1)		106(2)		95(1)	76(1)
UIP17		100(2)	99(1)		89(1)	84(1)
UIP18		-	97(2)		87(1)	
UIP19					63(1)	56(1)
UIP20	80(1)		94(1)	113(8)	86(1)	88(1)
UIP21	73(1)	79(1)			64(1)	60(1)
UIP23	-				83(1)	85(1)
UIP24	98(2)		92(1)		87(1)	60(1)
UIP25	80(1)		82(1)		63(1)	-
UIP26						92(1)
UIP27	-					114(2)

Πίνακας 5.10

Συντελεστές C_o ($Bq\ cm^{-3}$) –σχέση (5.3)- για τη μετανάστευση του Cs-137 σε εδάφη πλησίον του Chernobyl, σύμφωνα με τις μετρήσεις και τους συντελεστές D και ν του Ιβανον (1997) και το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο (Bossew, 2004α)

	Επιφάνεια κάτω από την "καμπάνα της σχέσεως (5.3)					
	1987	1988	1990	1991	1992	1993
Έδαφος						
UIP16	65		46		126	116
UIP17		105	117		129	107
UIP18		-	108		145	
UIP19					141	134
UIP20	145		120	81	182	104
UIP21	181	190			281	123
UIP23	-				136	105
UIP24	44		115		147	140
UIP25	50		145		173	-
UIP26						95
UIP27	-					82

Πίνακας 5.11

Επιφάνεια κάτω από την "καμπάνα" της σχέσεως (5.3)- για τη μετανάστευση του Cs-137 σε εδάφη πλησίον του Chernobyl, σύμφωνα με τις μετρήσεις και τους συντελεστές D και ν του Ιβανον (1997) και το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο (Bossew, 2004α)

	Παράγοντας C_o σχέσεως (5.6) σε $Bq\ cm^{-3}$ - σε παρένθεση το σφάλμα προσαρμογής -					
	1987	1988	1990	1991	1992	1993
Έδαφος						
UIP16	91(2)		93(30)		252(62)	192(10)
UIP17		154(-)	269(240)		241(53)	237(30)
UIP18		753(-)	146(-)		235(70)	
UIP19					291(18)	-
UIP20	183(11)		494(-)	150(-)	231(43)	584(-)
UIP21	225(8)	231(7)			65(62)	193(7)
UIP23	241(48)				356(131)	212(26)
UIP24	87(28)		181(34)		342(128)	190(5)
UIP25	157(35)		216(17)		228(7)	
UIP26						266(-)
UIP27	147(-)					139(-)

Πίνακας 5.12

Παράγοντες C_o ($Bq\ cm^{-3}$) –σχέση (5.6)- για τη μετανάστευση του Cs-137 σε εδάφη πλησίον του Chernobyl, σύμφωνα με τις μετρήσεις του Ivanov (1997) και το στατικό εμπειρικό μοντέλο (Dahm, 2002)

	Παράγοντας α σχέσεως (5.6) - σε παρένθεση το σφάλμα προσαρμογής -					
	1987	1988	1990	1991	1992	1993
Έδαφος						
UIP16	0.91(0.02)		1.9(0.3)		0.8(0.3)	0.48(0.05)
UIP17		0.5(-)	1(1)		0.7(0.2)	0.8(0.1)
UIP18		2(3)	0.5(-)		0.7(0.4)	
UIP19					0.41(0.02)	-
UIP20	0.64(0.04)		2(1)	0.6(-)	0.6(0.2)	2(1)
UIP21	0.294(0.001)	0.20(0.02)			0.01(-)	0.36(0.02)
UIP23	0.9(0.1)				1.1(0.3)	0.7(0.1)
UIP24	2.0(0.3)		0.4(-)		1.1(0.3)	0.27(0.01)
UIP25	1.6(0.2)		0.4(0.1)		0.23(0.01)	
UIP26						1(1)
UIP27	0.7(-)					0.5(-)

Πίνακας 5.13

Παράγοντες α –σχέση (5.6)- για τη μετανάστευση του Cs-137 σε εδάφη πλησίον του Chernobyl, σύμφωνα με τις μετρήσεις του Ιβανον (1997) και το στατικό εμπειρικό μοντέλο (Dahm, 2002)

	Παράγοντας - εκθέτης n σχέσεως (5.6) - σε παρένθεση το σφάλμα προσαρμογής -					
	1987	1988	1990	1991	1992	1993
Έδαφος						
UIP16	1.6(0.1)		1.3(0.6)		0.9(0.3)	1.3(0.1)
UIP17		1.9(-)	0.9(0.7)		1.0(0.3)	0.9(0.1)
UIP18		0.5(0.7)	2(-)		1.0(0.4)	
UIP19					0.79(0.06)	-
UIP20	0.9(0.1)		0.6(0.4)	2(-)	1.1(0.3)	0.6(0.4)
UIP21	1.26(0.05)	1.7(0.2)			4(-)	1.26(0.07)
UIP23	0.5(0.1)				0.6(0.2)	1.0(0.2)
UIP24	1.3(0.7)		2(-)		0.7(0.2)	1.53(0.07)
UIP25	0.6(0.1)		1.4(0.3)		1.5(0.1)	
UIP26						0.9(0.7)
UIP27	2(-)					2(-)

Πίνακας 5.14

Παράγοντες – εκθέτες n – σχέση (5.6)- για τη μετανάστευση του Cs-137 σε εδάφη πλησίον του Chernobyl, σύμφωνα με τις μετρήσεις του Ivanov (1997) και το στατικό εμπειρικό μοντέλο (Dahm, 2002)

	Επιφάνεια κάτω από την "καμπάνα" της σχέσεως (5.6)					
	1987	1988	1990	1991	1992	1993
Έδαφος						
UIP16	68		44		116	118
UIP17		90	95		118	109
UIP18		79	83		114	
UIP19					193	-
UIP20	130		94	85	122	78
UIP21	198	188			64	135
UIP23	119				116	103
UIP24	41		116		114	144
UIP25	47		147		180	
UIP26						75
UIP27	68					83

Πίνακας 5.15

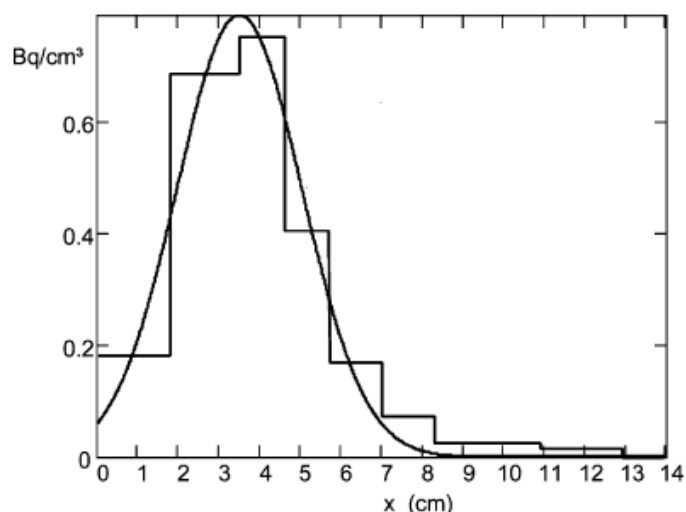
Επιφάνεια κάτω από την "καμπάνα" της σχέσεως (5.6)- για τη μετανάστευση του Cs-137 σε εδάφη πλησίον του Chernobyl, σύμφωνα με τις μετρήσεις του Ιβανον (1997) και το στατικό εμπειρικό μοντέλο (Dahm, 2002)

Συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού μετρήσεων Ιβανον (1997) – στατικού εμπειρικού μοντέλου (Dahm, 2002)						
	1987	1988	1990	1991	1992	1993
Έδαφος						
UIP16	0.99		0.99		0.99	0.99
UIP17		0.99	0.99		0.99	0.99
UIP18		0.99	0.99		0.99	
UIP19					0.99	-
UIP20	0.99		0.99	0.99	0.99	0.99
UIP21	0.99	0.99			0.28	0.99
UIP23	0.99				0.99	0.99
UIP24	0.99		0.99		0.99	0.99
UIP25	0.99		0.99		0.99	
UIP26						0.99
UIP27	0.99					0.99

Πίνακας 5.16

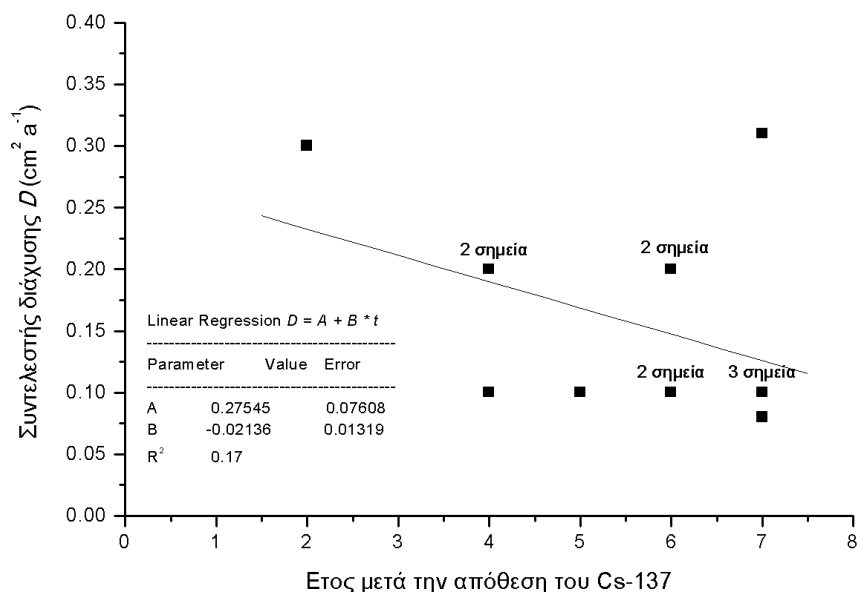
Συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού μετρήσεων μετανάστευσης Cs-137 (Ιβανον, 1997) – στατικού εμπειρικού μοντέλου (Dahm, 2002)

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 5^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



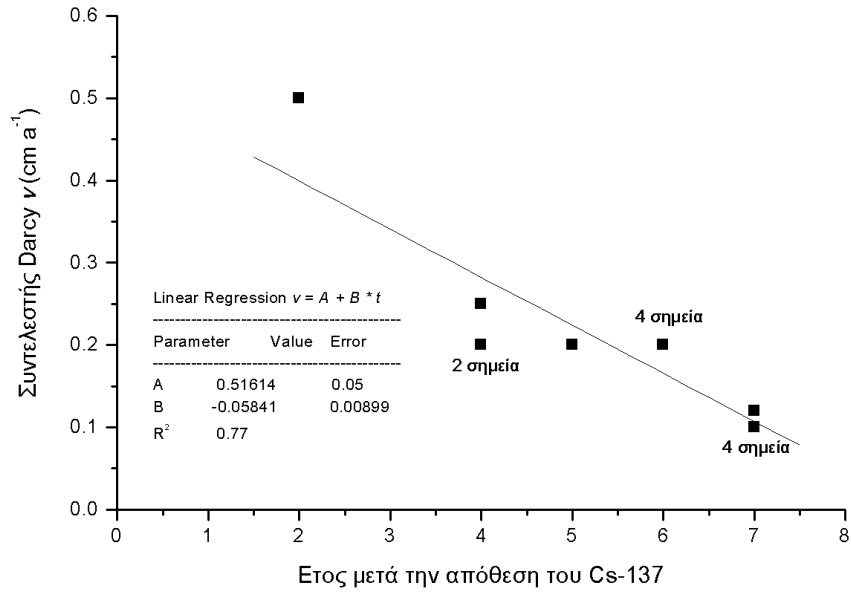
Διάγραμμα 5.1

Το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο της συνάρτησης (5.3) (συνεχής "καμπάνα") και οι αντίστοιχες μετρήσεις συγκέντρωσης ραδιοϊσοτόπου τις οποίες προσεγγίζει (Bossew, 2004α)



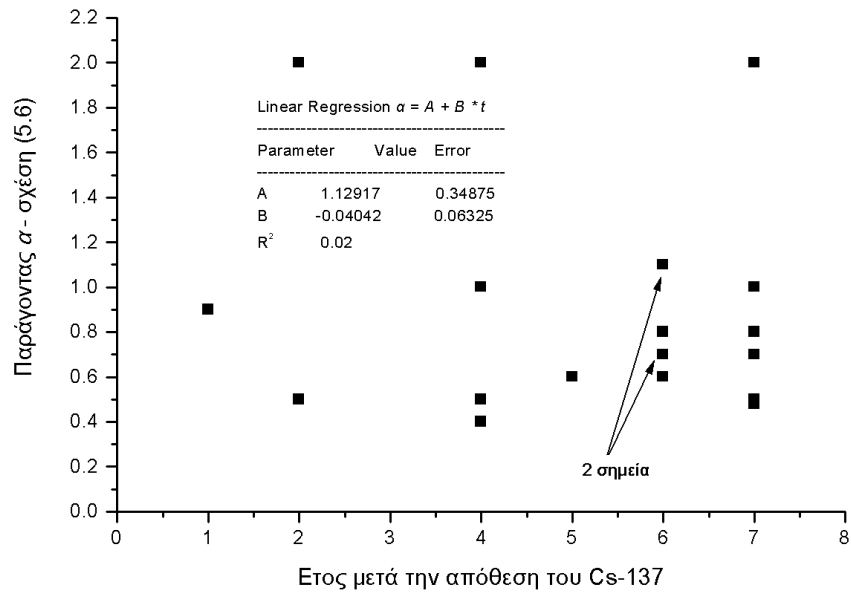
Διάγραμμα 5.2

Συντελεστής διάχυσης D ($\text{cm}^2 \text{a}^{-1}$) για τη μετανάστευση του Cs-137 σε συνάρτηση με το χρόνο, σύμφωνα με τις μετρήσεις του Ιβανον (1997) και το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο (Bossew, 2004α)



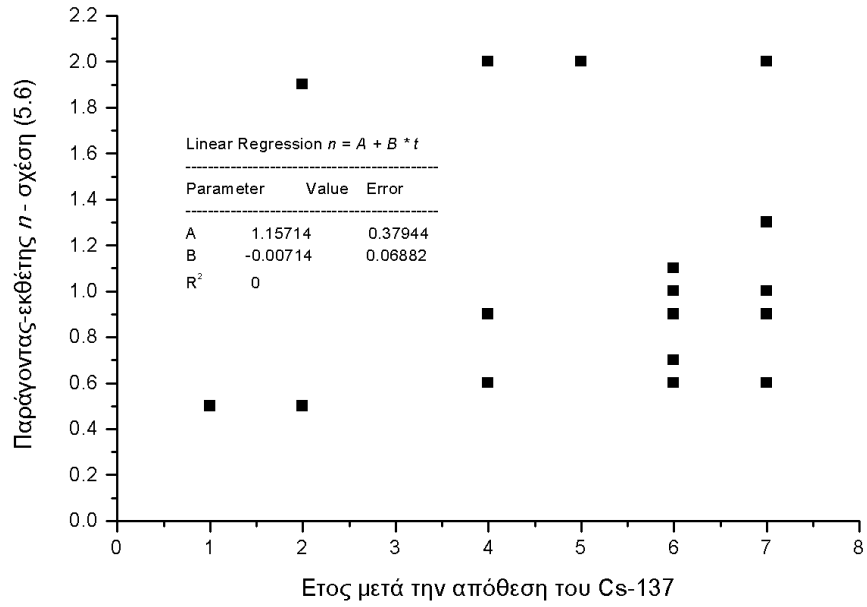
Διάγραμμα 5.3

Συντελεστής Darcy v (cm a^{-1}) για τη μετανάστευση του Cs-137 σε συνάρτηση με το χρόνο, σύμφωνα με τις μετρήσεις του Ιβανον (1997) και το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο (Bossew, 2004α)



Διάγραμμα 5.4

Παράγοντας α -σχέση (5.6)- για τη μετανάστευση του Cs-137 σε συνάρτηση με το χρόνο, σύμφωνα με τις μετρήσεις του Ιβανον (1997) και το στατικό εμπειρικό μοντέλο (Dahm, 2002)



Διάγραμμα 5.5

Παράγοντας - εκθέτης n -σχέση (5.6)- για τη μετανάστευση του Cs-137 σε συνάρτηση με το χρόνο, σύμφωνα με τις μετρήσεις του Ivanov (1997) και το στατικό εμπειρικό μοντέλο (Dahm, 2002)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ GOLDSIM

6.1 Ο κώδικας GoldSim - γενικά

Ο κώδικας GoldSim αναπτύχθηκε από τον Οίκο GoldSim Technology Group LLC¹ των Η.Π.Α. Πρόκειται για γενικευμένο κώδικα προσομοίωσης. Η έννοια της προσομοίωσης όπως αυτή εννοείται στον κώδικα GoldSim, αντιπροσωπεύει τη διαδικασία της δημιουργίας ενός μοντέλου περιγραφής ενός συστήματος (λειτουργούντος ή θεωρητικού), όπως π.χ. ένα ορυχείο, το δάσος, τα όργανα του ανθρώπινου οργανισμού, μία εμπορική επιχείρηση κ.ο.κ. Το μοντέλο δημιουργείται με σκοπό κυρίως (α) να απομονωθούν και να γίνουν κατανοητοί οι παράγοντες που επηρεάζουν το σύστημα, και (β) να προβλεφθεί η συμπεριφορά του συστήματος στο με την πρόοδο του χρόνου. Ο απώτερος φυσικά στόχος είναι ο επιτυχής έλεγχος του συστήματος. Συμπληρωματικά η προσομοίωση παρουσιάζει και το πλεονέκτημα ότι μπορεί να προβλέψει τη βελτίωση ή τη χειροτέρευση της λειτουργίας ενός συστήματος, χωρίς να χρειάζεται να γίνουν δοκιμές πάνω στο ίδιο το σύστημα, αλλά μόνο πάνω στο μοντέλο του. Για παράδειγμα, ένας βιολόγος, θα μπορούσε, χρησιμοποιώντας τον κώδικα GoldSim να μοντελοποιήσει την κύμανση του πληθυσμού του σολωμού σε ένα ποτάμι με στόχο, να προβλέψει τις αλλαγές στον πληθυσμό, και να κατανοήσει την επίδραση που έχουν σε αυτόν παράγοντες όπως το ψάρεμα, η αλλοίωση της ποιότητας του νερού κ.ά. Ο κώδικας GoldSim, σε αντίθεση με άλλους κώδικες, παρέχει δυνατότητες ανάπτυξης μοντέλων σε γραφικό - παραθυρικό περιβάλλον, πράγμα που διευκολύνει εξαιρετικά τον δημιουργό αλλά και τον μετέπειτα χρήστη του μοντέλου. Ο κώδικας GoldSim διατίθεται δωρεάν για Ακαδημαϊκή χρήση.

Οι ελάχιστες απαιτήσεις υλικού και λογισμικού για τον κώδικα GoldSim, έχουν ως εξής:

- Λειτουργικό Σύστημα Microsoft Windows 2000 η νεότερο.

¹ 22516 SE 64th Place, Suite 110, Issaquah, Washington 98027-5379, USA, Phone: +1 425-295-6985, Fax: +1 425-642-8073, e-mail: software@GoldSim.com, <http://www.GoldSim.com>

- Επεξεργαστής Pentium III ή νεότερος
- Μνήμη 128 MB RAM ή περισσότερη.

Η τρέχουσα (Ιούλιος 2007) έκδοση του κώδικα GoldSim είναι η 9.60.

6.2 Κατηγορίες προσομοιωτών και κώδικας GoldSim

Έχουν αναπτυχθεί πολλοί κώδικες για την προσομοίωση διαφόρων ειδικών συστημάτων. Για παράδειγμα υπάρχουν κώδικες για την προσομοίωση της κίνησης του νερού και των ρύπων στα "δέλτα" των ποταμών και στους υδροβιότοπους, άλλοι κώδικες για την προσομοίωση της ανάπτυξης των γαλαξιών, άλλοι για την πρόβλεψη της αξίας της αγοράς συναλλάγματος κλπ. Το κύριο χαρακτηριστικό των περισσότερων από αυτούς τους προσομοιωτές είναι ότι είναι εξαιρετικά ειδικοί για την αποκλειστική λύση συγκεκριμένων τύπων προβλημάτων εξομοίωσης και απαιτούν πολύ εμπειρία και γνώση από τον χρήστη για να δώσουν αποτελέσματα. Οι προσομοιωτές με αυτά τα χαρακτηριστικά ονομάζονται **ειδικοί**.

Στο άλλο άκρο βρίσκει κανείς προσομοιωτές οι οποίοι δεν ειδικεύονται σε συγκεκριμένους τύπους προβλημάτων. Πρόκειται για πλέον πολύπλοκα συστήματα προσομοίωσης, τα οποία παρέχουν εργαλεία στον μη έμπειρο χρήστη για την ευκολότερη μοντελοποίηση ακόμα και δύσκολων καταστάσεων. Οι προσομοιωτές με αυτά τα χαρακτηριστικά ονομάζονται **γενικευμένοι**.

Οι πλέον απλοί γενικευμένοι προσομοιωτές που υπάρχουν σήμερα σε ευρύτατη χρήση είναι τα **λογιστικά φύλλα**. Τα λογιστικά φύλλα, παρόλο που έχουν συγκεκριμένη περιοριστική δομή, είναι εξαιτίας της ευρείας τους διάδοσης και της απλότητάς τους (βλ. Microsoft Office, Excel), απολύτως κατάλληλα για απλές προσομοιώσεις συστημάτων –κυρίως χρηματοοικονομικών. Τα κυριότερα μειονεκτήματά τους είναι ότι δύσκολα προσομοιώνουν δυναμικά εξελισσόμενες καταστάσεις, δεν περιέχουν στατιστικά εργαλεία για την ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στους υπολογισμούς και τη διάδοση του σφάλματος στα αποτελέσματα και τέλος είναι μάλλον αδύνατα ως προς την γραφική απεικόνιση των προβλέψεών τους. Προφανώς και υπάρχουν γενικευμένοι προσομοιωτές που δεν παρουσιάζουν τα μειονεκτήματα των λογιστικών φύλλων, αλλά δεν έχουν ευρεία διάδοση, κοστίζουν και απαιτούν πολύ καλά εκπαιδευμένους χρήστες.

Οι γενικευμένοι προσομοιωτές διακρίνονται γενικά στις εξής κατηγορίες:

(α) Διακριτοί προσομοιωτές

Αυτοί οι προσομοιωτές είναι σχεδιασμένοι για να περιγράφουν συστήματα, όπως π.χ. τα τηλεφωνικά κέντρα, η βιομηχανική παραγωγή, η ταχυδρόμηση αντικειμένων κλπ. Η πληροφορία των οποίων η δυναμική ποσοτική μεταβολή προσομοιώνεται είναι σε αυτή την περίπτωση "κινούμενες σε διακριτά βήματα" ή "μεταβαλλόμενες σε διακριτές ποσότητες". Το αποτέλεσμα της κίνησης ή της μεταβολής είναι γραμμικό και εξαρτάται από ποσοτικές εισόδους και εξόδους, ενδεχόμενα χρονικά μεταβαλλόμενες και από απλούς κανόνες που τις επιτρέπουν ή τις απαγορεύουν. Οι διακριτοί προσομοιωτές είναι ακατάλληλοι για την περιγραφή συστημάτων που μεταβάλλονται με συνεχή τρόπο, όπως π.χ. συστήματα που έχουν ως συνιστώσα τη συνεχή και μεταβαλλόμενη ροή του νερού. Συστήματα επομένως που στον μαθηματικό κόσμο περιγράφονται με διαφορικές εξισώσεις δεν μπορούν να προσομοιωθούν από αυτούς τους προσομοιωτές.

(β) Διακριτοί προσομοιωτές με αλληλεπίδραση

Πρόκειται για ειδικότερη κατηγορία των γενικευμένων διακριτών προσομοιωτών. Η προσομοιούμενη διεργασία κινείται σε διακριτά βήματα, ή μεταβάλλεται σε διακριτές ποσότητες, αλλά τα βήματα αυτά και οι διακριτές ποσότητες ως προς τον αριθμό και το μέγεθος δεν έχουν απαραίτητα γραμμική εξάρτηση από ποσοτικές εισόδους και εξόδους. Επίσης οι κανόνες που επιτρέπουν οι απαγορεύουν τις εισόδους και εξόδους δεν είναι πάντοτε πολύ απλοί. Ένας γενικευμένος προσομοιωτής αυτής της κατηγορίας μπορεί για παράδειγμα να προσομοιώσει τη συμπεριφορά ενός πληθυσμού ζώων, όταν αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

(γ) Συνεχείς προσομοιωτές

Αυτή η κατηγορία γενικευμένων προσομοιωτών διαθέτει δυνατότητες λύσης διαφορικών εξισώσεων και με αυτόν τον τρόπο επιτρέπει την προσομοίωση συστημάτων τα οποία περιγράφονται από συνεχείς εξισώσεις. Οι συνεχείς προσομοιωτές επομένως είναι κατάλληλοι για τη δυναμική περιγραφή συστημάτων με ύλη ή πληροφορία που μεταβάλλεται συνεχώς ή γενικά με ομαλό και σχετικά βραδύ τρόπο, και σαφώς ακατάλληλοι για την περιγραφή συστημάτων στα οποία υπάρχουν "ξαφνικές", ή γενικά "ακανόνιστες" εισοδοί ή έξοδοι. Για παράδειγμα ένας

συνεχής προσομοιωτής μπορεί να περιγράψει με επιτυχία την κίνηση του νερού σε ένα σύστημα δεξαμενών και αγωγών. Ένας συνεχής προσομοιωτής μπορεί να περιγράψει με σχετική επιτυχία και ένα σύστημα για τον οποίο απαιτείται κανονικά διακριτός προσομοιωτής αν τα διακριτά βήματα είναι πολύ μικρά ή οι διακριτές ποσότητες είναι πολύ μικρές σε σχέση με τη συνολική επαγόμενη μεταβολή της προσομοιούμενης μεταβαλλόμενης πληροφορίας ή ποσότητας. Σε αυτή την περίπτωση υπονοείται μία σχεδόν συνεχής μεταβολή, η οποία μπορεί να εξομοιωθεί και με τους συνεχείς προσομοιωτές.

(δ) Υβριδικοί προσομοιωτές

Οι υβριδικοί προσομοιωτές ενσωματώνουν τις ικανότητες και των τριών πιο πάνω κατηγοριών προσομοιωτών (α), (β) και (γ). Ο κώδικας GoldSim είναι ένας υβριδικός προσομοιωτής ο οποίος μπορεί να υπερθέτει συνεχείς και διακριτές μεταβολές στο προσομοιούμενο σύστημα.

6.3 Ντετερμινιστική και στοχαστική προσομοίωση

Παρόλο που η προσομοίωση και τα μοντέλα γενικά είναι πολύτιμα εργαλεία για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας ενός συστήματος, η χρήση τους ως εργαλεία πρόβλεψης είναι μάλλον δύσκολη. Ο κυριότερος λόγος είναι ότι στα περισσότερα πραγματικά συστήματα –όπως π.χ. και στα συστήματα κατακόρυφης μετανάστευσης ραδιοϊσοτόπων στο βάθος του εδάφους, οι παράγοντες που επιδρούν, οι φυσικοί μηχανισμοί που λειτουργούν και τα γεγονότα που συμβαίνουν είναι αρκετές φορές στοχαστικά, ή έστω αβέβαια, ή ακόμα και ακατανόητα σε μεγάλο βαθμό. Ως εκ τούτου οι προσομοιώσεις και τα μοντέλα θα πρέπει γενικά και με ικανοποιητικό τρόπο να λαμβάνουν υπόψη αυτή τη στοχαστικότητα και την αβεβαιότητα.

Γίνεται φανερό ότι τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται και τα οποία εξετάστηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια, για να περιγραφεί η κατακόρυφη μετανάστευση των ραδιοϊσοτόπων στο έδαφος είναι "ντετερμινιστικά", δηλαδή δεν επιτρέπουν την ενσωμάτωση σε αυτά στοχαστικών επιδράσεων. Ως εκ τούτου, τα μοντέλα αυτά είναι τα λεγόμενα μοντέλα "καλύτερης δυνατής πρόβλεψης" (ή στα αγγλικά "best guess models"). Τα μοντέλα αυτά μπορούν να διατυπώνονται σε πολύ απλή μορφή ακόμα και με τη βοήθεια λογιστικών φύλλων.

Ο κώδικας GoldSim, διαφέρει σημαντικά από μία εφαρμογή λογιστικών φύλλων διότι παρόλο που έχει κατ'αρχήν την δυνατότητα προσομοίωσης με χρήση μοντέλων "best guess", το συγκριτικό του πλεονέκτημα βρίσκεται στο ότι διαθέτει μηχανισμούς που επιτρέπουν την εισαγωγή στο μοντέλο και στοχαστικών παραμέτρων. Με αυτό τον τρόπο έχει την δυνατότητα να απαντάει σε ερωτήματα του τύπου:

Ποιο είναι το εκτιμώμενο βάθος, στο οποίο αναμένεται να βρίσκεται σήμερα (2007) η μέγιστη συγκέντρωση από το Cs-137 που αποτέθηκε στα επιφανειακά εδάφη της Ελλάδας το 1986, εξαιτίας του ατυχήματος στο Chernobyl;

με τρόπο περίπου:

Υπολογίζεται ότι σε επίπεδο εμπιστοσύνης x%, το στατιστικά πιθανότερο βάθος στο οποίο αναμένεται να βρίσκεται σήμερα (2007) η μέγιστη συγκέντρωση από το Cs-137 που αποτέθηκε στα επιφανειακά εδάφη της Ελλάδας το 1986, εξαιτίας του ατυχήματος στο Chernobyl, είναι y cm.

διότι μπορεί να λάβει υπόψιν π.χ. την αβεβαιότητα με την οποία είναι γνωστοί οι συντελεστές D και ν, για τα ελληνικά εδάφη.

6.4 Προσομοίωση ραδιενεργού ρύπανσης με τον κώδικα GoldSim

6.4.1 Γενικά

Ο κώδικας GoldSim, διαθέτει ειδικό γραφικό παραθυρικό περιβάλλον (Contaminant Transport Module ή GoldSim CT) μέσα από το οποίο ο χρήστης μπορεί να προσομοιώσει σχετικά εύκολα την διάδοση ρύπων στο περιβάλλον. Οι ρύποι αυτοί δυνατόν να περιέχουν και ραδιοϊσότοπα. Το ειδικό γραφικό παραθυρικό περιβάλλον είναι σε αυτή την περίπτωση το λεγόμενο GoldSim RT. Η επιτυγχάνομενη προσομοίωση μπορεί να προβλέψει τις συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων στο υπέδαφος, στο νερό και τον αέρα, ή σχεδόν όπου αλλού ενδιαφέρει. Αν απαιτείται οι συγκεντρώσεις αυτές μπορούν να μετατραπούν σε δόσεις με την χρήση καταλλήλων συντελεστών.

Με τη χρήση του GoldSim RT, μπορούν να προσομοιώνονται κατ' αρχήν τα ακόλουθα πραγματικά προβλήματα:

(α) Διερεύνηση της διάδοσης και της τελικής τύχης ραδιενεργών ρύπων σε υδροφόρους ορίζοντες, ποτάμια, θαλάσσια, λιμναία ή ελώδη συστήματα και σε άλλα πολύπλοκα οικοσυστήματα.

(β) Αξιολόγηση της ασφαλούς υποδοχής ραδιενεργών ρύπων σε υπάρχοντες ή και προτεινόμενους χώρους ταφής.

Οι διεργασίες που προσομοιώνονται με το GoldSim RT είναι:

(1) Η απελευθέρωση ρύπων από συγκεκριμένες πηγές, λαμβάνοντας υπόψιν τόσο την αστοχία της συσκευασίας τους, όσο και την σταδιακή πιθανή καταστροφή των υλικών στα οποία οι ρύποι δεσμεύονται μέσα στις συσκευασίες (π.χ. το γυαλί).

(ii) Η διάδοση των ρύπων μέσα από πολλαπλές "οδούς διάδοσης" (transport pathways) μέσα σε ένα πολύπλοκο οικοσύστημα. Οι οδοί διάδοσης είναι πολλαπλές διότι πρέπει να καλύψουν τις περιπτώσεις μεταφοράς στον υδροφόρο ορίζοντα, στα επιφανειακά νερά, στο έδαφος, στον αέρα της ατμόσφαιρας κ.ο.κ. Η διάδοση των ρύπων μέσα από αυτές τις οδούς μπορεί να προσομοιώνεται καλύπτοντας τόσο τις περιπτώσεις της διάχυσης, όσο και της μεταφοράς. Στις οδούς διάδοσης μπορούν να εισάγονται περιορισμοί και οριακές συνθήκες, όπως η διαλυτότητα των ρύπων, και ο καταμερισμός τους προς ορισμένες από τις απολήξεις (storage media) των οδών διάδοσης. Δυνατόν είναι να συμπεριλαμβάνονται επίσης και χημικές αντιδράσεις και ραδιενεργές διασπάσεις.

6.4.2 Εφαρμογές

Το GoldSim RT αναπτύχθηκε για τις ανάγκες του Υπουργείου Ενέργειας των Η.Π.Α. (United States Department of Energy – DOE), προκειμένου να συνδράμει στην αξιολόγηση διαφόρων εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων που περιέχουν ραδιοϊσότοπα. Σήμερα (2007) χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση της καλής λειτουργίας χώρων απόθεσης αποβλήτων που περιέχουν ραδιοϊσότοπα, σε όλο τον πλανήτη. Αναφέρονται οι ακόλουθες κυριότερες εφαρμογές:

(1) Ορυχείο Ουρανίου

Με τη βοήθεια του GoldSim RT έγινε δυνατό να προσομοιωθεί η γεωχημική συμπεριφορά των καταλοίπων του μεταλλευτικού εμπλουτισμού Ουρανίου σε Ορυχείο Ουρανίου, ώστε να εκτιμηθεί η επίδραση αυτών των ρύπων στα κοντινά

υδρολογικά και υδρογεωλογικά συστήματα (βλ. και Διάγραμμα 6.1). Με τη βοήθεια πειραματικών δεδομένων η προσομοίωση με το GoldSim RT έδειξε ποιά είναι τα μέτρα που πρέπει να λαμβάνονται ώστε η απόθεση των καταλοίπων να μην επηρεάζει την ποιότητα του νερού.

(2) Εφαρμογές από διεθνείς και εθνικούς οργανισμούς

Έχει ήδη διαμορφωθεί ένας μάλλον μεγάλος κατάλογος διεθνών και εθνικών οργανισμών και εργαστηρίων οι οποίοι χρησιμοποιούν τον κώδικα GoldSim για θέματα ασφαλούς διάθεσης αποβλήτων που περιέχουν ραδιοϊσότοπα (βλ. και γραφική αναπαράσταση μιας τέτοιας προσομοίωσης στο Διάγραμμα 6.2). Αυτά κατά χώρα είναι (σε παρένθεση τα αντίστοιχα αρχικά ή η πλήρης περιγραφή του οργανισμού ή του εργαστηρίου):

Αίγυπτος (Egyptian Atomic Energy Agency), Αυστρία (IAEA), Γαλλία (ANDRA, IRSN), Γερμανία (DBE Technology, Wismut), Ηνωμένο Βασίλειο (Nexia Solutions, Nuclear Decommissioning Authority, Environment Agency, Serco Assurance, Galson, Quintessa), Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (Argonne National Laboratory, Los Alamos National Laboratory, Nevada Test Site, Nuclear Regulatory Commission, Sandia National Laboratories, Savannah River National Laboratory, Southwest Research Institute, Yucca Mountain Project), Ιαπωνία (JAEA, JNFL, JNES, JGC, Kajima, , Mitsubishi, NUMO, Taisei, Tepco, Toyo), Ισπανία (ENRESA), Κίνα (China National Nuclear Corporation), Νότια Κορέα (KAERI, KINS), Ταϊβάν (INER), Τσεχία (RWRA, NRI), Σλοβακία (VUJE).

6.5 Παράδειγμα προσομοίωσης ραδιενεργού ρύπανσης GoldSim

6.5.1 Οδηγίες χρήσης

Διατίθενται σε ηλεκτρονική μορφή τρεις τόμοι εγχειριδίων χρήσης του κώδικα GoldSim, οι:

- GoldSim User's Guide, "Probabilistic Simulation Environment", Chapters 1 – 7, Volume 1 (of 2), GoldSim Technology Group, Washington State, USA (approx. no. of pages: 720)

- GoldSim User's Guide, "Probabilistic Simulation Environment", Chapters 8 – 10, Appendices A – G, Volume 2 (of 2), GoldSim Technology Group, Washington State, USA (approx. no. of pages: 720)
- GoldSim Contaminant Transport Module User's Guide, Chapters 1 – 7, Appendices A – E, GoldSim Technology Group, Washington State, USA (approx. no. of pages: 320)

Όπως γίνεται κατανοητό οποιαδήποτε απόπειρα επεξεργασίας αυτών των κειμένων με στόχο την κατανόηση των δυνατοτήτων του κώδικα είναι πολύ φιλόδοξη για τα πλαίσια μιας Διπλωματικής Εργασίας. Και μόνο το μέγεθος των εγχειριδίων καθιστά την απόπειρα αυτή πάρα πολύ δύσκολη. Προκειμένου επομένως να δημιουργηθεί μία εικόνα από τις δυνατότητες προσομοίωσης του κώδικα GoldSim, αποφασίστηκε η παρουσίαση ενός παραδείγματος, όπως στη συνέχεια.

6.5.2 Παράδειγμα προβλήματος

100 βαρέλια², μονού τοιχώματος και διάρκειας ζωής 10 χρόνων, είναι θαμμένα στο έδαφος. Κάθε βαρέλι περιέχει 200 L νερό και 100 g χλωριούχο καίσιο (Cesium Chloride - CsCl). Το μόριο του χλωριούχου καϊσίου θεωρείται ότι έχει μοριακό βάρος 168 και σε ότι αφορά το καίσιο, αυτό αποτελείται μόνο από Cs-137. Κοντά στα βαρέλια βρίσκεται ο υδροφόρος ορίζοντας, ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί ότι περιέχει 100 m³ νερό. Τα βαρέλια παρουσιάζουν διαρροή προς τον υδροφόρο ορίζοντα με ρυθμό 0.5 m³ a⁻¹. Ζητείται ο ρυθμός απελευθέρωσης του χλωριούχου καϊσίου από τα βαρέλια στον υδροφόρο ορίζοντα ως συνάρτηση του χρόνου για τα επόμενα 20 χρόνια, αν δίνεται η διαλυτότητα του στο νερό ως ίση με 1.62 g mL⁻¹

6.5.3 Προσομοίωση του προβλήματος

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης είναι απαραίτητο να δηλωθούν ορισμένα δεδομένα:

1. Οι φυσικές ιδιότητες των ραδιενεργών ρύπων,
2. Οι φυσικές ιδιότητες των μέσων μεταφοράς των ρύπων, και του μέσου υποδοχής των ρύπων,

² Πρόκειται για τροποποίηση ήδη υπάρχοντος παραδείγματος του κώδικα GoldSim. Συγκεκριμένα το πρωτότυπο παράδειγμα βρίσκεται στη θέση C:\Program Files\GTG\GoldSim 9.xx\Contaminant Transport Examples\Source1.gsm

3. Ένα *Data Element*, το οποίο αντιπροσωπεύει τη συγκέντρωση του χλωριούχου καυσίου στα βαρέλια,
4. Ένα *Source Element*, το οποίο αντιπροσωπεύει τον όγκο νερού στα βαρέλια,
5. Ένα *Cell Pathway Element*, το οποίο αντιπροσωπεύει τη διαρροή νερού στον υδροφόρο ορίζοντα,
6. Η σύνδεση (*Link*) της πηγής των ραδιενεργών ρύπων με το μέσο υποδοχής τους, και
7. Ένα *Time History Element*, το οποίο αντιπροσωπεύει τα τελικά αποτελέσματα του ρυθμού απελευθέρωσης του χλωριούχου καυσίου από τα βαρέλια στον υδροφόρο ορίζοντα, ως συνάρτηση του χρόνου για τα επόμενα 20 χρόνια.

Στο Διάγραμμα 6.3 διακρίνεται το "πρώτο" παράθυρο του κώδικα GoldSim, το οποίο χρησιμοποιείται για την έναρξη της δημιουργίας μιας δυναμικής προσομοίωσης, όπως η εδώ ζητούμενη.

Για τις φυσικές ιδιότητες των ραδιενεργών ρύπων και των μέσων μεταφοράς:

Για να εισάγουμε στην προσομοίωση την παρουσία του χλωριούχου καϊσίου ανοίγουμε, από τον κατάλογο επιλογών που βρίσκεται αριστερά στο παράθυρο του Διαγράμματος 6.3, το στοιχείο **Material** και επιλέγουμε το στοιχείο **Species** (βλ. και Διάγραμμα 6.4). Εμφανίζεται στην οθόνη το παράθυρο "Master Species Properties", το οποίο διακρίνεται στο Διάγραμμα 6.5. Στο πεδίο με το όνομα **Element ID** διακρίνεται η ονομασία των στοιχείων **Species** η οποία ως τέτοια έχει δηλωθεί από τον κώδικα GoldSim και μπορεί να αλλάζει από το προηγούμενο "πρώτο" παράθυρο. Δεχόμαστε ότι η ονομασία όπως έχει είναι κατάλληλη και αντιπροσωπεύει στην πραγματικότητα τους ρύπους που είναι κλεισμένοι στα βαρέλια. Στο πεδίο με το όνομα **Description** δίνουμε –αν θέλουμε / χρειάζεται- μία σύντομη περιγραφή των **Species** και συμπληρώνοντας το πεδίο με το όνομα **Specify decay using** δηλώνουμε τον τρόπο με τον οποίο θα αναπαριστάται η ραδιενεργός διάσπαση. Επιλέγουμε να γίνεται σύμφωνα με το χρόνο ημιζωής (**Half-Lives**) και όχι σύμφωνα με την πιθανότητα διάσπασης (**Decay-Rates**) (βλ. και Διάγραμμα 6.6). Για να εισάγουμε στην λίστα των στοιχείων **Species** το χλωριούχο καϊσίο, επιλέγουμε το tab **Edit** (βλ. και Διάγραμμα 6.7). Εμφανίζεται στην οθόνη το παράθυρο "Edit Species", το οποίο διακρίνεται στο Διάγραμμα 6.8. Στο πεδίο με το όνομα **Species ID** δηλώνουμε την ονομασία του ρύπου ως **cesium_chloride** (χλωριούχο καϊσίο). Στο πεδίο με το όνομα **Description** δίνουμε –αν θέλουμε / χρειάζεται- μία σύντομη περιγραφή του ρύπου. Στο πεδίο με το όνομα **Molecular (or Atomic) Weight** δηλώνουμε το μοριακό βάρος του χλωριούχου καϊσίου, το οποίο θεωρείται ίσο με 168 και συμπληρώνοντας το πεδίο με το όνομα **Half-life** δηλώνουμε το χρόνο ημιζωής που εδώ λαμβάνεται ίσος με 30 y (βλ. και Διάγραμμα 6.9). Εφόσον ο συγκεκριμένος ρύπος θεωρείται εξολοκλήρου αποτελούμενος από $^{137}\text{CsCl}$, δεν συμπληρώνουμε το πεδίο **Isotope**. Αντίστοιχα επειδή ο συγκεκριμένος ρύπος είναι ραδιενεργός και διασπάται συμπληρώνουμε το πεδίο **Radioactive**. Στο πεδίο με το όνομα **Daughter**, δηλώνουμε αν υπάρχουν, τα θυγατρικά του ρύπου. Αφού επιλέξουμε το tab **OK**, εμφανίζεται στην λίστα των ρύπων στο παράθυρο "Master Species Properties" το χλωριούχο καϊσίο (βλ. και Διάγραμμα 6.10). Με το επόμενο **OK**, επιστρέφουμε στο "πρώτο" παράθυρο (βλ. και Διάγραμμα 6.4) και επιλέγουμε το στοιχείο **Water**. Εμφανίζεται στην οθόνη το παράθυρο "Reference Fluid Properties", το οποίο διακρίνεται στο Διάγραμμα 6.11.

Στο πεδίο με το όνομα **Element ID** διακρίνεται η ονομασία του στοιχείου **Water** η οποία ως τέτοια έχει δηλωθεί από τον κώδικα GoldSim και μπορεί να αλλάζει από το προηγούμενο "πρώτο" παράθυρο. Δεχόμαστε ότι η ονομασία όπως έχει είναι κατάλληλη και αντιπροσωπεύει στην πραγματικότητα το νερό του υδροφόρου ορίζοντα. Στο πεδίο με το όνομα **Description** δίνουμε –αν θέλουμε / χρειάζεται- μία σύντομη περιγραφή του **Water**. Στο πεδίο με το όνομα **Reference diffusivity** δηλώνουμε –αν θέλουμε / χρειάζεται- τη σταθερά διάχυσης του **Water**, η οποία δίνεται έτοιμη από τον κώδικα GoldSim ίση με $10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, και την οποία δεν αλλάζουμε. Επιλέγοντας το tab **Edit**, το οποίο αφορά στο πεδίο **Relative Diffusivities**, μπορούμε να διαμορφώσουμε το συντελεστή διάχυσης του χλωριούχου καισίου στο **Water**. Στην περίπτωση της εξεταζόμενης προσομοίωσης επιλέγουμε ο συντελεστής διάχυσης του χλωριούχου καισίου στο νερό να θεωρείται ίσος με $1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (βλ. και Διάγραμμα 6.12). Επιλέγοντας το tab **OK** επιστρέφουμε στο παράθυρο "Reference Fluid Properties". Επιλέγοντας το tab **Edit**, το οποίο αφορά στο πεδίο **Solubilities**, μπορούμε να διαμορφώσουμε τη διαλυτότητα του χλωριούχου καισίου στο **Water**. Επιλέγουμε η τιμή διαλυτότητας του χλωριούχου καισίου στο **Water** να θεωρείται ίση με 1.62 g mL^{-1} (βλ. και Διάγραμμα 6.13). Επιλέγοντας το tab **OK** επιστρέφουμε και πάλι στο παράθυρο "Reference Fluid Properties". Με το επόμενο **OK**, επιστρέφουμε και πάλι στο "πρώτο" παράθυρο (βλ. και Διάγραμμα 6.4).

Για την εισαγωγή ενός *Data Element*

Για να εισάγουμε στην προσομοίωση ένα *Data Element*, το οποίο αντιπροσωπεύει τη συγκέντρωση του χλωριούχου καΐσιου στα βαρέλια, επιλέγουμε από το tab **Model** τη διαδρομή *Insert Element > Inputs > Data* (βλ. και Διάγραμμα 6.14). Έτσι εμφανίζεται στην οθόνη το παράθυρο "Data Properties", το οποίο διακρίνεται στο Διάγραμμα 6.15. Στο πεδίο με το όνομα *Element ID* δηλώνουμε την ονομασία του *Data Element*, εδώ δεχόμαστε ότι αυτή που δίνει αυτόματα ο κώδικας GoldSim "**Initial_Inventory**" είναι ικανοποιητική. Στο πεδίο με το όνομα *Description* δίνουμε –αν θέλουμε / χρειάζεται– μία σύντομη περιγραφή του *Data Element* και συμπληρώνοντας το πεδίο με το όνομα *Display Units* δηλώνουμε τις μονάδες του *Data Element*, εδώ g (βλ. και Διάγραμμα 6.16). Επιλέγοντας το tab **Type** μετακινούμαστε στην συνέχεια στο παράθυρο "Define Output Attributes", όπως αυτό διακρίνεται στο Διάγραμμα 6.17. Στο πεδίο με το όνομα *Order* επιλέγουμε **Vector (1D-Array)**. Με αυτήν την επιλογή, "ανοίγει" το επιπλέον πεδίο *Row Labels*, στο οποίο επιλέγουμε **Species** (βλ. και Διάγραμμα 6.18). Με την επιλογή του tab **OK** επιστρέφουμε στο παράθυρο "Data Properties" (βλ. και Διάγραμμα 6.16), από όπου επιλέγοντας το tab **Edit Vector**, οδηγούμαστε στο παράθυρο "Edit Vector: Data1. Definition", όπως αυτό διακρίνεται στο Διάγραμμα 6.19. Επειδή γνωρίζουμε ότι αρχικά κάθε βαρέλι περιέχει 100 g χλωριούχο καΐσιο συμπληρώνουμε το κενό αντίστοιχο πεδίο με την ποσότητα "100" και ξαναγυρίζουμε στο παράθυρο "Data Properties" επιλέγοντας **OK** (βλ. και Διάγραμμα 6.16). Τέλος συμπληρώνοντας τα πεδία *Final Values* και *Time Histories* ορίζουμε ότι όταν γίνει η προσομοίωση τα αποτελέσματα της θα δίνονται τόσο ως τελικές τιμές (Final Values) όσο και ως ακολουθίες αποτελεσμάτων που μεταβάλλονται με το χρόνο (Time Histories). Επιλέγοντας το tab **OK** στο παράθυρο "Data Properties" επιστρέφουμε στο "πρώτο" παράθυρο (Διάγραμμα 6.3), το οποίο όμως τώρα περιέχει και το *Data Element* "**Initial_Inventory**", όπως διακρίνεται στο Διάγραμμα 6.20.

Για την εισαγωγή ενός *Source Element*

Για να εισάγουμε στην προσομοίωση ένα *Source Element*, το οποίο αντιπροσωπεύει τον όγκο νερού στα βαρέλια, επιλέγουμε από το tab **Model** τη διαδρομή *Insert Element > Contaminant Transport > Source* (βλ. και Διάγραμμα 6.21). Έτσι εμφανίζεται στην οθόνη το παράθυρο "Source Properties: Source1", το οποίο διακρίνεται στο Διάγραμμα 6.22. Στο πεδίο με το όνομα *Element ID* δηλώνουμε την ονομασία του *Source Element*, ως "**Burried_Drums**" (Θαμμένα Βαρέλια). Στο πεδίο με το όνομα *Description* δίνουμε –αν θέλουμε / χρειάζεται– μία σύντομη περιγραφή του *Source Element*. Στο πεδίο με το όνομα *Number of Packages* δηλώνουμε τον αριθμό των Θαμμένων Βαρελιών (100), ενώ συμπληρώνοντας στο πεδίο με το όνομα *Number of Barriers* την επιλογή **single** δηλώνουμε ότι τα βαρέλια έχουν μονό τοίχωμα (βλ. και Διάγραμμα 6.23). Με αυτήν την επιλογή, "ενεργοποιείται" το tab **Outer barrier**. Επιλέγοντας το υπόψιν tab οδηγούμαστε στο παράθυρο "Outer Barrier Failure", όπως αυτό διακρίνεται στο Διάγραμμα 6.24. Το πεδίο με το όνομα *Effective time* είναι συμπληρωμένο από το GoldSim με την επιλογή **E Time**. Αντίστοιχα το πεδίο με το όνομα της πιθανότητας *Probability* είναι συμπληρωμένο με την μονάδα. Τα δύο αυτά πεδία τα αφήνουμε ως έχουν. Συμπληρώνουμε όμως το πεδίο με το όνομα *Distribution* με την επιλογή **Uniform** για να δηλώσουμε ότι η φθορά του εξωτερικού τοιχώματος κάθε θαμμένου βαρελιού γίνεται με ομοιόμορφο τρόπο (βλ. και Διάγραμμα 6.25). Με αυτήν την επιλογή "ανοίγει" για συμπλήρωση το επιπλέον πεδίο *Duration*, το οποίο αναφέρεται στη διάρκεια ζωής του μονού εξωτερικού τοιχώματος κάθε βαρελιού (**Failure Mode Definition**). Γνωρίζουμε ότι το εξωτερικό τοίχωμα κάθε βαρελιού έχει διάρκεια ζωής 10 χρόνια, οπότε συμπληρώνουμε 10 y (βλ. και Διάγραμμα 6.26). Με την επιλογή του tab **Close** επιστρέφουμε στο παράθυρο "Source Properties: Source1" (βλ. και Διάγραμμα 6.23). Στη λίστα *Inventory Cells* θέλουμε τώρα να δηλώσουμε την παρουσία ενός "κελιού" (Cell), το οποίο θα περιέχει νερό, δηλαδή θέλουμε να δηλώσουμε την παρουσία του νερού μέσα στα θαμμένα βαρέλια. Επειδή ήδη είναι δηλωμένο ένα κελί, **Cell 1**, επιλέγοντας "δεξιά" το κόκκινο tab "x" διαγράφουμε το συγκεκριμένο κελί, προκειμένου να δημιουργήσουμε ένα δικό μας με τις επιθυμητές ιδιότητες. Το αποτέλεσμα της διαγραφής διακρίνεται στο Διάγραμμα 6.27. Για να δημιουργήσουμε δικό μας κελί, μέσω του οποίου θα δηλώσουμε την παρουσία του

νερού μέσα στα θαμμένα βαρέλια, επιλέγουμε "δεξιά" το πράσινο tab +. Εμφανίζεται ο διάλογος 6.28. Επιλέγοντας **Ναι** έχουμε τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε το κελί που επιθυμούμε. Εμφανίζεται τότε στην οθόνη το παράθυρο "Cell Pathway Properties: Cell 2", όπως διακρίνεται και στο Διάγραμμα 6.29. Σε αυτό το παράθυρο στο πεδίο με το όνομα **Element ID** δηλώνουμε την ονομασία του **Cell Pathway**, ως **Drums**. Στο πεδίο με το όνομα **Description** δίνουμε –αν θέλουμε / χρειάζεται– μία σύντομη περιγραφή της λειτουργίας του **Cell Pathway**. Το πεδίο με το όνομα **Medium** είναι συμπληρωμένο από τον κώδικα GoldSim με την επιλογή **Water**, μέσω της οποίας δηλώνουμε την παρουσία του νερού στα θαμμένα βαρέλια – το αφήνουμε όπως είναι. Στο πεδίο με το όνομα **Amount** συμπληρώνουμε 200 L, εφόσον γνωρίζουμε ότι κάθε θαμμένο βαρέλι περιέχει 200 L νερό με CsCl. Τέλος επιλέγοντας το πεδίο **F** (που σημαίνει Save Final Concentration) και το πεδίο **H** (που σημαίνει Save History Concentration) θα μπορέσουμε μέσω της προσομοίωσης να παρακολουθήσουμε τόσο τη χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων στα βαρέλια, όσο και να αποθηκεύσουμε τις τελικές τους τιμές (βλ. και Διάγραμμα 6.30). Επιλέγοντας το tab **OK** στο παράθυρο "Cell Pathway Properties: Cell 2" επιστρέφουμε στο παράθυρο "Source Properties: Source1", το οποίο τώρα έχει φυσικά μετονομασθεί σε "Source Properties: Burried_Drums" (βλ. και Διάγραμμα 6.31). Συνεχίζοντας σε αυτό το παράθυρο επιλέγουμε το tab **Edit** και μεταφερόμαστε στο παράθυρο "Source Inventories", το οποίο διακρίνεται στο Διάγραμμα 6.32. Σε αυτό, το πεδίο **Species Mass** είναι συμπληρωμένο με το **Data Element "Initial_Inventory"**. Επιλέγοντας το tab **Close** επιστρέφουμε στο παράθυρο "Source Properties: Burried_Drums" (βλ. και Διάγραμμα 6.32). Επιλέγοντας το tab **OK** στο παράθυρο αυτό επιστρέφουμε στο "πρώτο" παράθυρο (Διάγραμμα 6.3), το οποίο όμως τώρα περιέχει και το **Source Element "Burried_Drums"**, όπως διακρίνεται στο Διάγραμμα 6.33.

Για την εισαγωγή ενός *Cell Pathway Element*

Για να εισάγουμε στην προσομοίωση ένα *Cell Pathway Element*, το οποίο να αντιπροσωπεύει τη διαρροή νερού από τα βαρέλια στον υδροφόρο ορίζοντα, επιλέγουμε από το tab **Model** τη διαδρομή *Insert Element > Contaminant Transport > Cell Pathway* (βλ. και Διάγραμμα 6.34). Έτσι εμφανίζεται στην οθόνη το παράθυρο "Cell Pathway Properties: Cell 1", το οποίο διακρίνεται στο Διάγραμμα 6.35. Στο πεδίο με το όνομα *Element ID* δηλώνουμε την ονομασία του *Cell Pathway Element*, ως "**Aquifer**" (Υδροφόρος Ορίζοντας). Στο πεδίο με το όνομα *Description* δίνουμε –αν θέλουμε / χρειάζεται–μία σύντομη περιγραφή του *Cell Pathway Element*. Το πεδίο με το όνομα *Medium* είναι συμπληρωμένο με την επιλογή **Water**, μέσω της οποίας δηλώνουμε την παρουσία νερού στον υδροφόρο ορίζοντα. Στο πεδίο με το όνομα *Amount* συμπληρώνουμε 100 m³, εφόσον έχουμε θεωρήσει ότι ο υδροφόρος ορίζοντας περιέχει 100 m³ νερό (βλ. και Διάγραμμα 6.36). Επιλέγοντας το tab **OK** στο παράθυρο αυτό, επιστρέφουμε στο "πρώτο" παράθυρο (Διάγραμμα 6.3), το οποίο όμως τώρα περιέχει και το *Cell Pathway Element "Aquifer"*, όπως διακρίνεται στο Διάγραμμα 6.37.

Για την εισαγωγή ενός *Link*

Για να δημιουργήσουμε ένα *Link* από το *Source Element* "**Burried_Drums**" δια του οποίου να δηλώσουμε τη διαρροή νερού από τα θαμμένα βαρέλια στον υδροφόρο ορίζοντα, επιλέγουμε και (ξανά) ανοίγουμε το *Cell Pathway Element* "**Aquifer**", το οποίο –όπως ίσως γίνεται κατανοητό- είναι ακριβώς εκείνο το "παράθυρο", το οποίο πριν μετονομασθεί άνοιγε ως "Cell Pathway Properties: Cell 1" και τώρα ανοίγει ως "Cell Pathway Properties: Aquifer" (βλ. και Διάγραμμα 6.38). Για να δημιουργήσουμε το *Link* μέσω του οποίου θα δηλώσουμε τη διαρροή νερού από τα θαμμένα βαρέλια στον υδροφόρο ορίζοντα, επιλέγουμε το tab **Inflows**. Εμφανίζεται το παράθυρο του Διαγράμματος 6.39. Επιλέγοντας το tab **Add Inflow**, μπορούμε να δηλώσουμε το *Link* από το source Element "**Burried_Drums**" στο Cell Pathway Element "**Aquifer**", αν στο παράθυρο "Select Pathway to Link to:" (βλ. και Διάγραμμα 6.40), επιλέξουμε "**Drums**" και μετά **OK**. Εμφανίζεται το παράθυρο "Add Inflow to Pathway "Aquifer"" (βλ. και Διάγραμμα 6.41), όπου θέτουμε **Coupled** στην επιλογή *Link Type* και επιστρέφουμε με **OK** στο παράθυρο "Cell Pathway Properties: Aquifer", όπου διαπιστώνουμε ότι στο tab **Inflows**, το πεδίο με το όνομα *From Pathway* είναι συμπληρωμένο με την επιλογή "**Drums**" (Βαρέλια), με το οποίο έχουμε δηλώσει το σημείο από το οποίο αρχίζει η διαρροή, το πεδίο με το όνομα *To Pathway* είναι συμπληρωμένο με την επιλογή "**Aquifer**" (Υδροφόρος Ορίζοντας), με το οποίο έχουμε δηλώσει το σημείο στο οποίο καταλήγει η διαρροή, και τέλος το πεδίο *Medium* είναι συμπληρωμένο με την επιλογή "**Water**", με το οποίο έχουμε δηλώσει το μέσο δια του οποίου γίνεται η διαρροή προς τον υδροφόρο ορίζοντα. Στο πεδίο με το όνομα *Flow Rate* συμπληρώνουμε $0.5 \text{ m}^3 \text{ y}^{-1}$, εφόσον γνωρίζουμε ότι τα βαρέλια παρουσιάζουν διαρροή προς τον υδροφόρο ορίζοντα με ρυθμό 0.5 m^3 ανά χρόνο. Επιλέγοντας το tab **OK** στο παράθυρο αυτό, επιστρέφουμε στο "πρώτο" παράθυρο (Διάγραμμα 6.3), το οποίο όμως τώρα περιέχει και το *Link* που αντιπροσωπεύει τη διαρροή νερού από τα βαρέλια "**Burried_Drums**" στον υδροφόρο ορίζοντα "**Aquifer**", όπως διακρίνεται στο Διάγραμμα 6.43.

Για την εισαγωγή ενός *Time History Element*

Για να εισάγουμε στην προσομοίωση ένα *Time History Element*, το οποίο αντιπροσωπεύει τα τελικά αποτελέσματα της απελευθέρωσης του χλωριούχου καισίου από τα βαρέλια στον υδροφόρο ορίζοντα, ως συνάρτηση του χρόνου για τα επόμενα 20 χρόνια επιλέγουμε από το tab **Model** τη διαδρομή *Insert Element > Results > History* (βλ. και Διάγραμμα 6.44). Έτσι εμφανίζεται στην οθόνη το παράθυρο "Time History Properties: Result 1", το οποίο διακρίνεται στο Διάγραμμα 6.45. Στο πεδίο με το όνομα *Element ID* δηλώνουμε την ονομασία του *Time History Element*, ως "**Flux_to_Aquifer**." Στο πεδίο με το όνομα *Description* δίνουμε –αν θέλουμε / χρειάζεται– μία σύντομη περιγραφή του *Time History Element*. Επειδή στη συγκεκριμένη προσομοίωση θέλουμε να μοντελοποιήσουμε και το ρυθμό απελευθέρωσης του χλωριούχου καισίου από τα βαρέλια προς στον υδροφόρο ορίζοντα ως συνάρτηση του χρόνου για τα επόμενα 20 χρόνια, επιλέγουμε το tab **Add Input**. Εμφανίζεται τότε στην οθόνη το παράθυρο "Select the output to link to:", όπως διακρίνεται στο Διάγραμμα 6.46. Αναπτύσσοντας το *Properties > Drums > Outflows > Water_to_Aquifer > cesium_chloride*, εισάγουμε στη λίστα των *Inputs* του Διαγράμματος 6.45 τη διαρροή του χλωριούχου καισίου διαμέσου του νερού, ως αποτέλεσμα για το οποίο πρέπει να υπολογίζονται από την προσομοίωση χρονικές μεταβολές (βλ. και το νέο παράθυρο "Time History Properties: Flux_to_Aquifer", το οποίο αντικαθιστά το παράθυρο "Time History Properties: Result 1" – Διάγραμμα 6.47). Επιλέγοντας το tab **OK** στο παράθυρο αυτό, επιστρέφουμε στο "πρώτο" παράθυρο (Διάγραμμα 6.3), το οποίο όμως τώρα περιέχει και το *Time History Element "Flux_to_Aquifer"*, όπως διακρίνεται στο Διάγραμμα 6.48.

Για την οργάνωση των χρονικών παραμέτρων της προσομοίωσης

Για να οργανώσουμε τις χρονικές παραμέτρους της προσομοίωσης πάμε στο tab **Run** και επιλέγουμε τη διαδρομή **Simulation Settings** (βλ. και Διάγραμμα 4.49). Έτσι εμφανίζεται στην οθόνη το παράθυρο "Simulation Settings", το οποίο διακρίνεται στο Διάγραμμα 6.50. Στο πεδίο με το όνομα **Time Display Units** συμπληρώνουμε yr και στο πεδίο με το όνομα **Duration** συμπληρώνουμε 20 yr. Επιλέγοντας το tab **OK** στο παράθυρο αυτό, είμαστε πλέον έτοιμοι να "τρέξουμε" την προσομοίωση.

6.5.4 Λύση του προβλήματος με χρήση της προσομοίωσης

Για να "τρέξουμε" την προσομοίωση επιλέγουμε στο tab **Run** τη επιλογή **Run Model** (βλ. και Διάγραμμα 6.51). Ο κώδικας εμφανίζει το εικονίδιο **GoldSim Run Controller**. Επιλέγοντας **Run**, πραγματοποιείται η προσομοίωση (βλ. και Διάγραμμα 6.52). Τότε εμφανίζεται στην οθόνη το παράθυρο "GoldSim Run Log – Σημειωματάριο" (βλ. και Διάγραμμα 6.53) με πληροφορίες κειμένου για το "τρέξιμο". Αν το "τρέξιμο" είναι επιτυχές κλείνουμε το υπόψιν παράθυρο και προχωράμε στο να παραλάβουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

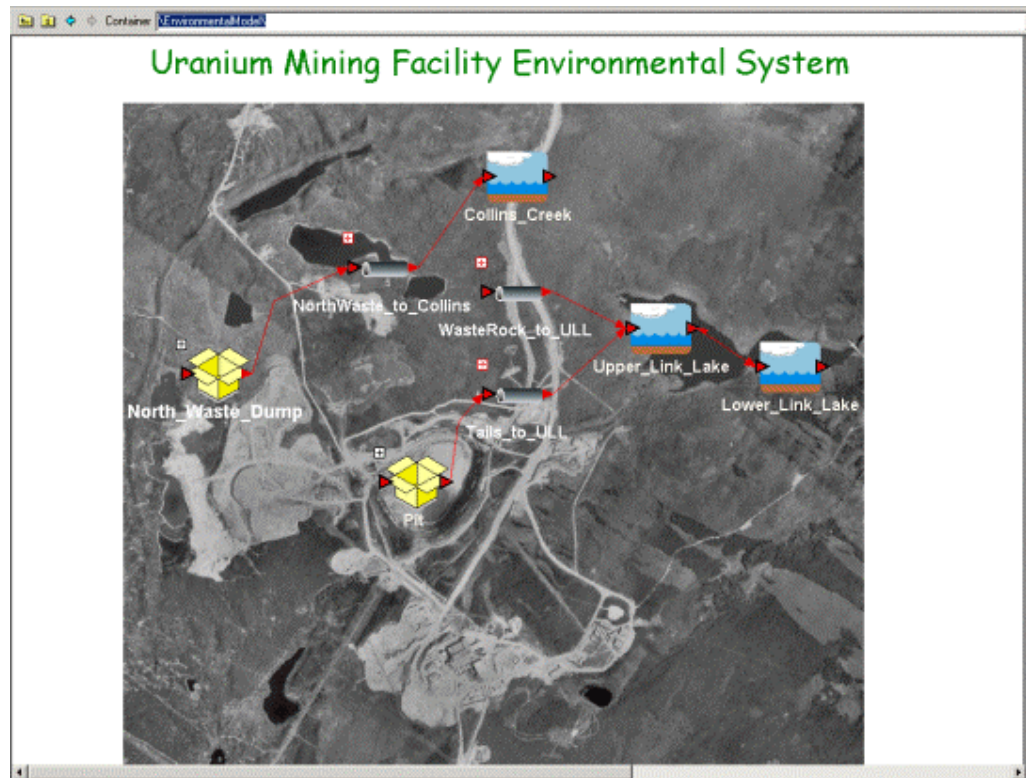
Για να εμφανίσουμε λοιπόν στην οθόνη τα αποτελέσματα που αφορούν το ρυθμό απελευθέρωσης του χλωριούχου καισίου από τα βαρέλια στον υδροφόρο ορίζοντα ως συνάρτηση του χρόνου για τα επόμενα 20 χρόνια, κάνουμε "δεξί κλικ" στο στοιχείο **Flux_to_Aquifer** και επιλέγουμε **Function of** όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 6.54. Εμφανίζεται στη οθόνη το παράθυρο "Function Of View: Flux_to_Aquifer", όπως διακρίνεται και στο Διάγραμμα 6.55. Στο παράθυρο αυτό, αν επιλέξουμε **Flux_to_Aquifer**, παρουσιάζεται στην οθόνη η γραφική παράσταση η οποία αντιπροσωπεύει τα αποτελέσματα του ρυθμού απελευθέρωσης του χλωριούχου καισίου από τα βαρέλια στον υδροφόρο ορίζοντα ως συνάρτηση του χρόνου για τα επόμενα 20 χρόνια. Η γραφική παράσταση αυτή απεικονίζεται στο Διάγραμμα 6.56.

6.6 Συμπεράσματα για τον κώδικα GoldSim

Όπως φάνηκε, από το προηγούμενο παράδειγμα ο κώδικας προσομοίωσης GoldSim, είναι πολύ φιλικός προς τον χρήστη, εξαιτίας του γραφικού παραθυρικού περιβάλλοντος πάνω στο οποίο βασίζεται και αναπτύσσεται. Παρόλαυτά φάνηκε επίσης ότι απαιτείται ισχυρή εμπειρία και τριβή του χρήστη προκειμένου αυτός να

αναπτύξει δικές του προσομοιώσεις, που να ξεφεύγουν βεβαίως από τις εφαρμογές τύπου "λογιστικά φύλλα". Έτσι δεν επιχειρήθηκε στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας κάποια προσομοίωση της κατακόρυφης μετανάστευσης του Cs-137 σε έδαφος με βάση κάποιο από τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Τέτοιες προσομοιώσεις φαίνονται κατ'αρχήν δυνατές. Το σημείο φυσικά που προβληματίζει είναι ότι για αυτές τις προσομοιώσεις, όσο ικανοποιητικά γνωστές και αν είναι οι αρχικές επιφανειακές αποθέσεις του Cs-137 δεν είναι πολύ καλά γνωστοί οι συντελεστές (π.χ. οι D και ν) οι οποίοι καθορίζουν τη χρονική συμπεριφορά όλων των μοντέλων και τη διάδοση του ραδιοϊσοτόπου κατά το βάθος. Ο κώδικας GoldSim, δεδομένης της υβριδικής του μορφής και των δυνατοτήτων αποδοχής στοχαστικών δεδομένων θα μπορούσε πάντως να χρησιμοποιηθεί για τέτοιες προσομοιώσεις ακόμα και αν δεχθεί κανείς ότι υπάρχει αβεβαιότητα στις τιμές των παραμέτρων που καθορίζουν τον τρόπο και την χρονική κλίμακα της κατακόρυφης μετανάστευσης ραδιοϊσοτόπου στο έδαφος.

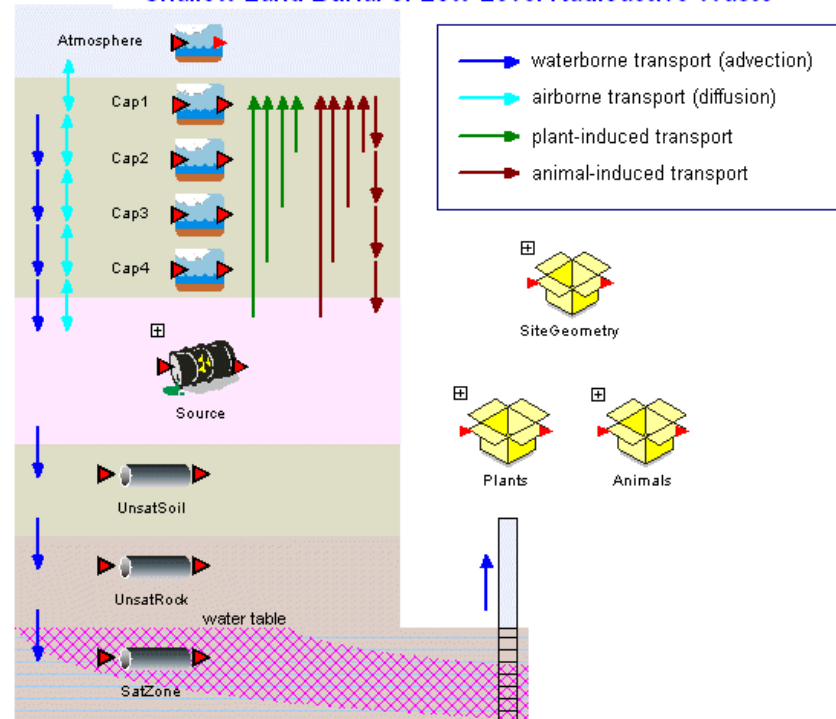
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 6^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



Διάγραμμα 6.1

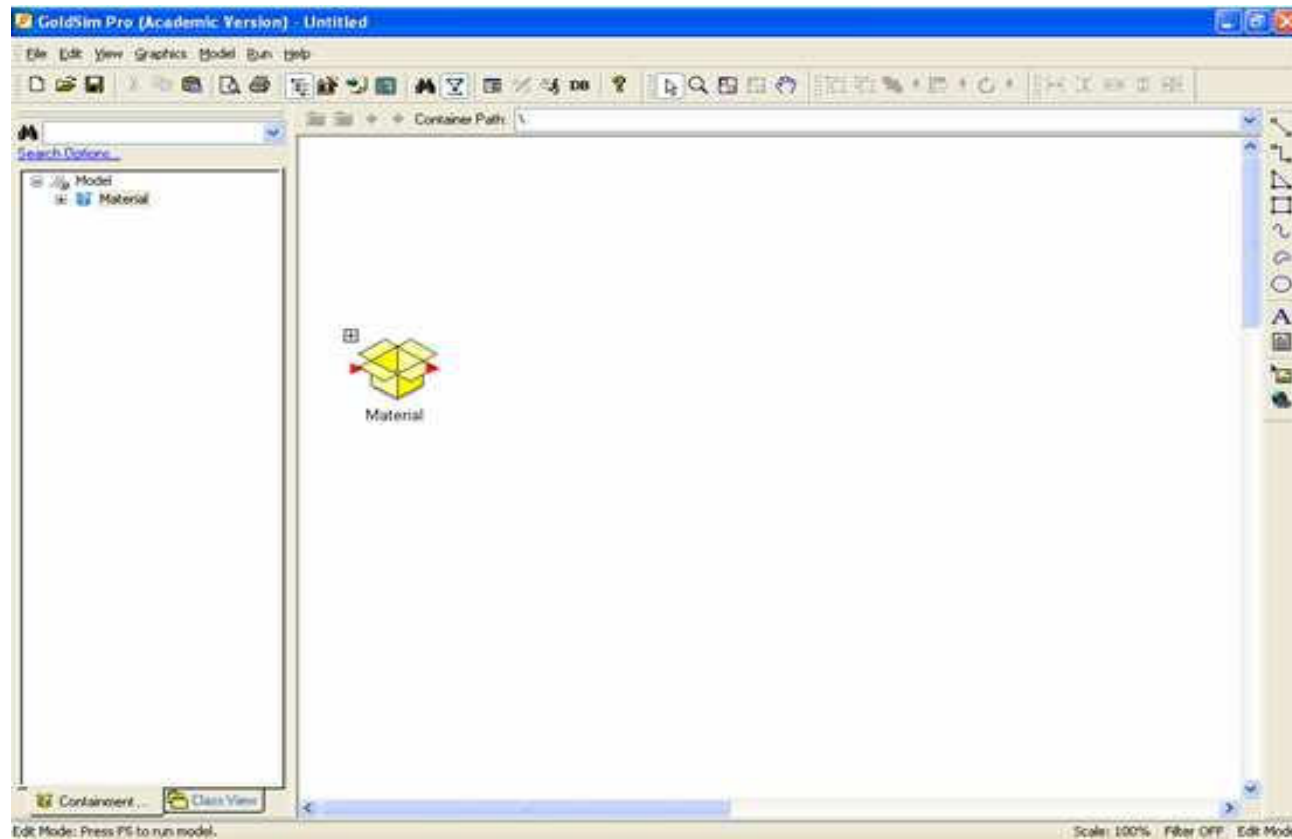
Προσομοίωση ορυχείου Ουρανίου και των αντίστοιχων περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην υδρολογία και την υδρογεωλογία με τον κώδικα GoldSim.

GoldSim Model of Shallow Land Burial of Low-Level Radioactive Waste



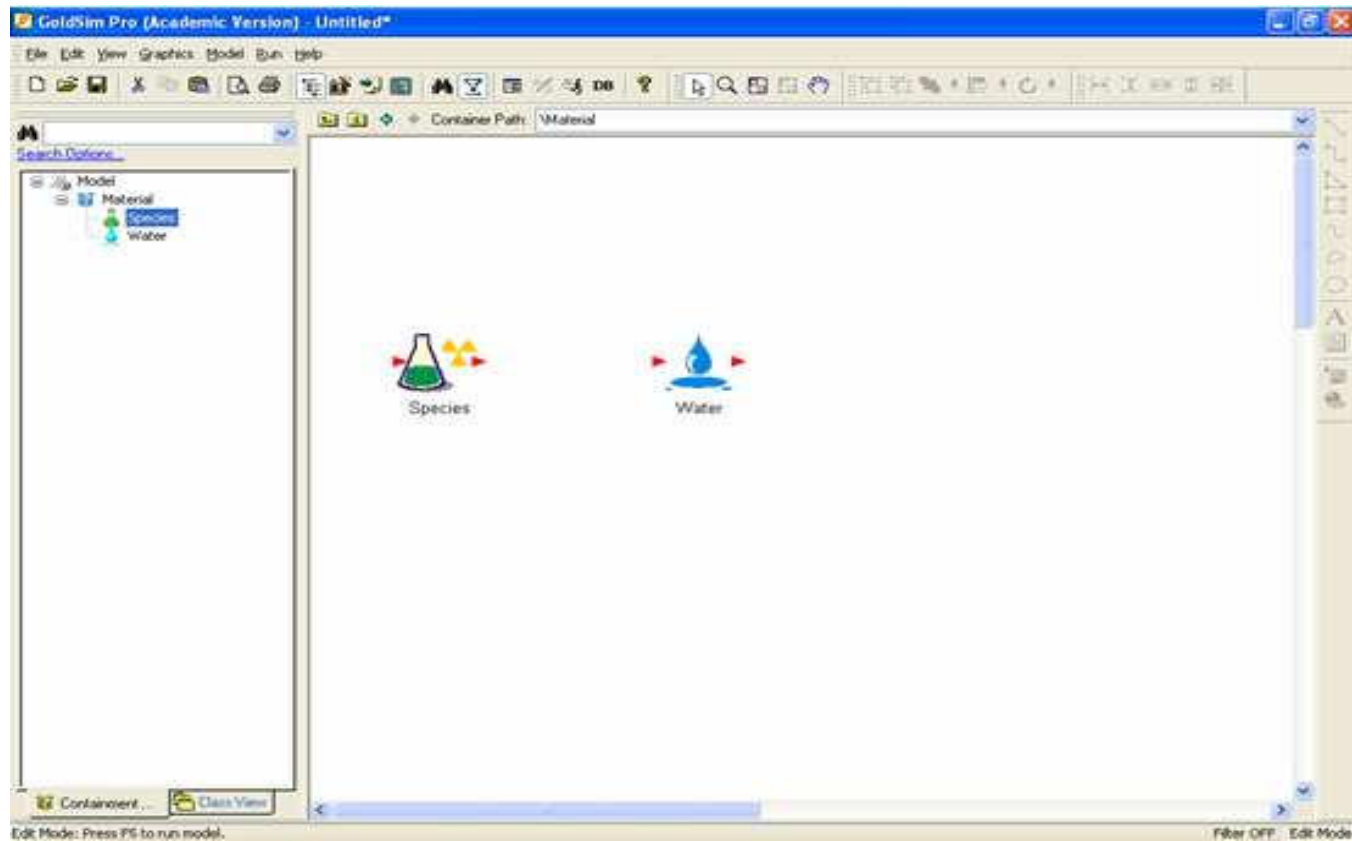
Διάγραμμα 6.2

Προσομοίωση επιφανειακής ταφής ραδιενεργών αποβλήτων μικρής ενεργότητας και των αντίστοιχων περιβαλλοντικών επιπτώσεων με τον κώδικα GoldSim.



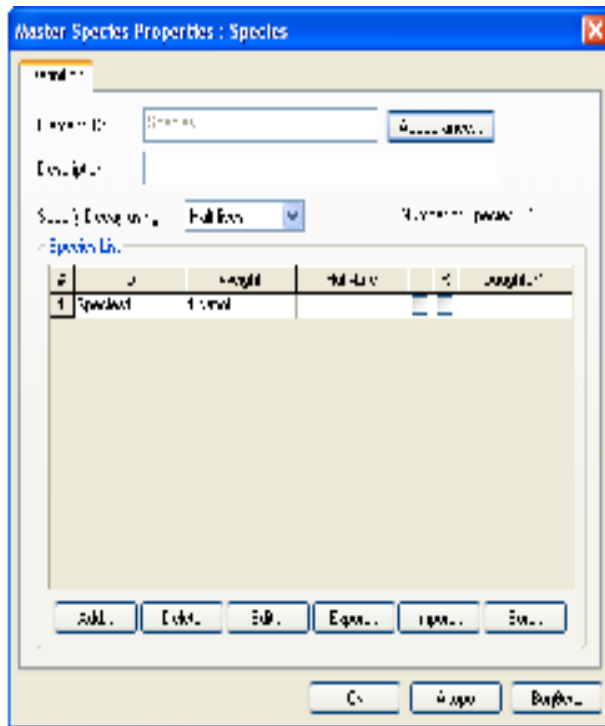
Διάγραμμα 6.3

"Πρώτο" παράθυρο του κώδικα GoldSim: Έναρξη δημιουργίας δυναμικής προσομοίωσης

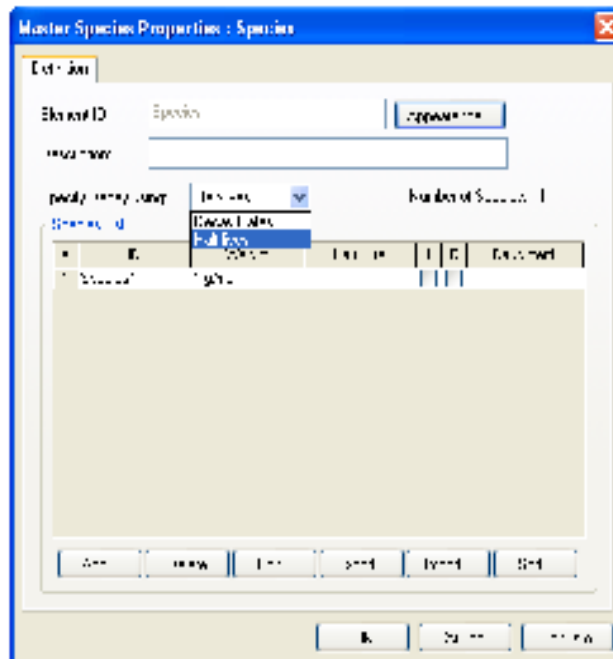


Διάγραμμα 6.4

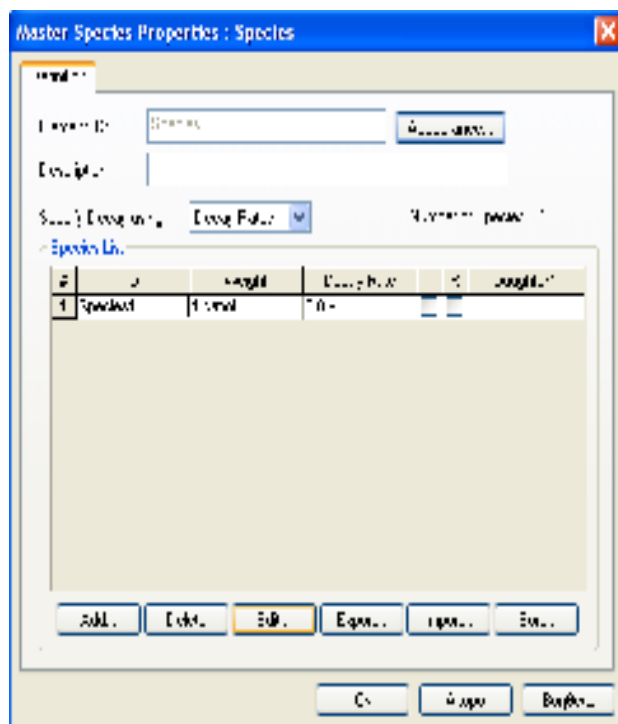
Εισαγωγή ραδιενεργού ρύπου στον κώδικα GoldSim: *Materials* > *Species*



Διάγραμμα 6.5
Παράθυρο "Master Species Properties"

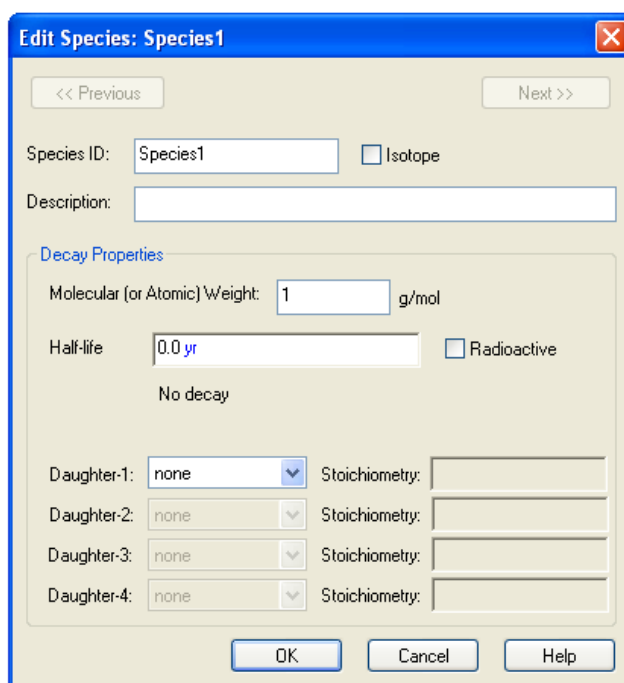


Διάγραμμα 6.6
Παράθυρο "Master Species Properties": Η ραδιενεργός διάσπαση γίνεται με βάση το χρόνο ημιζωής



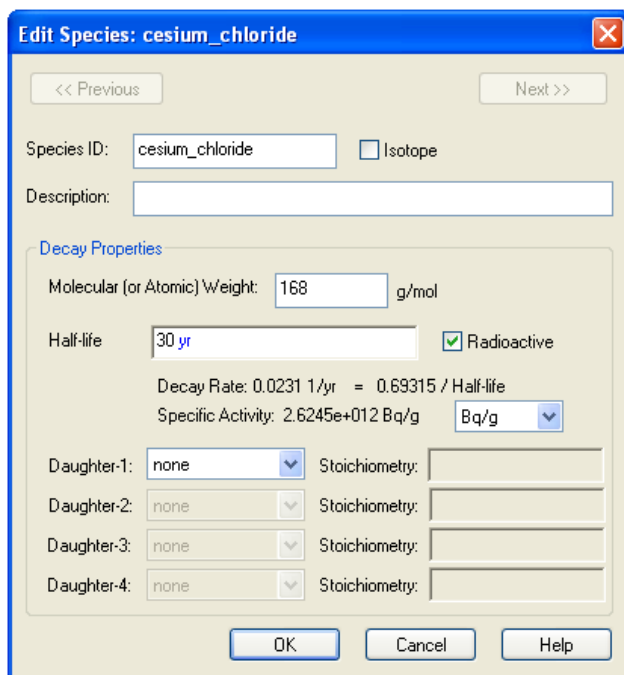
Διάγραμμα 6.7

Παράθυρο "Master Species Properties": Επιλογή tab Edit



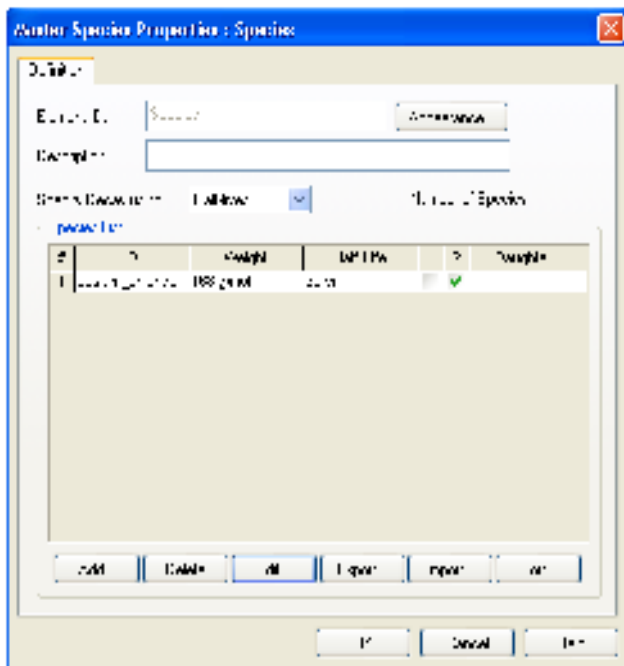
Διάγραμμα 6.8

Παράθυρο "Edit Species"



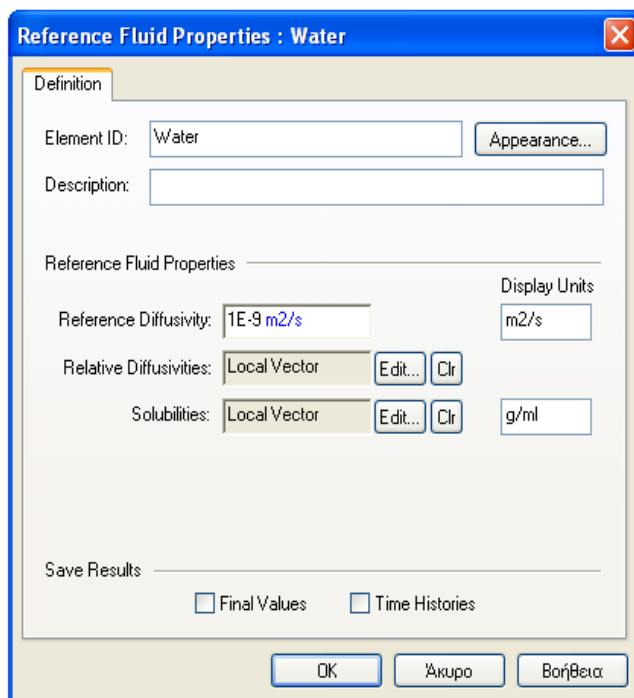
Διάγραμμα 6.9

Παράθυρο "Edit Species": Συμπλήρωση πεδίων

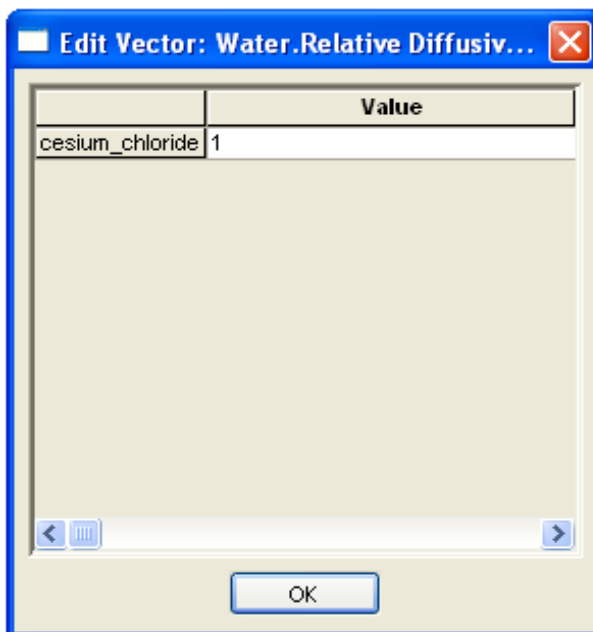


Διάγραμμα 6.10

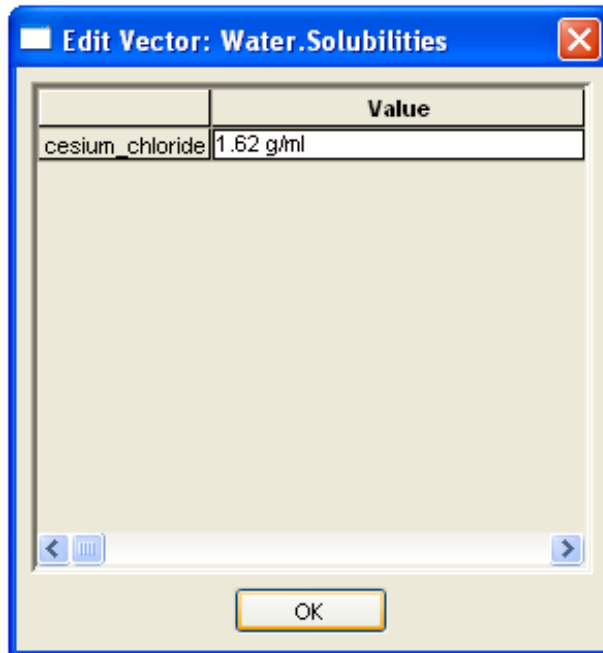
Παράθυρο "Master Species Properties": Επιστροφή από το παράθυρο "Edit Species"



Διάγραμμα 6.11
Παράθυρο "Reference Fluid Properties"

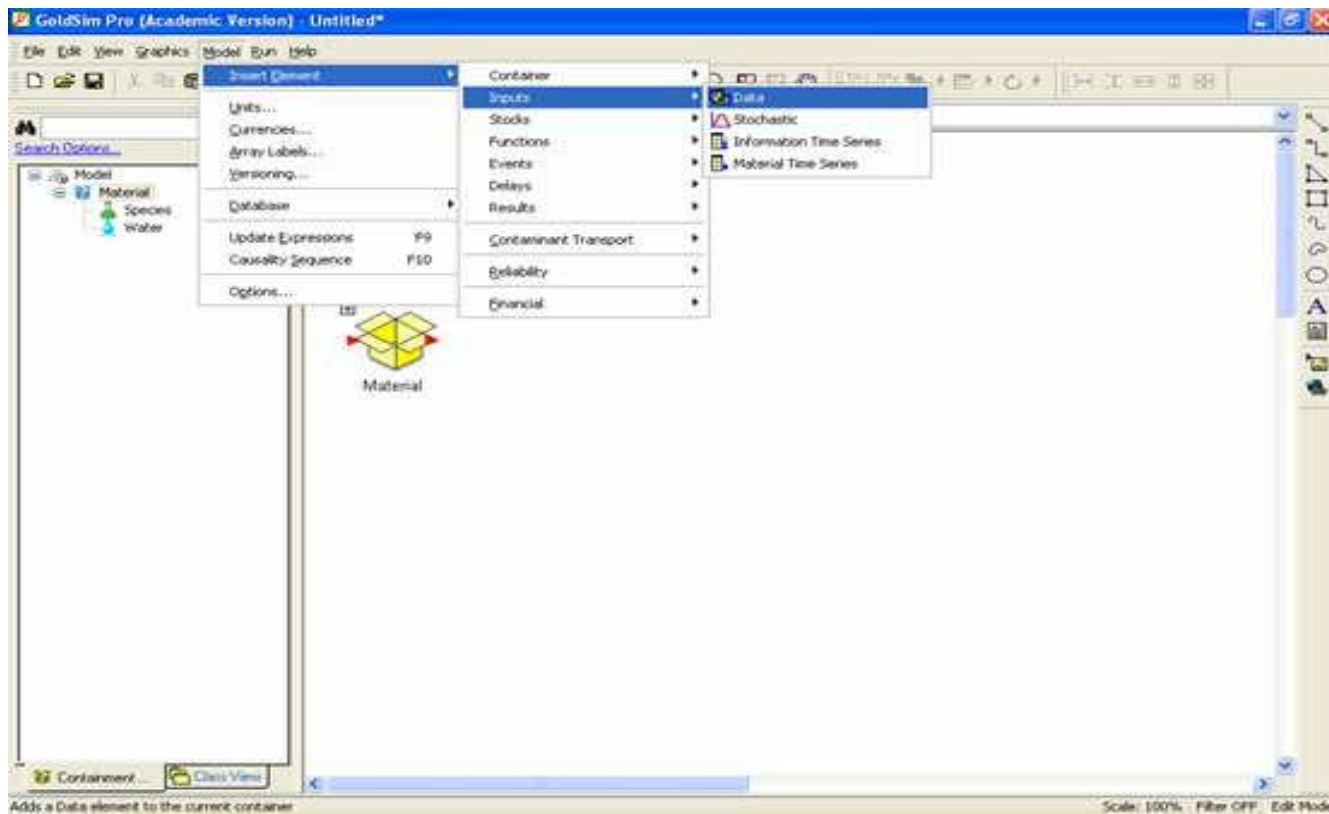


Διάγραμμα 6.12
Παράθυρο "Reference Fluid Properties": Επιλογή tab *Edit Relative Diffusivities*



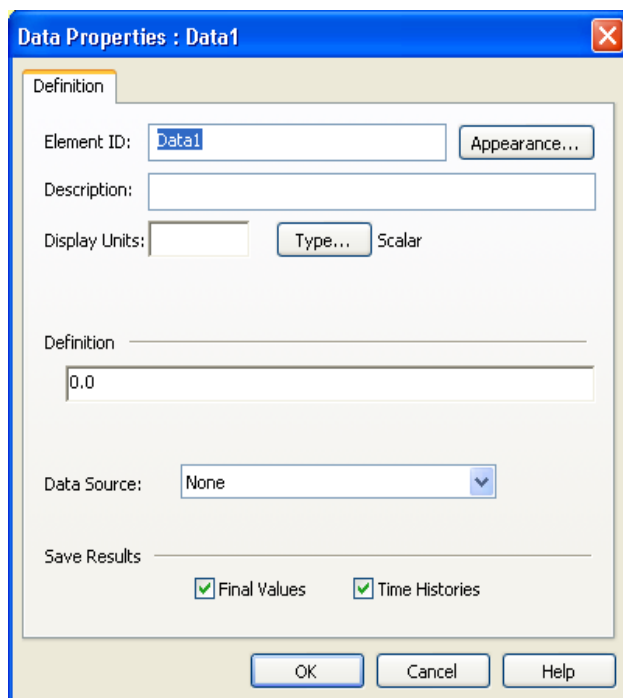
Διάγραμμα 6.13

Παράθυρο "Reference Fluid Properties": Επιλογή tab Edit *Solubilities*

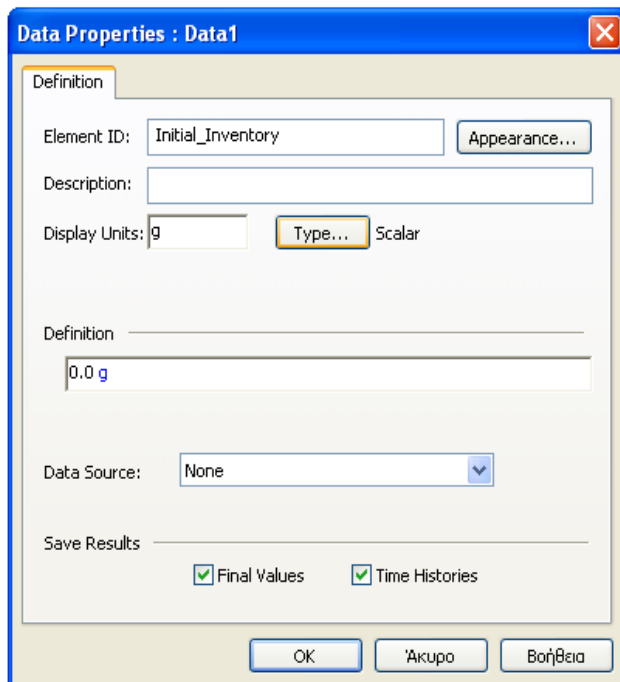


Διάγραμμα 6.14

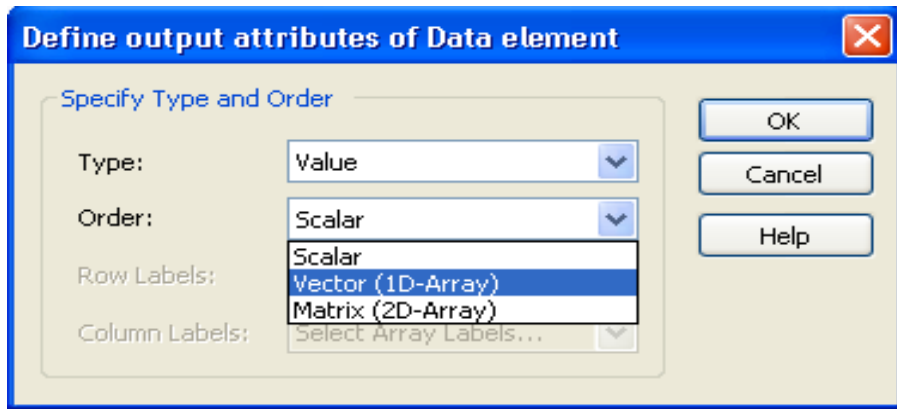
Εισαγωγή *Data Element*: tab *Model Insert Element* > *Inputs* > *Data*



Διάγραμμα 6.15
Παράθυρο "Data Properties"

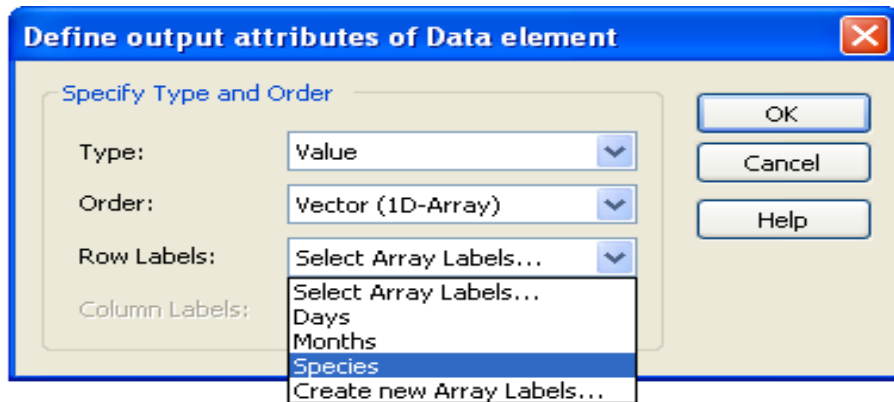


Διάγραμμα 6.16
Παράθυρο "Data Properties": Συμπλήρωση πεδίων



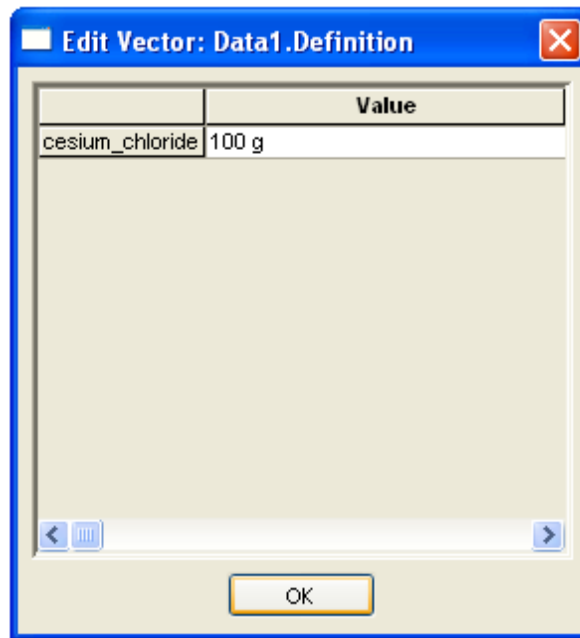
Διάγραμμα 6.17

Παράθυρο "Define output attributes of Data Element": Συμπλήρωση πεδίων



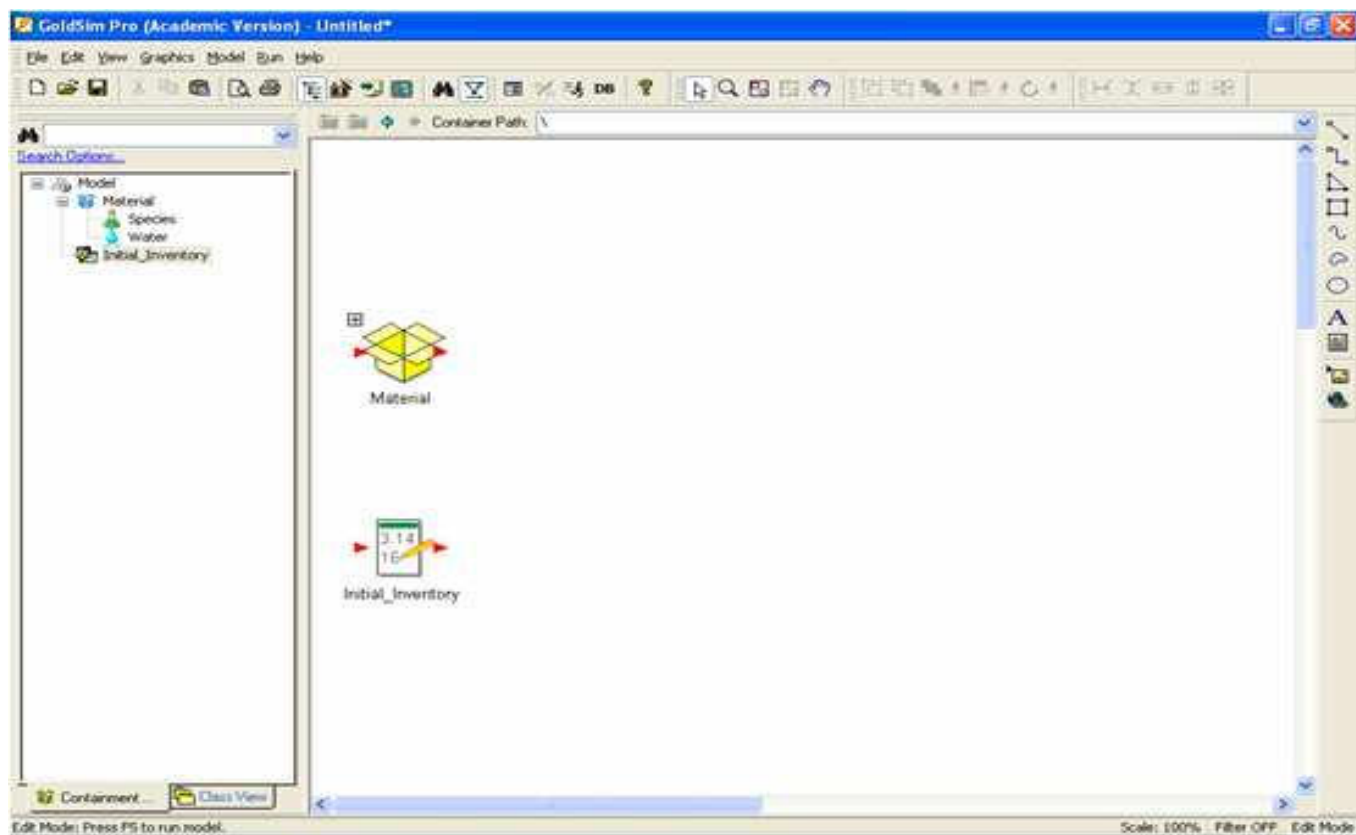
Διάγραμμα 6.18

Παράθυρο "Define output attributes of Data Element": Συμπλήρωση πεδίων
(συνέχεια)



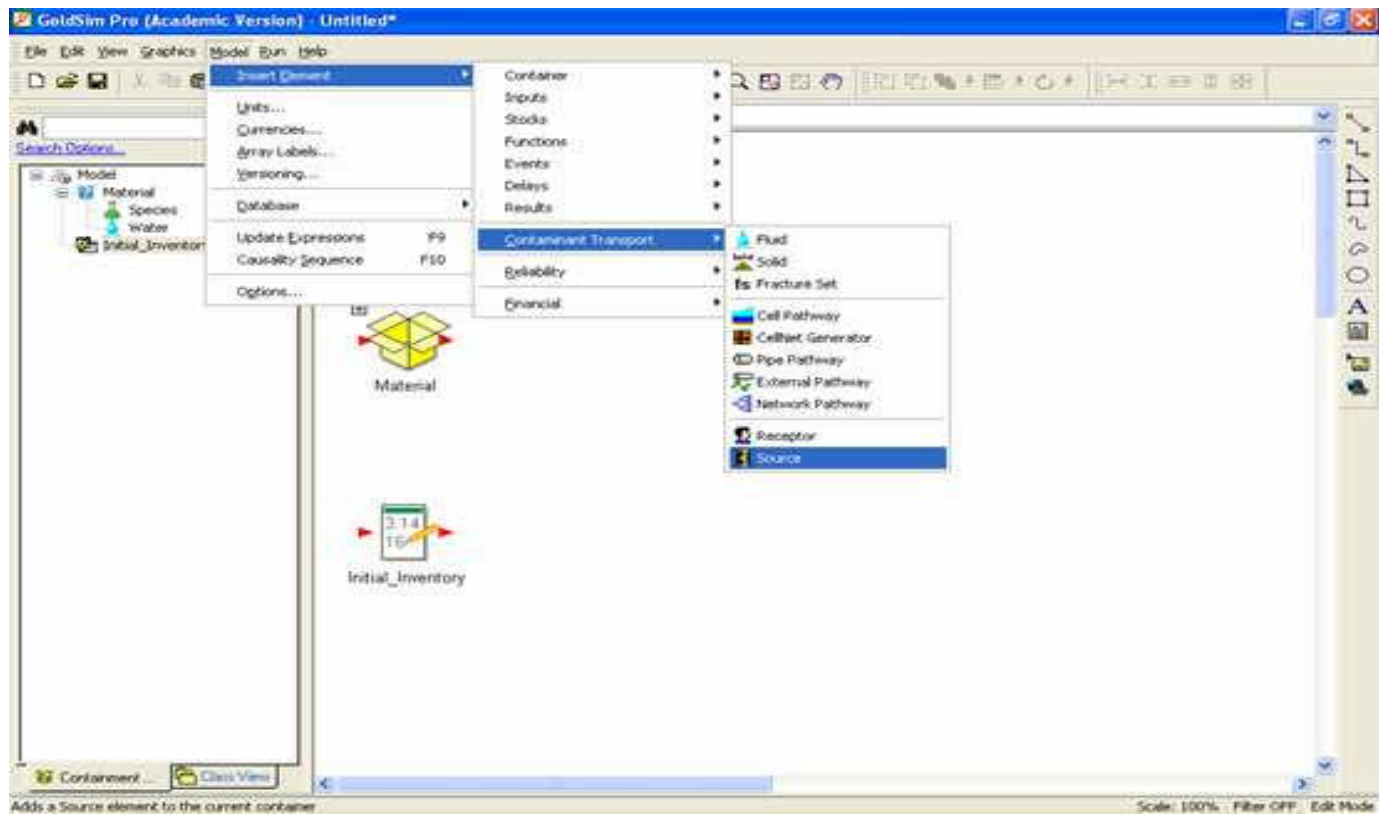
Διάγραμμα 6.19

Παράθυρο " Edit Vector: Data1. Definition ": Συμπλήρωση πεδίων



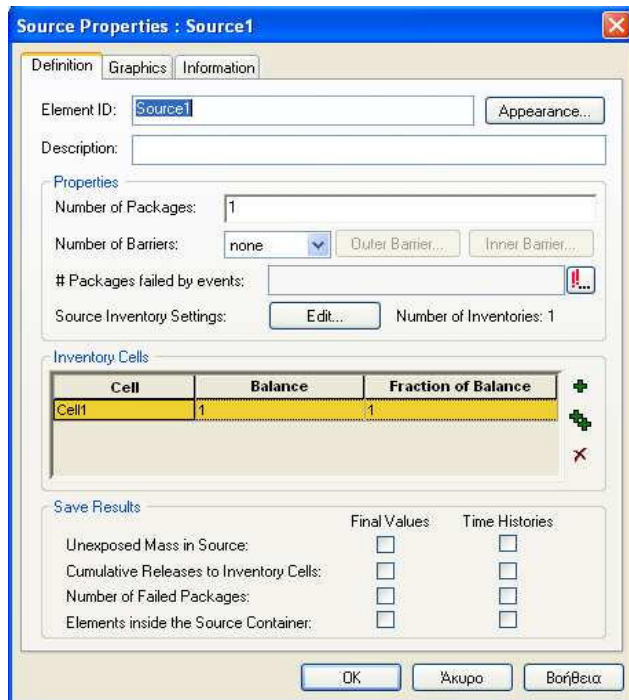
Διάγραμμα 6.20

Εισαγωγή *Data Element* "Initial_Inventory" σε προσομοίωση GoldSim



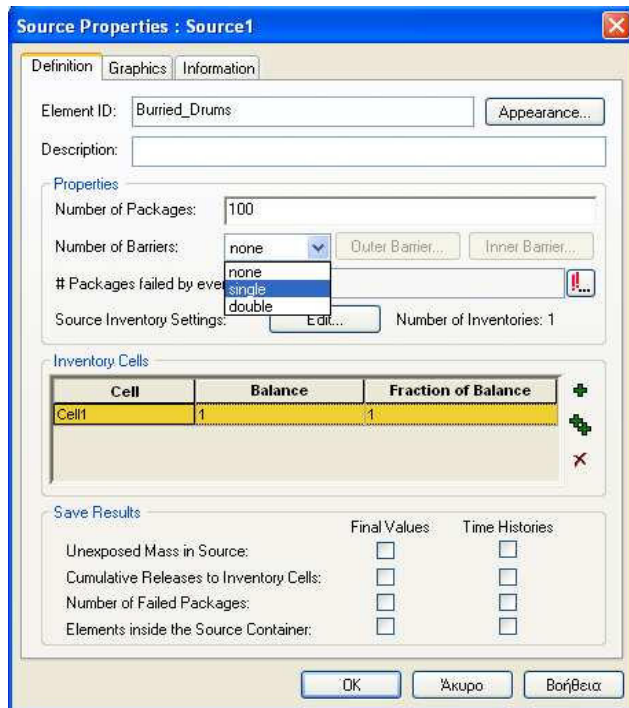
Διάγραμμα 6.21

Εισαγωγή *Data Element*: tab *Model Insert* > *Element* > *Contaminant Transport* > *Source*



Διάγραμμα 6.22

Παράθυρο "Source Properties: Source1"

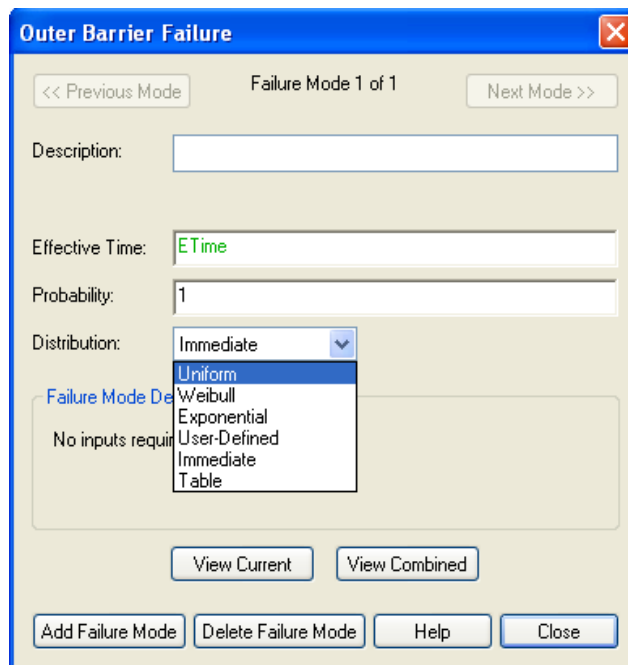


Διάγραμμα 6.23

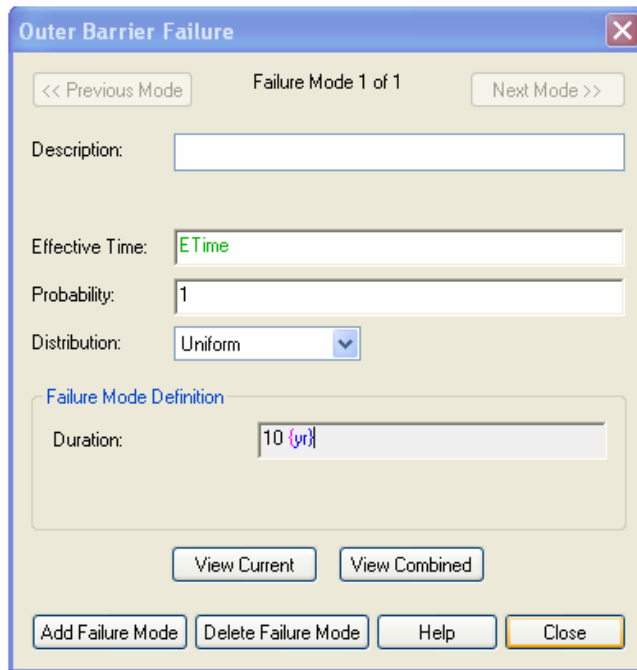
Παράθυρο "Source Properties: Source1": Συμπλήρωση πεδίων



Διάγραμμα 6.24
Παράθυρο "Outer Barrier Failure"

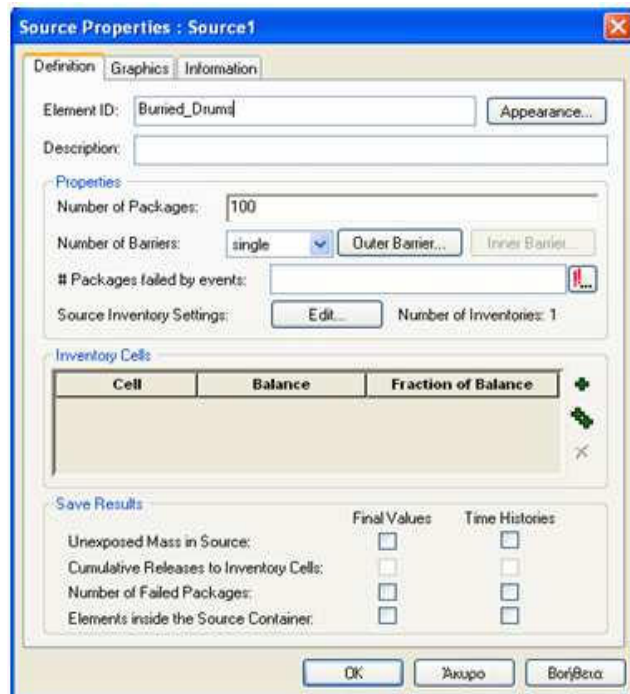


Διάγραμμα 6.25
Παράθυρο "Outer Barrier Failure": Συμπλήρωση πεδίων



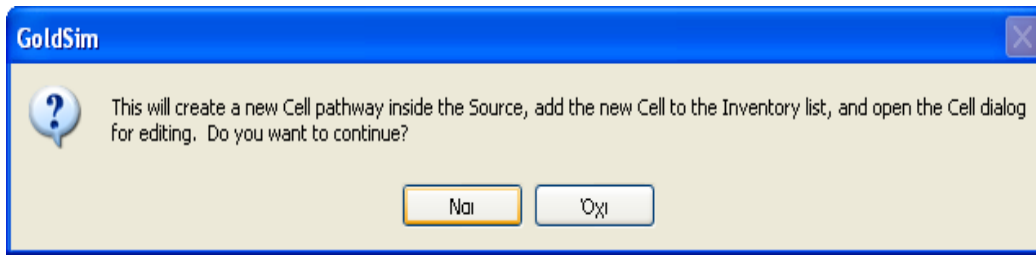
Διάγραμμα 6.26

Παράθυρο "Outer Barrier Failure": Συμπλήρωση πεδίων (συνέχεια)

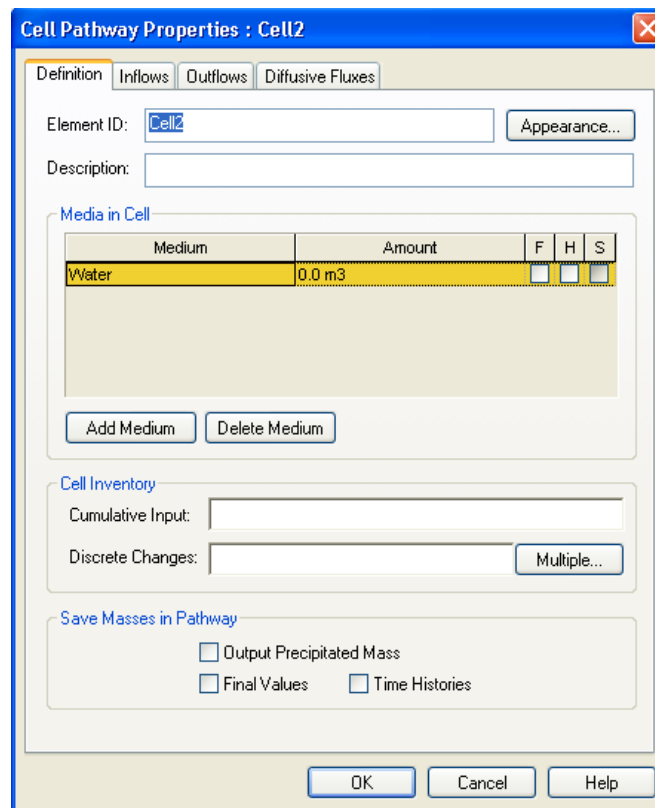


Διάγραμμα 6.27

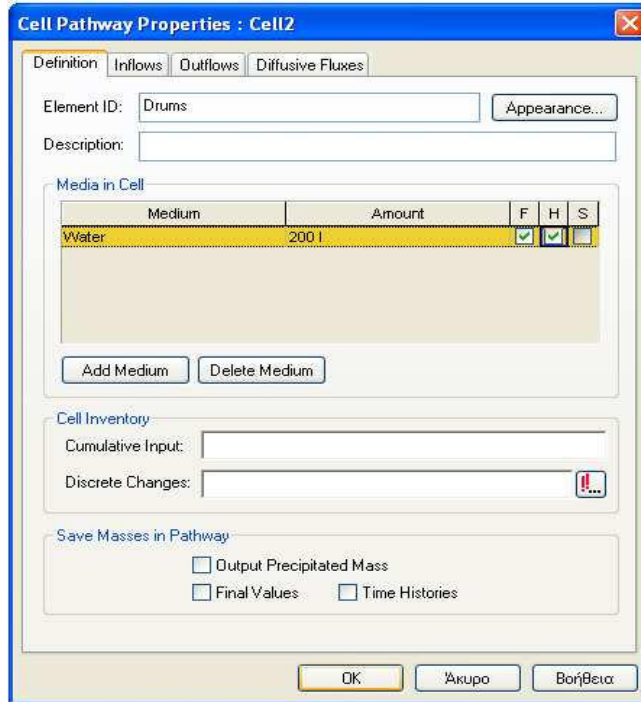
Παράθυρο "Source Properties: Source1": Διαγραφή Cell



Διάγραμμα 6.28
Διάλογος δημιουργίας νέου Cell

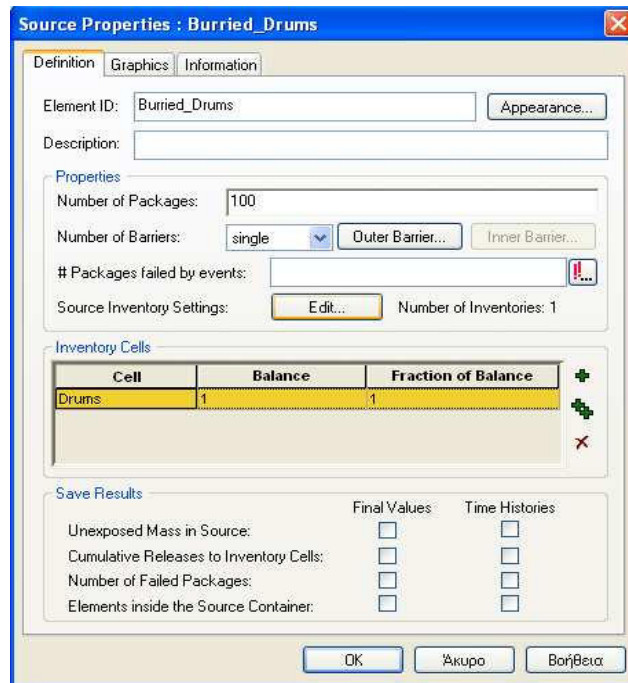


Διάγραμμα 6.29
Παράθυρο "Cell Pathway Properties: Cell2"



Διάγραμμα 6.30

Παράθυρο "Cell Pathway Properties: Cell2": Συμπλήρωση πεδίων



Διάγραμμα 6.31

Νέο παράθυρο "Source Properties: Burried_Drums"

Source Inventories

<< Previous Inventory 1 of 1 Next >>

Description:

Species Mass:

Location:

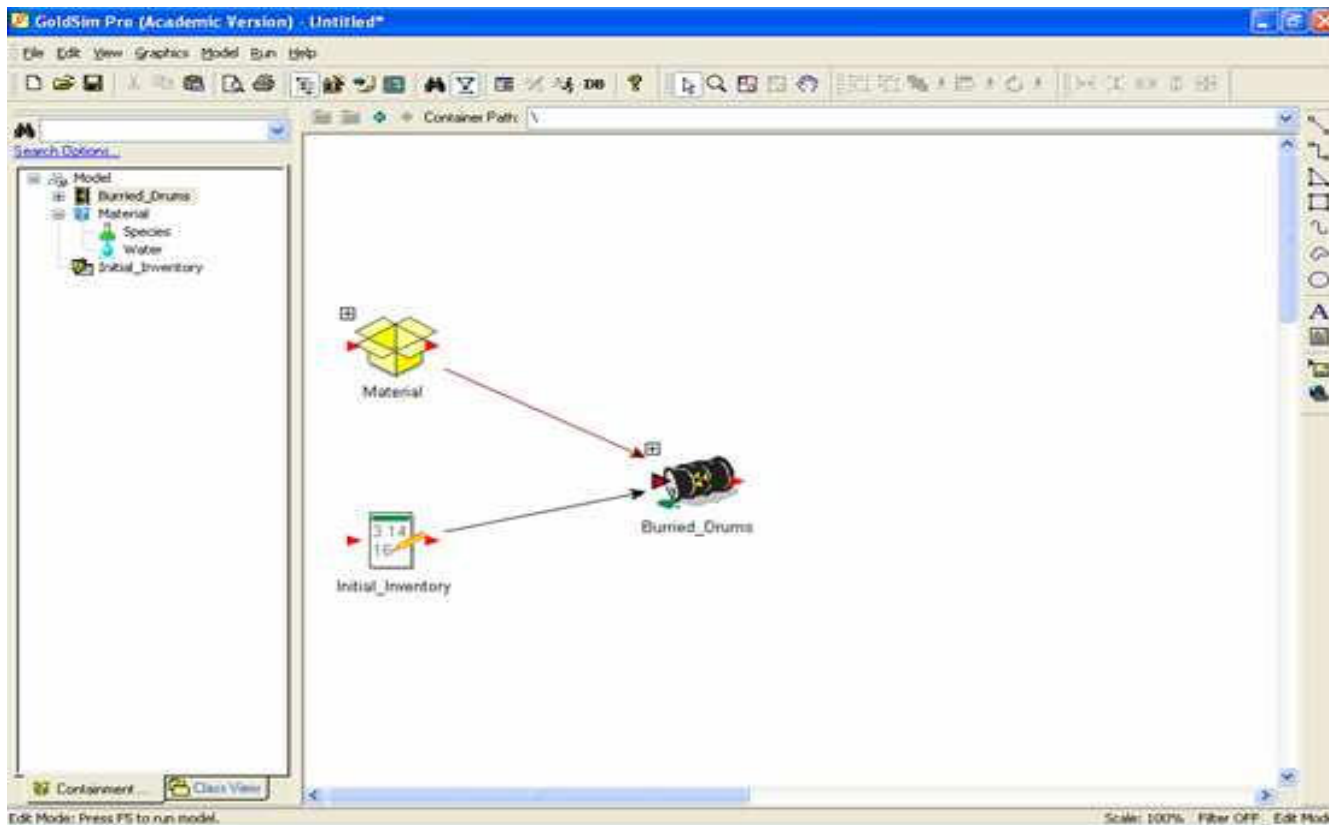
Bound in Matrix

Matrix degradation rate:

Add Inventory Delete Inventory Help Close

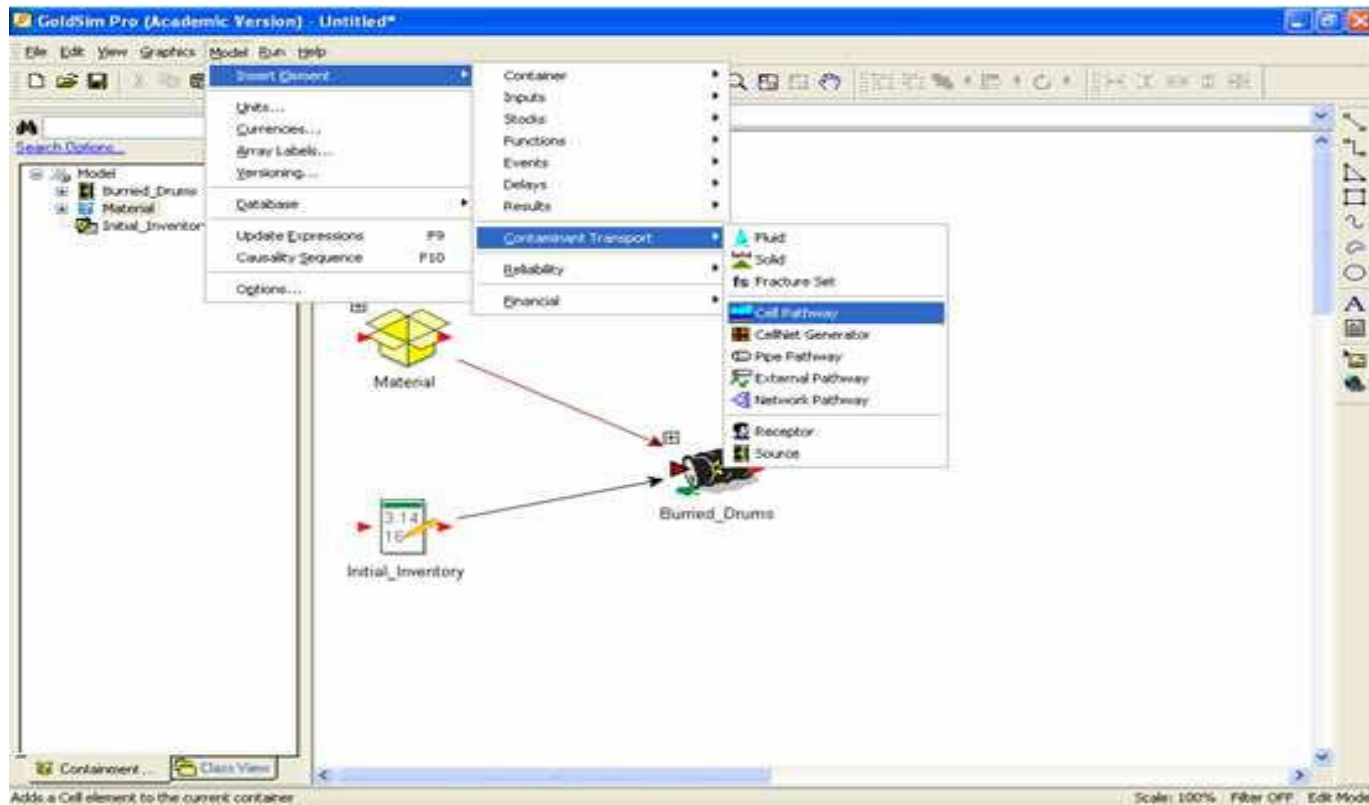
Διάγραμμα 6.32

Παράθυρο "Source Inventories"



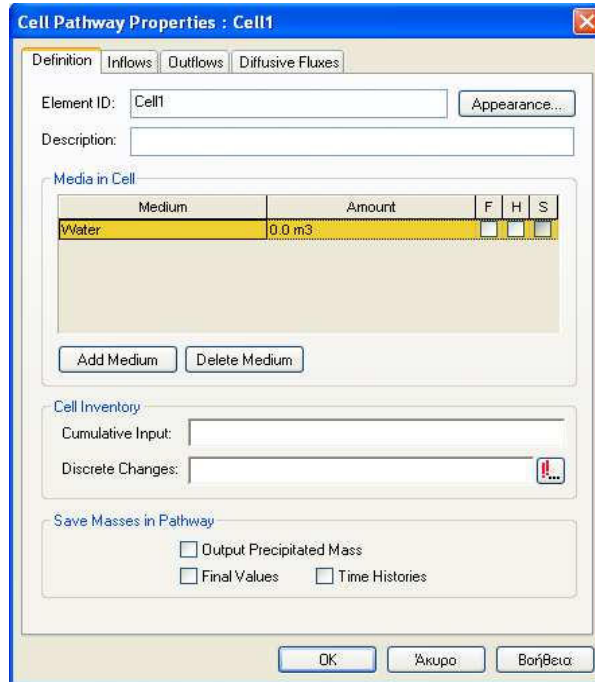
Διάγραμμα 6.33

Εισαγωγή *Source Element* "Burried_Drums" σε προσομοίωση GoldSim



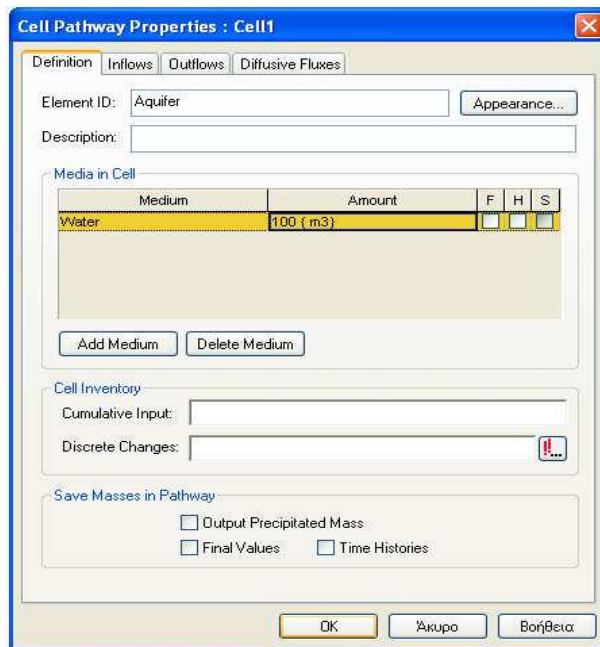
Διάγραμμα 6.34

Εισαγωγή *Cell Pathway Element*: tab *Model Insert Element* > *Contaminant Transport* > *Cell Pathway*



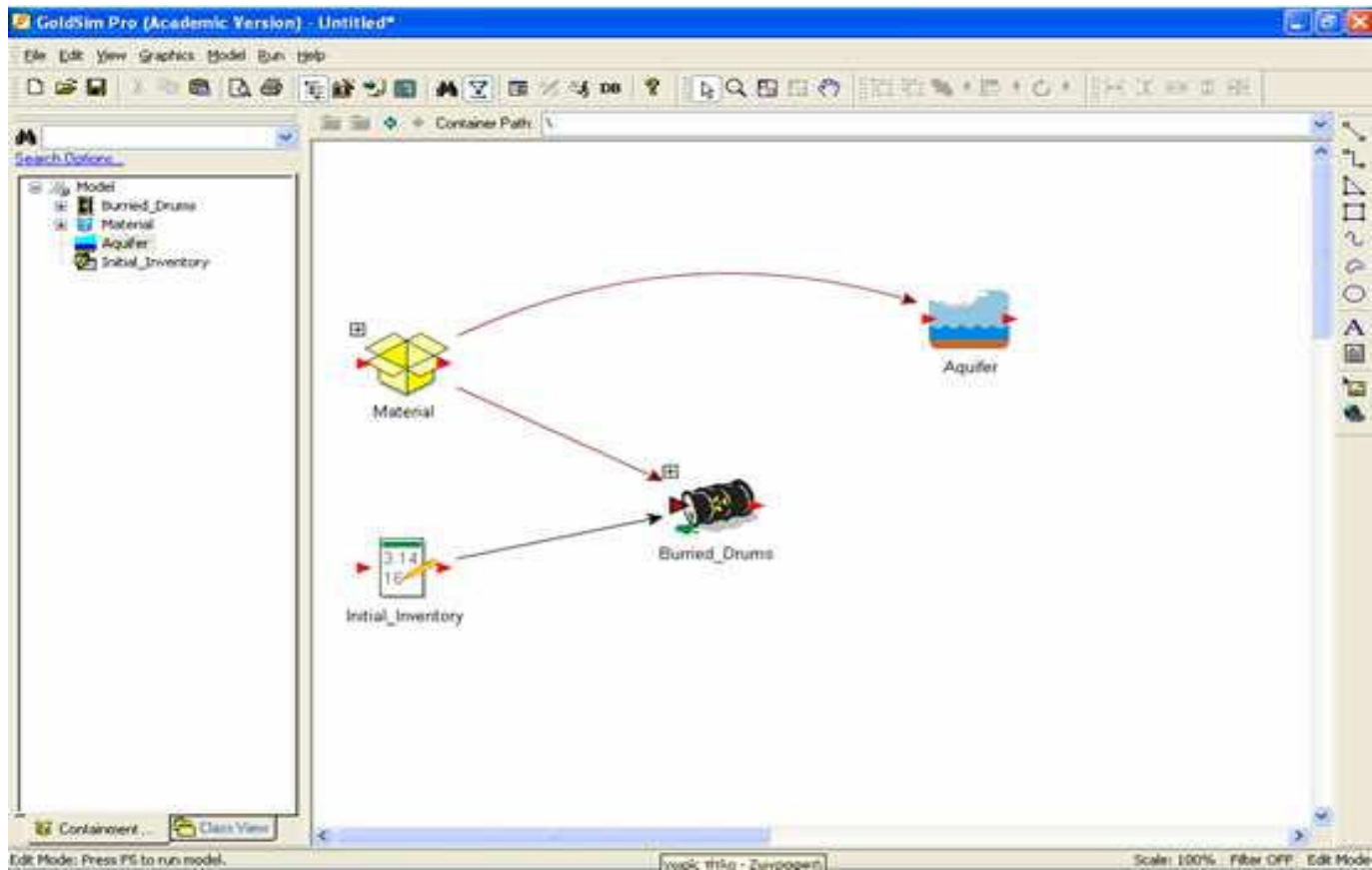
Διάγραμμα 6.35

Παράθυρο "Cell Pathway Properties: Cell 1"



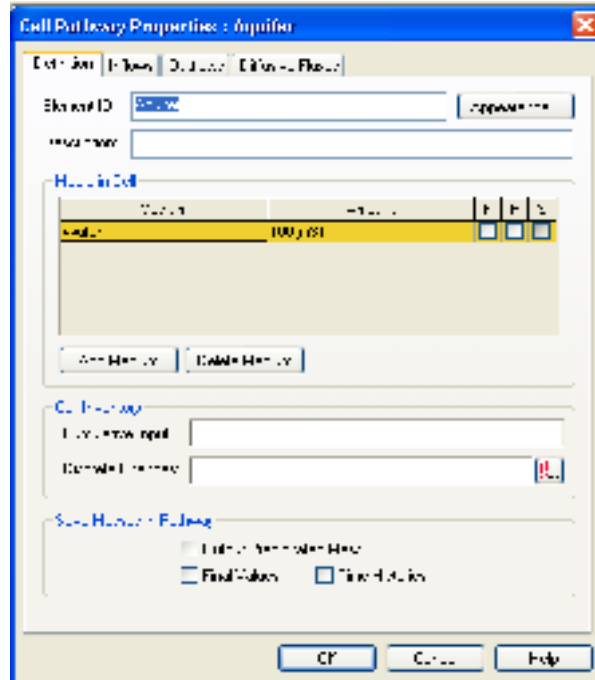
Διάγραμμα 6.36

Παράθυρο "Cell Pathway Properties: Cell 1": Συμπλήρωση πεδίων



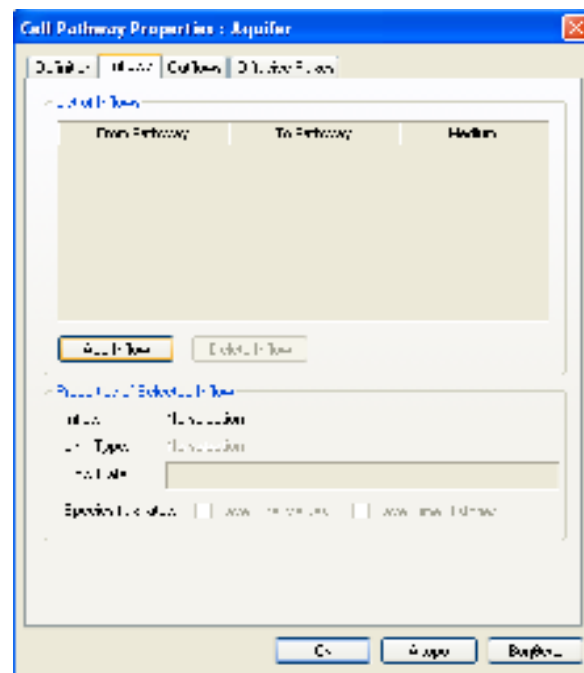
Διάγραμμα 6.37

Εισαγωγή *Cell Pathway Element* "Aquifer" σε προσομοίωση GoldSim



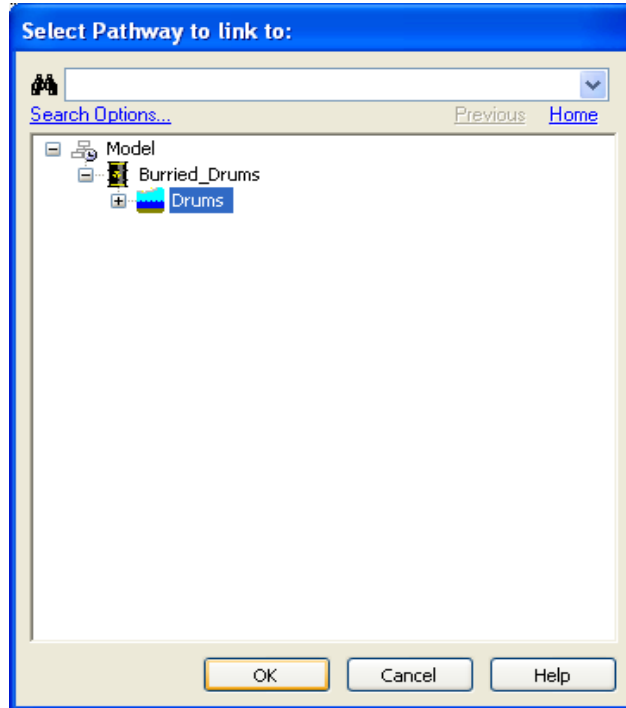
Διάγραμμα 6.38

Παράθυρο "Cell Pathway Properties: Aquifer"



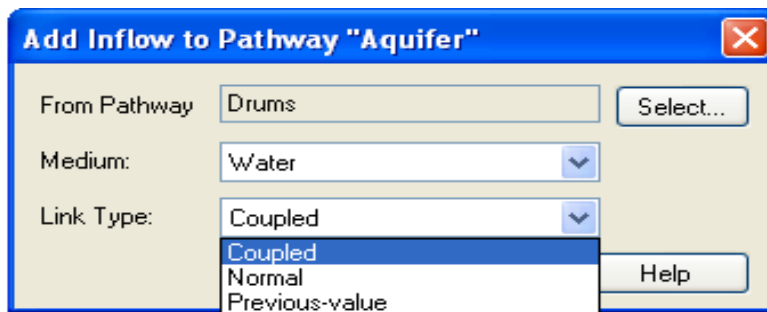
Διάγραμμα 6.39

Παράθυρο "Cell Pathway Properties: Aquifer": Συμπλήρωση πεδίων



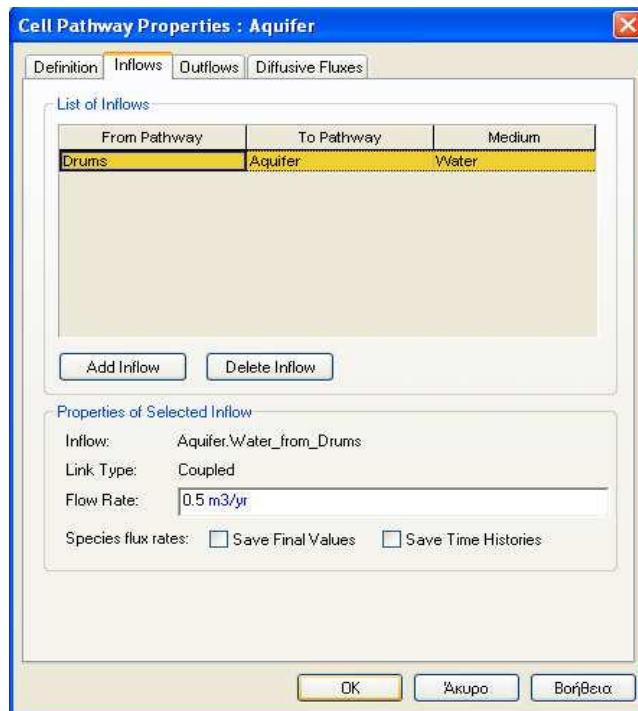
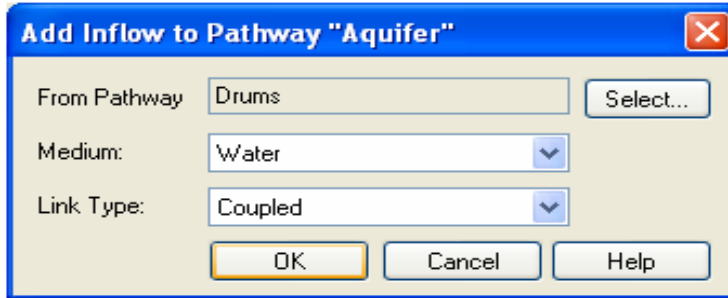
Διάγραμμα 6.40

Παράθυρο "Select Pathway to link to:"



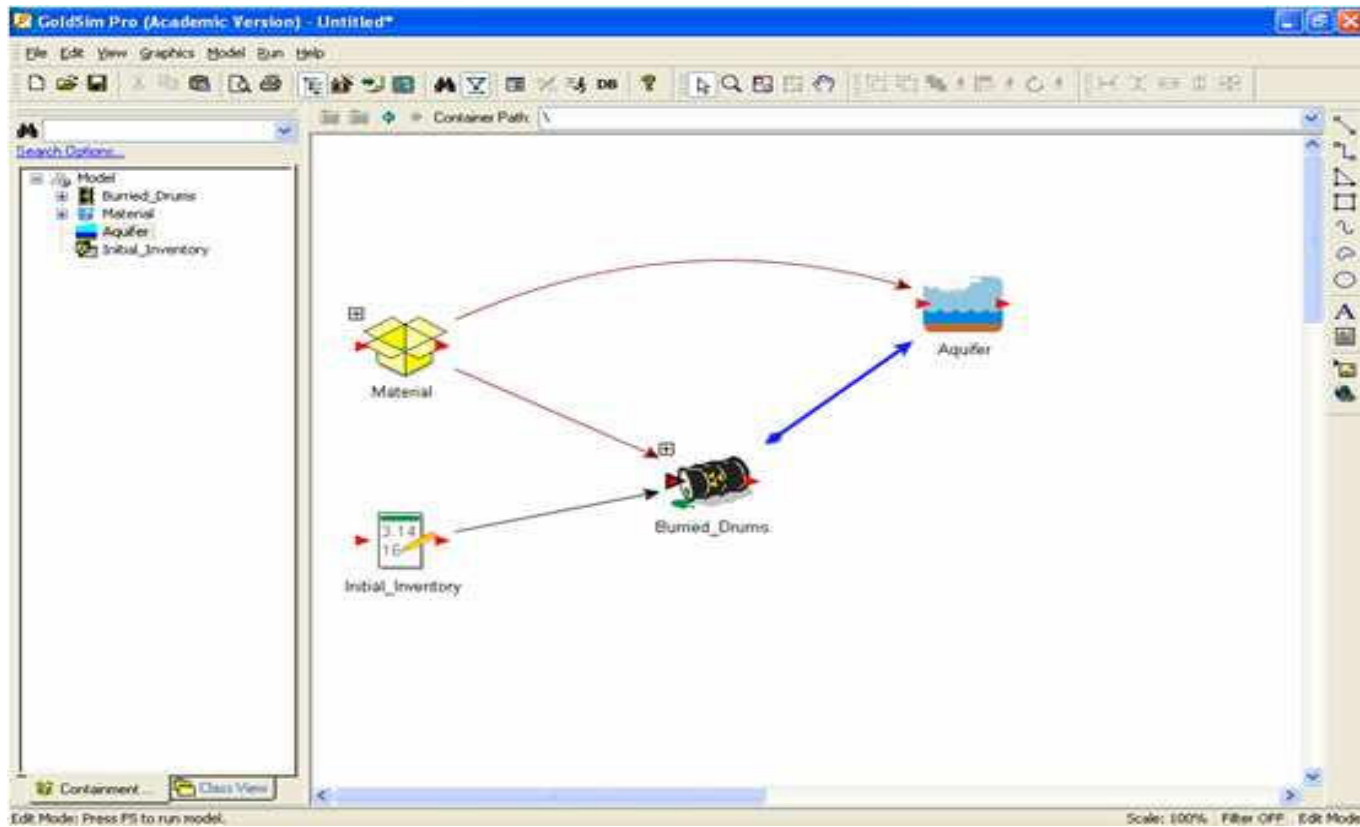
Διάγραμμα 6.41

Παράθυρο "Add Inflow to Pathway "Aquifer"": Συμπλήρωση πεδίων



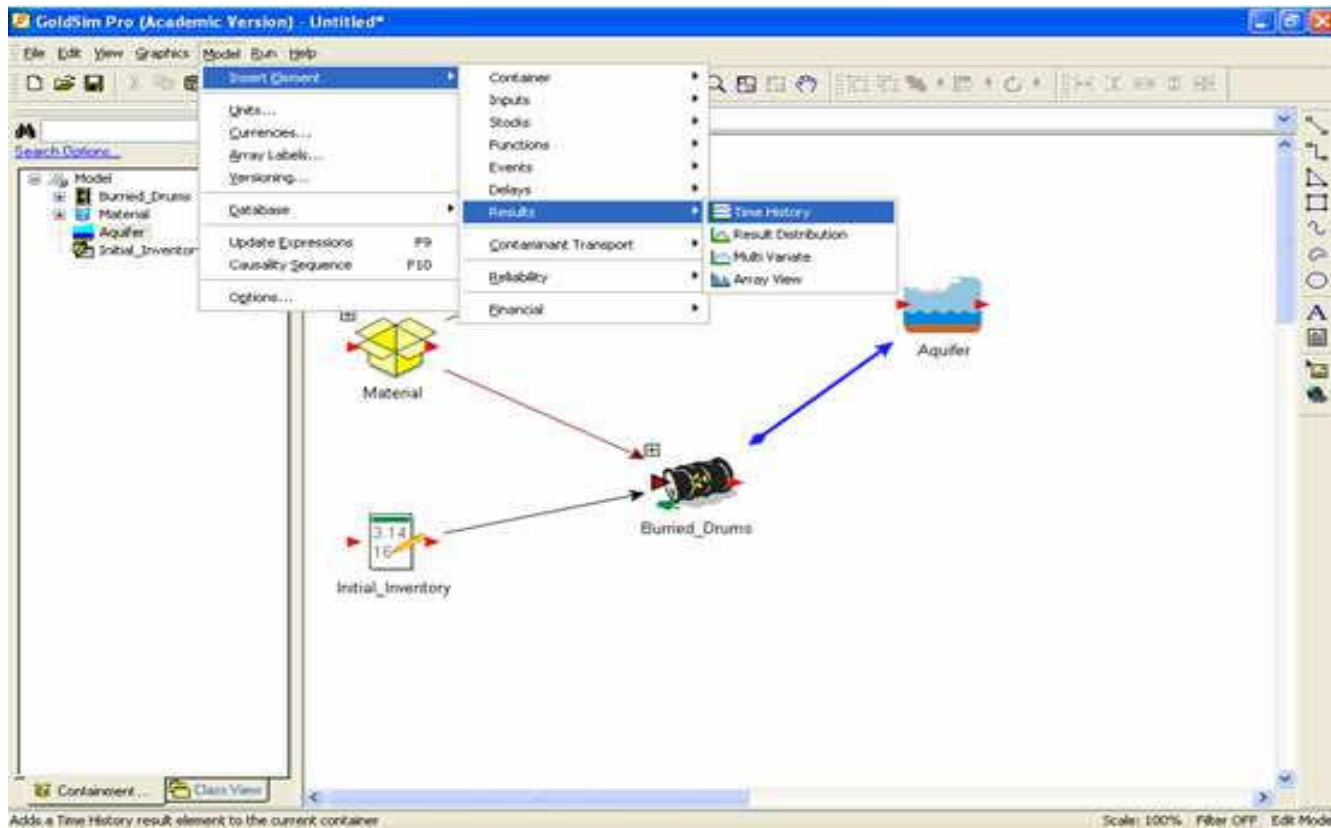
Διάγραμμα 6.42

**Παράθυρο "Cell Pathway Properties: Aquifer":
Πεδία From Pathway / To Pathway / Medium**



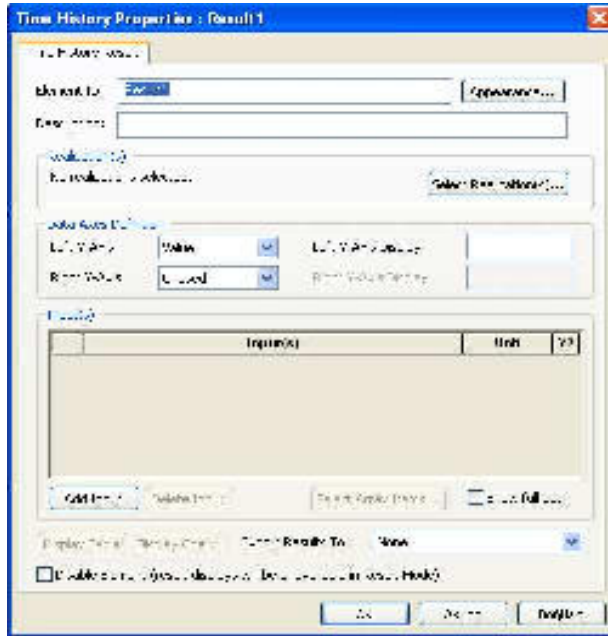
Διάγραμμα 6.43

Εισαγωγή *Link* (μπλε γραμμή) μεταξύ "Burried_Drums" και "Aquifer" σε προσομοίωση GoldSim



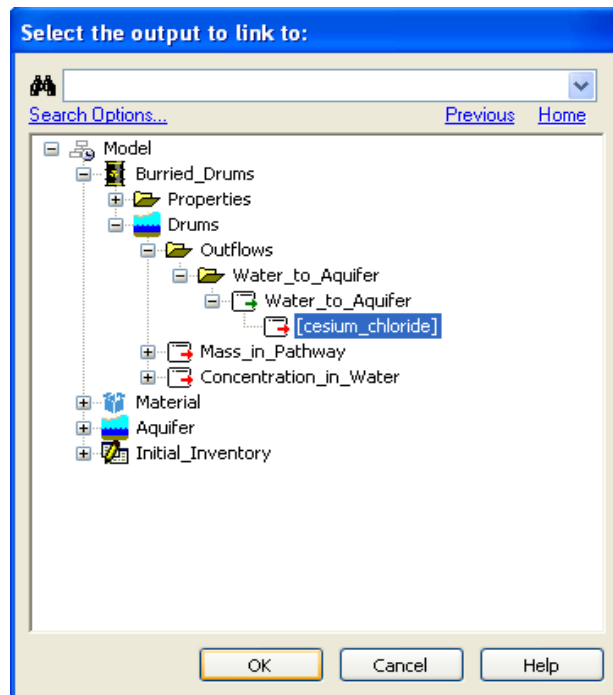
Διάγραμμα 6.44

Εισαγωγή *Time History Element*: tab Model *Insert Element* > *Insert Element* > *Results* > *History*



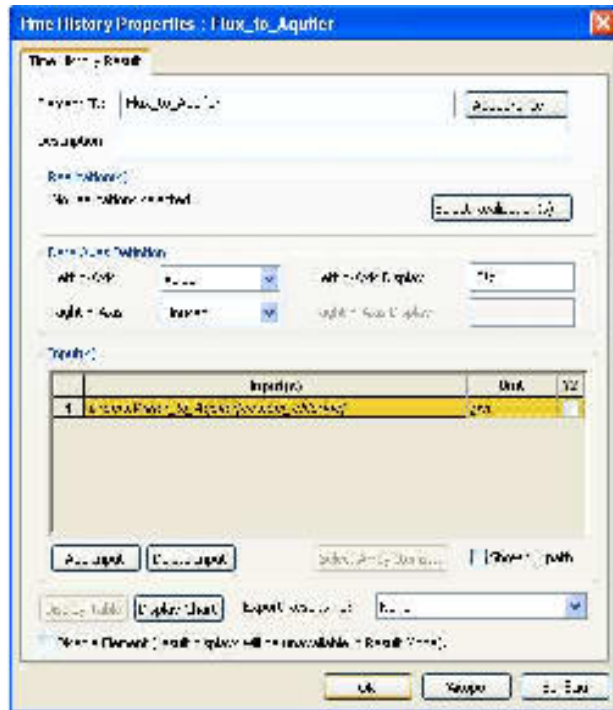
Διάγραμμα 6.45

Παράθυρο "Time History Properties: Result 1"



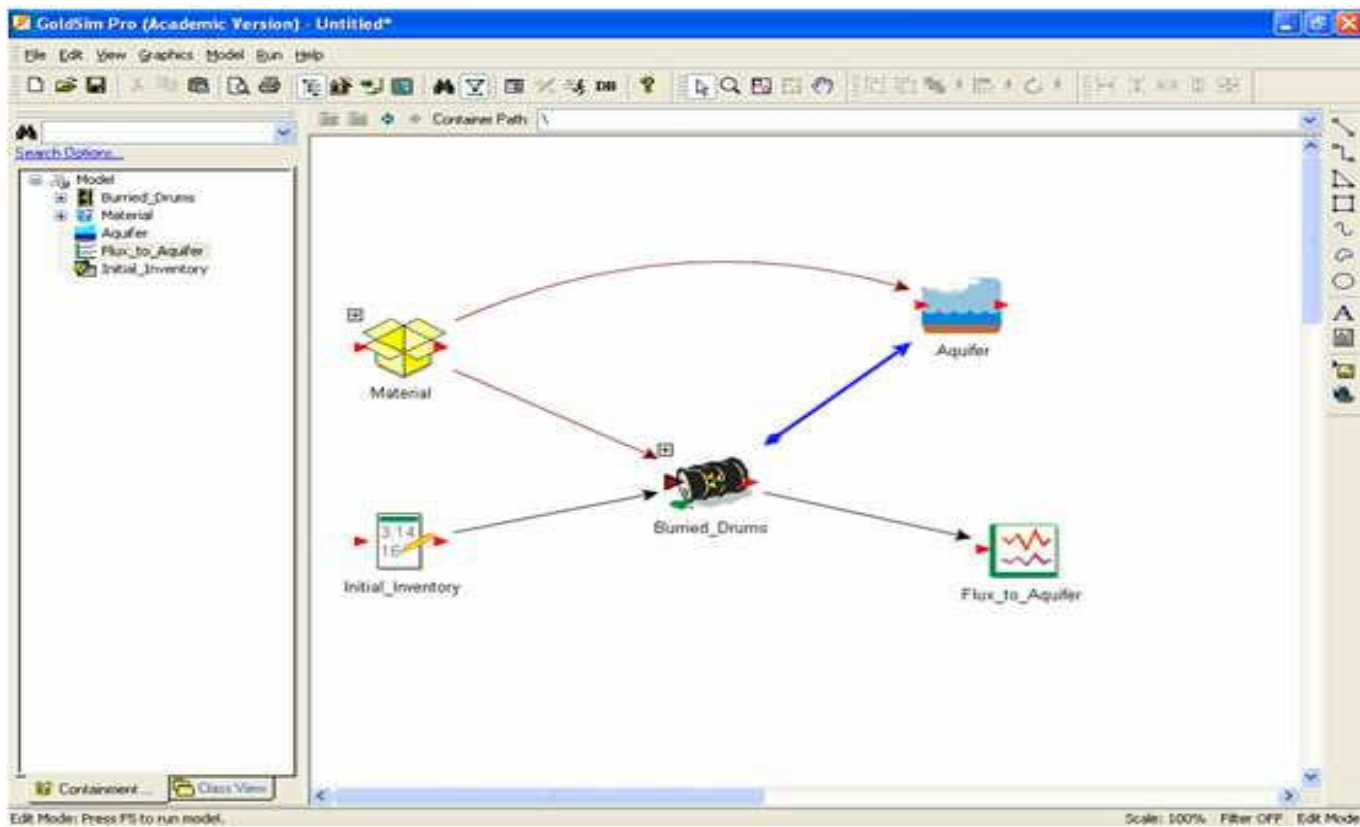
Διάγραμμα 6.46

Παράθυρο "Select the output to link to"



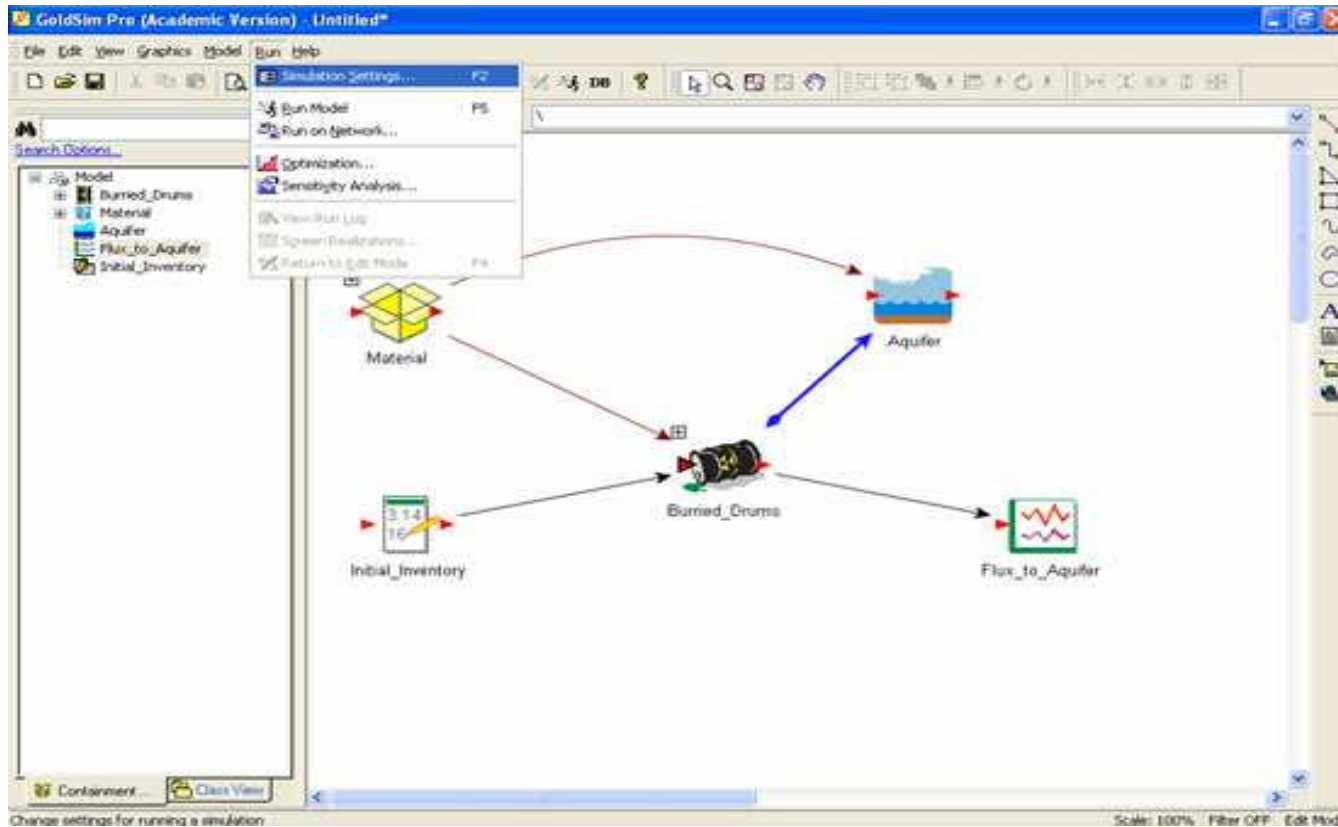
Διάγραμμα 6.47

Παράθυρο "Time History Properties: Flux_to_Aquifer"



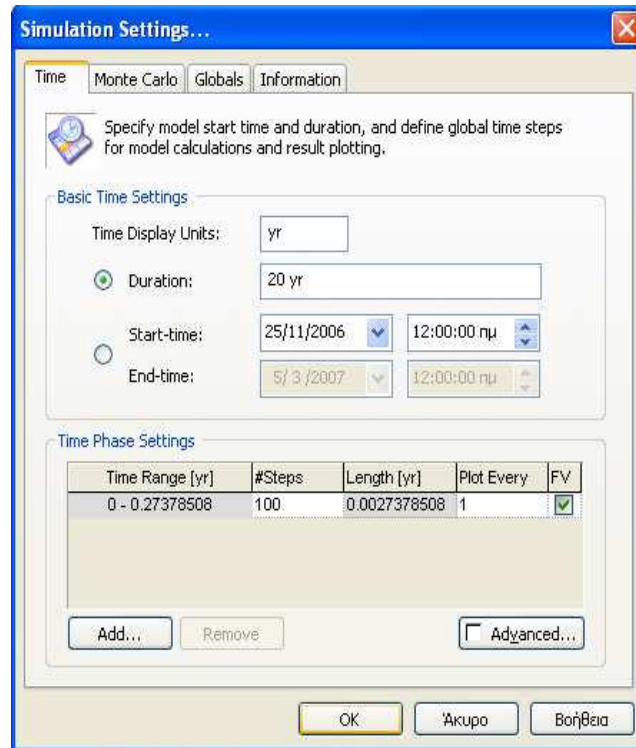
Διάγραμμα 6.48

Εισαγωγή *Time History Element* "Flux_to_Aquifer" σε προσομοίωση GoldSim



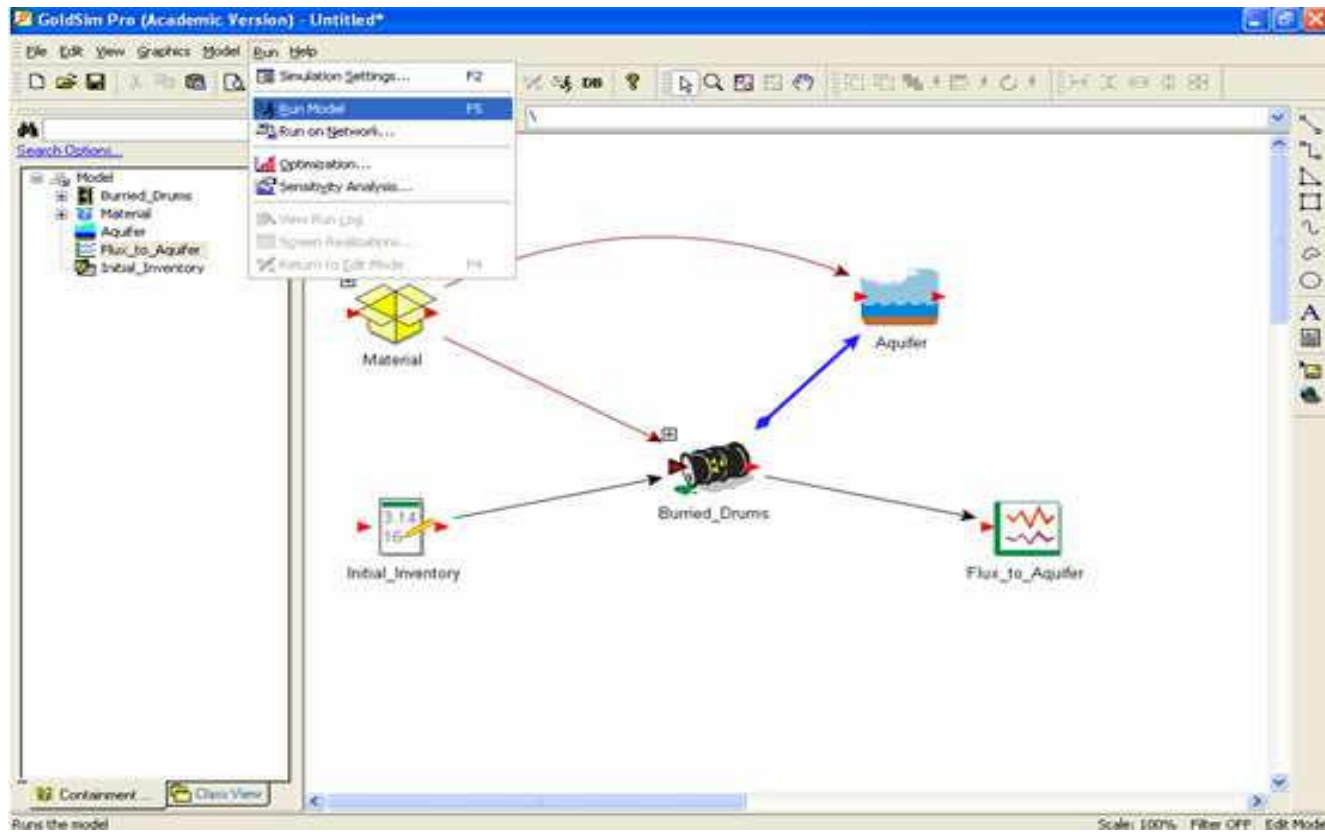
Διάγραμμα 6.49

Ρύθμιση χρονικών παραμέτρων προσομοίωσης Goldsim: tab Run *Simulation Settings*



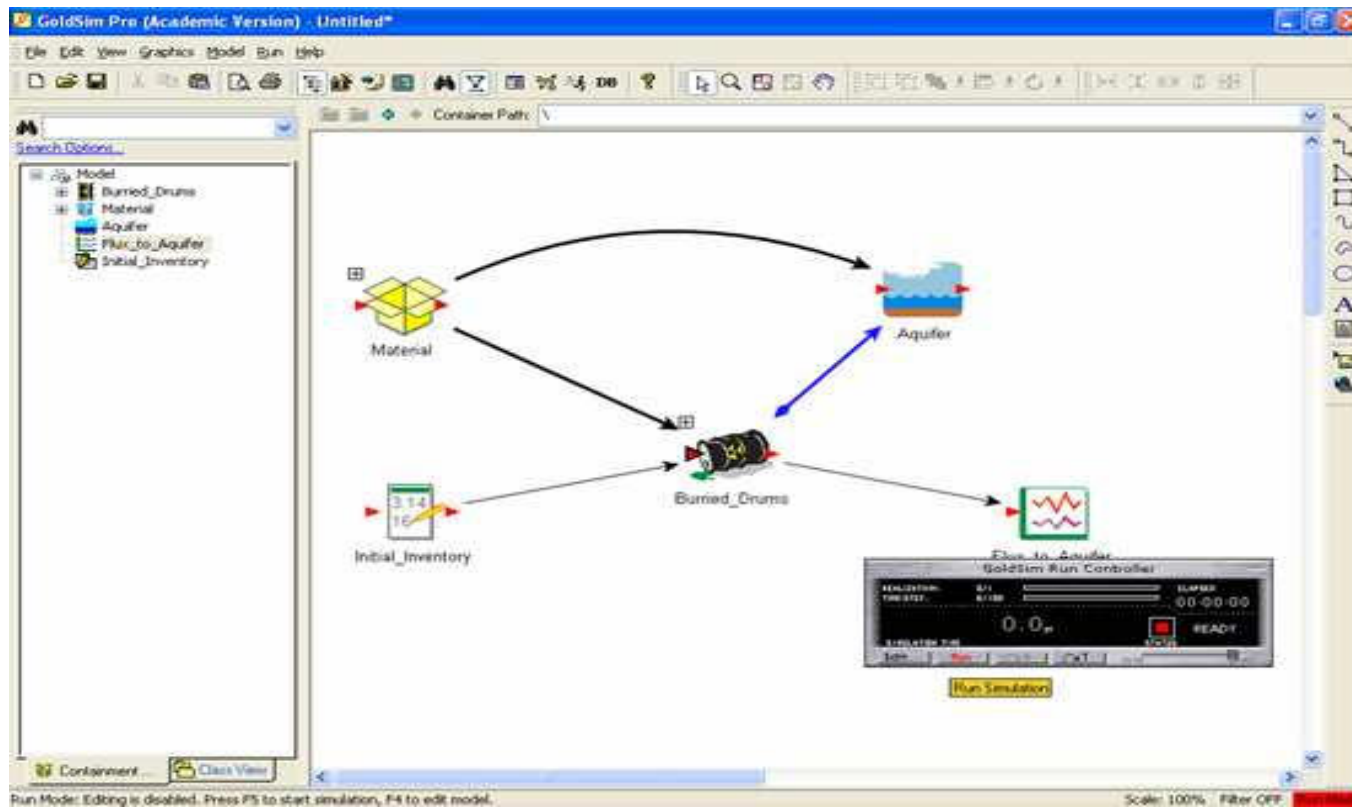
Διάγραμμα 6.50

Παράθυρο "Simulation Settings": Συμπλήρωση Πεδίων



Διάγραμμα 6.51

"Τρέξιμο" της προσομοίωσης: tab Run *Run Model*



Διάγραμμα 6.52

"Τρόξιμο" της προσομοίωσης: GoldSim Run Controller

```
GoldSim Run Log - Σημειωματάριο
Αρχικό Έμφασις: Μονή Πρόβλεψη Βαρέων
GoldSim 9.50.000
Model filename: monte10
Time simulation was begun: 29/08/2007 17:43:00
Total simulation time: 0.0 s

Analysis description:

user name:

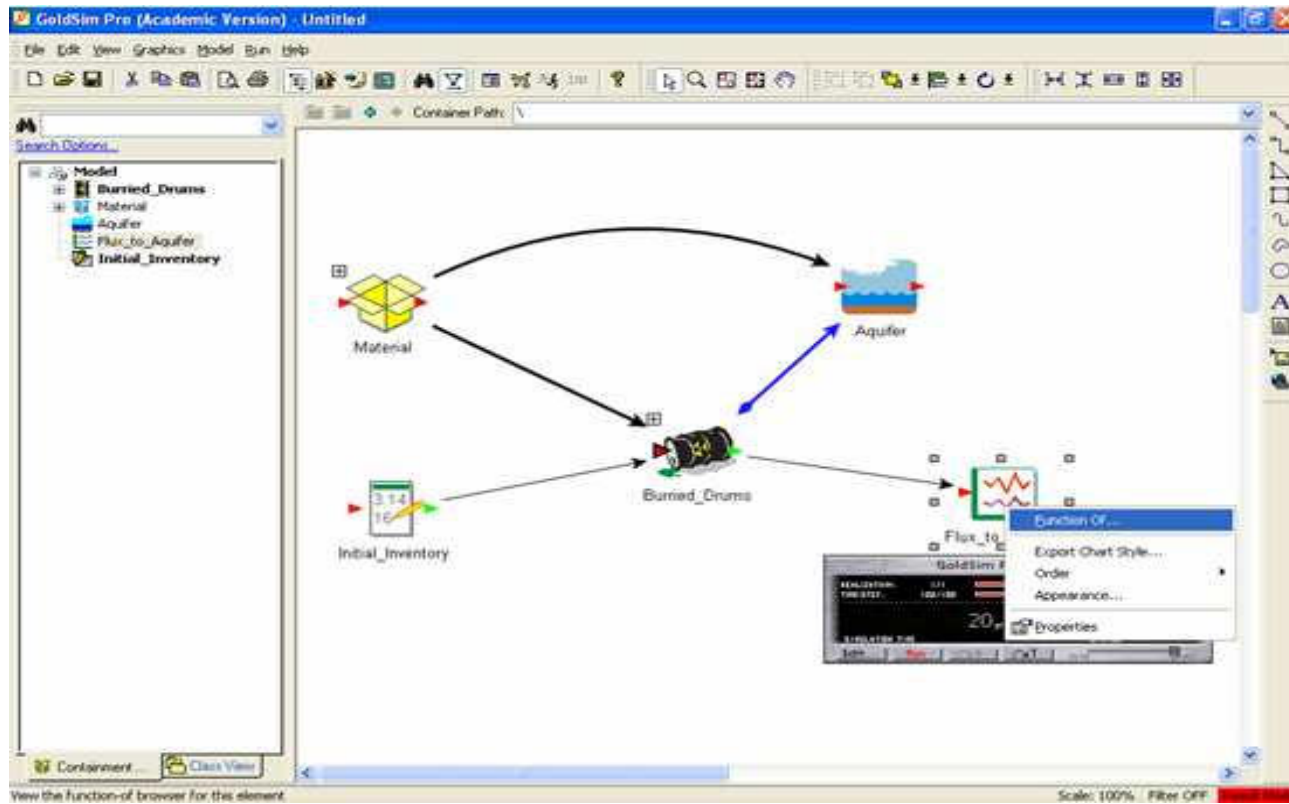
Simulation settings:
Latin hypercube sampling not used
Monte Carlo sampling sequences repeated, with beginning seed 1
1 realizations to run, with 100 time histories to record
Elapsed time run selected, duration: 20 {yr}
Run using 100 time steps.
The run was done in 1 phases, defined as follows.
  start time: 0yr, Phase timestep: 0.2yr, Plotting every 1 phase steps

Module: Radionuclide Transport Version 4.10.000:
  Solution precision:      Medium
  Barrier failure type:    Predicted failure time
  No. waste packages failed: rounded

WARNINGS AND ERRORS:
Realization 1
0 yr:
  \Aquifer: Pathway inflow (0.5 m3/yr) exceeds outflow (0 m3/yr)
```

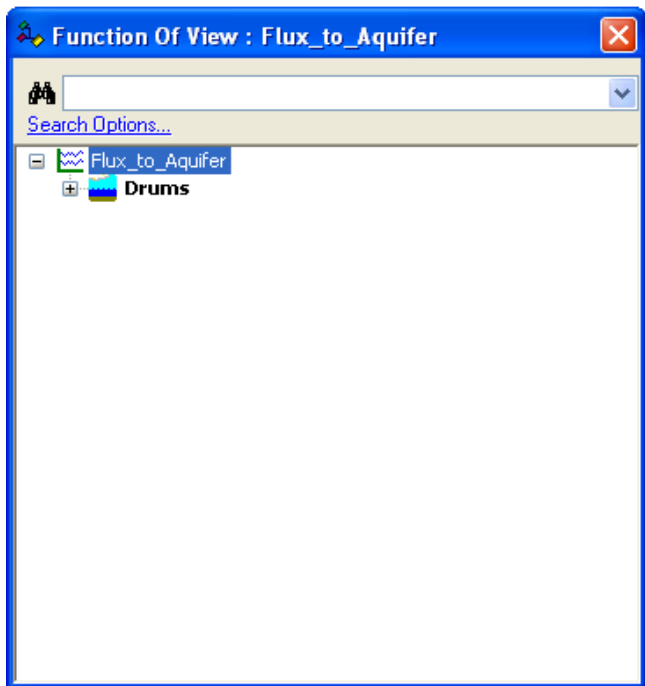
Διάγραμμα 6.53

"Τρέξιμο" της προσομοίωσης: GoldSim Run Log - Σημειωματάριο



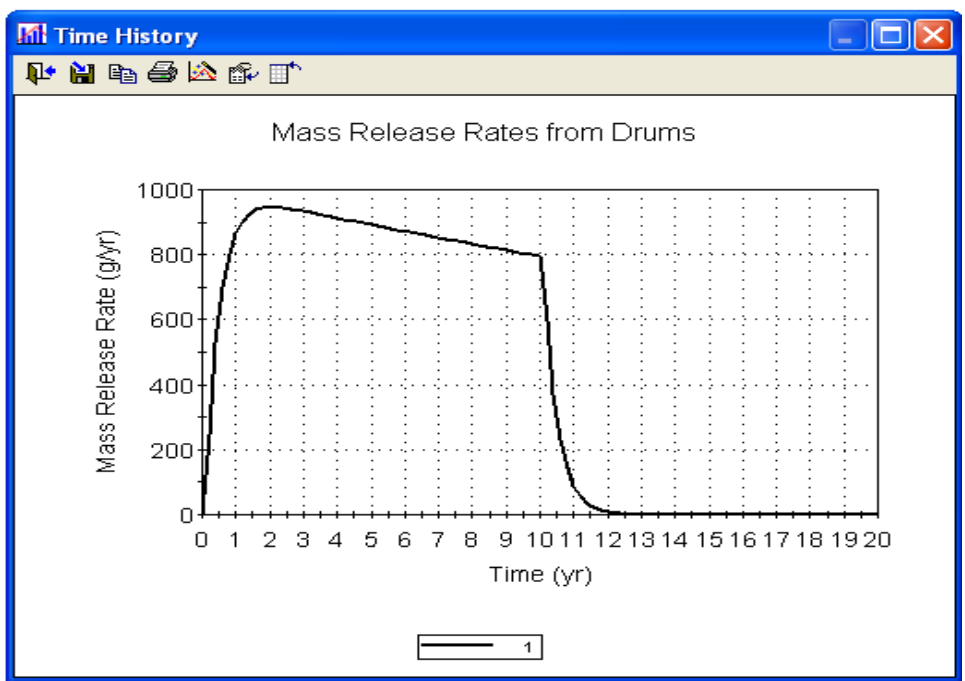
Διάγραμμα 6.54

Αποτελέσματα της προσομοίωσης



Διάγραμμα 6.55

Παράθυρο "Function Of View: Flux_to_Aquifer"



Διάγραμμα 6.56

Παράθυρο "Time History": Mass Release Rates from Drum

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

7.1 Ανακεφαλαίωση

Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας έγινε προσπάθεια για την παρουσίαση και την κριτική ανασκόπηση των κυριότερων μοντέλων που προσομοιώνουν τις διεργασίες, οι οποίες αφορούν στον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137, και γενικότερα ενός ραδιοϊσοτόπου στο έδαφος. Με τις προσομοιώσεις αυτές διευκολύνεται γενικά η πρόβλεψη της χρονικής μεταβολής της κατανομής της συγκέντρωσης ραδιοϊσοτόπων που προέρχονται από επιφανειακή απόθεση κατά το βάθος. Υπενθυμίζεται, ότι σε δεδομένη χρονική στιγμή η κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης ραδιοϊσοτόπου στο έδαφος παρουσιάζει γενικά μορφή "καμπάνας" (βλ. π.χ. Διάγραμμα 3.3, Διάγραμμα 3.6 και Διάγραμμα 5.1. Το βάθος που αντιστοιχεί στη μέγιστη συγκέντρωση του ραδιοϊσοτόπου (η θέση δηλαδή της κορυφής της "καμπάνας") είναι συνήθως μόλις λίγα εκατοστόμετρα από την επιφάνεια του εδάφους. Με την πάροδο του χρόνου το βάθος της μέγιστης συγκέντρωσης μετακινείται κατακόρυφα με αργό και συνεχή τρόπο. Παρουσιάστηκαν και εξετάστηκαν τρεις τύποι μοντέλων:

(α) Το "θεωρητικό - αναλυτικό"

(β) Τα "διαμερισματικά", και

(γ) Τα "εμπειρικά"

Η παρουσίαση και η εξέταση της συμπεριφοράς των μοντέλων αυτών με βάση πειραματικά αποτελέσματα έγινε σε βάθος και λεπτομέρεια στα προηγούμενα Κεφάλαια.

Το "θεωρητικό – αναλυτικό" μοντέλο, διαπιστώθηκε ότι είναι το θεωρητικά πολυπλοκότερο, βασίζεται σε μερικές διαφορικές εξισώσεις, που αποπειρώνται με όχι απόλυτη επιτυχία, την μαθηματική περιγραφή μιας σειράς φυσικοχημικών μηχανισμών με κυριότερους τη διάχυση και τη μεταφορά. Οι αναγκαίες οριακές συνθήκες είναι πολλές και λεπτομερείς. Επίσης οι παραδοχές που γίνονται είναι εξίσου πολλές. Παρόλαυτά, υπάρχει κλειστή λύση η οποία έχει γενικά απλή μαθηματική έκφραση, και εξαρτάται από το χρόνο που έχει παρέλθει από την

επιφανειακή απόθεση του ραδιοϊσοτόπου, το συντελεστή διάχυσης του ραδιοϊσοτόπου κατά το βάθος και την ταχύτητα μεταφοράς του ραδιοϊσοτόπου. Ο τρόπος που αυτό το μοντέλο αποδίδει την πειραματική πραγματικότητα, δηλαδή το γεγονός ότι ενσωματώνει φυσικά φαινόμενα και προσομοιάζει το πείραμα με μία μάλλον απλή έκφραση [βλ. και σχέση (2.29)], οδήγησε πολλούς ερευνητές στο να το προτιμήσουν για την αναπαράσταση των πειραματικών τους δεδομένων, όπως π.χ. ο Ivanov (1997), ο Szerbin (1999), ο Krstic' (2004) και ο Bossew (2004β). Παρόλαυτά, οι παράμετροι του μοντέλου, προσδιορίζονται με μεγάλη αβεβαιότητα και παρουσιάζουν μεγάλη κύμανση ακόμα και για το ίδιο έδαφος, την ίδια χρονική στιγμή. Κανείς από τους ερευνητές που το χρησιμοποίησαν, δεν κατόρθωσε να καταδείξει, ότι υπάρχει σαφής συσχέτιση των παραμέτρων του μοντέλου με το είδος του εξεταζόμενου εδάφους, όπως αυτό προσδιορίζεται από διάφορες ποσοτικές μετρήσεις και αναλύσεις, γεωλογικής ή γεωπονικής φύσεως.

Τα διαμερισματικά μοντέλα, ως βασιζόμενα σε σύστημα συνήθων διαφορικών εξισώσεων 1^{ης} τάξης, δεν μπορούν να επιλυθούν αν δεν υπάρχει ικανός αριθμός πειραματικών αποτελεσμάτων μετρήσεων της κατά βάθος εδάφους κατανομής της συγκέντρωσης ραδιοϊσοτόπου. Για την προσομοίωση με αυτά τα μοντέλα επιβάλλεται τα πειραματικά δεδομένα να έχουν συλλεχθεί με πολύ προσοχή, σε διαδοχικά πολύ μικρά βήματα βάθους, και σε πυκνές διαδοχικές χρονικές στιγμές. Αν τα βήματα βάθους είναι σχετικά μεγάλα, οι διαφορετικές ιδιότητες του εδάφους σε κάθε διαμέρισμα αγνοούνται, οπότε δεν έχει πλέον νόημα η εφαρμογή διαμερισματικού μοντέλου. Η αρχική επιφανειακή απόθεση πρέπει επίσης να είναι ποσοτικά σημαντική. Ο λόγος είναι ότι, στα μικρά διαμερίσματα σε μεγαλύτερα βάθη, η συγκέντρωση του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου πρέπει να φθάσει να είναι τέτοια ώστε να ανιχνεύεται και έτσι να επιτρέπεται η προσομοίωση. Η εφαρμογή διαμερισματικού μοντέλου στα πειραματικά αποτελέσματα του Ivanov (1997), έδειξε ακριβώς αυτές τις αδυναμίες και εκτίμησε ρυθμούς εισόδου και εξόδου στα διαμερίσματα στην αναμενόμενη τάξη μεγέθους αλλά με πολύ μεγάλη αβεβαιότητα.

Τα "εμπειρικά" μοντέλα είναι τα πλέον απλά. Έλκουν τη διαμόρφωσή τους κυρίως από τη μαθηματική μορφή της λύσης του θεωρητικού – αναλυτικού μοντέλου. Αναπαριστούν την κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης κατακόρυφα μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου Cs-137 συνήθως ως καμπύλη τύπου "καμπάνας",

όπως εξάλλου κάνουν και οι δύο προηγούμενοι τύποι μοντέλων. Η "καμπάνα" εκφράζεται συνήθως, είτε με καμπύλη που προσομοιάζει την Gauss, είτε με καμπύλη που προσομοιάζει την Weibull. Στην πρώτη περίπτωση η μορφή της καμπύλης εξαρτάται από τον χρόνο. Τα εμπειρικά μοντέλα και κυρίως αυτά στα οποία γίνεται δεκτό ότι παίζει ρόλο ο χρόνος, αποδίδουν την κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137 κατά βάθος, με σχετικά καλή ακρίβεια σε χρονικές στιγμές που απέχουν πάνω από 5 έτη από την αρχική απόθεση του ραδιοϊσοτόπου. Όπως φάνηκε με δοκιμές που έγιναν με τη χρήση των πειραματικών αποτελεσμάτων του Ιβανον (1997), η αβεβαιότητα των υπολογισμών δεν φαίνεται να είναι σημαντικά χειρότερη από την αβεβαιότητα των υπολογισμών που γίνονται με τα άλλα μοντέλα. Η αδυναμία βέβαια των στατικών και των δυναμικών εμπειρικών μοντέλων είναι ότι δεν μπορεί να ισχυρίζεται κανείς ότι οι παράμετροί τους έχουν φυσική σημασία. Παρόλαυτά διαπιστώθηκε στο 5^ο Κεφάλαιο ότι ο συντελεστής διαχύσεως και η ταχύτητα μεταφοράς που εκτιμάται με βάση το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο είναι μάλλον ίσοι με τις αντίστοιχες παραμέτρους του θεωρητικού αναλυτικού μοντέλου αν ο χρόνος που έχει μεσολαβήσει από την επιφανειακή απόθεση είναι γενικά μεγαλύτερος από 5 – 7 χρόνια.

7.2 Προσομοίωση και διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα

Στην διεθνή βιβλιογραφία δεν υπάρχουν πολλές δημοσιεύσεις, οι οποίες να συμπεριλαμβάνουν τα πρωτογενή πειραματικά αποτελέσματα από κατά βάθος μετρήσεις συγκέντρωσης ραδιοϊσοτόπων στο έδαφος, τα οποία να μεταναστεύουν μετά από μία αρχική επιφανειακή απόθεση, σε διάφορα εδάφη, σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απόθεση. Χαρακτηριστική τέτοια εργασία είναι αυτή του Ιβανον (1997), η οποία και παρατίθεται σε Παράρτημα στο τέλος αυτής της Διπλωματικής Εργασίας. Τα πειραματικά αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν πολλαπλώς για την παρουσίαση και την εξέταση της καταλληλότητας των διαφόρων τύπων μοντέλων που είναι δυνατόν να προσομοιώνουν την κατακόρυφη μετανάστευση του Cs-137.

Ειδικά σε ό,τι αφορά στο θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο, δεν επαναλήφθηκαν με δικούς μας υπολογισμούς, οι εκτιμήσεις των συντελεστών διάχυσης και των ταχυτήτων μεταφοράς, στα οποία είχε καταλήξει ο ίδιος ο Ιβανον (1997) στην ίδια δημοσίευση. Η αξιολόγηση του θεωρητικού – αναλυτικού μοντέλου έγινε συνολικά

με βάση την επεξεργασία του, αλλά και με βάση άλλες δημοσιεύσεις, στις οποίες δεν συμπεριλαμβάνονταν πειραματικά αποτελέσματα [Szerbin (1999), Krstic' (2004), Bossew (2004β)].

Σχετικά με την αξιολόγηση των διαμερισματικών και των εμπειρικών μοντέλων τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων του Ivanov (1997), αποδείχθηκαν πολύτιμα. Το γενικότερο βέβαια σχόλιο που μπορεί να κάνει κανείς σχετικά με τέτοιου τύπου πειραματικά αποτελέσματα, είναι:

"πώς επιτυγχάνεται ακριβής δειγματοληψία στο 1^ο – 2^ο αρχικό εκατοστό του εδάφους;"

Στην ιδανική περίπτωση το έδαφος μπορεί να θεωρηθεί, ότι είναι επίπεδο, ότι αποτελείται από πηλό (άργιλο σε μικρή κοκκομετρία) και ότι είναι αρκετά έως πολύ υγρό. Από τέτοιο έδαφος, μπορεί κανείς εύκολα να απομονώσει όλα τα διαδοχικά στρώματα σε πάχη ακόμα και μικρότερα του ενός εκατοστού και επομένως και τα στρώματα του πρώτου και του δεύτερου επιφανειακού εκατοστού. Τέτοιες ιδανικές περιπτώσεις εδαφών δεν υπάρχουν πολλές και μάλιστα δεν φαίνεται να υπάρχουν γενικά στην Ελλάδα. Στα πρώτα επιφανειακά εκατοστά του εδάφους γενικά παρατηρείται βλάστηση, πετραδάκια, ριζικό σύστημα φυτών, οργανική ύλη από τη χλωρίδα και την πανίδα, η οποία σαπίζει κ.ο.κ. σε τυχαία κατανομή. Ως αποτέλεσμα δειγματοληψίες εδάφους που θεωρητικά "αφορούν" στο πρώτο, δεύτερο εκατοστό της επιφανείας του δεν είναι γεωμετρικά ακριβείς. Η συνέπεια του γεγονότος αυτού είναι φανερή: Τα μοντέλα που προσομοιώνουν την κατά βάθος εδάφους κατανομή της συγκέντρωσης μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου, δεν αναπαριστούν με πιστότητα το φαινόμενο, στα πρώτα έτη μετά την αρχική απόθεση του ραδιοϊσοτόπου, όπου το μεγαλύτερο ποσοστό του υπόψιν ραδιοϊσοτόπου βρίσκεται ακόμα πολύ κοντά στην επιφάνεια (βλ. και την ανεπάρκεια του δυναμικού εμπειρικού μοντέλου τα έτη 1-5 μετά την απόθεση – Κεφάλαιο 5^ο). Σε μεταγενέστερα έτη, το μεγαλύτερο ποσοστό του μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου έχει πια μετακινηθεί σε μεγαλύτερο βάθος, το οποίο μεγαλύτερο βάθος έχει ως έδαφος, πολύ καλύτερα δειγματοληπτικά χαρακτηριστικά, έχει δηλαδή λεπτότερη κοκκομετρία, μεγαλύτερη πυκνότητα και περισσότερη υγρασία, με αποτέλεσμα η δειγματοληψία να είναι ευκολότερη και βεβαιότερη σε ό,τι αφορά το βάθος από το οποίο λαμβάνεται το δείγμα. Η συνέπεια του γεγονότος αυτού είναι επίσης φανερή: Τα μοντέλα που προσομοιώνουν την κατά βάθος εδάφους κατανομή της συγκέντρωσης μεταναστεύοντος ραδιοϊσοτόπου,

αναπαριστούν με περισσότερη πιστότητα το φαινόμενο, στα μεταγενέστερα έτη μετά την αρχική απόθεση του ραδιοϊσοτόπου, όπου το μεγαλύτερο ποσοστό του υπόψιν ραδιοϊσοτόπου βρίσκεται αρκετά πιο κάτω από την επιφάνεια (βλ. και την επάρκεια του δυναμικού εμπειρικού μοντέλου τα έτη 5-7 με τά την απόθεση – Κεφάλαιο 5^ο).

7.3 Προτάσεις για συνέχεια της έρευνας

Σήμερα (2007), έχουν ήδη συμπληρωθεί είκοσι χρόνια από την αρχική επιφανειακή απόθεση του Cs-137 που οφείλεται στο ατύχημα του Chernobyl. Από την δειγματοληπτική – πειραματική – μετρητική άποψη, μπορεί να γίνει προσπάθεια να εντοπισθούν εδάφη της Ελληνικής επικράτειας στα οποία να διακρίνεται τόσο η μετανάστευση του Cs-137 που οφείλεται στο ατύχημα του Chernobyl, όσο και η μετανάστευση του Cs-137 που οφείλεται στις ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές. Για το σκοπό αυτό πρέπει να γίνουν δειγματοληψίες για να μετρηθούν συγκεντρώσεις Cs-137 κατά βάθος εδάφους. Οι προκύπτουσες μετρήσεις θα πρέπει να προσομοιωθούν με τη χρήση του θεωρητικού – αναλυτικού μοντέλου [εξίσωση (3.7), βλ. και 3^ο Κεφάλαιο]. Αν υπάρχει επίδραση των ατμοσφαιρικών πυρηνικών δοκιμών, αναμένεται η κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης του Cs-137, να έχει την εικόνα του Διαγράμματος 3.6. Αν δεν υπάρχει επίδραση των ατμοσφαιρικών πυρηνικών δοκιμών αναμένεται η κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης του Cs-137, να έχει την εικόνα του Διαγράμματος 5.1. Αν υπάρχει βεβαιότητα ότι η επίδραση των ατμοσφαιρικών πυρηνικών δοκιμών είναι αμελητέα, τότε γενικά στα ελληνικά εδάφη είναι σκόπιμο να εφαρμόζεται το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο για την προσομοίωση της κατακόρυφης μετανάστευσης του Cs-137, δεδομένου ότι 20 σχεδόν χρόνια μετά το ατύχημα του Chernobyl, πρέπει πλέον τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το θεωρητικό – αναλυτικό μοντέλο και το δυναμικό εμπειρικό μοντέλο να ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό. Προκειμένου να αποκτηθεί αυτή η βεβαιότητα για τη μη επίδραση των ατμοσφαιρικών πυρηνικών δοκιμών πρέπει όπως γίνεται κατανοητό οι σχετικές δειγματοληψίες να είναι σημαντικές σε αριθμό. Μόνο τότε θα μπορεί κανείς να πει ποιο είναι το εφαρμόσιμο μοντέλο στα Ελληνικά εδάφη (το θεωρητικό – αναλυτικό, ή το δυναμικό εμπειρικό).

Δεδομένου ότι στο ερώτημα αν υπάρχει μοντέλο μέσω του οποίου να εκτιμηθεί σήμερα (2007) κυρίως σε ποια βάθη των Ελληνικών εδαφών της δειγματοληψίας των ετών 1986 – 1987, βρίσκονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις Cs-137, δεν μπορεί σήμερα

να δοθεί σαφής απάντηση, δεν μπορεί ακόμα να εκτιμηθεί ποια είναι η σημερινή κατά βάθος κατανομή της συγκέντρωσης του Cs-137 στην Ελληνική επικράτεια. Όταν προκύψουν δεδομένα που να πείθουν σχετικά με τις αρχικές επιφανειακές αποθέσεις Cs-137 στα Ελληνικά εδάφη, και από τις δύο αιτίες, τότε θα υπάρχει πλέον η δυνατότητα και για τέτοιου είδους υπολογισμούς μέσω προσομοιώσεων με κώδικες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αγγελόπουλος Μ.Γ., "Πυρηνική Τεχνολογία", ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα 1983
2. Antonopoulos-Domis M., Clouvas A., Hiladakis A. and Kadi S., "Radiocesium distribution in undisturbed soil: Measurements and diffusion – advection model", Health Physics, 69(6):949-953, 1995
3. Bossew P., Gastberger M., Gohla H., Hofer P. and Hubmer A., "Vertical distribution of radionuclides in soil of the grassland site in Chernobyl exclusion zone", Journal of Environmental Radioactivity, 73:87-99, 2004α.
4. Bossew P. and Kirchner G., "Modelling the vertical distribution of radionuclides in soil. Part 1: the convection – dispersion equation revisited", Journal of Environmental Radioactivity, 73:127-150, 2004β.
5. Dahm H., Niemeyer J. and Shröder D., "Application of the Weibull distribution to describe the vertical distribution of cesium-137 on a slope under permanent pasture in Luxemburg", Journal of Environmental Radioactivity, 63:207-219, 2002
6. De Cort M., Dubois G., Fridman Sh.D., Germenchuk M.G., Izrael Yu.A., Janssens A., Jones A.R., Kelly G.N., Kvasnikova E.V., Matveenko I.I., Nazarov I.M., Pokumeiko Yu.M., Sitak V.A., Stukin E.D., Tabachny L.Ya., Tsaturov Yu.S., Avdyushin S.I., "Atlas of Caesium Deposition on Europe after the Chernobyl Accident", Luxemburg, Office for Official Publications of the European Communities, 1998.
7. Environmental Studies, http://www.environmental-studies.de/Radioecology/Radiocesium/Cs_E7/Cs_E8/cs_e8.html, 2007α.
8. Environmental Studies, http://www.environmental-studies.de/Radioecology/Radiocesium/Cs_E7/Cs_E8/Cs_E8-1/cs_e8-1.html, 2007β.
9. Goldsim User's Guide, "Probabilistic Simulation Environment", Chapters 1 – 7, Volume 1 (of 2), Goldsim Technology Group, Washington State, USA (approx. no. of pages: 720)

10. Goldsim User's Guide, "Probabilistic Simulation Environment", Chapters 8 – 10, Apprentices A – G, Volume 2 (of 2), Goldsim Technology Group, Washington State, USA (approx. no. of pages: 720)
11. Goldsim Contaminant Transport Module User's Guide, Chapters 1 – 7, Apprentices A – E, Goldsim Technology Group, Washington State, USA (approx. no. of pages: 320)
12. Ivanov Y.A, Lewyckij N., Levchuk F.C., Prister B.S., Firsakova S.K., Arkhipov N.P., Arkhipov A.N., Kruglov S.V., Alexakhin R.M., Sandalls J. and Askbrant S., "Migration of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr from Chernobyl Fallout in Ukrainian, Belarussian and Russian Soils", Journal of Environmental Radioactivity, 35(1):1-21, 1997
13. Krstic' D., Nikezic' D., Stevanovic' N. and Jelic' M., "Vertical profile of ¹³⁷Cs in soil", Applied Radiation and Isotopes, 61:1487-1492, 2004
14. Παπαδάκος Γ., Σιμόπουλος Σ.Ε., Προσωπική Επικοινωνία, 2006
15. Petropoulos N.P., Hinis E.P., Simopoulos S.E., "137Cs Chernobyl Fallout in Greece and its Associated Radiological Impact", Environment International, 22(S1):S369-S373, 1996
16. Petropoulos N.P., Anagnostakis M.J., Hinis E.P. and Simopoulos S.E., "Geographical mapping and associated fractal analysis of the long-lived Chernobyl fallout radionuclides in Greece", Journal of Environmental Radioactivity, 53(1): 59-66, 2001
17. Simopoulos S.E., "Soil sampling and ¹³⁷Cs analysis of the chernobyl fallout in Greece", International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes, 40(7), 607-613, 1989
18. Σιμόπουλος Σ.Ε., "MPX-1: Αποτελέσματα προσδιορισμού ραδιενεργείας Cs-137, 1244 δειγμάτων χώματος επιφανειακού εδάφους της Ηπειρωτικής Ελλάδας (Μάιος – Νοέμβριος 1986)", ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα 1986
19. Σιμόπουλος Σ.Ε., "MPX-2: Μετρήσεις ραδιενεργείας των ελληνικών εδαφών μετά το ατύχημα στο Chernobyl", ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα 1987.
20. Σιμόπουλος Σ.Ε., "Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών", Β' Εκδοση, ΕΜΠ, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα 1989.

21. Rühm W., Kammerer L., Hiersche L. and Wirth E., " Migration of ^{137}Cs and ^{134}Cs in Different Forest Soil Layers", Journal of Environmental Radioactivity, 33(1):63-75, 1996
22. Rühm W., Kammerer L., Hiersche L. and Wirth E., " Migration of ^{137}Cs and ^{134}Cs in Different Forest Soil Layers, ERRATUM", Journal of Environmental Radioactivity, 34(1):103-106, 1997
23. Szerbin P., Koblinger-Bokori E., Koblinger L., Vegvari I. and Urgon A., "Caesium-137 migration in Hungarian soils", The Science of the Total Environment, 227:215-227, 1999.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

**Ivanov Y.A, Lewyckij N., Levchuk F.C., Prister B.S.,
Firsakova S.K., Arkhipov N.P., Arkhipov A.N., Kruglov S.V.,
Alexakhin R.M., Sandalls J. and Askbrant S.,
"Migration of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr from Chernobyl Fallout in Ukrainian,
Belarussian and Russian Soils",
Journal of Environmental Radioactivity, 35(1):1-21, 1997**