Εθνικο Μετσοβιο Πολυτεχνειο
Σχολη Μηχανολογων Μηχανικων
Τομεας Πυρηνικης Τεχνολογιας

Μοντέλα διακίνησης και εναπόθεσης στερεών σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας στο περιβάλλον και συνακόλουθες ραδιολογικές επιπτώσεις στη λεκάνη της Μεγαλόπολης

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

ΝΙΚΟΛΑΟΥ Κ. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Σ.Ε. ΣΙΜΟΠΟΥΛΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2010

Πρόλογος

Στην σημερινή εποχή η παραγωγή ενέργειας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για την εξέλιξη και την πρόοδο των κοινωνιών. Σημαντική θέση ανάμεσα στις πρώτες ύλες, που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας, κατέχουν οι γαιάνθρακες. Στον ελληνικό χώρο μάλιστα οι γαιάνθρακες παίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο καθώς το 2005 το 55% της παραγόμενης ενέργειας προερχόταν από την καύση του λιγνίτη, ο οποίος είναι ένα είδος γαιάνθρακα

Οι γαιάνθρακες ως ορυκτά περιέχουν φυσικά ραδιενεργά ισότοπα, όπως αυτά των ραδιενεργών σειρών του ^{238}U, του ^{232}Th καθώς και ^{40}K, το οποίο είναι φυσικό ραδιενεργό ισότοπο του καλίου. Κατά την καύση των γαιανθράκων στους Ατμοηλεκτρικούς Σταθμούς η οργανική ύλη ελαχιστοποιείται με αποτέλεσμα η παραγόμενη τέφρα να εμπλουτίζεται με τα παραπάνω ισότοπα. Το μεγαλύτερο μέρος των σωματιδίων της τέφρας συγκρατείται στον σταθμό στον θάλαμο καύσης και σε διάφορα σημεία στην διαδρομή των καυσαερίων προς την έξοδο. Ένα μικρό ποσοστό των σωματιδίων της τέφρας διαφεύγει από τις καμινάδες στην ατμόσφαιρα και διασπείρεται στην περιοχή γύρω από τον σταθμό. Η διασπορά των σωματιδίων της τέφρας είναι πιθανό ότι θα επιβαρύνει ραδιολογικά το περιβάλλον καθώς και τους ανθρώπους που κατοικούν στην εν λόγω περιοχή.

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή είχε ως σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης της λειτουργίας των ΑΗΣ της περιοχής της Μεγαλόπολης Αρκαδίας από ραδιολογική άποψη. Για αυτό τον σκοπό χρησιμοποιήθηκαν κώδικες υπολογισμού ατμοσφαιρικής διασποράς ραδιενεργών ρύπων. Επίσης πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες υγρής απόθεσης και ακολούθησε ανάλυση των δειγμάτων. Τέλος μετρήθηκε ο ρυθμός εκροής ραδονίου από τέφρα, που παράχθηκε στους υπό μελέτη σταθμούς. Η Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε στον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας κατά το χρονικό διάστημα Ιουλίου 2004-Νοεμβρίου 2010 και χρηματοδοτήθηκε από τον Ειδικό Λογαριασμό Έρευνας ΕΜΠ με την μορφή τετραετούς υποτροφίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Σ.Ε.Σιμόπουλο για την εμπιστοσύνη, που μου έδειξε αναθέτοντας μου αυτό το θέμα καθώς και για την αμέριστη υποστήριξη και καθοδήγησή του κατά την εκπόνηση της διατριβής. Ευχαριστώ επίσης τα άλλα δύο μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής κ.κ. Ε.Π.Χίνη, Επικ. Καθηγητή ΕΜΠ και Μ.Ι.Αναγνωστάκη, Επικ. Καθηγητή ΕΜΠ για τις πολύτιμες υποδείξεις και συμβουλές τους. Επίσης ευχαριστώ τους κ.κ. Ε. Κακαρά, Καθηγητή ΕΜΠ, Α. Κλούβα, Καθηγητή ΑΠΘ, Α.Λουίζη, Επικ. Καθηγήτρια Ιατρικής Σχολής Πανεπιστημίου Αθηνών, Ν.Π.Πετρόπουλο Λέκτορα ΕΜΠ, για την τιμή που μου έκαναν να συμμετάσχουν στην επταμελή Εξεταστική Επιτροπή της Διατριβής. Ακόμη ευχαριστώ τον Δρ.

Δ.Ι.Καράγγελο για όλη την βοήθεια, που μου προσέφερε στο πειραματικό μέρος της Διατριβής, και για τις πολύτιμες συμβουλές του στην σύνταξη του κειμένου καθώς και όλα τα μέλη του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας για την έμπρακτη βοήθεια τους.

Η εργασία αυτή αφιερώνεται σε όλους όσους στάθηκαν δίπλα μου και έκαναν φωτεινό το δρόμο μου αυτό το χρονικό διάστημα.

Νίκος Κ. Παπαδόπουλος
Αθήνα, Νοέμβριος 2010

Περίληψη

Οι γαιάνθρακες ως ορυκτά περιέχουν φυσικά ραδιενεργά ισότοπα, όπως αυτά των ραδιενεργών σειρών του ^{238}U, του ^{232}Th καθώς και ^{40}K, το οποίο είναι φυσικό ραδιενεργό ισότοπο του καλίου. Κατά την καύση των γαιανθράκων στους Ατμοηλεκτρικούς Σταθμούς (ΑΗΣ) η οργανική ύλη απομακρύνεται με αποτέλεσμα η παραγόμενη τέφρα να εμπλουτίζεται με τα παραπάνω ισότοπα. Το μεγαλύτερο μέρος των σωματιδίων της τέφρας συγκρατείται μέσα στον σταθμό στον θάλαμο καύσης, σε διάφορα σημεία στην διαδρομή των καυσαερίων προς την έξοδο και βέβαια στα ηλεκτροστατικά φίλτρα. Ένα μικρό ποσοστό των σωματιδίων της τέφρας διαφεύγει από τις καμινάδες στην ατμόσφαιρα, το οποίο διασπείρεται στην περιοχή γύρω από τους σταθμούς.

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή είχε ως σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης της λειτουργίας των ΑΗΣ της περιοχής της Μεγαλόπολης Αρκαδίας από ραδιολογική άποψη. Για αυτό τον σκοπό επιλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν οι κώδικες ατμοσφαιρικής διασποράς ραδιενεργών ρύπων ORION-II και GENII. Κατά την δοκιμαστική χρήση του ORION-II βρέθηκαν 2 σφάλματα στον πηγαίο κώδικα, τα οποία διορθώθηκαν. Η επιτυχία των διορθώσεων ελέγχθηκε με κατάλληλες δοκιμαστικές εκτελέσεις.

Έγινε εφαρμογή των κωδίκων για την περιοχή της Μεγαλόπολης και οι μέγιστες υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις ^{226}Ra στην ατμόσφαιρα στο επίπεδο του εδάφους ήταν της τάξης του $\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$. Από τους υπολογιζόμενους ρυθμούς απόθεσης ^{226}Ra συμπεραίνεται ότι οι υψηλές συγκεντρώσεις ^{226}Ra στο χώμα της περιοχής, που έχουν μετρηθεί στο παρελθόν, δεν οφείλονται στην εναπόθεση ιπτάμενης τέφρας αλλά στο φυσικό περιεχόμενο του εδάφους σε ^{226}Ra. Πραγματοποιήθηκαν επίσης δοσιμετρικοί υπολογισμοί και η μέγιστη ετήσια ατομική ενεργή δόση ήταν $6.4\,\mu\mathrm{Sv}$. Το σημείο μέγιστης δόσης βρέθηκε σε απόσταση $1\,\mathrm{km}$ από το κέντρο υπολογισμού και σε διεύθυνση $22.5\,^{\circ}$ ΒΒΑ. Η ετήσια ατομική δόση για κάποιον, που κατοικεί μέσα στην πόλη της Μεγαλόπολης ήταν $1.5\,\mu\mathrm{Sv}$. Οι συγκεκριμένες τιμές ήταν μία τάξη μεγέθους μικρότερες από την μέση ετήσια ενεργή δόση, που δέχεται ένας κάτοικος της Ελλάδας από τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα, που περιέχονται στο έδαφος. Επίσης ήταν μια τάξη μεγέθους μικρότερες από την μέση ετήσια ενεργή δόση, που δέχτηκε κάποιος εξαιτίας των τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων που έχουν εναποτεθεί στο έδαφος της Ελλάδας λόγω του ατυχήματος του Chernobyl για χρονικό διάστημα ενός έτους μετά το συμβάν.

Παράλληλα πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία δειγμάτων υγρής απόθεσης στην περιοχή της Μεγαλόπολης. Ακολούθησε ραδιοχημική επεξεργασία των δειγμάτων και στην συνέχεια ανάλυση με μεθόδους α-, γ-φασματοσκοπίας καθώς και ανάλυσης κινητικής φωσφορισμού *(Kinetic Phosphoresence Analysis, KPA)*. Η μετρούμενη συγκέντρωση ^{238}U στο βρόχινο νερό στην πόλη της Μεγαλόπολης προσδιορίστηκε σε

$10\pm2\,\mathrm{mBqkg^{-}1}$. Η μέγιστη συγκέντρωση ^{238}U στο βρόχινο νερό της περιοχής προσδιορίστηκε σε $90\pm14\,\mathrm{mBqkg^{-}1}$ και το σημείο δειγματοληψίας βρισκόταν πλησίον των ΑΗΣ1-2,3 της περιοχής. Σε αντίστοιχη μέτρηση που πραγματοποιήθηκε στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου η συγκέντρωση ήταν $2.2\pm0.6\,\mathrm{mBqkg^{-}1}$, δηλαδή 4.5 φορές μικρότερη από την αντίστοιχη στην πόλη της Μεγαλόπολης και 41 φορές μικρότερη από την μέγιστη συγκέντρωση, που μετρήθηκε. Υπολογίστηκε επίσης η μηνιαία απόθεση στην πόλη της Μεγαλόπολης, και βρέθηκε ίση με $679\pm135\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$. Η μέγιστη απόθεση στην περιοχή υπολογίστηκε σε $4764\pm741\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$ Η μηνιαία απόθεση στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου ήταν $113\pm31\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$. Οι παραπάνω τιμές ήταν σχετικά χαμηλά στο εύρος τιμών ανάλογης μελέτης, που έχει πραγματοποιηθεί στο παρελθόν στην περιοχή.

Προκειμένου να διερευνηθεί η πιθανή επιβάρυνση του περιβάλλοντος από την εκροή ραδονίου από τη διασπειρόμενη τέφρα στην περιοχή της Μεγαλόπολης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις εκροής ραδονίου από τέφρα, που παράχθηκε στους ΑΗΣ Μεγαλόπολης σε κατάλληλο θάλαμο. Ο ρυθμός εκροής ήταν $460\pm84\,\mu\mathrm{Bqs^{-1}m^{-2}}$ και το εκρεόμενο κλάσμα $2.0\pm0.4\,\%$. Λαμβάνοντας υπόψη προηγούμενες έρευνες στην βιβλιογραφία συμπεραίνεται ότι οι αυξημένοι ρυθμοί εκροής ραδονίου από το έδαφος της περιοχής δεν οφείλονται στην εναπόθεση ιπτάμενης τέφρας, η οποία εκπέμπεται από τις καμινάδες των ΑΗΣ.

Τα κυριότερα σημεία πρωτοτυπίας στο υπολογιστικό μέρος της Διδακτορικής Διατριβής είναι η ανάλυση και η άρση δύο σφαλμάτων στον πηγαίο κώδικα του ORION-II, η ανάπτυξη του μετεωρολογικού προεπεξεργαστή metprep και του γεωγραφικού προεπεξεργαστή geocalc σε γλώσσα Fortran 77, η πραγματοποίηση μελέτης διασποράς ραδιενεργών ρύπων από τις καμινάδες των ΑΗΣ Μεγαλόπολης και τέλος η πραγματοποίηση των αντίστοιχων δοσιμετρικών υπολογισμών.

Στο πειραματικό μέρος της Διδακτορικής Διατριβής τα κυριότερα σημεία πρωτοτυπίας είναι η πραγματοποίηση δειγματοληψιών υγρής απόθεσης στην περιοχή της Μεγαλόπολης και η επεξεργασία και επιτυχής ανάλυση των δειγμάτων με α-φασματοσκοπία και Ανάλυση Κινητικής Φωσφορισμού (KPA) καθώς και η πραγματοποίηση μέτρησης του ρυθμού εκροής ραδονίου από δείγμα τέφρας μεγάλου όγκου, στο εσωτερικό του θαλάμου ραδονίου σε πάχος $1\,\mathrm{cm}$.

Abstract

Fossil fuels such as coal and lignite play an important role in electric power generation worldwide. Coal contains naturally occurring radionuclides such as ^{238}U, ^{226}Ra, ^{210}Pb, ^{232}Th and ^{40}K. During the combustion process, the produced ashes are enriched in the above radionuclides. Most of the ash is traped by the Electrostatic Precipitators (ESP). However some particles escape from the stacks and disperse in the atmosphere.

The aim of this PhD Thesis was to investigate any radiological influence of the operation of the Power Plants in the Megalopolis Basin in Arkadia Prefecture. For this purpose the atmospheric dispersion codes ORION-II and GENII were chosen and used. During operational tests of ORION-II two bugs in the source code were found and were fixed. The success of the corrections was verified with trial executions.

The codes were executed for the coal burning power plants of Megalopolis and the maximum calculated concentrations of ^{226}Ra in the atmosphere at the ground level were in the order of $\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$. From the calculated deposition rates of ^{226}Ra it is concluded that the high concentrations of ^{226}Ra in the soil in the vicinity of Megalopolis cannot be attributed to the fly ash that escapes from the stacks of coal burning power plants. Dosimetric calculations also took place and the maximum annual individual effective dose was $6.4\,\mu\mathrm{Sv}$. The point of maximun dose was situated at a distance of $1\,\mathrm{km}$ from the center of calculations and in direction $22.5\,^{\circ}$ NNE. The annual individual effective dose for a person that lives in the city of Megalopolis was $1.5\,\mu\mathrm{Sv}$. These values were one order of magnitude lower than the mean annual individual effective dose caused by the natural occuring radioisotopes that are found in greek soils. Also these values were one order of magnitude lower than the mean annual individual effective dose caused by radioisotopes that have been deposited on greek soil after the Chernobyl accident.

Furthermore two months sampling of wet deposition took place in two different sites at the Megalopolis Basin. The samples were treated chemically and then were analyzed by alpha-, gamma-spectroscopy and KPA. The concentration of ^{238}U in rainwater in the city of Megalopolis was found to be equal to $10\pm2\,\mathrm{mBqkg}^{-1}$. The maximum concentration of ^{238}U in rainwater was found equal to $90\pm14\,\mathrm{mBqkg}^{-1}$ and the sampling location was near the Power Plant 1-2,3. The coresponding concentration of ^{238}U in rainwater that was sampled in the National Tachnical University of Athens (NTUA) Campus was $2.2\pm0.6\,\mathrm{mBqkg}^{-1}$ namely 4.5 times smaller than the concentration of ^{238}U in the city of Megalopolis and 41 times smaller than the maximum concentration. The concentrations of ^{238}U in precipitation samples

in the Megalopolis basin are also higher in comparison with other measurements of ^{238}U in rainwater in the literature, in cases where no known anthropogenic activities entailing uranium redistribution in the environment are in progress. Deposition rates also calculated for these sampling periods and ranged between 679-4764 $\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$ in Megalopolis. In NTUA Campus deposition rate was lower and had a value of $113\pm31\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$. The deposition rates in Megalopolis would be placed at the lower end of the range of values presented in another survey in the vicinity of Megaloplis basin.

In order to investigate the influence on the environment by the radon exhalation from fly ash particles, that escaped from the stacks and were deposited on the ground, fly ash samples from the Megalopolis Power Plants were analyzed for radon exhalation in a closed radon house. The radon exhalation rate was $460\pm84\,\mu\mathrm{Bqs^{-1}m^{-2}}$ and the exhalation fraction was $2.0\pm0.4\,\%$. These values are low and therefore radon exhalation from fly ash particles cannot be attributed to the radon exhalation rate from the Megalopolis ground.

The original contributions of the computational part of this PhD Thesis include the identification and correction of two bugs in the source code of ORION-II, the developement of the meteorological preprocessor metprep and geographical preprocessor geocalc, the application of atmospheric dispersion codes ORION-II and GENII for radioactive isotopes in the Megalopolis power plants and the calculation of radioactive doses in the vicinity of these power plants.

The points of originality of the experimental part of this PhD Thesis include the collection and the comparative analysis of wet deposition samples in the Megalopolis basin using a-spectrometry and Kinetic Phosphoresence Analysis (KPA), and the measurement of radon exhalation rate from a large volume sample ($30\,\mathrm{kg}$), in a radon house.

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή **1**

2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση **5**

2.1 Ραδιενέργεια στον λιγνίτη και στην παραγόμενη τέφρα στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς . . . 5

2.1.1 Εισαγωγή . . . 5

2.1.2 Ο λιγνίτης . . . 6

2.1.3 Η τέφρα . . . 6

2.1.3.1 Παραγωγή της τέφρας και τα διάφορα είδη της . . . 7

2.1.3.2 Σχηματισμός των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας . . . 7

2.1.3.3 Εμπλουτισμός των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας . . . 8

2.1.3.4 Εμπλουτισμός των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων των σειρών του ^{238}U και του ^{232}Th στα σωματίδια της τέφρας . . . 10

2.1.3.5 Συντελεστής εμπλουτισμού *(enrichment factor)* . . . 12

2.1.4 Μετρήσεις ραδιενέργειας στον λιγνίτη . . . 13

2.1.5 Μετρήσεις ραδιενέργειας στην τέφρα . . . 14

2.1.5.1 Μετρήσεις ραδιενέργειας στην υγρή τέφρα . . . 14

2.1.5.2 Μετρήσεις ραδιενέργειας στην ιπτάμενη τέφρα . . . 14

2.2 Ατμοσφαιρική διασπορά ρύπων . . . 15

2.2.1 Εισαγωγή . . . 15

2.2.2 Βασικές αρχές συμπεριφοράς της ατμόσφαιρας . . . 15

2.2.2.1 Μηχανική και θερμική τύρβη . . . 16

2.2.2.2 Ατμοσφαιρική ευστάθεια . . . 16

2.2.2.3 Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα . . . 20

2.2.2.4 Φαινόμενα εδάφους . . . 22

2.2.3 Ανύψωση του πλουμίου και μορφή του ανάλογα με την ατμοσφαιρική ευστάθεια . . . 23

2.2.3.1 Μορφή πλουμίου ανάλογα με το είδος ευστάθειας . . . 23

2.2.3.2 Εισαγωγικά στην μεθοδολογία υπολογισμού της ανύψωσης του πλουμίου . . . 24

2.2.3.3 Υπολογισμός κατωρεύματος στην καμινάδα . . . 25

2.2.3.4 Υπολογισμός παραμέτρων ροής άνωσης και ροής ορμής . . 25
2.2.3.5 Ανύψωση πλουμίου - ασταθείς και ουδέτερες συνθήκες . . 26
2.2.3.6 Ανύψωση πλουμίου - ευσταθείς συνθήκες 27
2.2.3.7 Ύψος πλουμίου πριν λάβει την μέγιστη ανύψωση 27
2.2.4 Εξισώσεις διασποράς των ρύπων στην ατμόσφαιρα 28
2.2.4.1 Η εξίσωση Gauss 29
2.2.4.2 Οι όροι της εξίσωσης Gauss και η φυσική τους σημασία . . 32
2.2.4.3 Φυσική σημασία των σ_y, σ_z και τρόποι υπολογισμού τους . 33
2.2.4.4 Προϋποθέσεις και παραδοχές του γκαουσιανού μοντέλου . 33
2.3 Η εναπόθεση των σωματιδίων 34
2.3.1 Η ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης V_d 34
2.3.2 Η ταχύτητα βαρυτικής επικάθησης V_g 37
2.4 Υπολογιστικά μοντέλα ατμοσφαιρικής διασποράς ρύπων 38
2.4.1 Γενικά 38
2.4.2 Εφαρμογές μοντέλων ατμοσφαιρικής διασποράς στον διεθνή και στον ελληνικό χώρο 38
Πίνακες Κεφαλαίου 41
Σχήματα Κεφαλαίου 45

3 Κώδικες υπολογισμού ατμοσφαιρικής διασποράς ραδιενεργών ρύπων, που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της ΔΔ 57
3.1 Εισαγωγή 57
3.2 Ο κώδικας ORION-II 58
3.2.1 Γενικά 58
3.2.2 Βασικές εξισώσεις υπολογισμού του κώδικα ORION-II 59
3.2.2.1 Υπολογισμός της συγκέντρωσης στον άξονα του κάθε τομέα 60
3.2.2.2 Μέση συγκέντρωση τομέα 60
3.2.2.3 Μέση συγκέντρωση τομέα λαμβάνοντας υπόψη και τους γειτονικούς τομείς 61
3.2.2.4 Οι παράγοντες ραδιενεργής διάσπασης, βαρυτικής επικάθησης, ξηρής εναπόθεσης και εναπόθεσης λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων 61
3.2.2.5 Υπολογισμός του ρυθμού απόθεσης ραδιοϊσοτόπων στο έδαφος 62
3.2.3 Εγκατάσταση του ORION-II στα υπολογιστικά συστήματα του ΕΠΤ-ΕΜΠ 63
3.2.3.1 Εγκατάσταση του ORION-II στον Η/Υ Silicon Graphics Indy (SGI) 63

3.2.3.2 Έλεγχος σωστής εγκατάστασης και λειτουργίας του ORION-II με βάση τα αρχεία δεδομένων και αποτελεσμάτων του κατασκευαστή του κώδικα. 65
3.2.3.3 Εγκατάσταση του ORION-II σε προσωπικό υπολογιστή PC κάτω από το λειτουργικό σύστημα Windows XP. 65
3.2.4 Διερεύνηση σχετικά με τη διαχείριση πατρικού και θυγατρικού ισοτόπου από τον κώδικα ORION-II 67
3.2.5 Ανάλυση και άρση σφαλμάτων στον κώδικα ORION-II 68
3.2.5.1 Διαπίστωση - τεκμηρίωση του προβλήματος 69
3.2.5.2 Ανάλυση της μεθόδου υπολογισμού και προτεινόμενη διόρθωση του τρόπου υπολογισμού της επίδρασης του εδάφους 70
3.2.5.3 Ανάλυση της μεθόδου υπολογισμού και προτεινόμενη διόρθωση του τρόπου υπολογισμού του παράγοντα ξηρής εναπόθεσης 72
3.2.5.4 Τεκμηρίωση της επιτυχίας των επεμβάσεων 74
3.3 Ο κώδικας GENII 75
3.3.1 Γενικά 75
3.3.2 Η επιλογή του κώδικα 75
3.3.3 Βασικές εξισώσεις υπολογισμού του κώδικα GENII 77
3.3.3.1 Εξισώσεις διασποράς των ρύπων 77
3.3.3.2 Κατακόρυφο προφίλ ανέμου 78
3.3.3.3 Εξισώσεις υπολογισμού της ταχύτητας ξηρής εναπόθεσης . 79
3.3.4 Δοσιμετρία με την βοήθεια του κώδικα GENII 80
3.3.5 Εγκατάσταση του κώδικα GENII στα υπολογιστικά συστήματα του ΕΠΤ-ΕΜΠ 82
3.3.6 Παρατηρήσεις 84
Πίνακες Κεφαλαίου 85
Σχήματα Κεφαλαίου 87

4 Ανάπτυξη πρόσθετου λογισμικού για την ολοκληρωμένη λειτουργία των κωδίκων ORION-II και GENII 95
4.1 Εισαγωγή 95
4.2 Ο μετεωρολογικός προεπεξεργαστής *metprep* για τον κώδικα ORION-II . 96
4.2.1 Γενικά 96
4.2.2 Μεθοδολογία εκτίμησης ατμοσφαιρικής ευστάθειας κατά P-G . . . 99
4.2.3 Εξισώσεις υπολογισμού της ανύψωσης του πλουμίου 100
4.2.4 Εξισώσεις υπολογισμού του ύψους ανάμιξης (*mixing height*) 100
4.2.4.1 Υπολογισμός του ύψους ανάμιξης σε ασταθείς συνθήκες . 102

4.2.4.2 Υπολογισμός του ύψους ανάμιξης σε ουδέτερες συνθήκες . 105
4.2.4.3 Υπολογισμός του ύψους ανάμιξης σε ευσταθείς συνθήκες . 106
4.2.5 Εξισώσεις υπολογισμού του κατακόρυφου προφίλ της ταχύτητας ανέμου 107
4.2.6 Διαχείριση διαστημάτων άπνοιας 109
4.2.7 Μορφή του *metprep* 111
4.2.8 Η λειτουργία του *metprep* 112
4.2.9 Παραγόμενα αποτελέσματα του *metprep* 114
4.2.10Έλεγχος σωστής λειτουργίας του *metprep* 114
4.3 Ο προεπεξεργαστής γεωγραφικών δεδομένων *GeoCalc* για τον κώδικα ORION-II 116
4.3.1 Εισαγωγή 116
4.3.2 Χρησιμοποιούμενη θεωρία για την ανάπτυξη του προγράμματος *GeoCalc* 117
4.3.3 Η ανάπτυξη του προγράμματος *GeoCalc* 119
4.3.4 Έλεγχος σωστής λειτουργίας του *GeoCalc* 120
4.4 Προγράμματα μετατροπής αρχείων αποτελεσμάτων των κωδίκων ORION-II και GENII 120
4.4.1 Προγράμματα μετατροπής για τον κώδικα ORION-II 122
4.4.1.1 Το πρόγραμμα *otran* 122
4.4.1.2 Το πρόγραμμα *ogt* 122
4.4.1.3 Το πρόγραμμα *ogtdeposit* 122
4.4.2 Προγράμματα μετατροπής για τον κώδικα GENII 123
4.4.2.1 Το πρόγραμμα *gtconc* 123
4.4.2.2 Το πρόγραμμα *gtdose* 123
4.4.2.3 Το πρόγραμμα *ggtconc* 124
4.4.2.4 Το πρόγραμμα *ggtdeposit* 124
4.4.2.5 Το πρόγραμμα *ggtdose* 124
4.5 Το πρόγραμμα μετατροπής αρχείου υψομέτρων *transheight* 125
4.6 Επίλογος 126
Πίνακες Κεφαλαίου 127
Σχήματα Κεφαλαίου 129

5 Εφαρμογές των κωδίκων ORION-II και GENII στους ΑΗΣ της περιοχής της Μεγαλόπολης 135
5.1 Εισαγωγή 135
5.2 Επιλογή παραμέτρων για την εκτέλεση των κωδίκων ORION-II και GENII 135
5.2.1 Εισαγωγή 135

5.2.2 Η ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης V_d 136
5.2.3 Η ταχύτητα βαρυτικής επικάθησης V_g 138
5.3 Κατασκευαστικά δεδομένα και δεδομένα εκπομπών των σταθμών ΑΗΣ1-2,3 και 4 της περιοχής της Μεγαλόπολης 142
5.3.1 Υπολογισμός ενεργών διατομών των κτιρίων πλησίον των καμινάδων του σταθμού 142
5.3.1.1 Οι μονάδες ΑΗΣ1-2 και 3 143
5.3.1.2 Η μονάδα 4 143
5.3.2 Υπολογισμός παραμέτρων εκπομπών των μονάδων 1-2, 3 και 4 . . 144
5.4 Συλλογή γεωγραφικών δεδομένων για την εκτέλεση του ORION-II 146
5.4.1 Εισαγωγή 146
5.4.2 Ορισμός του κέντρου υπολογισμού για την εκτέλεση του ORION-II και της θέσης των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 146
5.4.3 Καθορισμός και εύρεση υψομέτρων στα σημεία υπολογισμού του ORION-II 147
5.5 Κατασκευή μετεωρολογικών σεναρίων 148
5.5.1 Εισαγωγή 148
5.5.2 1^0 μετεωρολογικό σενάριο - Σενάριο αναφοράς 148
5.5.2.1 Υπολογισμός ποσοστού χρόνου κάθε κατηγορίας νέφωσης . 148
5.5.2.2 Υπολογισμός μέσου ηλιακού ύψους 150
5.5.2.3 Υπολογισμός κλάσης ηλιακής έκθεσης και ατμοσφαιρικής ευστάθειας 151
5.5.2.4 Υπολογισμός ανύψωσης πλουμίου 151
5.5.3 2^0 μετεωρολογικό σενάριο 152
5.6 Παρουσίαση των εκτελέσεων που πραγματοποιήθηκαν με τον κώδικα ORION-II 153
5.6.1 Εισαγωγή 153
5.6.2 Αρχική εκτέλεση του ORION-II 153
5.6.2.1 Τα απαιτούμενα δεδομένα για την εκτέλεση του κώδικα . . 153
5.6.2.2 Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων 154
5.6.2.3 Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης 154
5.6.3 Εξέταση της επίδρασης της ταχύτητας ξηρής εναπόθεσης V_d στα αποτελέσματα του ORION-II: Εκτελέσεις 14 και 16 157
5.6.3.1 Εκτέλεση με κωδικό 14 157
5.6.3.2 Εκτέλεση με κωδικό 16 157
5.6.4 Εξέταση της επίδρασης της διαμέτρου των σωματιδίων στις εκτελέσεις του ORION-II: Εκτέλεση 17 158
5.6.4.1 Περιγραφή της εκτέλεσης 158

5.6.4.2 Αποτελέσματα της εκτέλεσης 159
5.6.5 Εξέταση της επίδρασης του υψομέτρου στις εκτελέσεις του ORION-II: Εκτελέσεις 18 και 19 160
5.6.5.1 Εκτέλεση 18 160
5.6.5.2 Εκτέλεση 19 162
5.6.6 Εξέταση της επίδρασης της βροχόπτωσης στα αποτελέσματα του ORION-II: Εκτελέσεις 20, 21 και 22 163
5.6.6.1 Εισαγωγή 163
5.6.6.2 Εκτέλεση 20 164
5.6.6.3 Εκτέλεση 21 165
5.6.6.4 Εκτέλεση 22 166
5.6.7 Εξέταση της επίδρασης της τιμής της τοπικής ώρας στα αποτελέσματα του ORION-II: Εκτέλεση 23 166
5.6.8 Συμπεράσματα που προέκυψαν από τις παραμετρικές εκτελέσεις του ORION-II 167
5.7 Παρουσίαση των εκτελέσεων που πραγματοποιήθηκαν με τον κώδικα GENII 168
5.7.1 Εισαγωγή 168
5.7.2 Υπολογισμός των συντεταγμένων των ΑΗΣ1,2-3 και ΑΗΣ4 στο σύστημα συντεταγμένων του GENII 169
5.7.3 Η τροποποίηση της μορφής του 1ου μετεωρολογικού σεναρίου ώστε να είναι δυνατή ή χρήση του στον GENII 169
5.7.4 Εκλογή παραμέτρων για την εκτέλεση του GENII 170
5.7.5 Δεδομένα εκπομπών ραδιοϊσοτόπων για την εκτέλεση του GENII . . 171
5.7.5.1 Συγκέντρωση του ^{238}U στην ιπτάμενη τέφρα, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 172
5.7.5.2 Συγκέντρωση του ^{234}Th στην ιπτάμενη τέφρα, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 172
5.7.5.3 Συγκέντρωση του ^{226}Ra στην ιπτάμενη τέφρα, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 172
5.7.5.4 Συγκέντρωση των ^{210}Pb, ^{210}Po και ^{210}Bi στην ιπτάμενη τέφρα, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 172
5.7.5.5 Συγκέντρωση του ^{232}Th στην ιπτάμενη τέφρα, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 173
5.7.5.6 Συγκέντρωση των ισοτόπων ^{228}Th, ^{228}Ra, ^{224}Ra και ^{212}Pb στην ιπτάμενη τέφρα, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 173

5.7.5.7 Συγκέντρωση του ^{40}K στην ιπτάμενη τέφρα, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 173
5.7.5.8 Υπολογισμός του ρυθμού εκπομπής των ισοτόπων ^{238}U, ^{234}Th, ^{226}Ra, ^{210}Pb, ^{210}Po, ^{210}Bi, ^{232}Th, ^{228}Th, ^{228}Ra, ^{224}Ra, ^{212}Pb και ^{40}K από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 174
5.7.5.9 Υπολογισμός του ρυθμού εκπομπής ^{222}Rn από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 174
5.7.6 Εκτέλεση του GENII με βάση το 1ο μετεωρολογικό σενάριο 175
5.7.6.1 Εισαγωγή δεδομένων για την πραγματοποίηση των δοσιμετρικών υπολογισμών 175
5.7.6.2 Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων 177
5.7.6.3 Υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις 178
5.7.6.4 Σύγκριση των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων του GENII με αυτές του ORION-II 179
5.7.6.5 Υπολογιζόμενοι ρυθμοί απόθεσης 181
5.7.6.6 Υπολογιζόμενες δόσεις 182
5.7.7 Μετρήσεις ρυθμού γ-δόσης και συγκέντρωσης ^{222}Rn στην περιοχή της Μεγαλόπολης και στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου και υπολογιζόμενοι ρυθμοί δόσης από τον GENII στα σημεία δειγματοληψίας 184
5.7.7.1 Μετρήσεις στην περιοχή της Μεγαλόπολης 185
5.7.7.2 Μέτρηση ρυθμού γ-δόσης με τα όργανα Polimaster στο Κτίριο Κ της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου 186
5.7.7.3 Ενεργές ατομικές δόσεις στα σημεία δειγματοληψίας όπως υπολογίστηκαν με τον κώδικα GENII 187
5.7.8 Συμπεράσματα που προέκυψαν από την χρήση του κώδικα GENII 187
5.7.9 Συγκριτική αξιολόγηση των κωδίκων ORION-II και GENII 189
Πίνακες Κεφαλαίου 191
Σχήματα Κεφαλαίου 211

6 Ραδιοπεριβαλλοντική εφαρμογή στην περιοχή της Μεγαλόπολης 251
6.1 Εισαγωγή 251
6.2 Σχεδιασμός και πραγματοποίηση δειγματοληψιών στην περιοχή της Μεγαλόπολης 252
6.3 Προεπεξεργασία των δειγμάτων βρόχινου νερού για ανάλυση με α-, γ-φασματοσκοπία και ΚΡΑ 253
6.4 Αναλύσεις των δειγμάτων βρόχινου νερού με την μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας 256
6.4.1 Γενικές αρχές της μεθόδου 256
6.4.1.1 Οι ανιχνευτές 257

6.4.2 Η διάταξη γ-φασματοσκοπίας του ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ . 258
6.4.3 Υπολογισμός κατώτερου ορίου ανίχνευσης των ισοτόπων ^{238}U, ^{210}Pb και ^{40}K στον ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ 258
6.4.4 Ανάλυση δείγματος βρόχινου νερού χωρίς προεπεξεργασία με γ-φασματοσκοπική διάταξη 259
6.4.5 Αναλύσεις των δειγμάτων βρόχινου νερού μετά την προεπεξεργασία με γ-φασματοσκοπική διάταξη 261
6.5 Αναλύσεις των δειγμάτων με α-φασματοσκοπία 263
6.5.1 Γενικές αρχές α-φασματοσκοπίας 263
6.5.2 Η διάταξη α-φασματοσκοπίας 264
6.5.3 Η προετοιμασία των δειγμάτων 265
6.5.4 Αναλύσεις των δειγμάτων βρόχινου νερού με α-φασματοσκοπική διατάξη 266
6.5.4.1 Δείγμα βροχής στην ταράτσα του κτιρίου ¨Κ¨ στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου 267
6.5.4.2 Δείγμα βροχής στην πόλη της Μεγαλόπολης 268
6.5.4.3 Δείγμα βροχής κοντά στους ΑΗΣ1-2,3 269
6.5.4.4 Δείγμα βροχής κοντά στους ΑΗΣ1-2,3 270
6.6 Αναλύσεις των δειγμάτων με την μέθοδο ανάλυσης κινητικής φωσφορισμού (KPA) 271
6.6.1 Γενικές αρχές 271
6.6.2 Η μετρητική διάταξη που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ 272
6.6.3 Αναλύσεις των δειγμάτων R0043, R0046, R0048, R0049 273
6.7 Συμπεράσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις του βρόχινου ύδατος . 277
6.8 Εφαρμογή του κώδικα ORION-II στην περιοχή της Μεγαλόπολης κατά την διάρκεια δειγματοληψίας 278
6.8.1 Το μετεωρολογικό σενάριο 279
6.8.2 Υπολογισμός ρυθμού εκπομπής ραδιοϊσοτόπων από τις καμινάδες των ΑΗΣ 279
6.8.3 Πραγματοποίηση της εκτέλεσης και εξαγωγή αποτελεσμάτων . . . 280
Πίνακες Κεφαλαίου 283
Σχήματα Κεφαλαίου 295

7 Εκροή ραδονίου και γήινου αερίου στην ατμόσφαιρα στην περιοχή της Μεγαλόπολης 305
7.1 Εισαγωγή 305
7.2 Το ραδόνιο 306
7.3 Το ραδόνιο στο υπέδαφος 307

7.3.1 Μεθοδολογίες μέτρησης 307
7.3.2 Μετρήσεις ραδονίου στο γήινο αέριο στην περιοχή της Μεγαλόπολης από το ΕΠΤ-ΕΜΠ 308
7.4 Εκροή ραδονίου από το έδαφος 309
7.4.1 Γενικά 309
7.4.2 Μέθοδοι μέτρησης του ρυθμού εκροής 309
7.4.3 Μετρήσεις εκροής ραδονίου στην περιοχή της Μεγαλόπολης από το ΕΠΤ-ΕΜΠ 311
7.5 Πειράματα, που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της ΔΔ 311
7.5.1 Γενικά 311
7.5.2 Βαθμονόμηση ανιχνευτή AlphaGuard 312
7.5.2.1 Διάταξη βαθμονόμησης 312
7.5.2.2 Πείραμα βαθμονόμησης 312
7.5.3 Δειγματοληψία ιπτάμενης τέφρας από τον ΑΗΣ Α΄ Μεγαλόπολης και μετρήσεις φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων στην εν λόγω τέφρα με την μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας 314
7.5.4 Μέτρηση ρυθμού εκροής ραδονίου από την ιπτάμενη τέφρα του σταθμού ΑΗΣ Α΄ Μεγαλόπολης 315
7.6 Συμπεράσματα 318
Πίνακες Κεφαλαίου 321
Σχήματα Κεφαλαίου 325

8 Αποτελέσματα - Συμπεράσματα 329
8.1 Συνοπτική παρουσίαση της ΔΔ 329
8.2 Σημεία πρωτοτυπίας της ΔΔ 333
8.3 Μελλοντικές προοπτικές έρευνας 334
8.3.1 Κώδικες υπολογισμού διασποράς 334
8.3.2 Πειραματική διερεύνηση 335

Α΄ Αρχείο εντολών σύνδεσης των μεταγλωττισμένων υπορουτινών του ORION-II 337
Α΄.1 Το αρχείο makefile 337

Β΄ Πηγαίοι κώδικες προγραμμάτων, που γράφτηκαν στα πλαίσια της ΔΔ 339
Β΄.1 Ο μετεωρολογικός προεπεξεργαστής *metprep* 339
Β΄.1.1 Κύρια ρουτίνα 339
Β΄.1.2 Υπορουτίνες daymix, rk4, derivs και nocmix 353
Β΄.1.3 Υπορουτίνες plrise, pcalc 356
Β΄.1.4 Υπορουτίνα calcdate 360

Β΄.2 Ο προεπεξεργαστής γεωγραφικών δεδομένων *GeoCalc* 362
Β΄.2.1 Κύρια ρουτίνα 362
Β΄.2.2 Υπορουτίνα flcalc 365
Β΄.3 Ο προεπεξεργαστής γεωγραφικών δεδομένων *geoCalc16D* 366
Β΄.3.1 Κύρια ρουτίνα 366
Β΄.3.2 Υπορουτίνα flcalc 369
Β΄.4 Το πρόγραμμα *otran* 370
Β΄.5 Το πρόγραμμα *ogt* 372
Β΄.6 Το πρόγραμμα *ogtdeposit* 375
Β΄.7 Το πρόγραμμα *gtconc* 377
Β΄.8 Το πρόγραμμα *gtdose* 379
Β΄.9 Το πρόγραμμα *ggtconc* 380
Β΄.10 Το πρόγραμμα *ggtdepos* 383
Β΄.11 Το πρόγραμμα *ggtdose* 384
Β΄.12 Το πρόγραμμα μετατροπής αρχείου υψομέτρων *transheight* 387

Γ΄ Αρχεία δεδομένων και αποτελεσμάτων των προγραμμάτων μετατροπής πολικών συντεταγμένων σε καρτεσιανές 389
Γ΄.1 Το αρχείο συγκεντρώσεων polarconc.txt του ORION-II 389
Γ΄.2 Το αρχείο συγκεντρώσεων polarconc.txt του GENII 390
Γ΄.3 Το αρχείο συγκεντρώσεων polardepos.txt του GENII 390
Γ΄.4 Το αρχείο δόσεων polardose.txt του GENII 391
Γ΄.5 Το αρχείο υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων cartesconc480.txt του GENII 391
Γ΄.6 Το αρχείο υπολογιζόμενων ρυθμών απόθεσης cartesdepos480.txt του GENII 402
Γ΄.7 Το αρχείο υπολογιζόμενων δόσεων cartesdose480.txt του GENII 412

Δ΄ Το ύψος ανάμιξης σε ουδέτερες και ευσταθείς συνθήκες 425
Δ΄.1 Ουδέτερες συνθήκες 425
Δ΄.2 Ευσταθείς συνθήκες 426
Σχήματα Κεφαλαίου 427

Ε΄ Πιστοποιητικό πηγής ραδονίου 429
Σχήματα Κεφαλαίου 431

ΣΤ΄Υψόμετρα σημείων υπολογισμού του ORION-II 433

Ζ΄ Το αρχείο μετεωρολογικών δεδομένων του GENII 449

Η΄ Αρχεία εισαγωγής δεδομένων του προγράμματος metprep 453

Η'.1 Το αρχείο datmet.txt 453
Η'.2 Το αρχείο datconstr.txt 453
Πίνακες Κεφαλαίου 455

Βιβλιογραφία **457**

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Στην σημερινή εποχή η παραγωγή ενέργειας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για την εξέλιξη και την πρόοδο των κοινωνιών. Σημαντική θέση ανάμεσα στις πρώτες ύλες, που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας, κατέχουν οι γαιάνθρακες. Στον ελληνικό χώρο μάλιστα οι γαιάνθρακες παίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο καθώς το 2007 το 55% της παραγόμενης ενέργειας προερχόταν από την καύση του λιγνίτη, ο οποίος είναι ένα είδος γαιάνθρακα [84].

Οι γαιάνθρακες ως ορυκτά περιέχουν φυσικά ραδιενεργά ισότοπα, όπως αυτά των ραδιενεργών σειρών του ^{238}U, του ^{232}Th καθώς και ^{40}K, το οποίο είναι φυσικό ραδιενεργό ισότοπο του καλίου. Κατά την καύση των γαιανθράκων στους Ατμοηλεκτρικούς Σταθμούς (ΑΗΣ) η οργανική ύλη ελαχιστοποιείται με αποτέλεσμα η παραγόμενη τέφρα να εμπλουτίζεται με τα παραπάνω ισότοπα. Το μεγαλύτερο μέρος των σωματιδίων της τέφρας συγκρατείται στον σταθμό στον θάλαμο καύσης, σε διάφορα σημεία στην διαδρομή των καυσαερίων προς την έξοδο (π.χ. οικονομητήρας) και βέβαια στα ηλεκτροστατικά φίλτρα. Ένα μικρό ποσοστό των σωματιδίων της τέφρας διαφεύγει από τις καμινάδες στην ατμόσφαιρα και διασπείρεται στην περιοχή γύρω από τον σταθμό.

Τα σωματίδια της τέφρας, που βρίσκονται πλέον στην ατμόσφαιρα, είναι δυνατόν στην συνέχεια είτε να εισπνευστούν από τους ανθρώπους, που ζουν στην περιοχή, είτε να εναποτεθούν στο έδαφος ή στα φυτά. Μέρος τους απορροφάται από τα φυτά μέσω των ριζών ή των φυλλωμάτων τους. Τα φυτά στην συνέχεια μπορεί να καταναλωθούν από τα οικόσιτα ζώα ή από τον ίδιο τον άνθρωπο. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι ένας κάτοικος της εν λόγω περιοχής μπορεί να λαμβάνει ακτινοβολία εσωτερικά μέσω της εισπνοής και της κατάποσης καθώς και εξωτερικά λόγω ακτινοβολίας από το έδαφος και την ατμόσφαιρα.

Για τον έλεγχο τυχόν επιβάρυνσης του περιβάλλοντος από την λειτουργία ενός ΑΗΣ μπορεί να χρησιμοποιηθούν υπολογιστικά μοντέλα για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης και του ρυθμού απόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων στα διάφορα σημεία της υπό μελέτης περιοχής, ενώ επίσης μπορούν να πραγματοποιήσουν και δοσιμετρικούς υπο-

λογισμούς. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα να πραγματοποιηθούν μετρήσεις είτε στον αέρα, είτε στο νερό της βροχής σε επιλεγμένα σημεία της περιοχής ώστε να εκτιμηθεί in situ η τυχόν ραδιολογική επιβάρυνση.

Το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (ΕΠΤ-ΕΜΠ) έχει πραγματοποιήσει στο παρελθόν συστηματική έρευνα σε θέματα ραδιολογικής επιβάρυνσης του περιβάλλοντος από ανθρωπογενείς δραστηριότητες , ιδιαίτερα στις περιοχές των ελληνικών ΑΗΣ. Ομως, οι έρευνες αυτές έχουν εστιαστεί κυρίως σε πειραματικές διερεύνησεις. Στόχος της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής (ΔΔ) ήταν η μελέτη, εφαρμογή και βελτίωση μοντέλων ατμοσφαιρικής διασποράς ραδιενεργών ρύπων στους ΑΗΣ της περιοχής της Μεγαλόπολης καθώς και η πειραματική διερεύνηση της ραδιολογικής επιβάρυνσης της περιοχής. Η διερεύνηση αυτή συνοδεύτηκε από εργαστηριακές ραδιοχημικές αναλύσεις σε βρόχινο νερό της περιοχής και σε τέφρα, που είχε παραχθεί στους εν λόγω ΑΗΣ.

Η προσπάθεια εστιάστηκε στην εύρεση κατάλληλων προγραμμάτων ατμοσφαιρικής διασποράς, στην εγκατάστασή τους στα υπολογιστικά συστήματα του ΕΠΤ-ΕΜΠ καθώς και στην συγγραφή των απαραίτητων προγραμμάτων για την επεξεργασία των μετεωρολογικών και γεωγραφικών δεδομένων. Επίσης αναπτύχθηκαν προγράμματα για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, που παράγονται από τους κώδικες. Με αυτό τον τρόπο η λειτουργία των κωδίκων ατμοσφαιρικής διασποράς είναι σχετικά αυτοματοποιημένη και χρειάζονται μόνο λίγοι χειρισμοί από τον χρήστη από την εισαγωγή των αρχικών δεδομένων μέχρις ότου καταλήξει στα τελικά αποτελέσματα και γραφήματα.

Στο πειραματικό μέρος αυτής της ΔΔ αναπτύχθηκε διάταξη για την δειγματοληψία βρόχινου νερού από την περιοχή της Μεγαλόπολης και ακολούθησε δειγματοληψία στην εν λόγω περιοχή. Αναπτύχθηκε επίσης τεχνική για την επεξεργασία των δειγμάτων που συλλέχθηκαν, ώστε να είναι δυνατή η ανάλυσή τους με α-, γ- φασματοσκοπικές μεθόδους καθώς και με Ανάλυση Κινητικής Φωσφορισμού (ΚΡΑ) και στην συνέχεια έγινε εφαρμογή τους στα δείγματα που συλλέχθηκαν. Προκειμένου να μελετηθεί το φαινόμενο της εκροής από τα σωματίδια της τέφρας, που έχουν εναποτεθεί στο έδαφος της περιοχής, πραγματοποιήθηκαν σχετικά πειράματα προσομοίωσης στον θάλαμο ραδονίου, που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Η παρούσα ΔΔ αποτελείται από οκτώ κεφάλαια, των οποίων το περιεχόμενο παρουσιάζεται συνοπτικά ακολούθως, ενώ υπάρχουν και επτά παραρτήματα.

Στο κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται γενική βιβλιογραφική ανασκόπηση των σημαντικότερων φυσικών φαινομένων, που πραγματεύεται αυτή η ΔΔ. Αρχικά περιγράφονται τα φαινόμενα, τα οποία σχετίζονται με την συμπεριφορά των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων της σειράς του ουρανίου και του θορίου, που περιέχονται στον λιγνίτη, κατά την καύση του τελευταίου στους ΑΗΣ. Ακολουθούν οι βασικές αρχές, που διέπουν την διασπορά των ρύπων στην ατμόσφαιρα καθώς και την εναπόθεσή τους στο έδαφος. Τέ-

λος γίνεται συνοπτική παρουσίαση μελετών ατμοσφαιρικής διασποράς συμβατικών και ραδιενεργών ρύπων, που έχουν πραγματοποιηθεί στην Ελλάδα και στο εξωτερικό.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι κώδικες ατμοσφαιρικής διασποράς ORION-II και GENII, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της ΔΔ. Η παρουσίαση περιλαμβάνει τόσο τις κυριότερες εξισώσεις, που χρησιμοποιεί κάθε κώδικας όσο και τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του καθενός. Επίσης σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι επεμβάσεις και οι τροποποιήσεις, που χρειάστηκε να γίνουν στους κώδικες ώστε να επιτευχθεί η λειτουργία τους στα υπολογιστικά συστήματα του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα προγράμματα, που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια αυτής της ΔΔ. Η συγγραφή τους έγινε για να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία προετοιμασίας των δεδομένων εισαγωγής, όσο και για να γίνει δυνατή η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των κωδίκων διασποράς των ρύπων. Όλα γράφτηκαν σε γλώσσα Fortran 77. Τα σπουδαιότερα από πλευράς χρησιμότητας είναι τα ακόλουθα:

- Ένας μετεωρολογικός προεπεξεργαστής, δηλαδή ένα πρόγραμμα, το οποίο επεξεργάζεται τα πρωτογενή μετεωρολογικά δεδομένα, που λαμβάνουμε από έναν μετεωρολογικό σταθμό, και τα παρέχει σε κατάλληλη μορφή, ώστε να χρησιμοποιηθούν από τους κώδικες διασποράς.

- Ένας γεωγραφικός προεπεξεργαστής, ο οποίος βοηθά στην μετατροπή των συντεταγμένων των σημείων υπολογισμού στην κατάλληλη μορφή ώστε να εισαχθούν στους κώδικες.

Για τα υπόλοιπα, τα οποία είναι βοηθητικά προγράμματα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων γίνεται εκτενής αναφορά στο εν λόγω κεφάλαιο.

Στο κεφάλαιο 5 αρχικά γίνεται επιλογή-προσδιορισμός διάφορων παραμέτρων, που είναι απαραίτητες για την εκτέλεση των κωδίκων, που χρησιμοποιούνται σε αυτή την ΔΔ. Ακολούθως παρουσιάζεται η μεθοδολογία, που αναπτύχθηκε για την κατασκευή μετεωρολογικών σεναρίων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην συνέχεια ως δεδομένα εισόδου στους εν λόγω κώδικες. Τέλος πραγματοποιείται εκτέλεση των κωδίκων, επεξεργασία των αποτελεσμάτων, που προέκυψαν καθώς και σχολιασμός τους.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η μεθοδολογία και η τεχνικές, που αναπτύχθηκαν προκειμένου να γίνει δυνατή η δειγματοληψία και η ανάλυση βρόχινων δειγμάτων από την περιοχή της Μεγαλόπολης, ώστε να ερευνηθεί και πειραματικά η επίδραση των ΑΗΣ στην ατμόσφαιρα της περιοχής. Επίσης γίνεται σύντομη παρουσίαση των αρχών λειτουργίας της α-, της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης καθώς και της ΚΡΑ. Ακόμη παρουσιάζονται όλες οι δειγματοληψίες που πραγματοποιήθηκαν καθώς και τα αποτελέσματα, που προέκυψαν ύστερα από την ανάλυση των δειγμάτων με τις τρεις

παραπάνω μεθόδους. Τέλος πραγματοποιείται σχολιασμός όλων των αποτελεσμάτων, που προέκυψαν.

Στο κεφάλαιο 7 εξετάστηκε η πιθανή επιβάρυνση του περιβάλλοντος από την εκροή ραδονίου από τη διασπειρόμενη τέφρα στην περιοχή της Μεγαλόπολης, πραγματοποιώντας μετρήσεις εκροής ραδονίου σε κατάλληλο θάλαμο. Έτσι αρχικά έγινε αναφορά στους βασικούς νόμους, που διέπουν τα παραπάνω φαινόμενα και στη συνέχεια περιγράφονται τα πειράματα, που πραγματοποιήθηκαν για την μέτρηση του ρυθμού εκροής ραδονίου από ιπτάμενες τέφρες. Για τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε δείγμα μεγάλου όγκου από ΑΗΣ της Μεγαλόπολης, για την ανάλυση του οποίου αναπτύχθηκε νέα μεθοδολογία. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων εξετάστηκαν σε σχέση με τις συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο, όπως αυτές προκύπτουν από ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε σε μετρήσεις ραδονίου στο πεδίο στην περιοχή της Μεγαλόπολης.

Τέλος στο κεφάλαιο 8 συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα, τα οποία προέκυψαν, ενώ παράλληλα προτείνονται κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας, οι οποίες επεκτείνουν και αξιοποιούν τις μελέτες, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της αυτής της ΔΔ.

Στα επτά παραρτήματα αυτής της ΔΔ παρατίθενται κείμενα και πληροφορίες, οι οποίες δεν εντάσσονται στο κύριο σώμα του κειμένου. Τέτοιες είναι οι πηγαίοι κώδικες των προγραμμάτων που αναπτύχθηκαν και παραθέτονται στα παραρτήματα Α΄, Β΄. Στα παραρτήματα Γ΄, Ζ΄ και Η΄ παρουσιάζεται η μορφή αρχείων δεδομένων, που χρησιμοποιούνται στα προγράμματα αυτής της ΔΔ. Στο παράρτημα Δ΄ περιέχονται επιπλέον πληροφορίες σχετικά με το ύψος ανάμιξης και στο παράρτημα Ε΄ παρουσιάζεται το πιστοποιητικό βαθμονόμησης της πηγής ραδονίου, που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα. Τέλος στο παράρτημα ΣΤ΄ περιέχονται τα υψόμετρα του εδάφους στα σημεία υπολογισμού του κώδικα ORION-II.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται γενική βιβλιογραφική ανασκόπηση των σημαντικότερων φυσικών φαινομένων, που πραγματεύεται αυτή η ΔΔ. Αρχικά περιγράφονται τα φαινόμενα, τα οποία σχετίζονται με την συμπεριφορά των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων της σειράς του ουρανίου και του θορίου, που περιέχονται στους γαιάνθρακες, κατά την καύση τους στους ΑΗΣ. Ακολουθούν οι βασικές αρχές που διέπουν την διασπορά των ρύπων στην ατμόσφαιρα καθώς και την εναπόθεσή τους στο έδαφος. Τέλος γίνεται συνοπτική παρουσίαση μελετών ατμοσφαιρικής διασποράς συμβατικών και ραδιενεργών ρύπων, που έχουν πραγματοποιηθεί στην Ελλάδα και στο εξωτερικό.

2.1 Ραδιενέργεια στον λιγνίτη και στην παραγόμενη τέφρα στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς

2.1.1 Εισαγωγή

Ο λιγνίτης συγκαταλέγεται στα στερεά ορυκτά καύσιμα και προέρχεται από μετασχηματισμό της φυτικής ύλης (δάση), όταν αυτή καταπλακώθηκε από πετρώματα πριν από εκατομμύρια χρόνια. Χρησιμοποιείται κυρίως ως καύσιμη ύλη στην παραγωγή ενέργειας στους ΑΗΣ και η εξόρυξή του γίνεται είτε με ανοιχτά ορύγματα, είτε κατασκευάζοντας ορυχεία.

Τα φαινόμενα και οι μηχανισμοί, που θα περιγραφούν παρακάτω, ισχύουν σε γενικές γραμμές και για τα υπόλοιπα στερεά ορυκτά καύσιμα όπως ο λιθάνθρακας αλλά η παρούσα ΔΔ θα εστιάσει στον λιγνίτη λόγω ελληνικού ενδιαφέροντος καθώς και λόγω των υψηλότερων συγκεντρώσεων που παρουσιάζει το συγκεκριμένο καύσιμο στα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα των αλυσίδων του ^{238}U και του ^{232}Th καθώς και στο ^{40}K.

2.1.2 Ο λιγνίτης

Ο λιγνίτης ως ορυκτό υλικό περιέχει διάφορα ιχνοστοιχεία. Ανάμεσα σε αυτά βρίσκονται και τα στοιχεία της φυσικής ραδιενεργού σειράς του ^{238}U, του ^{232}Th καθώς και το φυσικό ραδιενεργό ισότοπο του καλίου ^{40}K [51, σελ.175], [32, σελ. 24]. Στα σχήματα 2.1 και 2.2 φαίνονται όλα τα στοιχεία των δύο ραδιενεργών σειρών, οι χρόνοι ημιζωής τους καθώς και το είδος της ακτινοβολίας, που εκπέμπουν [133, σελ.6, 44]. Από όλα τα παραπάνω στοιχεία αυτά που κυρίως θα μας απασχολήσουν είναι το ^{238}U, το ^{226}Ra, ο ^{210}Pb, το ^{232}Th και το ^{40}K.

Για την Μεγαλόπολη, που παρουσιάζει το κύριο ενδιαφέρον, το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ) διεξάγει έρευνες εδώ και μια 25ετία και έχει δημοσιεύει αρκετά σχετικά αποτελέσματα. Έτσι στην πιο πρόσφατη εργασία [97] παρέχει τις ακόλουθες ενδεικτικές τιμές για τις συγκεντρώσεις των εν λόγω στοιχείων στον λιγνίτη:

- ^{238}U: 306 $\mathrm{Bqkg^{-1}}$
- ^{226}Ra: 346 $\mathrm{Bqkg^{-1}}$
- ^{210}Pb: 361 $\mathrm{Bqkg^{-1}}$
- ^{232}Th: 19 $\mathrm{Bqkg^{-1}}$
- ^{40}K: 173 $\mathrm{Bqkg^{-1}}$

Από τις παραπάνω τιμές μόνο αυτή για το ^{232}Th βρίσκεται στην περιοχή των τιμών τις οποίες παρέχει η UNSCEAR. Οι τιμές των λοιπών ραδιοϊσοτόπων είναι αρκετά υψηλότερες, κάτι που υποδεικνύει την ανάγκη ενδελεχούς έρευνας στην περιοχή της Μεγαλόπολης.

2.1.3 Η τέφρα

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω καθώς καίγεται ο λιγνίτης το οργανικό περιεχόμενο απομακρύνεται. Έτσι τα στερεά προϊόντα της καύσης γνωστά και ως τέφρα θα έχουν μικρότερη μάζα σε σχέση με την αρχική, που είχε λιγνίτης πριν την καύση. Συνεπώς οι συγκεντρώσεις των εν λόγω ραδιενεργών ισοτόπων θα είναι αρκετά μεγαλύτερες λόγω της μείωσης της μάζας. Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιαστεί αναλυτικά ο τρόπος καύσης του λιγνίτη στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς καθώς και ο μηχανισμός εμπλουτισμού της τέφρας με τα φυσικά ραδιενεργά στοιχεία της σειράς του ουρανίου και του θορίου.

2.1.3.1 Παραγωγή της τέφρας και τα διάφορα είδη της

Κατά την καύση του λιγνίτη στο θάλαμο καύσης *(boiler)* του σταθμού αναπτύσσονται θερμοκρασίες τουλάχιστον 1000 $^{\circ}$C, οπότε το μεγαλύτερο ποσοστό της οργανικής ύλης μετατρέπεται σε CO_2 και CO. Τα ανόργανα μέρη του λιγνίτη αποτελούν πλέον την τέφρα, η οποία περιέχει και τα οργανικά υπολείμματα της ατελούς καύσης μιας μικρής ποσότητας του λιγνίτη . Έτσι η τέφρα αποτελείται από ανόργανα καθώς και οργανικά συστατικά. Οι διάμετροι των σωματιδίων της τέφρας κυμαίνονται από μερικά mm έως δέκατα του μm [156]. Για περισσότερα σχετικά με το μέγεθος των σωματιδίων της τέφρας ο αναγνώστης μπορεί να δει την παράγραφο 5.2.3.

Τα παραγόμενα σωματίδια της τέφρας είναι κυρίως σφαιρικά (βλ. παράγραφο 5.2.2) και στη σύσταση τους περιλαμβάνουν διάφορα ανόργανα στοιχεία και ενώσεις [104], [141], [160]. Ο εμπλουτισμός της τέφρας σε ανόργανα συστατικά λόγω της απομάκρυνσης του οργανικού περιεχομένου του λιγνίτη συμβαίνει κατά μία τάξη μεγέθους περίπου [225, σελ.48]. Το φαινόμενο του εμπλουτισμού είναι αρκετά σύνθετο και θα περιγραφεί αναλυτικά στην παράγραφο 2.1.3.3.

Κατά την καύση του λιγνίτη ένα μέρος της παραγόμενης τέφρας (περίπου 15-20%) παραμένει ως υπόλειμμα στον πυθμένα του θάλαμου καύσης και ονομάζεται 'υγρή τέφρα' *(bottom ash ή slag)*. Η υπόλοιπη ποσότητα παρασύρεται μαζί με τα καυσαέρια προς τα ηλεκτροστατικά φίλτρα και όνομάζεται 'ιπτάμενη τέφρα' *(fly ash)*. Στα ηλεκτροστατικά φίλτρα κατακρατείται ένα πολύ μεγάλο ποσοστό της ιπτάμενης τέφρας ενώ μια μικρή ποσότητα διαφεύγει στην ατμόσφαιρα μαζί με τα καυσαέρια (βλ. σχήμα 2.3). Η ποσότητα αυτή εξαρτάται από την ποιότητα των ηλεκτροστατικών φίλτρων καθώς και από την διάμετρο των σωματιδίων. Τα σύγχρονα φίλτρα επιτυγχάνουν συγκράτηση μέχρι και 99.9% ενώ τα φίλτρα παλαιότερης τεχνολογίας δεν είναι τόσο αποδοτικά και ο βαθμός απόδοσης τους πολλές φορές δεν ξεπερνά το 97% [179]. Όσον αφορά τώρα την διάμετρο των σωματιδίων, όσο μικραίνει τόσο δυσκολότερη είναι η συγκράτησή τους στα ηλεκτροσταικά φίλτρα. Για σωματίδια με διαμέτρους 0.1-2 μm η απόδοση των φίλτρων δεν ξεπερνά συνήθως το 97% [113].

2.1.3.2 Σχηματισμός των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας

Ο λιγνίτης εισάγεται στο θάλαμο καύσης συνήθως κονιοποιημένος [229] και τα σωματίδια του έχουν μέση κατά μάζα διάμετρο 35-70μm [177, σελ.56]. Η ανόργανη ύλη βρίσκεται αρχικά διασκορπισμένη μέσα στα σωματίδια του λιγνίτη σε μεγέθη μέγεθος 1-15 μm και κατά την καύση αλλάζει φάση και περνά σε υγρή μορφή. Καθώς τα σωματίδια του λιγνίτη καίγονται και μειώνεται ο όγκος τους η υγρή ανόργανη ύλη αρχίζει να συσσωματώνεται σε μεγαλύτερους σχηματισμούς. Όταν πλέον οι οργανικές ενώσεις έχουν καεί τα σωματίδια της ανόργανης ύλης απελευθερώνονται από την οργανική μή-

τρα τους και σχηματίζουν τα σφαιρικά σωματίδια της ιπτάμενης τέφρας, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4. Πολλές φορές συνενώνονται μεταξύ τους και σχηματίζουν ακόμη μεγαλύτερα σωματίδια ενώ είναι δυνατόν να περιέχουν κενά στο εσωτερικό τους λόγω εγκλεισμού αερίων, τα οποία απελευθερώθηκαν κατά την καύση [225], [32, σελ. 37].

Αυτή η σχετικά απλουστευμένη θεωρεία μπορεί να περιγράφει ικανοποιητικά τον σχηματισμό των σχετικά μεγαλύτερων σωματιδίων ($>2\,\mu\mathrm{m}$) αδυνατεί όμως να δώσει απαντήσεις για το πώς σχηματίζονται τα σωματίδια της τέφρας, που έχουν διαμέτρους μικρότερες από $1\,\mu\mathrm{m}$. Ένας πιθανός τρόπος σχηματισμού τους είναι από καταστροφή μεγαλύτερων κόκκων, οι οποίοι περιέχουν αέρια στο εσωτερικό τους, και κατά την απότομη θέρμανση εκρήγνυνται [177]. Περισσότερο λεπτομερής ανάπτυξη θα γίνει στην επόμενη παράγραφο.

2.1.3.3 Εμπλουτισμός των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας

Στο παρελθόν έχουν γίνει μελέτες για την συμπεριφορά των ανόργανων στοιχείων και ενώσεων στα διάφορα κλάσματα της ιπτάμενης και υγρής τέφρας [34], [35], [41], [72], [95], [97], [102], [119], [178], [207]. Οι μελέτες αυτές έδειξαν ότι τα ιχνοστοιχεία, τα οποία υπάρχουν μέσα στον λιγνίτη πριν την καύση του, κατανέμονται με διαφορετικό τρόπο στα σωματίδια της τέφρας. Αυτό συμβαίνει διότι ορισμένες ανόργανες ενώσεις εξαερώνονται κατά την καύση λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών και 'ταξιδεύουν' μαζί με τα καυσαέρια. Όταν αυτά θα αρχίσουν να ψύχονται οι ανόργανες ενώσεις θα στερεοποιηθούν στα σωματίδια της τέφρας, που βρίσκονται στα καυσαέρια [225, σελ.51]. Η κατανομή των ιχνοστοιχείων φαίνεται να εξαρτάται από την διάμετρο των κόκκων της τέφρας και από τις φυσικοχημικές ιδιότητες του κάθε στοιχείου. Έτσι υπάρχουν στοιχεία, που η συγκέντρωση τους αυξάνει όσο μειώνεται η διάμετρος των σωματιδίων της τέφρας (εμπλουτισμός) ενώ άλλα παρουσιάζουν σχετικά ομοιόμορφη κατανομή στα διάφορα κλάσματα της τέφρας. Δηλαδή η συγκέντρωσή τους παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από το μέγεθος των σωματιδίων. Τέλος υπάρχουν στοιχεία στα οποία η συγκέντρωσή τους εμφανίζεται μειωμένη στα πολύ μεγάλα σωματίδια της τέφρας

Τα ιχνοστοιχεία μπορούν να διακριθούν σε 3 βασικές ομάδες ανάλογα με την συμπεριφορά τους κατά την καύση [34], [35], [102], [225].

- *Ομάδα Ι:* Στην ομάδα αυτή συμπεριλαμβάνονται στοιχεία, τα οποία έχουν συγκεντρώσεις σταθερές και ανεξάρτητες από την διάμετρο των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας. Τα στοιχεία, που απαρτίζουν αυτή την ομάδα είναι τα: Al, Ca, Cs, Fe, Hf , K, Na, Mg, Mn, Rb, Sc, Si, Th, Ti καθώς και οι σπάνιες γαίες. Τα στοιχεία της ομάδας Ι χαρακτηρίζονται ως λιθόφιλα *(lithophilic)* και συνδέονται με αργιλοπυριτικές ενώσεις. Αυτά τα στοιχεία δεν ατμοποιούνται στην ζώνη καύσης

αλλά φτιάχνουν μαζί με τις αργυλοπυριτικές ενώσεις έναν 'πολτό', ο οποίος στην συνέχεια γίνεται τέφρα (υγρή και ιπτάμενη).

- *Ομάδα II :* Εδώ βρίσκονται τα στοιχεία, των οποίων η συγκέντρωση αυξάνει όσο μειώνεται η διάμετρος των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας, δηλαδή οι μικρότεροι κόκκοι είναι περισσότερο εμπλουτισμένοι. Σ' αυτή την ομάδα ανήκουν τα As, Cd, Ga, Mo, Pb, Se, Sb, W, Zn, τα οποία χαρακτηρίζονται ως χαλκόφιλα *(chalcophilic)* και σχηματίζουν ενώσεις του θείου. Λόγω αυτής της σύνδεσης τους με το θείο είναι ιδιαίτερα πτητικά, ατμοποιούνται κατά την καύση και εγκαταλείπουν τον θάλαμο καύσης μαζί με τα καυσαέρια

- *Ομάδα III :* Αυτή περιλαμβάνει στοιχεία, τα οποία παρουσιάζουν ενδιάμεση συμπεριφορά σε σχέση με αυτά των ομάδων I και II και έχουν αυξημένες συγκεντρώσεις στα μικρότερα σωματίδια της τέφρας, όχι όμως σε τέτοιο βαθμό όσο αυτά της ομάδας II. Τα στοιχεία αυτά είναι το Ba, Be, Co, Cr, Cu, Ni, Sr, V και το U και το καθένα ξεχωριστά συμπεριφέρεται είτε ως λιθόφιλο είτε ως χαλκόφιλο.

Ο εμπλουτισμός των σωματιδίων της τέφρας εξ αιτίας της αλλαγής φάσης ορισμένων στοιχείων συμβαίνει ως εξής: Τα ιχνοστοιχεία της ομάδας II καθώς και ορισμένα της ομάδας III κατά την διάρκεια της καύσης περνούν σε αέρια φάση λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών, που αναπτύσσονται στο boiler. Έτσι αρχίζουν να 'ταξιδεύουν' μαζί με τα καυσαέρια προς τα ηλεκτροστατικά φίλτρα και καθώς σταδιακά ψύχονται αρχίζουν να συμπυκνώνονται στα σωματίδια της ιπτάμενης τέφρας. Η υγρή τέφρα όμως, η οποία συγκεντρώνεται στον πυθμένα του θαλάμου καύσης, περιέχει μειωμένο ποσοστό από αυτά τα στοιχεία, διότι απομακρύνεται σχετικά γρήγορα και μάλιστα πριν ακόμα αυτά ξαναστερεοποιηθούν, αφού ως γνωστό στο θάλαμο καύσης επικρατούν θερμοκρασίες περίπου 1000°C [225].

Στην ιπτάμενη τέφρα τώρα η συγκέντρωση των εν λόγω ιχνοστοιχείων αυξάνει όσο μειώνεται η διάμετρος των σωματιδίων της τέφρας διότι η διαθέσιμη επιφάνεια ανά μονάδα μάζας μεγαλώνει όσο μειώνεται η διάμετρος του σωματιδίου *(surface effect)*. Η παραπάνω θεωρία έχει επιβεβαιωθεί και πειραματικά από τους Schure et al. [165]. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι τα μεγαλύτερα και βαρύτερα σωματίδια της ιπτάμενης τέφρας σταματούν νωρίτερα την διαδρομή τους μέσα στους αγωγούς των καυσαερίων και στα ηλεκτροστατικά φίλτρα από ό,τι τα μικρότερα σωματίδια [97, σελ. 240] [142, σελ.294]. Με δεδομένο ότι στα πρώτα στάδια της διαδρομής, όπου κατακάθονται τα μεγαλύτερα σωματίδια, οι θερμοκρασία των καυσαερίων είναι ακόμα υψηλή και τα ιχνοστοιχεία της ομάδας II είναι ακόμη αέρια, συμπεραίνουμε ότι κυρίως θα εμπλουτίζονται τα μικρότερα σε διάμετρο σωματίδια της ιπτάμενης τέφρας, αφού η συμπύκνωση θα λαμβάνει χώρα σε προχωρημένο στάδιο της διαδρομής των καυσαερίων, όπου τα μεγάλα σωματίδια δυσκολεύονται να φθάσουν.

Επίσης διαπιστώθηκε από τους Hansen and Fisher [72] ότι περισσότερο από το 70% της μάζας των στοιχείων της ομάδας II (εκτός του Pb), καθώς και των U,V συμπυκνώνεται στην επιφάνεια των σωματιδίων της τέφρας. Για διαμέτρους σωματιδίων από 3-50 μm το φαινόμενο περιγράφεται ικανοποιητικά από την ακόλουθη σχέση:

$$C = a + \frac{b}{D} \tag{2.1}$$

η οποία αργότερα βελτιώθηκε και διατυπώθηκε ως εξής [225, σελ. 66]:

$$C = a + \frac{b}{D^2} \tag{2.2}$$

όπου C η συγκέντρωση του ιχνοστοιχείου, D η διάμετρος του σωματιδίου και a,b σταθερές.

Οι παραπάνω σχέσεις για σωματίδια μικρότερα από 1 μm προβλέπουν υψηλές συγκεντρώσεις ιχνοστοιχείων, οι οποίες διαφέρουν από τις μετρήσεις των Gladney et al. [64], που είχαν διαπιστώσει σταθερές συγκεντρώσεις ή ακόμα και ελάχιστα γι' αυτές τις διαμέτρους.

2.1.3.4 Εμπλουτισμός των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων των σειρών του ^{238}U και του ^{232}Th στα σωματίδια της τέφρας

Σχετικά τώρα με την συμπεριφορά των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων της τέφρας, στα οποία εστιάζεται το ενδιαφέρον μας, έχουμε: Το ^{40}K και το ^{232}Th ανήκουν στην ομάδα I. Έτσι αναμένεται να έχουν σχετικά σταθερή συγκέντρωση σε όλα τα κλάσματα της τέφρας, καθώς δεν αλλάζουν φάση κατά την καύση και διασπείρονται στην αργιλοπυριτική μήτρα *(aluminosilicate matrix)* του σωματιδίου της τέφρας [35, σελ.458].

Ο ^{210}Pb, ο οποίος ανήκει στην ομάδα II, περνάει στην αέρια φάση κατά την διάρκεια της καύσης και κινείται μαζί με τα καυσαέρια προς τα ηλεκτροστατικά φίλτρα. Καθώς τα καυσαέρια ψύχονται ο ^{210}Pb αρχίζει να συμπυκνώνεται στην επιφάνεια των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας. Συμπυκνώνεται επίσης και στα τοιχώματα των αγωγών των καυσαερίων, αλλά αυτό το φαινόμενο, μολονότι εξαιρετικής σημασίας κατά την αποξήλωση και απόθεση των αγωγών, δεν θα μας απασχολήσει στην παρούσα ΔΔ. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι η συμπύκνωση του μολύβδου θα συμβαίνει κυρίως στα λεπτόκοκκα σωματίδια της τέφρας, τα οποία θα έχουν ταξιδέψει περισσότερο μέσα στους αγωγούς καυσαερίων του σταθμού. Παράλληλα τα μικρότερα σωματίδια έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες, ώστε να συμπυκνωθούν οι ατμοί του μολύβδου επάνω τους, λόγω μεγαλύτερης επιφάνειας ανά μονάδα μάζας. Τα παραπάνω έχουν επιβεβαιωθεί πειραματικά από αρκετούς ερευνητές [34], [97], [119]. Αντίθετα με τα μικρά σωματίδια της ιπτάμενης τέφρας, η υγρή τέφρα θα είναι πτωχή σε ^{210}Pb, αφού αυτή εγκαταλείπει

τον θάλαμο καύσης πολύ γρήγορα, ενώ ο μόλυβδος είναι ακόμα σε αέρια φάση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται απεμπλουτισμός.

Το ουράνιο τώρα βρίσκεται στον λιγνίτη είτε σαν ουρανινίτης (UO_2), είτε σαν κοφφινίτης $(U(SiO_4)_{1-x^-}(OH)_{4x})$ εάν υπάρχει αρκετό πυρίτιο στον λιγνίτη. Κατά την καύση, όπου έχουμε ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών και οξειδωτικό περιβάλλον, το UO_2 σχηματίζει UO_3, το οποίο είναι πολύ πτητικό, και θα εγκαταλείψει τον θάλαμο καύσης σε αέρια μορφή [34, σελ. 446]. Αντίθετα το ουράνιο, που βρίσκεται με την μορφή του κοφφινίτη, δεν θα αλλάξει φάση. Θα παραμείνει στερεό και θα ενσωματωθεί στα σωματίδια της τέφρας. Υπάρχει επίσης το ενδεχόμενο μια ποσότητα του ^{238}U και του ^{210}Pb να βρίσκεται σε αέρια φάση ακόμα και μετά το πέρασμα των καυσαερίων από τα ηλεκτροστατικά φίλτρα, ειδικά εάν τα καυσαέρια διέρχονται έχοντας υψηλή θερμοκρασία. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι τα φίλτρα τύπου hot side έχουν θερμοκρασία λειτουργίας 300-350°C [225, σελ.71]. Έτσι δεν είναι δυνατή η συγκράτησή τους με αποτέλεσμα να συμπυκνώνονται μέσα στην καμινάδα στα πολύ μικρής διαμέτρου σωματίδια της ιπτάμενης τέφρας, τα οποία διαφεύγουν από τα φίλτρα, ή ακόμα και να εκπέμπονται από την καμινάδα στο περιβάλλον σε αέρια μορφή [225, σελ.71], [186]. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι υπάρχει περίπτωση η τέφρα, η οποία διαφεύγει από τα φίλτρα, να έχει συγκεντρώσεις αρκετά υψηλότερες από ό,τι αυτή, που συλλέγεται ακόμη και στο τελευταίο στάδιο των ηλεκτροστατικών φίλτρων. Σύμφωνα μάλιστα με τους Hedvall and Erlandsson [73] η ποσότητα του ^{210}Pb, που διαφεύγει σε αέρια φάση από τα ηλεκτροστατικά φίλτρα, ξεπερνά το 50%.

Όσον αφορά στο ^{226}Ra, το οποίο βρίσκεται στον λιγνίτη και με την μορφή του $Ra(OH)_2$, η οποία είναι αρκετά πτητική [34, 225], οι απόψεις διίστανται: Οι Papastefanou and Charalabous [142] καθώς και οι Coles et al., 1978 [34] παρατήρησαν ελαφρύ εμπλουτισμό των μικρότερων σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας και το κατατάσσουν στην ομάδα II. Αντίθετα οι Kaakinen et al. [95] παρατήρησαν ασθενέστερες τάσεις εμπλουτισμού και έτσι κατατάσσουν το ^{226}Ra στην ομάδα I. Επίσης οι Karangelos et al. [97] δεν διαπίστωσαν μεταβολή της συγκέντρωσης του ραδίου σε σχέση με την κοκκομετρία των σωματιδίων της τέφρας. Τα παραπάνω προφανώς συμβαίνουν λόγω των διαφορετικών καυσίμων, που χρησιμοποιεί κάθε σταθμός, αλλά και λόγω των διαφορετικών συνθηκών καύσης, που επικρατούν σε κάθε σταθμό.

Αυτά τα διαφορετικά αποτελέσματα μπορεί να προκύπτουν εξαιτίας του διαφορετικού σημείου, που γίνεται η δειγματοληψία της ιπτάμενης τέφρας. Οι Coles et al. [34] συλλέγουν την τέφρα μέσα στην καμινάδα. Αυτό σημαίνει ότι συλλέγουν σωματίδια πολύ μικρά σε μέγεθος και μάλιστα σε περιβάλλον, όπου η θερμοκρασία έχει μειωθεί αρκετά, και συνεπώς η ποσότητα του αερίου ^{226}Ra, που θα έχει συμπυκνωθεί θα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με κάποιο σημείο νωρίτερα στην διαδρομή των καυσαερίων.

Αντίθετα με τους Coles et al. οι Kaakinen et al. [95] συλλέγουν την τέφρα αμέσως

μετά την έξοδο των φίλτρων, όπου αναμένεται η θερμοκρασία να είναι σχετικά μεγαλύτερη από ό,τι μέσα στην καμινάδα, οπότε θα έχει συμπυκνωθεί μικρότερη ποσότητα ραδίου στα σωματίδια της τέφρας. Έτσι δεν είναι παράξενο, που εντοπίζουν μικρότερες τάσεις εμπλουτισμού. Το ίδιο μάλλον ισχύει και για τους Karangelos et al. [97], των οποίων το πιο προωθημένο σημείο δειγματοληψίας είναι το τελευταίο τμήμα των ηλεκτροστατικών φίλτρων, όπου η μέση διάμετρος των σωματιδίων είναι $21\,\mu\mathrm{m}$. Όλα τα παραπάνω πάντως αποτελούν υποθέσεις εργασίας καθώς δεν γνωρίζουμε την θερμοκρασία στα σημεια δειγματοληψίας καθώς και άλλες παραμέτρους λειτουργίας των σταθμών.

Σχετικά τώρα με τα ισότοπα του ραδονίου (^{222}Rn και ^{220}Rn), τα οποία είναι αέρια, δεχόμαστε ότι όλη η ποσότητά τους, που υπάρχει στον λιγνίτη, διαφεύγει στην ατμόσφαιρα [36, σελ.7].

Από όλα τα παραπάνω αντιλαμβανόμαστε ότι η ραδιενεργός ισορροπία στην σειρά του ^{238}U θα είναι διαταραγμένη στην τέφρα και αυτό οφείλεται κυρίως στον εμπλουτισμό των λεπτότερων κλασμάτων της τέφρας σε ^{238}U και σε ^{210}Pb. Αυτό έχει δειχθεί από αρκετούς ερευνητές [34, 119] έως τώρα και μάλιστα και από το ΕΠΤ-ΕΜΠ [97]. Έτσι η διαταραχή της ισοροπίας θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε οποιοδήποτε υπολογισμό εκπομπής ραδιενεργών ισοτόπων από ατμοηλεκτρικούς σταθμούς.

2.1.3.5 Συντελεστής εμπλουτισμού *(enrichment factor)*

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω υπήρχε η ανάγκη να βρεθεί ένας τρόπος για να περιγραφούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα παραπάνω φαινόμενα. Έτσι ερευνητές προκειμένου να ποσοτικοποιήσουν τον εμπλουτισμό ενός κλάσματος της τέφρας σε κάποιο ιχνοστοιχείο όρισαν τον συντελεστή εμπλουτισμού *(enrichment factor)* [36], [95], [102] σε σχέση με κάποιο στοιχείο αναφοράς, του οποίου η συγκέντρωση παραμένει αμετάβλητη στα διάφορα κλάσματα της τέφρας, ανήκει δηλαδή στην ομάδα I. Συνήθως επιλέγεται το στοιχείο Ce ή το ισότοπο ^{40}K .:

$$EF_{i,j} = \frac{C_{i,j}/C_{n,j}}{C_{i,c}/C_{n,c}} \tag{2.3}$$

όπου:

C: Η συγκέντρωση του ιχνοστοιχείου.

i: Το ιχνοστοιχείο, για το οποίο προσδιορίζεται ο συντελεστής εμπλουτισμού.

j: Το κλάσμα της τέφρας, στο οποίο αναφέρεται.

n: Το ιχνοστοιχείο αναφοράς.

c: Ο λιγνίτης.

Ειδικότερα τώρα για τα ραδιενεργά στοιχεία, τα οποία κυρίως μας ενδιαφέρουν ο

συντελεστής εμπλουτισμού ορίζεται ως εξής [34]:

$$EF = \frac{[X]_{sample}/[^{40}K]_{sample}}{[X]_{coal}/[^{40}K]_{coal}} \tag{2.4}$$

όπου:
$[X]_{sample}$: Η συγκέντρωση του ισοτόπου Χ στο δείγμα της τέφρας.
$[X]_{coal}$: Η συγκέντρωση του ισοτόπου Χ στον λιγνίτη.
$[^{40}K]_{sample}$: Η συγκέντρωση του ^{40}Κ στο δείγμα της τέφρας.
$[^{40}K]_{coal}$:Η συγκέντρωση του ^{40}Κ στον λιγνίτη.

Δηλαδή στην περίπτωση της μελέτης ραδιενεργών ισοτόπων ο συντελεστής εμπλουτισμού είναι ο λόγος των συγκεντρώσεων του ισοτόπου και του ^{40}Κ στην τέφρα, προς τον αντίστοιχο λόγο στον λιγνίτη. Ένας δεύτερος διαφορετικός τρόπος ορισμού του συντελεστή εμπλουτισμού είναι ο ακόλουθος [36], [225]:

$$EF_{i,j} = \frac{C_{i,j}}{C_{i,c}} n_c(\%) \tag{2.5}$$

όπου n_c η περιεκτικότητα του καυσίμου σε τέφρα.

Η Μανωλοπούλου [225] προτείνει έναν ακόμη εναλλακτικό τρόπο για τον ορισμό του συντελεστή εμπλουτισμού, ώστε να λαμβάνεται υπόψη και το περιεχόμενο της τέφρας σε άκαυστες οργανικές ύλες(περίπου 45% στην υγρή και 2-6% στην ιπτάμενη τέφρα) [225, σελ.63]:

$$EF_{i,j} = \frac{C_{i,j} n_c}{C_{i,c} n_j} \tag{2.6}$$

όπου n_j περιεκτικότητα του j κλάσματος σε τέφρα.

2.1.4 Μετρήσεις ραδιενέργειας στον λιγνίτη

Στην προσπάθεια να διερευνηθεί η συμπεριφορά των ραδιενεργών ισοτόπων κατά την καύση των διάφορων ειδών γαιάνθρακα στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς καθώς και η προκύπτουσα ραδιολογική επιβάρυνση, έχουν γίνει αρκετές μετρήσεις, ώστε να διαπιστωθεί το αρχικό περιεχόμενο του καυσίμου σε ραδιενεργά ισότοπα τόσο στον διεθνή όσο και στον ελληνικό χώρο. Παρακάτω παραθέτουμε ότι έχει δημοσιευθεί έως τώρα για την Ελλάδα καθώς και ορισμένες αντιπροσωπευτικές για τον διεθνή χώρο.

Αρκετές έρευνες έχουν γίνει έως τώρα στους ελληνικούς λιγνίτες. Οι έρευνες επικεντρώθηκαν κυρίως στην περιοχή της Πτολεμαΐδας και της Μεγαλόπολης, το κοίτασμα των οποίων είναι λιγνίτης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 2.1. Όλες οι συγκεντρώσεις βρίσκονται τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους πιο πάνω από τις τιμές, που δίνει η UNSCEAR [193] και είναι παραπλήσιες με αυτές, που παρέχει ο Roeck et al.

[155].

Όσον αφορά σε μετρήσεις, που έχουν πραγματοποιηθεί διεθνώς, παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2 και τις περισσότερες φορές δεν αναφέρουν οι συγγραφείς το είδος του γαιάνθρακα που μελετήθηκε. Οι μετρήσεις προέρχονται από διάφορες περιοχές ανά τον κόσμο και ποικίλλουν σε εύρος τιμών. Οι πιο πολλές κυμαίνονται κοντά στις τιμές που έχει δώσει η UNSCEAR [193]. Μόνο οι μετρήσεις, που έκαναν οι Roeck et al. έχουν υψηλές συγκεντρώσεις για τα ραδιενεργά ισότοπα των δύο αλυσίδων.

2.1.5 Μετρήσεις ραδιενέργειας στην τέφρα

Έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν μετρήσεις τόσο στην υγρή όσο και στην ιπτάμενη τέφρα. Οι μετρήσεις στην ιπτάμενη τέφρα έχουν γίνει σε τέφρες που συλλέχθηκαν στα ηλεκτροστατικά φίλτρα. Μόνο δύο μελέτες υπάρχουν για τέφρα, που συλλέχθηκε μέσα στην καμινάδα [34, 155]. Αυτό συμβαίνει διότι το κόστος και οι τεχνικές δυσκολίες για να πραγματοποιηθεί κάτι τέτοιο είναι πολύ αυξημένα σε σύγκριση με μια συμβατική δειγματοληψία. Στην συνέχεια παρατίθενται μετρήσεις, που πραγματοποιήθηκαν στον διεθνή καθώς και στον ελληνικό χώρο. Παρατηρούμε ότι στην Ελλάδα έχουν γίνει αρκετές μελέτες, καθώς οι λιγνίτες παρουσιάζουν αυξημένες συγκεντρώσεις στα εν λόγω ισότοπα.

2.1.5.1 Μετρήσεις ραδιενέργειας στην υγρή τέφρα

Στον πίνακα 2.3 παρουσιάζονται μετρήσεις συγκεντρώσεων στην υγρή τέφρα από τον διεθνή χώρο. Αυτές οι τιμές είναι πολύ μικρότερες από αντίστοιχες σε υγρές τέφρες, που παράχθηκαν σε ελληνικούς ΑΗΣ και παρουσιάζονται στον πίνακα 2.4. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς οι ελληνικοί λιγνίτες παρουσιάζουν υψηλότερες συγκεντρώσεις αυτών των ισοτόπων.

2.1.5.2 Μετρήσεις ραδιενέργειας στην ιπτάμενη τέφρα

Εδώ παρουσιάζονται μετρήσεις, οι οποίες έγιναν σε ιπτάμενη τέφρα, που συλλέχθηκε στα ηλεκτροστατικά φίλτρα. Με όσα έχουν αναφερθεί παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι αυτές οι τιμές θα ήταν διαφορετικές εάν π.χ. η τέφρα είχε συλλεχθεί μέσα στην καμινάδα. Τέτοιες μετρήσεις έχουν κάνει μόνο οι Coles et al. [34] και οι Roeck et al. [155] οπότε ο ενδιαφερόμενος μπορεί ανατρέξει εκεί. Στον πίνακα 2.5 παρουσιάζονται μετρήσεις, που πραγματοποιήθηκαν διεθνώς, και στον πίνακα 2.6 μετρήσεις, που έγιναν σε ΑΗΣ στην Ελλάδα. Οι τιμές στις ελληνικές τέφρας είναι γενικά υψηλότερες, πράγμα λογικό αφού οι ελληνικοί λιγνίτες έχουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στα εν λόγω ραδιενεργά ισότοπα.

2.2 Ατμοσφαιρική διασπορά ρύπων

2.2.1 Εισαγωγή

Από τις μετρήσεις, που πραγματοποιήθηκαν στους ΑΗΣ Μεγαλόπολης από το ΕΠΤ-ΕΜΠ [97, 173], βλέπουμε ότι οι εκπεμπόμενες ποσότητες αυτών των ραδιενεργών ισοτόπων δεν είναι αμελητέες. Τα σωματίδια της ιπτάμενης τέφρας (τα οποία περιέχουν τα ραδιενεργά ισότοπα), αφού εξέλθουν από την καμινάδα στην ατμόσφαιρα, θα αρχίσουν να διασπείρονται στην γύρω περιοχή. Έτσι θα κατακαθίσουν είτε στο έδαφος, είτε επάνω στα φυτά και στα δένδρα. Από αυτό το σημείο θα ξεκινήσει η διαδρομή των ραδιενεργών ισοτόπων στο οικοσύστημα και ιδιαίτερα στην τροφική αλυσίδα, καθώς τα φυτά θα τα απορροφήσουν από το έδαφος καθώς και από τα φυλλώματα. Τα φυτά με την σειρά τους θα φαγωθούν από τον άνθρωπο καθώς και από τα οικόσιτα ζώα, των οποίων ο άνθρωπος τα προϊόντα (γάλα, αβγά κ.τ.λ.) καταναλώνει. Σύμφωνα με τα όλα τα παραπάνω ο άνθρωπος θα δέχεται ακτινοβολία λόγω της διαφυγής ιπτάμενης τέφρας από τους λιγνιτικούς ΑΗΣ με τους ακόλουθους τρόπους:

- Με εισπνοή.
- Με κατάποση τροφών που έχουν ρυπανθεί.
- Εξωτερικά από τα ισότοπα, που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα.
- Εξωτερικά από τα ισότοπα, που έχουν εναποτεθεί στο έδαφος.

Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι υπάρχει ανάγκη μελέτης της διασποράς των ραδιενεργών ρύπων στην ατμόσφαιρα της περιοχής της Μεγαλόπολης. Προκειμένου να γίνει αυτό θα παρατεθούν οι βασικές αρχές συμπεριφοράς της ατμόσφαιρας και ακολούθως με βάση αυτές θα παρουσιαστούν οι εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν την ανύψωση του πλουμίου μετά την έξοδο του από την καμινάδα. Τέλος θα παρουσιαστούν οι εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν την κίνηση και την διασπορά του πλουμίου στην ατμόσφαιρα, αφού αυτό έχει ήδη λάβει το τελικό του ύψος.

2.2.2 Βασικές αρχές συμπεριφοράς της ατμόσφαιρας

Ως γνωστόν η ατμόσφαιρα αποτελεί ένα πολυσύνθετο μηχανισμό, ο οποίος συμπιέζει και αποσυμπιέζει αέρια και ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον. Για την κίνηση των αέριων καθώς και των στερεών ρυπαντών μέσα στην ατμόσφαιρα οι παράγοντες που παίζουν τον αποφασιστικότερο ρόλο είναι η μηχανική και η θερμική τύρβη. Έχοντας αυτές τις έννοιες υπόψη μας θα μπορέσουμε να αναφερθούμε στην ατμοσφαιρική ευστάθεια, η οποία είναι άλλη μια βασική παράμετρος για την κίνηση των ρυπαντών στην ατμόσφαιρα. Στην συνέχεια θα γίνει λόγος για το Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα,

μέσα στο οποίο πραγματοποιείται η κίνηση των ρυπαντών και το ύψος του μεταβάλλεται κατά την διάρκεια του 24ώρου. Τέλος θα παρουσιαστούν ορισμένα τοπικά φαινόμενα, τα οποία επηρεάζουν σημαντικά την κίνηση των ρύπων.

2.2.2.1 Μηχανική και θερμική τύρβη

Η τύρβη *(turbulence)* της ατμόσφαιρας μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με το αίτιο, το οποίο την προκαλεί σε [40, κεφ.6]:

- Μηχανική τύρβη *(mechanical turbulence)*: Αυτή δημιουργείται από τις διακυμάνσεις της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου σε σχέση με τις μέσες τιμές τους. Οι διακυμάνσεις προκαλούνται, κατά ένα μέρος, από τις διατμητικές τάσεις, που αναπτύσσονται στην ατμόσφαιρα. Οι διατμητικές τάσεις με την σειρά τους οφείλονται στο γεγονός ότι η ταχύτητα του ανέμου είναι μηδέν στην επιφάνεια του εδάφους και αυξάνει όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια του. Λόγω των διατμητικών τάσεων δημιουργούνται μικροί στροβιλισμοί στη ροή του αέρα, οι οποίοι ευνοούν την ανάπτυξη ακόμη μεγαλύτερων. Όπως είναι φυσικό όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου, τόσο μεγαλύτερη και εντονότερη είναι η αναπτυσσόμενη μηχανική τύρβη στην ατμόσφαιρα.

- Θερμική τύρβη *(thermal turbulence)*: Το φαινόμενο της μηχανικής τύρβης ενισχύεται και γίνεται ακόμα πιο σύνθετο λόγω της θερμικής τύρβης. Αυτή προκαλείται ως εξής: Κατά την διάρκεια της ημέρας ο ήλιος θερμαίνει την επιφάνεια του εδάφους, το οποίο θερμαίνει στην συνέχεια το στρώμα του αέρα, που βρίσκεται επάνω του. Αυτό έχοντας πλέον θερμανθεί και έχοντας αποκτήσει μικρότερη πυκνότητα γίνεται ελαφρύτερο και αρχίζει να ανυψώνεται λόγω άνωσης. Το αντίστροφο φαινόμενο παρατηρείται κατά την διάρκεια της νύχτας όταν ο ουρανός είναι σχετικά καθαρός. Τότε το έδαφος χάνει γρήγορα θερμότητα λόγω εκπομπής με ακτινοβολία και έτσι ψύχει και τον αέρα, που βρίσκεται πάνω από αυτό. Έτσι προκαλούνται ρεύματα αέρα τα οποία βυθίζονται, λόγω αύξησης της πυκνότητας τους.

2.2.2.2 Ατμοσφαιρική ευστάθεια

Η τάση της ατμόσφαιρας να περιορίζει ή να ευνοεί την κάθετη κίνηση αερίων μαζών ονομάζεται ευστάθεια *(stability)*. Εξαρτάται τόσο από την ταχύτητα του ανέμου όσο και από τον ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας σε σχέση με το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους *(lapse rate)*[40]. Προς το παρόν θα εμπλέξουμε μόνο τον ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας στις αναφορές μας. Στα παρακάτω κεφάλαια όμως θα γίνει εκτενής αναφορά και για την ταχύτητα του ανέμου.

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες ευστάθειας. Όταν η ατμόσφαιρα χαρακτηρίζεται ως ασταθής *(unstable)*, η μηχανική τύρβη ενισχύεται από την θερμοκρασιακή δομή της ατμόσφαιρας. Όταν χαρακτηρίζεται ως ουδέτερη *(neutral)*, η θερμοκρασιακή δομή ούτε εμποδίζει ούτε ενισχύει την μηχανική τύρβη. Τέλος όταν η μηχανική τύρβη περιορίζεται από την θερμοκρασιακή δομή η ατμόσφαιρα χαρακτηρίζεται ως ευσταθής *(stable)*. Αναλυτικά:

- *Ουδέτερη ευστάθεια.* Ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας σε σχέση με το ύψος όταν έχουμε ουδέτερη ευστάθεια ταυτίζεται με αυτόν της ξηρής αδιαβατικής μεταβολής, όταν δηλαδή μια μάζα αέρα συμπιεστεί ή διασταλεί χωρίς να ανταλλάξει θερμότητα με το περιβάλλον. Ο αδιαβατικός ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας Γ ισούται με -1°C/100m [42]. Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν έχουμε μετακινήσεις αερίων μαζών μέσα στην ατμόσφαιρα θεωρούμε ότι αυτές οι μετακινήσεις γίνονται αδιαβατικά. Στο σχήμα 2.5 παριστάνεται με συνεχή γραμμή η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας σε σχέση με το ύψος (που ταυτίζεται με την ξηρή αδιαβατική μεταβολή) και με διακεκομμένη παριστάνεται η ξηρή αδιαβατική μεταβολή, σύμφωνα με την οποία μεταβάλλεται η θερμοκρασία μιας μάζας αέρα, που χάνει ή κερδίζει ύψος. Μετακινώντας μια μάζα αέρα, η θερμοκρασία της στο νέο ύψος θα ταυτίζεται με αυτή του περιβάλλοντος, αφού έχουν και οι δύο όμοιο ρυθμό μεταβολής. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος η ατμόσφαιρα ούτε ενισχύει αλλά ούτε και εμποδίζει την κίνηση των αερίων μαζών γι' αυτό και λέμε ότι έχουμε ουδέτερη ευστάθεια.

- *Ασταθής ατμόσφαιρα.* Εάν η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας μειώνεται με ρυθμό μεγαλύτερο από αυτόν της ξηρής αδιαβατικής Γ (π.χ. -1.01°C/100m) λέμε ότι ο ρυθμός είναι υπεραδιαβατικός *(superadiabatic)* και η ατμόσφαιρα ασταθής. Στο σχήμα 2.6 φαίνονται αναλυτικά τα παραπάνω: Εάν μετακινήσουμε αδιαβατικά έναν όγκο αέρα κατακόρυφα κατά 100m από το σημείο Α στο σημείο Β, η θερμοκρασία του όγκου αυτού θα μειωθεί από τους 21.15°C στους 20.15°C. Η θερμοκρασία όμως της ατμόσφαιρας μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό (π.χ. -1.25°C/100m), υπεραδιαβατικό. Επομένως στο σημείο Β η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας θα έχει μειωθεί από τους 21.15°C στους 19.90°C. Έτσι η θερμοκρασία του μικρού όγκου αέρα θα είναι μεγαλύτερη από αυτήν της ατμόσφαιρας και συνεπώς θα τείνει να συνεχίσει την κίνηση του προς τα επάνω ως ελαφρύτερος. Όμοια εάν μετακινήσουμε έναν όγκο αέρα προς τα κάτω αυτός θα συνεχίσει να βυθίζεται, αφού θα είναι πάντα ψυχρότερος από την ατμόσφαιρα. Βλέπουμε λοιπόν ότι η μηχανική τύρβη ενισχύεται από την θερμοκρασιακή δομή της ατμόσφαιρας και γι' αυτό λέμε ότι η ατμόσφαιρα είναι ασταθής

- *Ευσταθής ατμόσφαιρα.* Εάν η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας μεταβάλλεται με

ρυθμό μικρότερο από τον αδιαβατικό Γ, αυτός λέγεται υποαδιαβατικός *(subadiabatic)* και η ατμόσφαιρα χαρακτηρίζεται σταθερή. Εάν μετακινήσουμε έναν όγκο αέρα (βλ. σχήμα 2.7) κάθετα κατά 100m από το σημείο Α στο σημείο Β, η θερμοκρασία του θα μεταβληθεί με τον ρυθμό της ξηρής αδιαβατικής μεταβολής Γ και επομένως θα μειωθεί από τους 21.15°C στους 20.15°C. Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, που μεταβάλλεται υποαδιαβατικά (π.χ. -0.5°C/100m), θα μειωθεί από τους 21.15°C στους 20.65°C. Έτσι ο όγκος του αέρα θα έχει μικρότερη θερμοκρασία από αυτή του περιβάλλοντος και επομένως θα έχει την τάση να κινηθεί προς τα κάτω δηλαδή την αρχική του θέση. Ομοίως εάν μετακινήσουμε έναν όγκο αέρα προς τα κάτω αυτός θα έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από το περιβάλλον στην τελική του θέση και επομένως θα τείνει να ξαναγυρίσει στην αρχική θέση του λόγω ανωστικών δυνάμεων. Παρατηρούμε λοιπόν ότι η ατμόσφαιρα στέκεται εμπόδιο στις κινήσεις των μαζών του αέρα, που προκαλούνται από την μηχανική τύρβη και γι' αυτό την ονομάζουμε ευσταθή. Μια ιδιαίτερη περίπτωση της υποαδιαβατικής είναι όταν η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας αυξάνεται με το ύψος και τότε λέμε ότι έχουμε μια αναστροφή *(inversion)*. Αυτή η θερμοκρασιακή δομή της ατμόσφαιρας μειώνει την δυνατότητα διάλυσης των ρύπων στην ατμόσφαιρα και έχει συνδεθεί στο παρελθόν με αρκετά επεισόδια ρύπανσης [18, σελ.278]. Γίνεται αντιληπτό ότι σε περιπτώσεις αναστροφής η μηχανική τύρβη περιορίζεται πάρα πολύ, αφού μετακινώντας έναν όγκο αέρα προς τα πάνω αυτός θα είναι πάντα πολύ ψυχρότερος της ατμόσφαιρας, ενώ μετακινώντας έναν όγκο αέρα προς τα κάτω αυτός θα είναι πολύ θερμότερος της ατμόσφαιρας. Και στις δύο περιπτώσεις λοιπόν η κατακόρυφη κίνηση των αερίων μαζών θα εμποδίζεται και μάλιστα πολύ.

Προκειμένου να καθοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η ευστάθεια της ατμόσφαιρας ο Pasquill ανέπτυξε μια μέθοδο, που κατηγοριοποιεί την κατάσταση της ατμόσφαιρας σε έξι διαφορετικές κλάσεις-κατηγορίες (βλ. πίνακα 2.7). Αυτές οι κλάσεις ονομάζονται και κλάσεις κατά Pasquill-Gifford (P-G) και είναι οι ακόλουθες [71], [195, σελ.A-5]:

- A: Εξαιρετικά ασταθής (ισχυρά υπεραδιαβατική). Συνήθως συμβαίνει κατά την διάρκεια ισχυρής ηλιοφάνειας με χαμηλή ταχύτητα ανέμου (< 3m/sec).

- B: Ενδιάμεσα ασταθής (μέτρια υπεραδιαβατική). Συνήθως συμβαίνει όταν επικρατούν συνθήκες, που κυμαίνονται από δυνατή ηλιοφάνεια με ταχύτητα ανέμου 3-5m/sec μέχρι αμυδρή ηλιοφάνεια με ένταση ανέμων <2m/sec.

- C: Ελαφρά ασταθής (ελαφρά υπεραδιαβατική). Παρουσιάζεται κατά την διάρκεια συνθηκών, που κυμαίνονται από δυνατή ηλιοφάνεια με ταχύτητα ανέμου 5-6m/sec μέχρι αμυδρή ηλιοφάνεια με ταχύτητα ανέμου 2-3m/sec.

- D: Ουδέτερη (αδιαβατική). Συνήθως συμβαίνει όταν επικρατεί ασθενής ηλιοφάνεια ή συννεφιά καθώς και την νύχτα όταν η ταχύτητα ανέμου είναι μεγαλύτερη από 3m/sec. Επίσης παρατηρείται όταν πνέουν πολύ ισχυροί άνεμοι είτε σε ηλιόλουστες είτε σε συννεφιασμένες μέρες

- E: Ελαφρά ευσταθής (ελαφρά υποαδιαβατική με ή χωρίς αναστροφή). Συνήθως συμβαίνει το βράδυ ή νωρίς το πρωί με μερική συννεφιά και ανέμους 2-5m/sec.

- F: Ενδιάμεσα ευσταθής (μέτρια υποαδιαβατική με αναστροφή). Παρατηρείται την νύχτα ή νωρίς το πρωί με λίγα σύννεφα και χαμηλή ένταση ανέμων (< 3m/sec).

Η μέθοδος του Pasquill λαμβάνει υπόψη της τόσο την μηχανική όσο και την ατμοσφαιρική τύρβη. Την μηχανική τύρβη αντιπροσωπεύει η ταχύτητα του ανέμου ενώ την θερμική τύρβη η εισερχόμενη ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία και το ποσοστό κάλυψης του ουρανού με νέφη στην διάρκεια της νύχτας. Όσον αφορά στη χρήση του πίνακα αξίζει να σημειωθούν τα επόμενα: Ισχυρή ακτινοβολία αντιστοιχεί σε ηλιόλουστο καλοκαιρινό μεσημέρι στην Αγγλία, ενώ ελαφρά ακτινοβολία σε όμοιες χειμερινές συνθήκες. Επίσης ως νύχτα θεωρείται το χρονικό διάστημα 1 ώρα πριν την δύση έως μια ώρα μετά την ανατολή του ήλιου. Τέλος η ταχύτητα ανέμου λαμβάνεται σε ύψος 10m από την επιφάνεια του εδάφους.

Η μέθοδος αυτή μολονότι είναι εμπειρική δίνει σχετικά αξιόπιστα αποτελέσματα και γι' αυτό χρησιμοποιείται ευρύτατα. Μάλιστα αποτελεί, όπως θα δούμε παρακάτω, το πρώτο βήμα στην προσπάθεια να υπολογίσουμε την διασπορά των ρύπων, που εκπέμπονται από μια καμινάδα.

Ενδιαφέρον έχει επίσης να δούμε πως μεταβάλλεται η ατμοσφαιρική ευστάθεια κατά την διάρκεια ενός 24ώρου σε μια τοποθεσία αρκετά ξηρή, ώστε να μην χρειαστεί να εισάγουμε την επίδραση της υγρασίας στον ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας καθ' ύψος. Θεωρούμε επίσης ότι δεν υπάρχουν σύννεφα και οι άνεμοι που πνέουν είναι ελαφρείς. Κατά την διάρκεια της νύχτας το έδαφος ψύχεται, αφού χάνει θερμότητα μέσω εκπομπής με ακτινοβολία. Το ψυχρό έδαφος ψύχει και το στρώμα αέρα, το οποίο βρίσκεται ακριβώς από πάνω του. Αυτό με την σειρά του ψύχει το αμέσως παραπάνω στρώμα. Έτσι λίγο πριν την ανατολή του ήλιου η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας αυξάνει με το ύψος μέχρι περίπου τα 300m, έχουμε δηλαδή μια αναστροφή (βλ. σχήμα 2.8). Πάνω από την αναστροφή η ατμόσφαιρα είναι σχετικά σταθερή οπότε οι κατακόρυφες κινήσεις των μαζών του αέρα είναι περισσότερες.

Με την ανατολή του ήλιου αρχίζει και ζεσταίνεται το έδαφος, το οποίο με την σειρά του αρχίζει να ζεσταίνει το στρώμα αέρα, που βρίσκεται επάνω του. Αυτό το στρώμα αέρα ζεσταίνει το αμέσως παραπάνω κ.ο.κ. Έτσι μετά από 2 ώρες θα έχει αναπτυχθεί στην επιφάνεια του εδάφους ένα στρώμα αέρα, στο οποίο ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας θα ισούται περίπου με τον αδιαβατικό. Πάνω από αυτό το στρώμα θα

βρίσκονται τα υπολείμματα της αναστροφής, που είχε αναπτυχθεί κατά την διάρκεια της νύχτας. Ο ανυψούμενος αέρας από το έδαφος δεν μπορεί να διαπεράσει την αναστροφή, αλλά αναμιγνύεται με αυτή στο συνοριακό σημείο. Έτσι σιγά, σιγά την καταστρέφει και 4 ώρες μετά την ανατολή την έχει σχεδόν εξαφανίσει.

Το απόγευμα πλέον έχει μεταφερθεί αρκετή θερμότητα από το έδαφος στην ατμόσφαιρα και η αναστροφή έχει εξαφανιστεί τελείως. Στα στρώματα της ατμόσφαιρας, που απέχουν μέχρι 1000m ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας είναι υπεραδιαβατικός και η ατμόσφαιρα ασταθής, ενώ στα υψηλότερα είναι παραπλήσιος με τον αδιαβατικό. Το παραπάνω στρώμα στο σύνολο του έχει ύψος περί τα 1800m. Από εκεί και πάνω επικρατούν σχετικά σταθερές συνθήκες. Λίγο πριν την δύση του ηλίου το έδαφος αρχίζει να ψύχεται με αποτέλεσμα κατά την δύση να έχει αναπτυχθεί κοντά στο έδαφος μια ελαφριά αναστροφή, η οποία κατά την διάρκεια της νύχτας θα μεγαλώνει, ώστε να λάβει την μέγιστη έκτασή της λίγο πριν την ανατολή του ήλιου [42, σελ.96].

2.2.2.3 Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα

Είδαμε λίγο πριν ότι η θερμοκρασιακή δομή της ατμόσφαιρας μεταβάλλεται κατά την διάρκεια ενός 24ώρου. Ουσιαστικά περιγράψαμε συνοπτικά τις διάφορες μεταβολές του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος *(Atmospheric Boundary Layer)*. Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (ΑΟΣ) είναι ένα στρώμα μέγιστου πάχους περίπου 2Km, το οποίο περιβάλλει την γη και πάνω από αυτό συνεχίζει η τροπόσφαιρα (βλ. σχήμα 2.9). Όλες οι συναλλαγές θερμοκρασίας και υγρασίας μεταξύ της γης και του αέρα συμβαίνουν στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα και δεν επηρεάζουν σημαντικά την υπόλοιπη ατμόσφαιρα, η οποία περιβάλλει την γη. Σύμφωνα με τον Stull [182] 'είναι το κομμάτι της τροπόσφαιρας το οποίο επηρεάζεται άμεσα από την επιφάνεια του εδάφους και απαντά εξίσου άμεσα στα ερεθίσματα του (όπως είναι η εκπομπή θερμότητας και ρυπαντών, η ατμοποίηση κ.τ.λ.)'.

Μπορεί να διακρίνει κανείς δύο διαφορετικές καταστάσεις στην μορφή και τη συμπεριφορά του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος ανάλογα με τον κυρίαρχο μηχανισμό τύρβης. Έτσι συνήθως κατά την διάρκεια της ημέρας παρατηρείται το θερμαγωγό οριακό στρώμα *(convective boundary layer)* και κατά την διάρκεια της νύχτας το ευσταθές οριακό στρώμα *(stable boundary layer)*.

Το ημερήσιο θερμαγωγό οριακό στρώμα αποτελείται από 3 επιμέρους στρώματα : Το στρώμα επιφάνειας, το οποίο είναι σχετικά ρηχό (περίπου 10% του συνολικού ύψους του ΑΟΣ). Πάνω από το στρώμα επιφανείας βρίσκεται ένα μεγαλύτερο (50-80% του ΑΟΣ) καλά αναμεμιγμένο στρώμα. Στην κορυφή βρίσκεται η ζώνη παράσυρσης *(entrainment zone)*, η οποία είναι ισχυρά ευσταθής[8, σελ.81], και διαχωρίζει το ΑΟΣ από την υπόλοιπη τροπόσφαιρα (βλ. σχήμα 2.10). Το αναμεμειγμένο στρώμα παρουσιάζει σχεδόν αδιαβατικό ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας, ενώ στο επιφανειακό

στρώμα επικρατούν υπεραδιαβατικές συνθήκες με συνέπεια το τελευταίο να είναι αστα-θές. Έτσι μάζες θερμού αέρα ανυψώνονται από την επιφάνεια του εδάφους, λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας, και διασχίζουν το αναμεμειγμένο στρώμα μέχρι που σταματούν στην ζώνη παράσυρσης, αφού αυτή είναι μια αναστροφή. Αυτές ανυψούμενες μάζες θερμού αέρα προκαλούν ισχυρή τύρβη, οπότε οι ρύποι και η υγρασία αναμιγνύονται με γρήγορο ρυθμό στο ΑΟΣ. Στην ζώνη παράσυρσης τώρα αέριες μάζες από την ελεύθερη τροπόσφαιρα εισχωρούν δια μέσου της στο αναμεμειγμένο στρώμα προκαλώντας μια αύξηση του ύψους του κατά την διάρκεια της ημέρας. Αντίθετα αέρας από το αναμεμειγμένο στρώμα δεν μπορεί να εισχωρήσει στην ζώνη παράσυρσης με συνέπεια οι ρύποι, που υπάρχουν στο αναμεμειγμένο στρώμα να μην είναι δυνατόν να διαφύγουν [183, σελ.72]. Η ζώνη παράσυρσης αποτελεί το 10-30% του συνολικού ύψους του ΑΟΣ και κατά τις πρωινές ώρες μπορεί να είναι αρκετά μεγαλύτερη [167, σελ. 10].

Η ανάπτυξη του θερμαγωγού ΑΟΣ κατά την διάρκεια μιας ηλιόλουστης μέρας χαρακτηρίζεται από τα επόμενα στάδια [167, σελ.10], [96, σελ. 7]:

1. Με την ανατολή του ήλιου δημιουργείται ένα ρηχό θερμαγωγό στρώμα στην επιφάνεια του εδάφους, το οποίο μεγαλώνει αρκετά γρήγορα (10-100m/h, μέχρι να εξαφανίσει πλήρως την νυχτερινή αναστροφή.

2. Στην συνέχεια το ΑΟΣ αναπτύσσεται με ακόμα ταχύτερους ρυθμούς (100-1000m/h) μέχρι να φθάσει το ύψος της αναστροφής αντικυκλωνικής καθίζησης (*capping inversion*).

3. Διατήρηση του ΑΟΣ και ίσως πολύ μικρή περαιτέρω αύξηση.

4. Λίγο πριν τη δύση του ηλίου αρχίζει να μειώνεται η θερμική τύρβη και συνεπώς η κάθετη ανάμιξη οπότε και περνάμε σιγά-σιγά στα νυκτερινά φαινόμενα.

Κατά την διάρκεια της νύχτας τα κατώτερα στρώματα του ΑΟΣ ψύχονται εξαιτίας της γειτνίασης τους με το έδαφος, το οποίο χάνει θερμότητα με εκπομπή ακτινοβολίας. Έτσι, όπως αναφέραμε και παραπάνω, αναπτύσσεται μια αναστροφή στην επιφάνεια του εδάφους η οποία κατά την διάρκεια της νύχτας μεγαλώνει. Πάνω από το ευσταθές στρώμα βρίσκεται το κατάλοιπο στρώμα *(residual layer)*, το οποίο δεν έχει ψυχθεί και συνεπώς διατηρεί τον αδιαβατικό ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας, που είχε ως αναμεμειγμένο στρώμα κατά την διάρκεια της προηγούμενης ημέρας, και η τύρβη, που επικρατεί, είναι διακοπτόμενη και οφείλεται στην μηχανική τύρβη [167, σελ.14]. Όπως γίνεται αντιληπτό ρύποι, οι οποίοι βρίσκονταν εκεί κατά την διάρκεια της ημέρας, θα παραμείνουν στο κατάλοιπο στρώμα, για όλη την διάρκεια της νύχτας. Το τελευταίο κομμάτι του ΑΟΣ είναι η λεγόμενη αναστροφή αντικυκλωνικής καθίζησης.

Καταλαβαίνουμε ότι η ανάπτυξη και η μορφή του ΑΟΣ εξαρτάται κυρίως από το ποσό της θερμότητας, που απορροφά το έδαφος από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινο-

βολία, και από το ποσό, που χάνει λόγω εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της νύχτας. Έτσι το θερμαγωγό οριακό στρώμα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, όπου η μέρα διαρκεί περισσότερο από την νύχτα, θα ξεκινά αρκετά 'ρηχό' το πρωί και θα μεγαλώνει με γρήγορο ρυθμό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Την νύχτα θα αναπτύσσεται ένα ευσταθές στρώμα πάνω από την επιφάνεια, πάνω από το οποίο θα παραμένει ένα αρκετά παχύ κατάλοιπο στρώμα. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όπου η επιφάνεια του εδάφους ψύχεται περισσότερο κατά την διάρκεια της ψυχρής και μακράς νύχτας από ό,τι ζεσταίνεται στην διάρκεια της σύντομης ημέρας, το ευσταθές ΑΟΣ θα κυριαρχεί για σχεδόν όλη την διάρκεια του 24ώρου [183, σελ.72].

Από όσα αναπτύχθηκαν μέχρι τώρα γίνεται κατανοητό ότι το ΑΟΣ είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για τον τρόπο με τον οποίο διασπείρονται οι ρύποι, οι οποίοι εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα από μια καμινάδα ενός εργοστασίου, και είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε το ύψος του. Μάλιστα το ύψος του ΑΟΣ ονομάζεται και ύψος ανάμιξης *(mixing height)* [167, σελ.13], αφού μέχρι αυτού του σημείου συμβαίνει η ανάμιξη των ρύπων. Δηλαδή το ύψος ανάμιξης καθορίζει τον διαθέσιμο όγκο για την διασπορά των ρύπων στην ατμόσφαιρα. Για να γίνει κατανοητή η ιδιαίτερη σημασία του ύψους ανάμιξης στην μελέτη της διασποράς των ρύπων παραθέτουμε το ακόλουθο θεωρητικό παράδειγμα: Έστω ότι έχουμε ένα πλούμιο, το οποίο είναι ισχυρά ανωστικό και έχει την τάση να ανυψωθεί αρκετά (Για την ανύψωση του πλουμίου θα αναφερθούμε διεξοδικά στην παράγραφο 2.2.3.2 κ.εξ.). Εάν το θερμαγωγό ΑΟΣ έχει μικρότερο ύψος από το συνολικό ύψος του πλουμίου (ανύψωση του πλουμίου μετά την έξοδο του απο την καμινάδα + ύψος καμινάδας) το τελευταίο δεν θα λάβει όλο το ύψος, που θα μπορούσε θεωρητικά, αλλά θα περιοριστεί από την ζώνη παράσυρσης του ΑΟΣ.

2.2.2.4 Φαινόμενα εδάφους

Πολλές φορές τοπικά φαινόμενα, τα οποία αναπτύσσονται, κυριαρχούν επάνω στα ατμοσφαιρικά συστήματα μεγαλύτερης κλίμακας και αλλάζουν την συμπεριφορά της ατμόσφαιρας. Τέτοια είναι οι θαλάσσιες και οι στεριανές αύρες, οι θερμικές νησίδες καθώς και τα φαινόμενα πλαγιάς και κοιλάδας. Εμείς θα αναφερθούμε μόνο στα δύο τελευταία, μια που στην περιοχή της Μεγαλόπολης είναι δυνατόν να έχουμε την ανάπτυξη τέτοιων φαινομένων. Η ανάπτυξη των υπολοίπων ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας διατριβής και εάν ενδιαφέρεται ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην βιβλιογραφία [1], [18], [40], [42].

Η θέρμανση του εδάφους από τον ήλιο καθώς και η ψύξη του κατά την διάρκεια της νύχτας, με εκπομπή ακτινοβολίας, μπορεί να επηρεάσουν την ροή του αέρα σε τοπικό επίπεδο. Ας θεωρήσουμε μια πλαγιά με νότιο προσανατολισμό, ώστε να έχει άμεση επαφή με τις ακτίνες του ηλίου αρκετές ώρες την ημέρα. Καθώς η πλαγιά ζεσταίνεται από τις ακτίνες του ήλιου, ζεσταίνει και το στρώμα αέρα, το οποίο βρίσκεται πάνω

της. Καθώς τώρα η πυκνότητα αυτού του στρώματος αέρα έχει μειωθεί, αυτό τείνει να ανυψωθεί (βλ. σχήμα 2.11(α)). Η μάζα αέρα, που βρίσκεται στην κορυφή της πλαγιάς θα ανυψωθεί κατακόρυφα και οι μικρές μάζες αέρα, που βρίσκονται χαμηλότερα στην πλαγιά θα τείνουν να πάρουν την θέση της. Αυτή η ροή ανέμου στην επιφάνεια της πλαγιάς από την βάση της προς την κορυφή της λέγεται «άνεμος κοιλάδας». Γίνεται αντιληπτό ότι εάν μια καμινάδα βρίσκεται κοντά στην πλαγιά είναι δυνατόν το πλούμιο της να επηρεαστεί από το συγκεκριμένο φαινόμενο.

Κατά την διάρκεια της νύχτας η πλαγιά εκπέμπει ακτινοβολία. Μάλιστα ο ρυθμός εκπομπής είναι μεγαλύτερος στην πλαγιά από ότι στο επίπεδο έδαφος στην βάση της. Εξαιτίας της εκπομπής η πλαγιά χάνει θερμότητα. Έτσι το στρώμα αέρα, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με την πλαγιά, ψύχεται και αυτό, οπότε αυξάνει η πυκνότητά του και γίνεται βαρύτερο με αποτέλεσμα να αρχίζει να κινείται προς την βάση της πλαγιάς. Αυτό ονομάζεται «άνεμος πλαγιάς». Προκειμένου να αντισταθμιστεί αυτή η ποσότητα αέρα, που κατέρχεται, αέρας, ο οποίος βρίσκεται λίγο μακρύτερα από την πλαγιά και έχει ψυχθεί λιγότερο και είναι πιο θερμός σε σχέση με τον κατερχόμενο, αρχίζει να ανυψώνεται ώστε να δημιουργηθεί ένα κύκλωμα κυκλοφορίας (βλ. σχήμα 2.11(β)). Όταν οι άνεμοι πλαγιάς πνέουν σε αντικριστές πλαγιές, ο ψυχρός αέρας μπορεί να συσσωρευθεί στον πυθμένα της κοιλάδας. Εάν ο τελευταίος έχει κλίση ο συσσωρευμένος ψυχρός αέρας θα αρχίσει να κινείται προς τα σημεία χαμηλότερου υψομέτρου δημιουργώντας ένα ρεύμα απορροής *(drainage wind)*.

2.2.3 Ανύψωση του πλουμίου και μορφή του ανάλογα με την ατμοσφαιρική ευστάθεια

Σε αυτή την παράγραφο θα αναφερθούν τα σχετικά με την μορφή του πλουμίου ανάλογα με το είδος της επικρατούσας ατμοσφαιρικής ευστάθειας και ακολούθως θα παρουσιαστεί η θεωρία, που περιγράφει τον υπολογισμό της ανύψωσης του πλουμίου μετά την έξοδο του από την καμινάδα.

2.2.3.1 Μορφή πλουμίου ανάλογα με το είδος ευστάθειας

Με δεδομένο ότι η ευστάθεια της ατμόσφαιρας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην κίνηση των αερίων μαζών στην ατμόσφαιρα αντιλαμβανόμαστε ότι αυτή θα επηρεάζει σημαντικά την μορφή του πλουμίου αλλά και την διασπορά του. Στο σχήμα 2.12 παρατίθενται διάφοροι τύποι πλουμίων ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Έτσι σε μια ατμόσφαιρα έντονα ασταθή, που ευνοεί τις κατακόρυφες κινήσεις των αερίων μαζών, το πλούμιο θα έχει την μορφή του σχήματος 2.12(a). Η κάθετη ανάμιξη σε αυτή την περίπτωση είναι έντονη, οπότε και η μορφή του πλουμίου είναι σχετικά ακανόνιστη, ενώ η διάλυση του συμβαίνει αρκετά γρήγορα. Αυτό το είδος πλουμίου

παρατηρείται συνήθως την θερμότερη στιγμή της ημέρας, όταν έχουμε έντονη ανύψωση θερμικών ρευμάτων από το έδαφος.

Κωνικά πλούμια όπως αυτό του σχήματος 2.12(b) δημιουργούνται όταν η ατμόσφαιρα είναι ευσταθής και η κάθετη ανάμιξη περιορισμένη. Σε αυτή την περίπτωση η κάθετη και η οριζόντια ανάμιξη είναι περίπου ίσες και έτσι καθώς ταξιδεύει το πλούμιο διασπείρεται με τον ίδιο ρυθμό τόσο κάθετα όσο και οριζόντια. Κωνικά πλούμια παρατηρούνται συνήθως αργά το πρωί [74, σελ.410].

Στην περίπτωση, που το πλούμιο εκπέμπεται μέσα σε μία αναστροφή (βλ. σχήμα 2.12(c)), συμβαίνει το εξής: Η κάθετη ανάμιξη είναι ελάχιστη καθώς εμποδίζεται κάθε κατακόρυφη κίνηση των καυσαερίων. Έτσι το πλούμιο έχει αυτή την πολύ λεπτή μορφή. Τέτοια πλούμια παρατηρούνται συνήθως αργά την νύχτα και μέχρι την ανατολή του ηλίου.

Εάν όμως το πλούμιο εκπέμπεται πάνω από την αναστροφή (βλ. σχήμα 2.12(d)), εμποδίζεται η κίνηση και η ανάπτυξη του προς τα κάτω καθώς η αναστροφή είναι ένα φράγμα στις κάθετες μετακινήσεις αερίων μαζών. Αντίθετα αναπτύσσεται κανονικά προς τα επάνω όπου επικρατούν ασταθείς ή ουδέτερες συνθήκες.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η περίπτωση, όπου η αναστροφή δεν ξεκινάει από το έδαφος αλλά το κάτω όριο της βρίσκεται λίγο πάνω από την καμινάδα (βλ. σχήμα 2.12(e, f)). Τότε το πλούμιο παγιδεύεται κάτω από την αναστροφή, καθώς η τελευταία εμποδίζει τις κάθετες κινήσεις των καυσαερίων. Έτσι οι ρύποι δεν έχουν την δυνατότητα να διαλυθούν με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις τους στο έδαφος να είναι πολύ μεγάλες. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι οι ανυψωμένες αναστροφές είναι δυνατόν να προκαλέσουν σοβαρά επεισόδια ρύπανσης, ειδικά εάν διατηρηθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα.

2.2.3.2 Εισαγωγικά στην μεθοδολογία υπολογισμού της ανύψωσης του πλουμίου

Αναλύθηκε προηγουμένως πως επηρεάζεται η μορφή του πλουμίου από την ατμοσφαιρική ευστάθεια. Ακολούθως θα παρουσιαστεί η θεωρία σχετικά με την ανύψωση του πλουμίου μετά την έξοδο του από την καμινάδα. Το συγκεκριμένο μέγεθος είναι απόλυτα απαραίτητο στην μεθοδολογία υπολογισμού της διασποράς των ρυπαντών στην ατμόσφαιρα.

Η ανύψωση του πλουμίου μετά την έξοδο του από την καμινάδα οφείλεται σε δύο λόγους: (α) Στην ταχύτητα, που έχουν τα καυσαέρια, και (β) στην αυξημένη θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο, η οποία προκαλεί την εμφάνιση ανωστικών δυνάμεων. Τα καυσαέρια αποκτούν ταχύτητα είτε λόγω μηχανικών φτερωτών, οι οποίες βρίσκονται στους αγωγούς διοχέτευσης των καυσαερίων, είτε λόγω φυσικού ελκυσμού μέσα στην καμινάδα. Επίσης η ανύψωση του πλουμίου επηρεάζεται και από τους μετεω-

ρολογικούς παράγοντες, που επικρατούν κατά την εκπομπή. Αυτοί είναι η ταχύτητα του ανέμου, η ατμοσφαιρική ευστάθεια και η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Καθώς αυτοί οι παράγοντες μεταβάλλονται, θα μεταβάλλεται και η τελική ανύψωση του πλουμίου ακόμα και εάν οι συνθήκες εκπομπής (ταχύτητα και θερμοκρασία καυσαερίων) παραμένουν σταθερές [116, σελ.284].

Για τον υπολογισμό της ανύψωσης του πλουμίου ο Briggs [202, σελ.1-6] ανέπτυξε την ακόλουθη μεθοδολογία, η οποία είναι σχετικά εύκολα εφαρμόσιμη, καθώς δεν απαιτεί την γνώση δύσκολα προσδιορίσιμων μετεωρολογικών μεγεθών, ενώ τα αποτελέσματα, που παρέχει, είναι αρκετά αξιόπιστα. Αναλυτικά η εν λόγω μεθοδολογία θα περιγραφεί στις επόμενες παραγράφους:

2.2.3.3 Υπολογισμός κατωρεύματος στην καμινάδα

Σε αυτή την παράγραφο υπολογίζουμε την πιθανή αρχική βύθιση του πλουμίου λόγω κατωρεύματος *(stack-tip downwash)*. Αυτό το φαινόμενο, που ονομάζεται και «φαινόμενο καμινάδας» συμβαίνει όταν η ταχύτητα του αέρα είναι σχετικά υψηλή σε σχέση με την ταχύτητα εξόδου των καυσαερίων. Τότε μέρος ή ολόκληρο το πλούμιο οδηγείται στην υπήνεμη πλευρά της καμινάδας, όπου η πίεση είναι μειωμένη (βλ. σχήμα 2.13).

Το φαινόμενο της καμινάδας δεν συμβαίνει εάν $\mathrm{w_s} > 1.5\mathrm{u_s}$, όπου $\mathrm{w_s}$ η ταχύτητα εξόδου των καυσαερίων και $\mathrm{u_s}$ η ταχύτητα ανέμου στο ύψος της καμινάδας. Σε αντίθετη περίπτωση το νέο μειωμένο ύψος εκπομπής του πλουμίου υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$h'_s = h_s + 2d_s\left(\frac{w_s}{u_s} - 1.5\right) \tag{2.7}$$

όπου:

$\mathrm{h'_s}$: Το νέο μειωμένο ύψος εκπομπής του πλουμίου.

$\mathrm{h_s}$: Το ύψος της καμινάδας.

$\mathrm{d_s}$: Η εσωτερική διάμετρος της καμινάδας.

2.2.3.4 Υπολογισμός παραμέτρων ροής άνωσης και ροής ορμής

Ένα άλλο απαραίτητο μέγεθος για τον υπολογισμό της ανύψωσης του πλουμίου είναι η παράμετρος ροής άνωσης *(buoyancy flux parameter)* $\mathrm{F_b(m^4/s^3)}$, που υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$F_b = g w_s d_s^2 \left(\frac{\Delta T}{4T_s}\right) \tag{2.8}$$

όπου:

g: Η επιτάχυνση της βαρύτητας.

$\Delta\mathrm{T}$: Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των καυσαερίων $\mathrm{T_s(K)}$ και του περιβάλλοντος $\mathrm{T_a(K)}$, δηλαδή $\Delta\mathrm{T} = \mathrm{T_s} - \mathrm{T_a}$.

Απαραίτητη στους υπολογισμούς είναι επίσης η παράμετρος ροής ορμής *(momentum flux parameter)* $\mathrm{F_m(m^4/s^2)}$, η οποία υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$F_m = w_s^2 d_s^2 \frac{T_a}{4T_s} \tag{2.9}$$

Οι δύο παραπάνω παράμετροι χρησιμοποιούνται ως κριτήρια για την εκλογή των κατάλληλων εξισώσεων υπολογισμού της ανύψωσης του πλουμίου και η χρήση τους παρουσιάζεται στην ακόλουθη παράγραφο.

2.2.3.5 Ανύψωση πλουμίου - ασταθείς και ουδέτερες συνθήκες

Ορίζουμε εδώ ώς ενεργό ύψος πλουμίου *(effective plume height)* $\mathrm{h_{ef}}$ τη συνολική απόσταση της κεντρικής γραμμής του πλουμίου από το έδαφος, δηλαδή το ύψος της καμινάδας $\mathrm{h_s}$ συν την ανύψωση του πλουμίου $\Delta\mathrm{h}$ (βλ. σχήμα 2.14).

Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν το πλούμιο ανυψώνεται λόγω άνωσης ή λόγω ορμής, ώστε να εφαρμοστεί η κατάλληλη μεθοδολογία, προχωρούμε ως εξής:

- Εάν $\mathrm{F_b} < 55\,\mathrm{m^4s^{-3}}$ το $(\Delta\mathrm{T})_\mathrm{c}$ υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$(\Delta T)_c = 0.0297 T_s \frac{w_s^{1/3}}{d_s^{2/3}} \tag{2.10}$$

- Εάν $\mathrm{F_b} \geq 55\,\mathrm{m^4s^{-3}}$ το $(\Delta\mathrm{T})_\mathrm{c}$ είναι:

$$(\Delta T)_c = 0.00575 T_s \frac{w_s^{2/3}}{d_s^{1/3}} \tag{2.11}$$

Εάν η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των καυσαερίων και της ατμόσφαιρας $\Delta\mathrm{T}$ είναι μεγαλύτερη από το $(\Delta\mathrm{T})_\mathrm{c}$ θεωρούμε ότι το πλούμιο ανυψώνεται λόγω άνωσης. Σε οποιοδήποτε άλλη περίπτωση το πλούμιο ανυψώνεται λόγω της ταχύτητας των καυσαερίων. Οι εξισώσεις, που περιγράφουν τα δύο φαινόμενα έχουν ως εξής:

- *Ανύψωση λόγω άνωσης.* Διακρίνουμε δύο υποπεριπτώσεις:

  1. Εάν $\mathrm{F_b} < 55\,\mathrm{m^4s^{-3}}$ η απόσταση από την πηγή $\mathrm{x_f}$, όπου το πλούμιο αποκτά το μέγιστο ύψος του, καθώς και το ενεργό ύψος πλουμίου $\mathrm{h_{ef}} = \mathrm{h_s'} + \Delta\mathrm{h}$, δίνονται από τους ακόλουθους τύπους:

$$x_f = 49 F_b^{5/8} \tag{2.12}$$

$$h_{ef} = h_s' + 21.425 \frac{F_b^{3/4}}{u_s} \tag{2.13}$$

2. Εάν $\mathrm{F_b} \geq 55\,\mathrm{m^4s^{-3}}$ τότε:

$$x_f = 119F_b^{2/5} \tag{2.14}$$

$$h_ef = h_s^{'} + 38.71\frac{F_b^{3/5}}{u_s} \tag{2.15}$$

- *Ανύψωση λόγω ορμής.* Η ανύψωση του πλουμίου δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$h_ef = h_s^{'} + 3d_s\frac{w_s}{u_s} \tag{2.16}$$

2.2.3.6 Ανύψωση πλουμίου - ευσταθείς συνθήκες

Υπολογίζουμε αρχικά τον συντελεστή ευστάθειας *(stability parameter)* s με την βοήθεια της εξίσωσης:

$$s = g\frac{\partial\theta/\partial z}{T_a} \tag{2.17}$$

Η τιμή για το $\partial\theta/\partial\mathrm{z}$ εξαρτάται από την ευστάθεια, που επικρατεί. Έτσι για ευστάθεια κλάσης Ε εκλέγουμε συνήθως $\partial\theta/\partial\mathrm{z} = 0.020\,\mathrm{Km^{-1}}$, ενώ για ευστάθεια F εκλέγουμε $\partial\theta/\partial\mathrm{z} = 0.035\,\mathrm{Km^{-1}}$ [202, σελ.1-9].

Ομοίως πρέπει να ελέγξουμε εάν η ανύψωση του πλουμίου οφείλεται στην άνωση ή στην ορμή. Ως κριτήριο χρησιμοποιούμε το $(\Delta\mathrm{T})_\mathrm{c}$:

$$(\Delta T)_c = 0.019582T_sw_s\sqrt{s} \tag{2.18}$$

Εάν η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των καυσαερίων και του περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη ή ίση με το $(\Delta\mathrm{T})_\mathrm{c}$ τότε το πλούμιο ανυψώνεται λόγω άνωσης, αλλιώς λόγω ορμής.

- *Ανύψωση λόγω άνωσης.* Το $\mathrm{x_f}$ και το $\mathrm{h_{ef}}$ δίνονται από τους ακόλουθους τύπους:

$$x_f = 2.0715\frac{u_s}{\sqrt{s}} \tag{2.19}$$

$$h_{ef} = h_s^{'} + 2.6\left(\frac{F_b}{u_s s}\right)^{(1/3)} \tag{2.20}$$

- *Ανύψωση λόγω ορμής.* Το ενεργό ύψος πλουμίου $\mathrm{h_{ef}}$ παρέχεται από τον παρακάτω τύπο:

$$h_{ef} = h_s^{'} + 1.5\left(\frac{F_m}{u_s\sqrt{s}}\right)^{(1/3)} \tag{2.21}$$

2.2.3.7 Ύψος πλουμίου πριν λάβει την μέγιστη ανύψωση

Όπως είναι κατανοητό η ανύψωση του πλουμίου γίνεται σταδιακά και λαμβάνει το μέγιστο ύψος του σε μια ορισμένη οριζόντια απόσταση από την πηγή. Το ύψος του

πλουμίου για αυτό το διάστημα δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

- *Ανύψωση λόγω άνωσης.* Η ανύψωση του πλουμίου είναι η ακόλουθη ανεξάρτητα από την ευστάθεια της ατμόσφαιρας:

$$h_{ef} = h_s^{'} + 1.60 \left(\frac{F_b^{1/3} x^{2/3}}{u_s} \right) \tag{2.22}$$

  όπου x η οριζόντια απόσταση από την καμινάδα.

- *Ανύψωση λόγω ορμής.* Σε αυτή την περίπτωση τα πράγματα είναι κάπως πιο σύνθετα.

  1. Ασταθείς συνθήκες

$$h_{ef} = h_s^{'} + \left(\frac{3F_m x}{\beta_j^2 u_s^2} \right)^{1/3} \tag{2.23}$$

  Η μέγιστη τιμή x_{max} δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$x_{max} = \frac{4d_s(w_s + 3u_s)^2}{w_s u_s} \qquad \text{όταν} \qquad F_b = 0 \tag{2.24}$$

$$x_{max} = 49F_b^{5/8} \qquad \text{όταν} \qquad 0 < F_b < 55m^4/s^3 \tag{2.25}$$

$$x_{max} = 119F_b^{2/5} \qquad \text{όταν} \qquad F_b \geq 55m^4/s^3 \tag{2.26}$$

  2. Ευσταθείς συνθήκες

$$h_{ef} = h_s^{'} + \left(3F_m \frac{sin(x\sqrt{s}/u_s}{\beta_j^2 u_s \sqrt{s}} \right)^{1/3} \tag{2.27}$$

  όπου:

$$\beta_j = \frac{1}{3} + \frac{u_s}{w_s} \tag{2.28}$$

  Η μέγιστη τιμή της απόστασης $\mathrm{x_{max}}$ από την πηγή δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$x_{max} = 0.5 \frac{\pi u_s}{\sqrt{s}} \tag{2.29}$$

2.2.4 Εξισώσεις διασποράς των ρύπων στην ατμόσφαιρα

Είδαμε παραπάνω πώς ανυψώνεται το πλούμιο όταν εξέρχεται από την καμινάδα καθώς και αναφέρθηκαν οι εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν αυτό το φαινόμενο. Έχοντας τώρα το πλούμιο εξέλθει από την καμινάδα υπάρχει ανάγκη για εξισώσεις, οι οποίες να περιγράφουν την διασπορά και την κίνηση των ρύπων στην ατμόσφαιρα. Υπάρχουν αρκετά τέτοια μοντέλα, τα οποία στηρίζονται σε διάφορες μεθόδους. Τα πιο γνωστά

είναι τα στατιστικά μοντέλα, τα μοντέλα ομοιότητας καθώς και τα μοντέλα του Gauss. Εμείς θα ασχοληθούμε μόνο με γκαουσιανά μοντέλα και δεν θα αναφερθούμε εδώ στα υπόλοιπα, διότι κάτι τέτοιο ξεφεύγει από τους σκοπούς αυτής της διατριβής. Εάν ο αναγνώστης επιθυμεί να εμβαθύνει δεν έχει παρά να ανατρέξει στην βιβλιογραφία [8], [71], [212].

2.2.4.1 Η εξίσωση Gauss

Έστω λοιπόν ότι έχουμε μια καμινάδα, από την οποία εκπέμπεται ένα πλούμιο. Αυτό φυσικά θα ανυψωθεί και θα αρχίσει να ταξιδεύει με την βοήθεια του ανέμου στην διεύθυνση του τελευταίου. Καθώς θα απομακρύνεται από την πηγή, οι ρυπαντές, που βρίσκονται στο πλούμιο, θα αρχίσουν να διασπείρονται τόσο κάθετα, όσο και οριζόντια. Για να καταλήξουμε στην εξίσωση, που περιγράφει την διασπορά των ρύπων θα εργαστούμε σε σύστημα αναφοράς κατά Lagrange, όπου ο παρατηρητής κινείται μαζί με τον αέρα με την ίδια μάλιστα ταχύτητα και δεν βρίσκεται ακίνητος σε κάποιο σταθερό σημείο (π.χ. στο έδαφος) όπως στο σύστημα Euler. Ξεκινάμε λοιπόν την παρατήρησή μας πριν την καμινάδα (upwind of the stack), από την οποία εκπέμπονται οι ρύποι, οπότε στο συγκεκριμένο σημείο οι συγκέντρωσή τους είναι μηδενική [42, σελ.128]. Καθώς περνάμε πάνω από την καμινάδα εισερχόμαστε σε μια περιοχή, όπου η συγκέντρωση των ρύπων είναι υψηλή. Οι ρύποι καθώς εξέρχονται από την καμινάδα διασπείρονται εξαιτίας της μηχανικής και θερμικής τύρβης, που επικρατούν. Θεωρούμε έναν στοιχειώδη κύβο (βλ. σχήμα 2.15) και εφαρμόζουμε το αξίωμα διατήρησης της μάζας σ' αυτόν. Έτσι ο ρυθμός συσσώρευσης *(accumulation rate)* ενός ρυπαντή θα ισούται με τον ρυθμό εισόδου μείον τον ρυθμό εξόδου του ρυπαντή από τον κύβο. Ο ρυθμός συσσώρευσης AR είναι η παράγωγος της περιεχόμενης ποσότητας του ρύπου στον κύβο, η οποία ισούται με την συγκέντρωση του ρύπου επί τον όγκο του κύβου. Δηλαδή:

$$AR = \frac{\partial}{\partial t}(cV) = V\frac{\partial c}{\partial t} = \Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial c}{\partial t} \tag{2.30}$$

Όλα τα παραπάνω ισχύουν με την προϋπόθεση ότι δεν δημιουργείται επιπλέον, ούτε αφαιρείται μάζα του ρύπου κατά την παρουσία του στην ατμόσφαιρα. Με δεδομένο ότι έχουμε ροή του ρύπου από τις 6 έδρες του κύβου μόνο λόγω τύρβης, αφού ο κύβος έχει την ίδια ταχύτητα με αυτή των καυσαερίων μπορούμε να κάνουμε την επόμενη παραδοχή: Ο ρυθμός ροής FR του ρύπου δια μέσου κάθε επιφάνειας ($\mathrm{g}/(\mathrm{s} \cdot \mathrm{m}^2)$) θα είναι ίσος με:

$$FR = -K\frac{\partial c}{\partial n} \tag{2.31}$$

όπου:

c: Η συγκέντρωση του ρύπου στον κύβο.

n: Η απόσταση στην θεωρούμενη διεύθυνση (δηλαδή x,y ή z).

K: Ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης *(turbulent dispersion coefficient).*

Το μείον στον τύπο σημαίνει ότι η ροή πραγματοποιείται από σημείο υψηλής συγκέντρωσης προς σημείο χαμηλότερης συγκέντρωσης. Σύμφωνα με τα παραπάνω η ροή μάζας MF του ρύπου δια μέσου των δύο επιφανειών, που έχουν εμβαδόν $\Delta x \Delta y$ η κάθε μια και είναι κάθετες στον άξονα x, θα είναι:

$$MF = \left[\left(-\frac{K\partial c}{\partial x}\right)_x - \left(-\frac{K\partial c}{\partial x}\right)_{x+\Delta x}\right]\Delta y \Delta z \tag{2.32}$$

Με τον ίδιο τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε την ροή μάζας και για τις άλλες 4 επιφάνειες. Το άθροισμα όλων των ροών μάζας ισούται με το ρυθμό συσσώρευσης μάζας στον υπό μελέτη κύβο. Επομένως έχουμε:

$$\Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial c}{\partial t} = \left[\left(-\frac{K\partial c}{\partial x}\right)_x - \left(-\frac{K\partial c}{\partial x}\right)_{x+\Delta x}\right]\Delta y \Delta z \tag{2.33}$$

$$+ \left[\left(-\frac{K\partial c}{\partial y}\right)_y - \left(-\frac{K\partial c}{\partial y}\right)_{y+\Delta y}\right]\Delta x \Delta z \tag{2.34}$$

$$+ \left[\left(-\frac{K\partial c}{\partial z}\right)_z - \left(-\frac{K\partial c}{\partial z}\right)_{z+\Delta z}\right]\Delta x \Delta y \tag{2.35}$$

Γνωρίζουμε όμως ότι:

$$\lim_{\Delta x \to 0} \frac{\left(K\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{x+\Delta x} - \left(K\frac{\partial c}{\partial x}\right)_x}{\Delta x} = K\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \tag{2.36}$$

Έτσι εάν θεωρήσουμε ότι ο κύβος μας είναι απειροστός και $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ τείνουν στο μηδέν η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = K\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + K\frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + K\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \tag{2.37}$$

Επιλύοντας αυτή την εξίσωση για 2 διαστάσεις έχουμε:

$$c = \frac{X}{4(\pi t)(K_x K_y)^{1/2}} exp\left[-\frac{1}{4t}(\frac{x^2}{K_x} + \frac{y^2}{K_y})\right] \tag{2.38}$$

όπου:

t: Ο χρόνος.

X: Η μάζα του ρύπου.

Εάν θεωρήσουμε αυτή την εξίσωση για την εκπομπή, που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.16, όπου το πλούμιο εκπέμπεται από ένα σημείο με συντεταγμένες 0,0,H_{ef}, όπου H_{ef}

το ενεργό ύψος πλουμίου, τότε η παραπάνω εξίσωση παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$c = \frac{Q/u}{4(\pi t)(K_y K_z)^{1/2}} exp\left[-\frac{1}{4t}\left(\frac{y^2}{K_y} + \frac{(z-H_{ef})^2}{K_z}\right)\right] \tag{2.39}$$

όπου:

Q: Ο ρυθμός εκπομπής του ρύπου από την καμινάδα.

u: Η ταχύτητα του ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου.

Κάνοντας στην παραπάνω εξίσωση τις ακόλουθες αντικαταστάσεις:

$$K_y = 0.5\sigma_y^2 \frac{u}{x} \tag{2.40}$$

$$K_z = 0.5\sigma_z^2 \frac{u}{x} \tag{2.41}$$

$$t = \frac{u}{x} \tag{2.42}$$

έχω:

$$c = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} exp\left[-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z-H_{ef})^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \tag{2.43}$$

η οποία είναι η βασική εξίσωση Gauss για την διασπορά του πλουμίου. Θέτοντας $\mathrm{t} = \frac{\mathrm{x}}{\mathrm{u}}$ αλλάξαμε σύστημα αναφοράς και μεταφερθήκαμε από αυτό του κινούμενου παρατηρητή (Lagrange) σε αυτό του ακίνητου (Euler). Έτσι ο άξονας x είναι προσανατολισμένος στην διεύθυνση του ανέμου, ο άξονας y είναι κάθετος στην διεύθυνση του ανέμου, ενώ ο z είναι κάθετος στο επίπεδο, που ορίζουν οι x, y (βλ. σχήμα 2.16). Τα σ_y, σ_z ορίζονται ως εξής:

σ_y: Τυπική απόκλιση της κατανομής της συγκέντρωσης κατά τον άξονα y σε απόσταση x από την πηγή. Αλλιώς ονομάζεται και παράμετρος οριζόντιας διασποράς *(lateral dispersion parameter)*.

σ_z: Τυπική απόκλιση της κατανομής της συγκέντρωσης κατά τον άξονα z σε απόσταση x από την πηγή. Αλλιώς ονομάζεται και παράμετρος κάθετης διασποράς *(vertical dispersion parameter)*.

Η εξίσωση 2.43 όμως δεν λαμβάνει υπόψη της την επίδραση του εδάφους στην κάθετη ανάπτυξη του πλουμίου [42, σελ.138]. Εάν δεχθούμε ότι οι ρύποι δεν απορροφώνται από το έδαφος όταν έρθουν σε επαφή με αυτό, τότε το πλούμιο ουσιαστικά ανακλάται κατά την πρόσκρουσή του στο έδαφος. Αυτό μοντελοποιείται ως μια νέα κατοπτρική πηγή σε απόσταση h_s κάτω από το έδαφος [71, σελ.48]. Η νέα εξίσωση Gauss θα είναι η ακόλουθη:

$$c = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\left[exp\left(-\frac{(H_{ef}-z)^2}{2\sigma_z^2}\right) + exp\left(-\frac{(H_{ef}+z)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \tag{2.44}$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι οι εξισώσεις 2.43, 2.44 έχουν μεγάλη ομοιότητα με την συνάρτηση της κανονικής κατανομής [232]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{(1/2)}} exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{2.45}$$

όπου μ η μέση τιμή και σ η τυπική απόκλιση της κατανομής. Η μορφή της συνάρτησης φαίνεται στο σχήμα 2.17. Στο σχήμα 2.18 μπορούμε να δούμε την εφαρμογή του μοντέλου Gauss στην μορφή του πλουμίου καθώς και την κατανομή της συγκέντρωσης των ρύπων.

2.2.4.2 Οι όροι της εξίσωσης Gauss και η φυσική τους σημασία

Μπορούμε να πούμε ότι η εξίσωση Gauss αποτελείται από 4 διαφορετικούς όρους, που ο καθένας έχει την δική του φυσική σημασία [192, σελ.2-5], [8, σελ.198]. Αυτοί είναι:

- Ο παράγοντας εκπομπής Q, ο οποίος έχει την ακόλουθη φυσική σημασία: Η συγκέντρωση ενός ρύπου στο υπό μελέτη σημείο είναι ανάλογη με την ποσότητα εκπομπής Q του ρύπου.

- Ο παράγοντας ταχύτητας ανέμου 1/u. Τα σημεία, που είναι παράλληλα με τον άξονα x έχουν συγκεντρώσεις αντιστρόφως ανάλογες με την ταχύτητα του ανέμου u.

- Ο παράγοντας ατμοσφαιρικής διασποράς κατά y.

$$\frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma_y} exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right]. \tag{2.46}$$

  Αυτός ο παράγοντας δείχνει ότι κατά μήκος του άξονα y η συγκέντρωση του ρύπου είναι σύμφωνη με την κανονική κατανομή (βλ. σχήμα 2.18). Η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης παρατηρείται στην κεντρική γραμμή του πλουμίου. Η συγκέντρωση επίσης είναι αντιστρόφως ανάλογη με την παράμετρο οριζόντιας διασποράς σ_y, η οποία αυξάνει όσο μεγαλώνει στον άξονα x η απόσταση από την πηγή.

- Ο κάθετος (κατά z) παράγοντας ατμοσφαιρικής διασποράς

$$\frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma_z}\left[exp\left(-\frac{(H_{ef}-z)^2}{2\sigma_z^2}\right) + exp\left(-\frac{(H_{ef}+z)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \tag{2.47}$$

  Ο συγκεκριμένος παράγοντας δείχνει ότι κατά μήκος του άξονα z η συγκέντρωση ακολουθεί κανονική κατανομή. Και εδώ η μέγιστη συγκέντρωση παρατηρείται στην κεντρική γραμμή του πλουμίου. Επίσης η συγκέντρωση είναι αντιστρό-

φως ανάλογη με την παράμετρο οριζόντιας διασποράς σ_z, η οποία αυξάνει, όσο μεγαλώνει στον άξονα x, η απόσταση από την πηγή.

2.2.4.3 Φυσική σημασία των σ_y, σ_z και τρόποι υπολογισμού τους

Τα σ_y και σ_z είναι οι τυπικές αποκλίσεις της κανονικής κατανομής. Εδώ χρησιμοποιούνται στην περιγραφή της διασποράς του πλουμίου και αυξάνουν με τον χρόνο και την απόσταση από την πηγή. Ο ρυθμός αύξησής τους εξαρτάται από τις μετεωρολογικές συνθήκες, που επικρατούν. Το σ_y είναι γενικά μεγαλύτερο από το σ_z καθώς στον άξονα y δεν υπάρχουν εμπόδια λόγω της θερμοκρασιακής δομής της ατμόσφαιρας [116, σελ.281].

Τα σ_y, σ_z επηρεάζονται κυρίως από την μηχανική και την θερμική τύρβη. Όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές των τελευταίων τόσο πιο γρήγορα αυξάνονται οι τιμές των σ_y, σ_z καθώς μεγαλώνει η απόσταση από την πηγή.

Τα σ_y, σ_z καθορίζουν το εύρος της γκαουσιανής κατανομής των ρύπων μέσα στο πλούμιο. Έτσι εάν οι τιμές τους αυξάνουν, η συγκέντρωση ενός ρύπου στην κεντρική γραμμή του πλουμίου θα μειώνεται. Παρόλα αυτά η συνολική ποσότητα του ρύπου στο πλούμιο θα παραμένει σταθερή. Περίπου τα 2/3 του πλουμίου θα βρίσκονται σε απόσταση $\pm\sigma$ από το κέντρο του, ενώ το 95% του πλουμίου θα βρίσκεται σε απόσταση $\pm 2\sigma$. Ως όριο του πλουμίου θεωρείται το σημείο όπου η συγκέντρωση του ρύπου γίνεται ίση με το 1/10 της συγκέντρωσης στην κεντρική γραμμή του πλουμίου [116, σελ.281].

Για τον προσδιορισμό των σ_y, σ_z με βάση την απόσταση την απόσταση από την πηγή καθώς και την ατμοσφαιρική ευστάθεια, που επικρατεί, οι Pasquil-Gifford ανέπτυξαν μια μεθοδολογία, η οποία βασίζεται σε πειραματικές μελέτες, τις οποίες βελτίωσε ο Briggs [139, σελ.242]. Οι σχετικές εξισώσεις καθώς και τα αντίστοιχα νομογραφήματα φαίνονται στον πίνακα 2.8 και στο σχήμα 2.19. Αυτές οι εξισώσεις μπορούν να εφαρμοστούν για αποστάσεις από 100m έως και 30km από την πηγή. Στην πράξη εφαρμόζονται με επιτυχία και για μεγαλύτερες αποστάσεις αλλά ελοχεύει ο κίνδυνος να εισχωρήσουν σφάλματα [8, σελ. 206].

2.2.4.4 Προϋποθέσεις και παραδοχές του γκαουσιανού μοντέλου

Πολλές παραδοχές και προσεγγίσεις γίνονται κατά την μελέτη διασποράς ρύπων με την βοήθεια μοντέλων Gauss. Παρακάτω αναπτύσσονται οι σημαντικότερες [8, σελ.198]:

1. Η εκπομπή από την πηγή είναι συνεχής με σταθερό ρυθμό για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο ή ίσο του χρόνου, που κάνει ο ρύπος για να φθάσει από την πηγή στο σημείο υπολογισμού. Η εξίσωση Gauss υπολογίζει μέσες τιμές συγκεντρώσεων. Αντίθετα αδυνατεί να κάνει υπολογισμούς για στιγμιαίες τιμές και γι' αυτό

οι περίοδοι υπολογισμού πρέπει να έχουν τουλάχιστον διάρκεια 10 λεπτά με καταλληλότερο διάστημα αυτό της μιας ώρας. Στο σχήμα 2.20 βλέπουμε την μορφή του πλουμίου για την περίπτωση της στιγμιαίας όσο και της έκθεσης, που διαρκεί κάποιο χρονικό διάστημα.

2. Οι μετεωρολογικές συνθήκες να είναι σταθερές για το διάστημα υπολογισμού.

3. Διατήρηση της μάζας στο πλούμιο. Δεχόμαστε δηλαδή ότι δεν αφαιρούνται ρύποι από το πλούμιο με χημικές αντιδράσεις, βαρυτική επικάθηση ή εναπόθεση στην επιφάνεια του εδάφους. Επίσης η ποσότητα των ρύπων, που προσκρούει στο έδαφος ανακλάται πλήρως εκ νέου στην ατμόσφαιρα.

4. Η διάχυση των ρύπων στην διεύθυνση x θεωρείται αμελητέα. Υπολογίζεται όμως η μεταφορά των ρύπων σε αυτή την διεύθυνση λόγω του ανέμου.

2.3 Η εναπόθεση των σωματιδίων

Είδαμε μέχρι τώρα τις εξισώσεις, που διέπουν την διασπορά του πλουμίου μετά την έξοδο του από την πηγή. Θα δούμε παρακάτω τους νόμους, που καθορίζουν την αφαίρεση σωματιδίων από το πλούμιο και την εναπόθεση τους στο έδαφος. Για την περίπτωσή μας τα παραπάνω έχουν μεγάλη σημασία αφού στο πλούμιο, που εκπέμπεται από τους ΑΗΣ Μεγαλόπολης, βρίσκονται σωματίδια ιπτάμενης τέφρας, τα οποία είναι πλούσια σε φυσικά ραδιενεργά ισότοπα.

2.3.1 Η ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης V_d

Ο όρος *ξηρή εναπόθεση (dry deposition)* αναφέρεται στην μεταφορά ύλης (σωματίδια ή αέρια) από την ατμόσφαιρα προς την επιφάνεια της γής, συμπεριλαμβανομένων των φυτών και των υγρών επιφανειών [8, κεφ.4]. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια: Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την μεταφορά του υλικού-ρυπαντή δια μέσου του επιφανειακού ατμοσφαιρικού στρώματος μέχρι ένα πολύ λεπτό στρώμα ακίνητου αέρα σχεδόν επάνω στην επιφάνεια εναπόθεσης. Ο μηχανισμός, που είναι υπεύθυνος γι' αυτό είναι η τυρβώδης διάχυση. Το δεύτερο στάδιο είναι η διάχυση τύπου Brown για τα σωματίδια (ή μοριακή για τα αέρια) μέσα στο ημι-στρωτό *(quasi-laminar)* στρώμα αέρα μέχρι την επιφάνεια εναπόθεσης. Τέλος, ακολουθεί η απορρόφηση των σωματιδίων ή του αερίου από την επιφάνεια. Καθένα από αυτά τα βήματα συμβάλλει στην τιμή της ταχύτητας ξηρής εναπόθεσης V_d. Αυτό το μέγεθος δεν είναι 'πραγματική' ταχύτητα αλλά ονομάζεται έτσι λόγω των διαστάσεών του [212, σελ.249] και ορίζεται ώς εξής:

Η *ροή εναπόθεσης* F *του ρυπαντή (pollutant deposition flux)* $(\mathrm{gm^{-2}s^{-1}})$ είναι ανάλογη με την συγκέντρωση του C σε κάποιο ύψος αναφοράς πάνω από την επιφάνεια (π.χ. $10\,\mathrm{m}$). Η σταθερά αναλογίας ανάμεσα στα δύο μεγέθη έχει διαστάσεις ταχύτητας και είναι γνωστή ως ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης $\mathrm{V_d}$.

$$F = -V_d \cdot C \tag{2.48}$$

Επειδή η συγκέντρωση C του ρυπαντή είναι συνάρτηση του ύψους z από το έδαφος και η $\mathrm{V_d}$ επομένως εξαρτάται από το z και πρέπει να ορίζεται σε σχέση με ένα ύψος αναφοράς στο οποίο υπολογίζεται το C. Κατά σύμβαση η ροή εναπόθεσης του ρυπαντή είναι αρνητική έτσι ώστε η $\mathrm{V_d}$ να είναι θετική για τον ρυπαντή που αποτίθεται [169, σελ.959].

Το πλεονέκτημα με την ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης είναι ότι όλη η πολυπλοκότητα του φαινομένου της ξηρής εναπόθεσης συγκεντρώνεται σε μία παράμετρο, την $\mathrm{V_d}$. Αυτό όμως συνεπάγεται ότι είναι πολύ δύσκολο να την ορίσουμε με ακρίβεια εξαιτίας των πολλών φυσικών και χημικών διεργασιών, που λαμβάνουν μέρος. Αποδείχθηκε χρήσιμο να ορίζεται το φαινόμενο της εναπόθεσης με όρους ανάλογους μιας ηλεκτρικής αντίστασης, όπου η μεταφορά του ρυπαντή στην επιφάνεια καθορίζεται από τρεις εν σειρά αντιστάσεις (βλ. σχήμα 2.21)

- την αεροδυναμική αντίσταση $\mathrm{r_a}$.
- την αντίσταση $\mathrm{r_b}$ στο ημι-στρωτό στρώμα γειτονικά της επιφάνειας εναπόθεσης.
- την αντίσταση επιφανείας ή 'φυλλωσιάς' $\mathrm{r_c}$.

Η ολική αντίσταση εναπόθεσης $\mathrm{r_t}$ για αέριο ρυπαντή είναι το άθροισμα των τριών αντιστάσεων και συνεπώς η αντίστροφη της ταχύτητας εναπόθεσης.

$$V_d^{-1} = r_t = r_a + r_b + r_c \tag{2.49}$$

Για την περίπτωση εναπόθεσης σωματιδίου, που έχει ταχύτητα $\mathrm{V_g}$ λόγω βαρύτητας, και δεχόμενοι ότι το σωματίδιο προσκολλάται στην επιφάνεια με επαφή οπότε $\mathrm{r_c} = 0$, αποδεικνύεται ότι:

$$V_d = \frac{1}{r_t} = \frac{1}{r_a + r_b + r_a r_b V_g} + V_g \tag{2.50}$$

Δηλαδή η ταχύτητα εναπόθεσης σωματιδίων μπορεί να ορισθεί ως η αντίστροφη τιμή τριών αντιστάσεων σε σειρά $(\mathrm{r_a}, \mathrm{r_b}$ and $\mathrm{r_a r_b V_g})$ και μιας παράλληλα $(1/\mathrm{V_g})$. Η $\mathrm{r_a r_b V_g}$ δεν αντιπροσωπεύει κάποιο φυσικό μέγεθος αλλά είναι προϊόν των μαθηματικών υπολογισμών. Για περισσότερα σχετικά με τον αναλυτικό υπολογισμό της $\mathrm{V_d}$ ο αναγνώστης μπορεί να δεί τις σελ. 961-969 των Seinfeld and Pandis [169]. Επίσης γενικά για την

ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης μπορεί να δει επίσης τις εργασίες των Baklanov and Aloyan [12], Burden [21] και Schnoor [164].

Σχετικά τώρα με το ημι-στρωτό *(quasi-laminar)* στρώμα πλησίον της επιφάνειας εναπόθεσης ξέρουμε ότι η αντίσταση στην κίνηση μέσα σε αυτό εξαρτάται από τις μοριακές ιδιότητες των σωματιδίων και της επιφάνειας εναπόθεσης. Το εν λόγω στρώμα δεν αντιστοιχεί σε στρωτό οριακό στρώμα με την κλασσική έννοια της ρευστομηχανικής. Το βάθος του ημι-στρωτού στρώματος αλλάζει συνεχώς και εξαρτάται από τις τυρβώδεις διατμητικές τάσεις *(turbulent shear stresses)* στην επιφάνεια εναπόθεσης. Η μεταφορά μέσα στο ημι-στρωτό στρώμα γίνεται ανεξάρτητα από την διεύθυνση αφού η μοριακή καθώς και η διάχυση Brown, που είναι τα κυρίαρχα φαινόμενα μεταφοράς, πραγματοποιούνται προς όλες τις κατευθύνσεις, έχουν δηλαδή την ίδια αντίσταση κίνησης είτε το σωματίδιο κινείται προς τα επάνω είτε κινείται προς τα κάτω. Μπορούν επομένως να πραγματοποιηθούν στην κάτω μεριά ενός φυλλώματος με την ίδια ευκολία, που πραγματοποιούνται στην επάνω επιφάνεια του [169, σελ. 963][136, σελ.590].

Όσον αφορά στους μηχανισμούς της ξηρής εναπόθεσης, αυτοί είναι πολύ πολύπλοκοι και επηρεάζονται κυρίως από τους μικρομετεωρολογικούς παράγοντες, που επικρατούν στο σημείο εναπόθεσης, καθώς και τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των ρυπαντών και της επιφάνειας εναπόθεσης. Στον πίνακα 2.9 παρουσιάζονται οι πιο σημαντικοί παράγοντες για την εναπόθεση τόσο των σωματιδίων όσο και των αερίων.

Οι μικρομετεωρολογικοί παράγοντες επηρεάζουν την κίνηση του ρυπαντή μέσα στο επιφανειακό στρώμα. Από τους παραπάνω ο πιο σημαντικός είναι η ταχύτητα τριβής *(friction velocity)*. Μάλιστα έχει βρεθεί ότι η ταχύτητα τριβής και ο ρυθμός εναπόθεσης σχετίζονται σημαντικά [8, σελ.229]. Επίσης η ατμοσφαιρική ευστάθεια είναι άλλος ένας σημαντικός παράγοντας καθώς από αυτήν εξαρτάται η τύρβη στο επιφανειακό στρώμα και επομένως και η ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης. Η υγρασία και η θερμοκρασία του ανέμου επηρεάζουν την χημική ενεργότητα *(chemical reactivity)* των ρυπαντών. Ακόμη άλλες ιδιότητες όπως η υγροσκοπικότητα και η διαλυτότητα καθορίζουν εάν τα σωματίδια θα προσκολληθούν σε μια υγρή επιφάνεια εναπόθεσης και δεν θα ξαναγυρίσουν στην ατμόσφαιρα. Σημαντικό ρόλο στην συγκράτηση των σωματιδίων στην επιφάνεια παίζουν και οι ηλεκτροστατικές ιδιότητες τόσο των ρυπαντών όσο και της επιφάνειας.

Επίσης ρόλο παίζει το σχήμα των φυλλωμάτων, που πιθανόν να υπάρχουν στην επιφάνεια εναπόθεσης. Έτσι π.χ. η ταχύτητα εναπόθεσης μπορεί να αλλάξει όταν πνέουν ισχυροί άνεμοι, οι οποίοι μετακινούν και παραμορφώνουν τα φυλλώματα. Η μορφή του φυλλώματος παίζει και έναν επιπλέον ρόλο καθώς αυξάνει την επιφάνεια εναπόθεσης σε σχέση με μια 'γυμνή' επιφάνεια. Ένα θέμα, που δεν έχει ερευνηθεί επαρκώς ακόμη είναι το κατά πόσο τα σωματίδια μπορούν να 'διαπεράσουν' την φυλλωσιά και να επικαθήσουν στην επιφάνεια. Το ποσοστό των σωματιδίων που θα καταφέρουν να

επικαθήσουν στην επιφάνεια κάτω από τα φυλλώματα εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου, την διάμετρο του σωματιδίου και την μορφή του φυλλώματος [166, σελ. 998].

Για τα σωματίδια όμως, τα οποία μας ενδιαφέρουν ιδιαίτερα, ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι το μέγεθός τους [169, σελ.969]. Τα σωματίδια μεταφέρονται με τον μηχανισμό της τυρβώδους διάχυσης προς την επιφάνεια εναπόθεσης. Για τα μεγαλύτερα σωματίδια το φαινόμενο αυτό εντείνεται λόγω των βαρυτικών δυνάμεων, που αναπτύσσονται σε αυτά.Κατά μήκος του ημι-στρωτού στρώματος *(quasi-laminar layer)* τα πολύ μικρά σωματίδια (<0.05 μm) υπακούουν κυρίως στον μηχανισμό της διάχυσης Brown, που είναι ανάλογος με την μοριακή διάχυση των αερίων.

Η επίδραση της διαμέτρου των σωματιδίων στην ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης φαίνεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 2.22. Παρατηρούμε λοιπόν ότι η ταχύτητα εναπόθεσης παρουσιάζει ένα ελάχιστο για διαμέτρους 0.1-1 μm. Ο λόγος για αυτό το φαινόμενο είναι ότι τα πολύ μικρά σωματίδια συμπεριφέρονται κυρίως σαν αέρια και κινούνται ευκολότερα χάρη στην διάχυση Brown. Τα σχετικά μεγαλύτερα σωματίδια με διαμέτρους 2-20 μm έχουν επίσης υψηλές ταχύτητες εναπόθεσης λόγω αδρανειακών συγκρούσεων *(inertial impaction)*, ενώ και τα σωματίδια με διαμέτρους μεγαλύτερες από $20\,\mu$m αποκτούν υψηλές ταχύτητες εναπόθεσης λόγω των βαρυτικών δυνάμεων. Βλέπουμε έτσι ότι για τα σωματίδια με διαμέτρους 0.05-2 μm δεν υπάρχει κάποιος κυρίαρχος μηχανισμός εναπόθεσης με αποτέλεσμα αυτά τα σωματίδια να παρουσιάζουν μικρότερες ταχύτητες με αποτέλεσμα να παραμένουν στην ατμόσφαιρα μερικές φορές ακόμα και για μέρες εκτός εάν παρασυρθούν από σταγονίδια βροχής.

2.3.2 Η ταχύτητα βαρυτικής επικάθησης $\mathrm{V_g}$

Η *ταχύτητα βαρυτικής επικάθησης (gravitational settling velocity* $\mathrm{V_g}$*)* του σωματιδίου είναι η ταχύτητα, που προκάλειται από την δράση των βαρυτικών δυνάμεων [169, σελ.465]. Για σφαιρικά σωματίδια η τιμή της δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$V_g = \frac{\rho d_p^2\, gC}{18n} \tag{2.51}$$

όπου:

ρ: η πυκνότητα σωματιδίου

$\mathrm{d_p}$: η διάμετρος του σωματιδίου

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας

n: η δυναμική συνεκτικότητα του αέρα ($1.8 \cdot 10^{-4}\ gsec^{-1}cm^{-1}$)

C: ο συντελεστής διόρθωσης για μικρά σωματίδια, ο οποίος υπολογίζεται ως εξής:

$$C = 1 + \frac{2\lambda}{d_p}\left(1.257 + 0.4\exp\left(\frac{-0.55 d_p}{\lambda}\right)\right) \tag{2.52}$$

όπου λ η μέση ελεύθερη διαδρομή των σωματιδίων του αέρα, η οποία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, της πίεσης και του ιξώδους του αέρα. Οι Seinfeld and Pandis [169, σελ.478] προτείνουν μια μεθοδολογία για τον υπολογισμό της μέσης ελεύθερης διαδρομής, ενώ επίσης παρέχουν και έναν πίνακα με τιμές του C σε συνάρτηση με την διάμετρο του σωματιδίου (βλ. πίνακα 2.10).

2.4 Υπολογιστικά μοντέλα ατμοσφαιρικής διασποράς ρύπων

2.4.1 Γενικά

Η μελέτη της ατμοσφαιρικής διασποράς των ρύπων στην ατμόσφαιρα πραγματοποιείται πλέον με την βοήθεια κωδίκων (μοντέλων), οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τους τα φαινόμενα, που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Έτσι είναι πλέον δυνατή η μοντελοποίηση και η μελέτη της διασποράς ρύπων για εκτεταμένες περιοχές και με αρκετή λεπτομέρεια, πράγμα το οποίο δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί πριν την εκτεταμένη διάδοση των υπολογιστών και την ανάπτυξη των σχετικών μοντέλων. Μάλιστα με την υπολογιστική δύναμη, που διατίθεται σήμερα είναι δυνατόν να προσομοιωθούν πολύ περίπλοκα φαινόμενα της διασποράς των ρύπων στην ατμόσφαιρα. Μια μικρή αναφορά σχετικά με τους κώδικες διασποράς για ραδιενεργά ισότοπα μπορεί να δει κανείς στη βιβλιογραφία Napier [126].

2.4.2 Εφαρμογές μοντέλων ατμοσφαιρικής διασποράς στον διεθνή και στον ελληνικό χώρο

Η χρήση τέτοιων μοντέλων στην διεθνή βιβλιογραφία ειδικά για συμβατικούς ρύπους είναι πολυάριθμη και δεν χρειάζεται ιδιαίτερη αναφορά. Εφαρμόζονται είτε για μικρά χρονικά διαστήματα (*Short term dispersion models*), είτε για μεγάλα (*Long term dispersion models*).Τα πρώτα χρησιμοποιούνται για έκτακτα επεισόδια ρύπανσης και τα δεύτερα για σχετικά ομοιόμορφες εκπομπές σε σχετικά μεγάλα χρονικά διαστήματα (π.χ. 1 έτος).

Όσον αφορά στους ραδιενεργούς ρύπους παραθέτουμε τις εργασίες των Quelo et al. [153] και Shinohara [171]. Η πρώτη αφορά σε προσομοίωση διασποράς ραδιενεργού νέφους μετά από ατυχήμα σε πυρηνικό σταθμό παραγωγής ενέργειας με μοντέλο μικρής διάρκειας, ενώ το δεύτερο είναι εφαρμογή μοντέλου μακράς διάρκειας σε εκπομπές από σταθμό επεξεργασίας πυρηνικών καυσίμων στην Ιαπωνία. Σχετικά τώρα με την μελέτη διασποράς φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων από τις καμινάδες ατμοηλεκτρικών σταθμών ο αναγνώστης μπορεί να δει τις δημοσιεύσεις των M.Alvarez and L.

Garzon [3] καθώς και των Zeevaert et al. [213].

Στην Ελλάδα έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν μελέτες και εκτελέσεις μοντέλων διασποράς ρύπων στην ατμόσφαιρα από καμινάδες ατμοηλεκτρικών σταθμών. Οι εκτελέσεις αυτές αφορούσαν διασπορά συμβατικών ρύπων όπως SO_2 και NO_x. Στην περιοχή της Πτολεμαΐδας [227] και στον ατμοηλεκτρικό σταθμό της περιοχής του Αθερινόλακου του Νομού Λασιθίου [226] χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα μεγάλης χρονικής περιόδου (*long term*) που ήταν στηριγμένα στις εξίσωσεις Gauss και Navier-Stokes. Για την περιοχή της Πτολεμαΐδας πραγματοποιήθηκαν και πειραματικές μελέτες, όπου μετρήθηκαν με διάφορους τρόπους οι τιμές των συμβατικών ρύπων. Για περισσότερα ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην βιβλιογραφία [234], [233] και [227].

Μελέτη της διασποράς συμβατικών ρύπων στην ατμόσφαιρα έχει πραγματοποιηθεί και στην περιοχή της Μεγαλόπολης αλλά μόνο για τις μονάδες I, II, III. Η μονάδα IV δεν λήφθηκε υπόψη. Η προσομοίωση της διασποράς των συμβατικών ρύπων έγινε με μοντέλο βασισμένο στις εξισώσεις Lagrange, το οποίο ήταν μικρής χρονικής περιόδου (*short term*) και εκτελέστηκε για 12 επιλεγμένες μέρες, ενώ πραγματοποιήθηκε και σύγκριση των τιμών του SO_2, που παρείχε το μοντέλο με πειραματικές τιμές [39].

Για τους ΑΗΣ της περιοχής της Πτολεμαΐδας πραγματοποιήθηκε μελέτη της διασποράς ραδιενεργών ρύπων με βάση το μοντέλο Valey στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής της Μ.Μανωλοπούλου [225]. Οι εκτελέσεις πραγματοποιήθηκαν για τα ισότοπα ^{238}U, ^{226}Ra, ^{210}Pb. Το εύρος των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων παρατίθεται ακολούθως:

- ^{238}U: 9-2085 μBq/m^3
- ^{226}Ra: 3-611 μBq/m^3
- ^{210}Pb: 5-1146 μBq/m^3

Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω διαπιστώνουμε ότι η παρούσα ΔΔ παρουσιάζει αρκετά μεγάλη χρησιμότητα, διότι οι μελέτες διασποράς ραδιενεργών ρύπων από ΑΗΣ στον ελληνικό χώρο είναι πολύ περιορισμένες. Μάλιστα για τους ΑΗΣ της περιοχής της Μεγαλόπολης δεν έχει πραγματοποιηθεί ξανά στο παρελθόν τέτοια μελέτη.

Πίνακες Κεφαλαίου

Ερευνητής	*Τοποθεσία*	*Ημ/νια*	*Ειδική Ραδιενέργεια* (Bqkg^{-1})				
			^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb	^{232}Th	^{40}K
Papastefanou et al. [143]	Καρδιά	1980	422	241	-	1	-
΄΄΄	Αλιβέρι	΄΄΄	296	133	-	1	-
΄΄΄	Μεγαλόπολη	΄΄΄	433	118	-	1	-
΄΄΄	Σέρρες	΄΄΄	1306	414	-	1	-
΄΄΄	Βεύη	΄΄΄	-	311	-	1	-
Δανάλη-Κωτσάκη [218]	Πτολεμαΐδα	1979	-	12.21	-	-	-
΄΄΄	Μεγαλόπολη	1980	-	146.52	-	-	-
΄΄΄	Αλιβέρι	1980	-	140.71	-	-	-
΄΄΄	Μεγαλόπολη	1980	-	405.15	-	-	-
΄΄΄	Πτολεμαΐδα	1982	-	76.96	-	-	-
΄΄΄	Καρδιά	1982	-	176.12	-	-	-
Simopoulos et al. [173]	Πτολεμαΐδα IV	1986	-	83	-	15	78
΄΄΄	Καρδιά I	΄΄΄	-	175	-	16	68
΄΄΄	Μεγαλόπολη I	1987	-	314	-	21	181
΄΄΄	Μεγαλόπολη III	1987	-	321	-	21	191
Manolopoulou et al. [119]	Καρδιά	1992	281	175	162	13	79
΄΄΄	Πτολεμαΐδα	΄΄΄	173	105	110	18	113
΄΄΄	Αγ. Δημήτριος	΄΄΄	345	160	160	13	71
΄΄΄	Αμύνταιο	΄΄΄	171	92	102	29	41.6
Karangelos et al. [97]	Μεγαλόπολη IV	2004	306	346	361	19	173

Πίνακας 2.1: Μετρήσεις ειδικής ραδιενέργειας στον λιγνίτη στον ελληνικό χώρο

Ερευνητής	*Χώρα*	*Ημ/νια*	*Ειδική Ραδιενέργεια* (Bqkg^{-1})				
			^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb	^{232}Th	^{40}K
Coles et al. [34]	ΗΠΑ	1978	8.88	7.77	9.62	6.29	27.01
Chang et al. [26]	Ταϊβάν	1982	18.5	-	-	33.3	303.4
Salmon et al. [161]	Αγγλία	1984	14.1	14.5	-	11.75	150
Tracy et al. [190]	Καναδάς	1985	12.4	12.4	12.4	7.5	26.4
Roeck et al. [155]	ΗΠΑ	1987	355.2	355.2	355.2	40.7	-
Alvarez et al. [3]	Ισπανία	1989	26	-	-	22	300
Weng et al. [207]	Ταϊβαν	1992	29	25	24	21	233
Tso et al. [191]	Χονγκ-Κονγκ	1996	-	17	-	-	24
Aycik et al. [10]	Τουρκία	1997	-	350	-	-	11
Bem et al. [17]	Πολωνία	2002	19.8	16.2	19.8	13.1	133.7
Mandal et al. [118]	Ινδία	2003	37.2	-	-	47.8	-
Mishra [125]	Ινδία	2004	-	24.1	-	-	82.5

Πίνακας 2.2: Μετρήσεις ειδικής ραδιενέργειας στους γαιάνθρακες διεθνώς

Ερευνητής	*Χώρα*	*Ημ/νια*	*Ειδική Ραδιενέργεια* (Bqkg^{-1})				
			^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb	^{232}Th	^{40}K
Coles et al. [34]	ΗΠΑ	1978	55.5	70.3	21.46	55.5	251.6
Chang et al. [26]	Ταϊβάν	1982	96.2	-	-	118.4	947.2
Tracy et al. [190]	Καναδάς	1985	91	91	91	61	245
Weng et al. [207]	Ταϊβάν	1992	136	140	19	-	509
Tso et al. [191]	Χονγκ Κονγκ	1996	-	100	-	105	132
Aycik et al. [10]	Τουρκία	1997	-	590	-	-	22
Bem et al. [17]	Πολωνία	2002	58	55.7	26.1	46.3	432.2
Mishra [125]	Ινδία	2004	-	88.8	-	-	373.8

Πίνακας 2.3: Μετρήσεις ειδικής ραδιενέργειας στην υγρή τέφρα διεθνώς

Ερευνητής	*Τοποθεσία*	*Ημ/νια*	*Ειδική Ραδιενέργεια* (Bqkg^{-1})				
			^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb	^{232}Th	^{40}K
Δανάλη-Κωτσάκη [218]	Μεγαλόπολη	1980	-	903.54	-	-	-
΄΄΄΄	Αλιβέρι	1980	-	510.97	-	-	-
΄΄΄΄	Μεγαλόπολη	1980	-	2145.63	-	-	-
΄΄΄΄	Πτολεμαΐδα	1982	-	563.51	-	-	-
΄΄΄΄	Καρδιά	1982	-	517.63	-	-	-
Simopoulos et al. [173]	Πτολεμαΐδα IV	1986	-	114	-	24	137
΄΄΄΄	Καρδιά I	΄΄΄΄	-	363	-	36	200
΄΄΄΄	Μεγαλόπολη I	1987	-	546	-	44	406
΄΄΄΄	Μεγαλόπολη III	΄΄΄΄	-	587	-	44	423
Karangelos et al. [97]	Μεγαλόπολη IV	2004	681	662	275	44	405

Πίνακας 2.4: Μετρήσεις ειδικής ραδιενέργειας στην υγρή τέφρα στον ελληνικό χώρο

Ερευνητής	*Χώρα*	*Ημ/νια*	*Ειδική Ραδιενέργεια* (Bqkg^{-1})				
			^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb	^{232}Th	^{40}K
Coles et al. [34]	ΗΠΑ	1978	70.3	85.1	51.8	62.9	299.7
Chang et al. [26]	Ταϊβάν	1982	99.9	-	-	107.3	884.3
Tracy et al. [190]	Καναδάς	1985	92	-	-	58	204
Lalit et al. [110]	Ινδία	1986	345.2	788.1	-	-	488
Roeck et al. [155]	ΗΠΑ	1987	1369	703	3959	99.9	-
Alvarez et al. [3]	Ισπανία	1989	90	-	-	91	-
Weng et al. [207]	Ταϊβάν	1992	216	143	359	-	572
Tso et al. [191]	Χονγκ Κονγκ	1996	-	140	-	-	178
Aycik et al. [10]	Τουρκία	1997	-	630	-	-	17
Bem et al. [17]	Πολωνία	2002	116.4	85.6	112.4	66.4	608.4
Mandal et al. [118]	Ινδία	2003	103.1	-	-	141.4	-
Mishra [125]	Ινδία	2004	-	77.7	-	-	373.8

Πίνακας 2.5: Μετρήσεις ειδικής ραδιενέργειας στην ιπτάμενη τέφρα διεθνώς

Ερευνητής	*Τοποθεσία*	*Ημ/νια*	*Ειδική Ραδιενέργεια* ($\mathrm{Bqkg^{-1}}$)				
			^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb	^{232}Th	^{40}K
Δανάλη-Κωτσάκη [218]	Πτολεμαΐδα	1979	-	391.4	-	-	-
'''	Μεγαλόπολη	1980	-	915.7	-	-	-
'''	Αλιβέρι	1980	-	680.8	-	-	-
'''	Μεγαλόπολη	1980	-	1828.9	-	-	-
'''	Πτολεμαΐδα	1982	-	587.9	-	-	-
'''	Καρδιά	1982	-	985.3	-	-	-
Papastefanou et al. [142]	Καρδία, προθ/ρας	1984	340.4	192.4	-	-	-
'''	''' ESP A	'''	481	336.7	-	-	-
'''	''' ESP B	'''	640.1	499.5	-	-	-
Simopoulos et al. [173]	Πτολεμαΐδα IV	1986	-	261.19	-	45	251
'''	Καρδιά I	'''	-	600	-	49	217
'''	Μεγαλόπολη I	1987	-	807	-	55	449
'''	Μεγαλόπολη III	'''	-	845	-	56	502
Manolopoulou et al. [119]	Καρδιά	1992	642	463	352	40	237
'''	Πτολεμαΐδα	'''	358	257	230	51	313
'''	Αγ. Δημήτριος	'''	793	592	379	50	270
'''	Αμύνταιο	'''	274	153	140	60	367
Karangelos et al. [97]	Μεγαλόπολη IV	2004	964	904	1158	53	454

Πίνακας 2.6: Μετρήσεις ειδικής ραδιενέργειας στην ιπτάμενη τέφρα στον ελληνικό χώρο

ταχ. ανέμου $msec^{-1}$	*ηλιοφάνεια*			*νυχτερινές συνθήκες*	
	ισχυρή	μέση	ελαφρά	νέφωση $> 4/8$	νέφωση $\leq 3/8$
< 2	A	A-B	B		
2-3	A-B	B	C	E	F
3-4	B	B-C	C	D	E
4-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Πίνακας 2.7: Πίνακας εκλογής κατηγορίας ατμοσφαιρικής ευστάθειας κατά P-G

Ευστάθεια	$\sigma_y(m)$	$\sigma_z(m)$
A	$0.22x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.20x$
B	$0.16x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.12x$
C	$0.11x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1+0.0002x)^{-1/2}$
D	$0.08x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1+0.0015x)^{-1/2}$
E	$0.06x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x(1+0.0003x)^{-1}$
F	$0.04x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.016x(1+0.0003)^{-1}$

Πίνακας 2.8: Εξισώσεις υπολογισμού των σ_y και σ_z για ανοιχτή ύπαιθρο. Όπου x η απόσταση από την πηγή. Πηγή :[139]

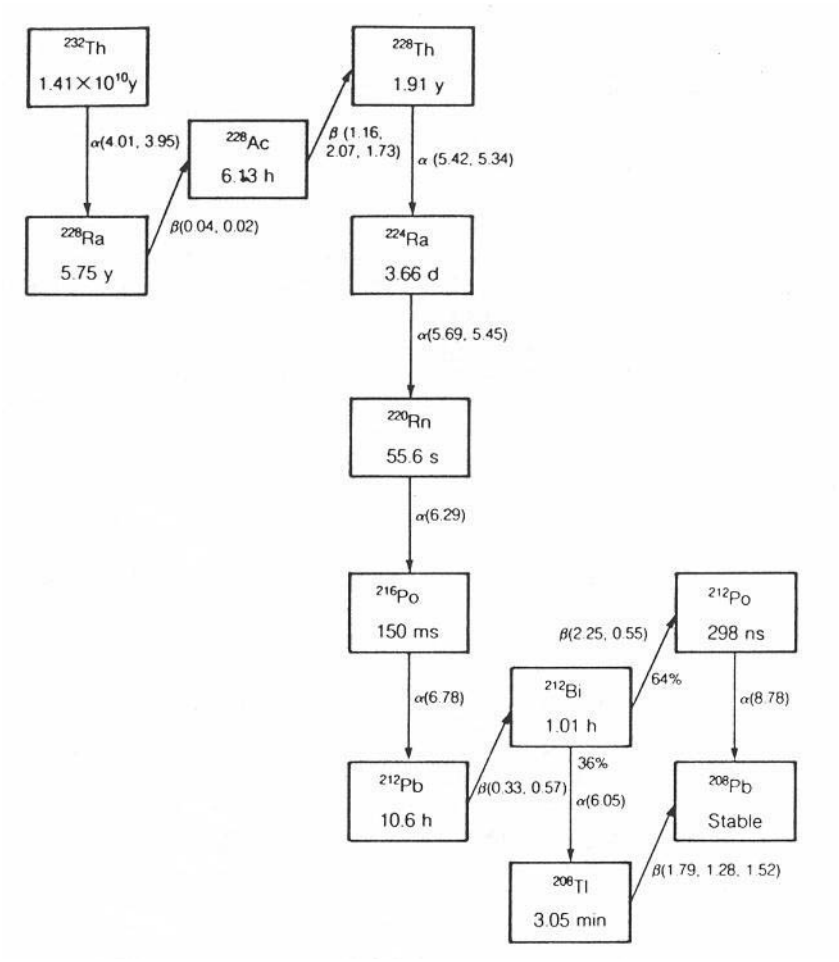
κατηγορία παραγόντων	Παράγοντες
Μετεωρολογικοί παράγοντες	ταχύτητα ανέμου, ταχύτητα τριβής, ατμοσφαιρική ευστάθεια, τύρβη, θερμ. αέρα, σχετική υγρασία, ροή θερμότητας
Αέρια	χημική ενεργότητα, μοριακή διαχυση, μερική πίεση, διαλυτότητα
Σωματίδια	διάμετρος, σχήμα, πυκνότητα, συντελεστής διάχυσης, υγροσκοπικότητα, διαλυτότητα, ηλ/στατικά φαινόμενα
Επιφάνεια εναπόθεσης	τραχύτητα, υγρασία, ύψος φυλλώματος, μορφή φυλλώματος, απορροφητικότητα, πορώδες, ηλ/στατικές ιδιότητες

Πίνακας 2.9: Παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης

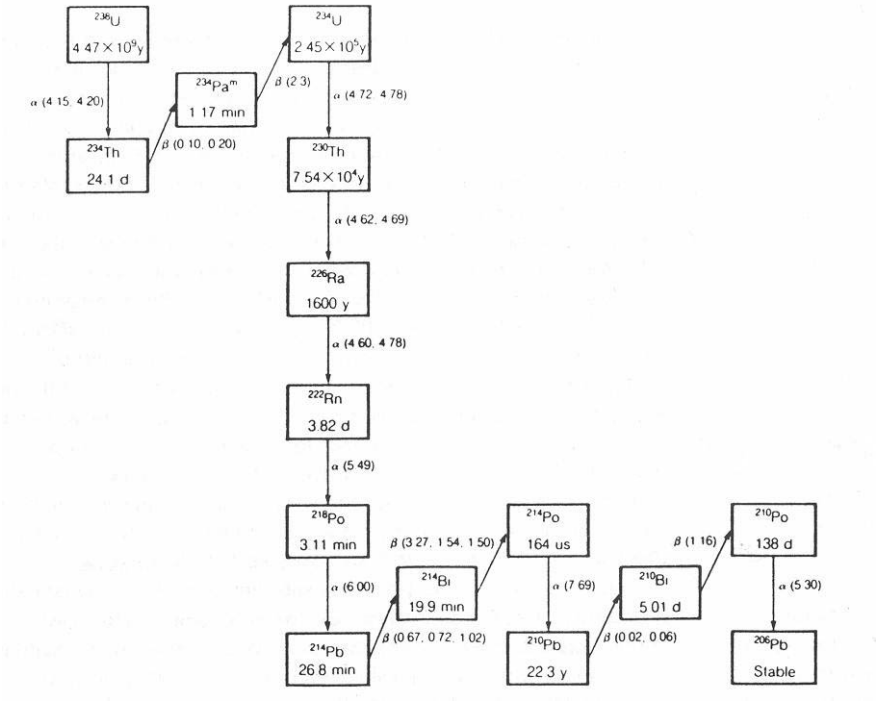
$d_p(\mu m)$	0.4	1.0	2.0	4.0	10.0	20.0
$\lambda(\mu m)$	$1.21 \cdot 10^{-2}$	$1.53 \cdot 10^{-2}$	$2.06 \cdot 10^{-2}$	$2.8 \cdot 10^{-2}$	$4.32 \cdot 10^{-2}$	$6.08 \cdot 10^{-2}$

Πίνακας 2.10: Τιμές της μέσης ελεύθερης διαδρομής λ σε σχέση με την διάμετρο του σωματιδίου. Πηγή :[169]

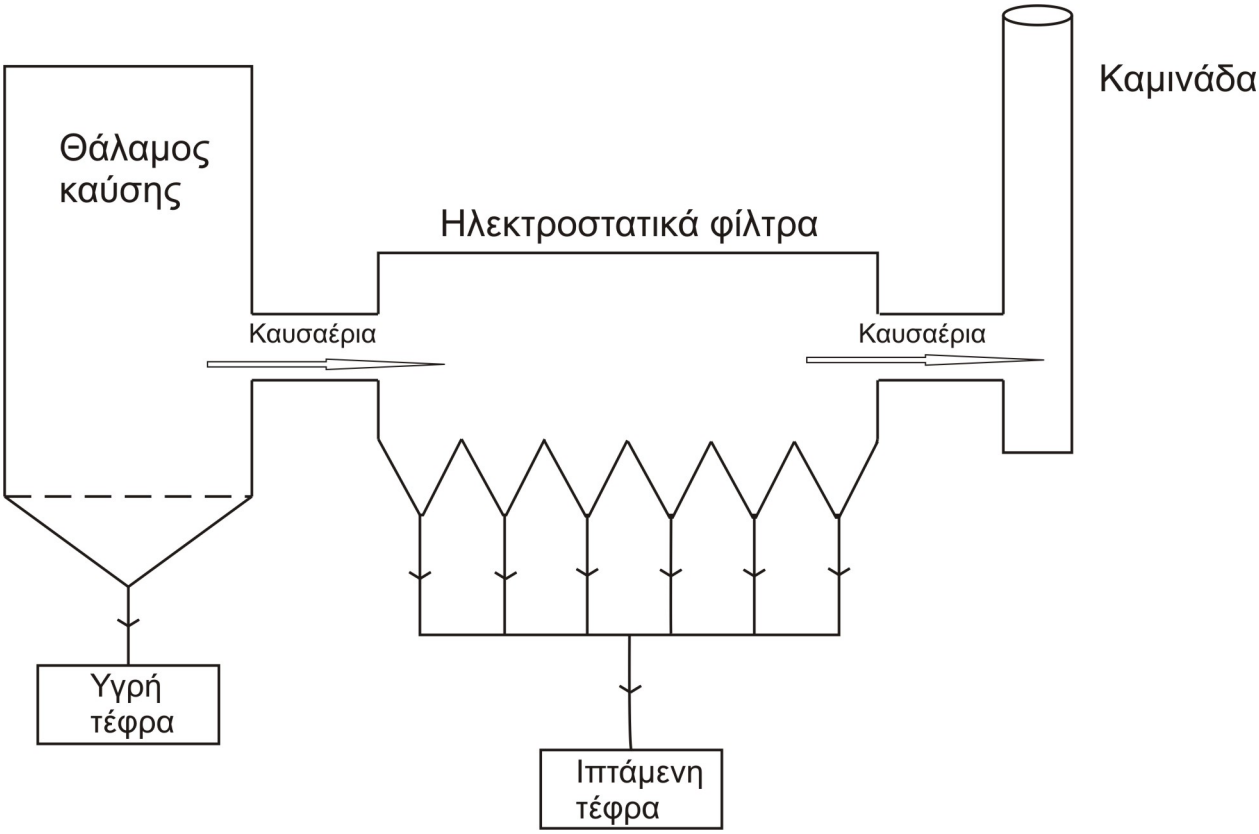
Σχήματα Κεφαλαίου



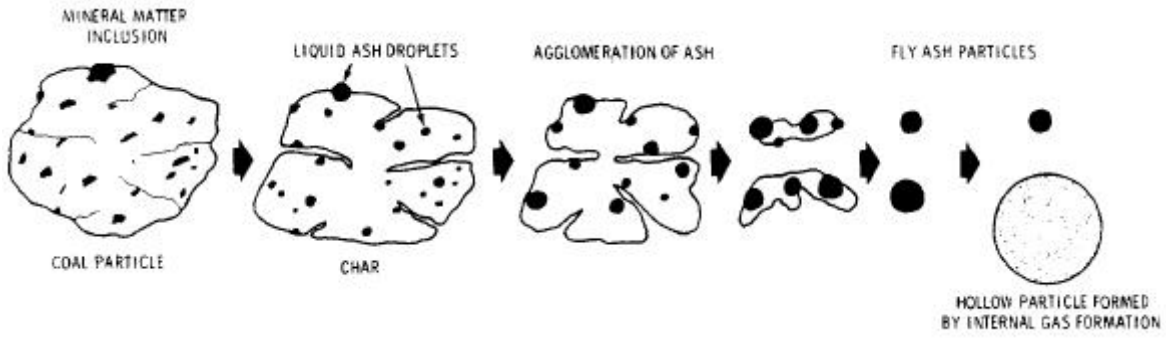
Σχήμα 2.1: Η ραδιενεργός σειρά του ^{232}Th. Πηγή:[133]



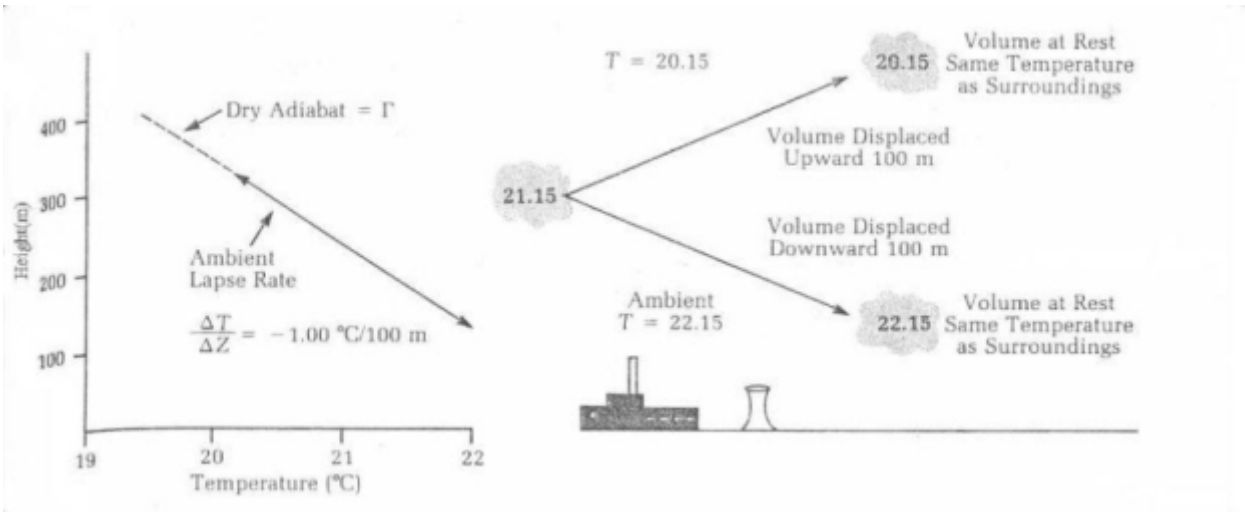
Σχήμα 2.2: Η ραδιενεργός σειρά του ^{238}U. Πηγή :[133]



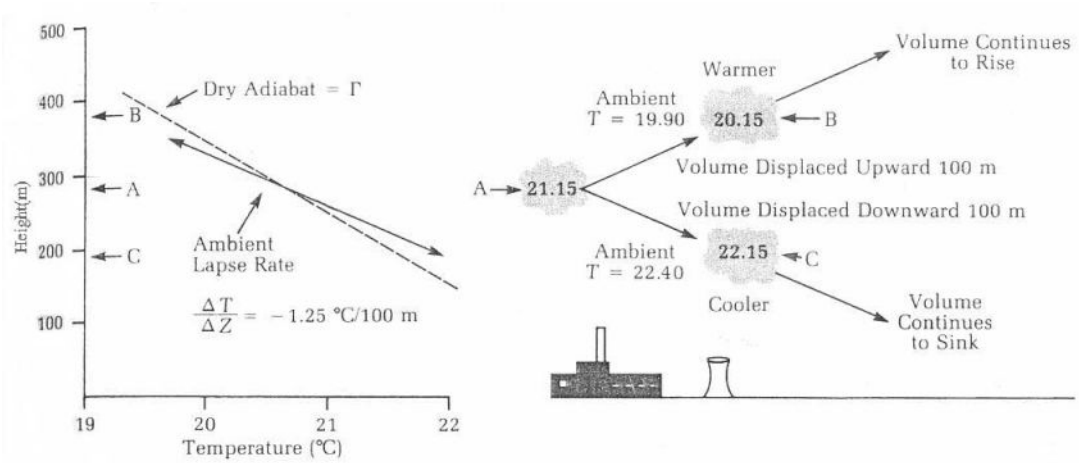
Σχήμα 2.3: Λειτουργία ατμοηλεκτρικού σταθμού



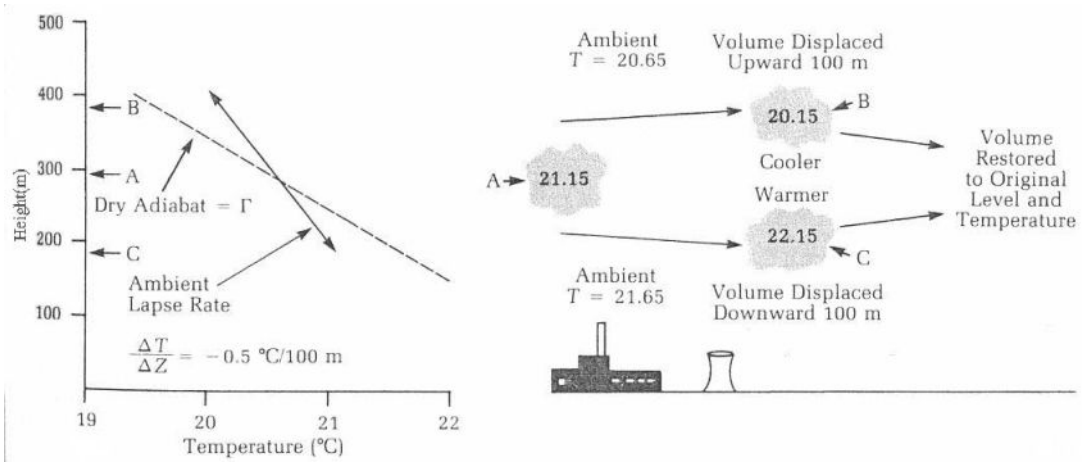
Σχήμα 2.4: Σχηματισμός σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας. Πηγή:[177]



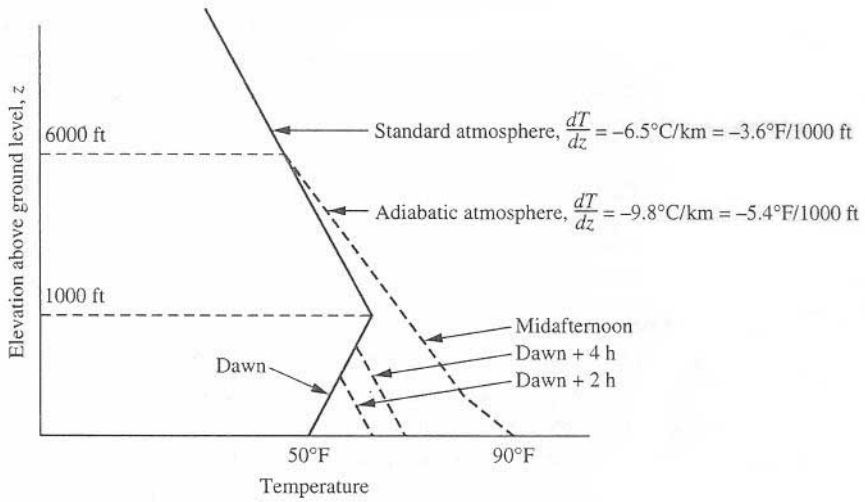
Σχήμα 2.5: Κίνηση αέριας μάζας σε ουδέτερη ευστάθεια. Πηγή:[40]



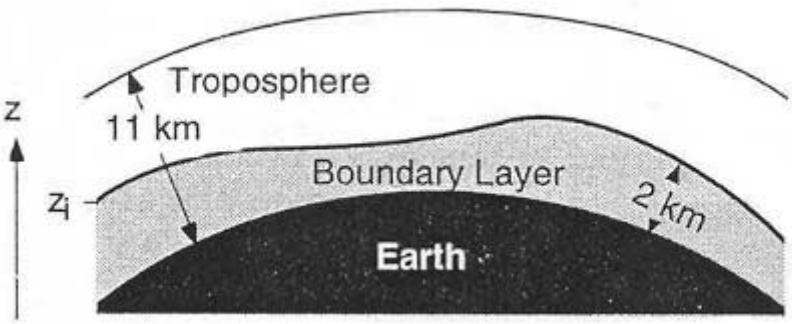
Σχήμα 2.6: Κίνηση αέριας μάζας σε ασταθή ατμόσφαιρα. Πηγή:[40]



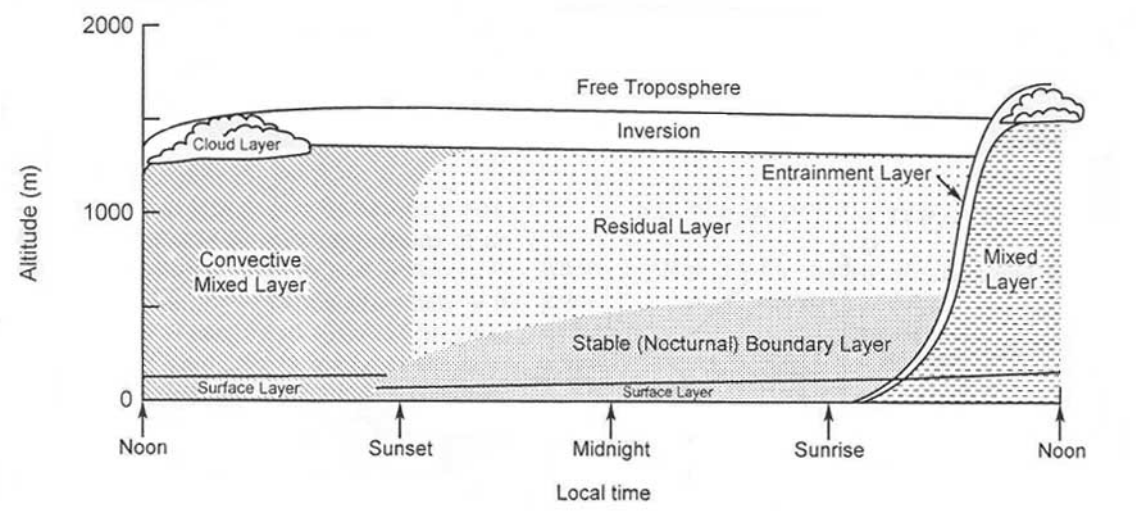
Σχήμα 2.7: Κίνηση αέριας μάζας σε ευσταθή ατμόσφαιρα. Πηγή:[40]



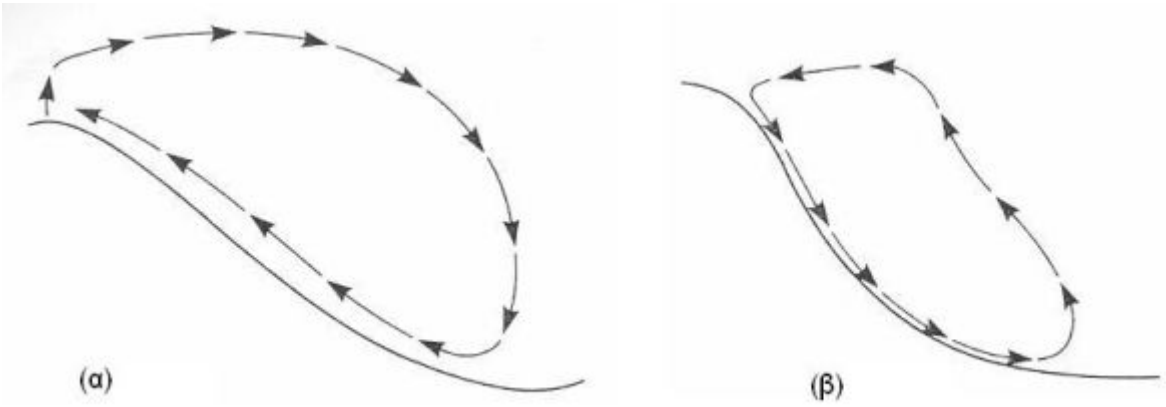
Σχήμα 2.8: Θερμοκρασιακή δομή της ατμόσφαιρας στην διάρκεια ενός 24ώρου. Πηγή:[42]



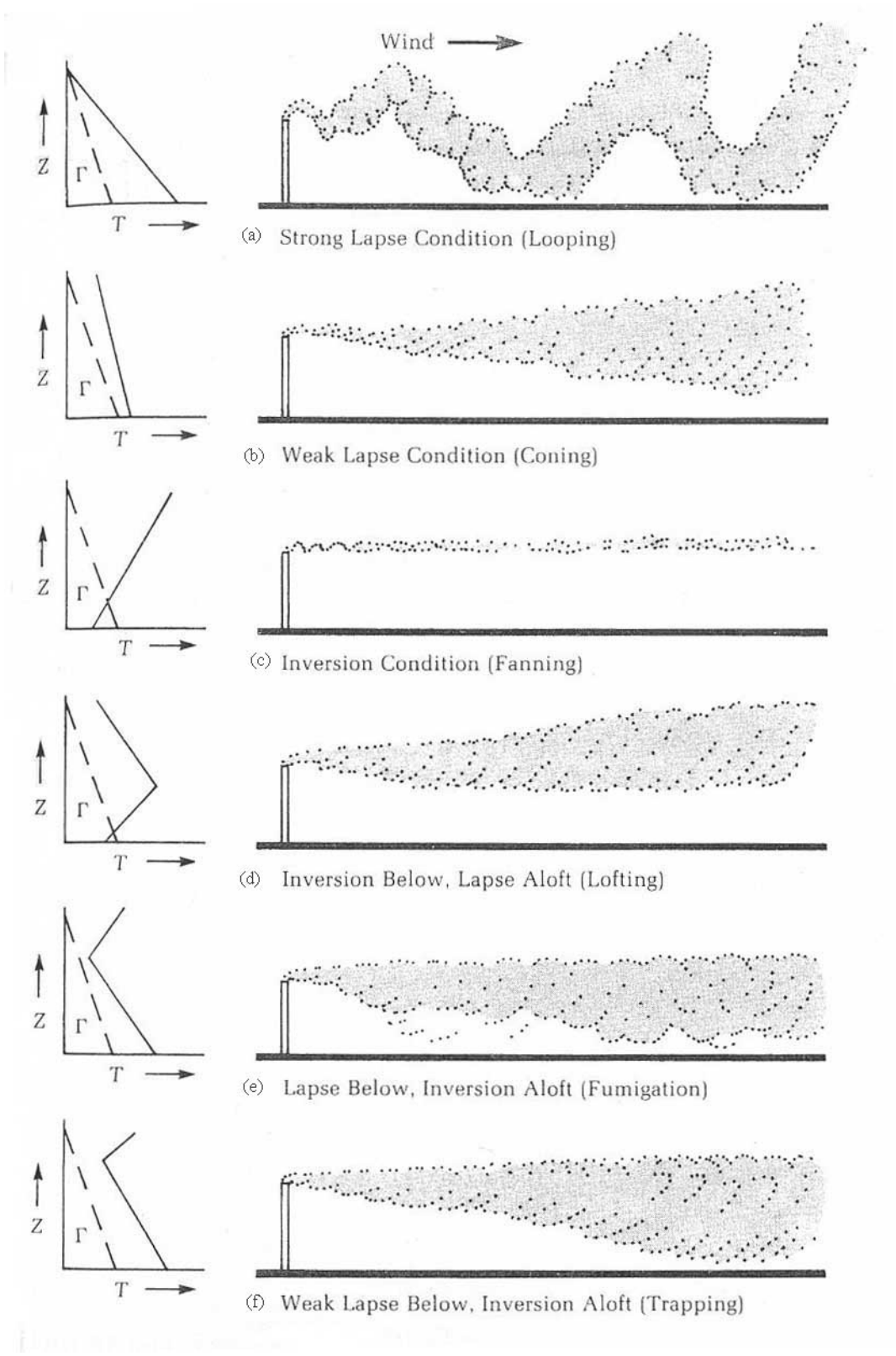
Σχήμα 2.9: Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα και η γη. Πηγή:[183]



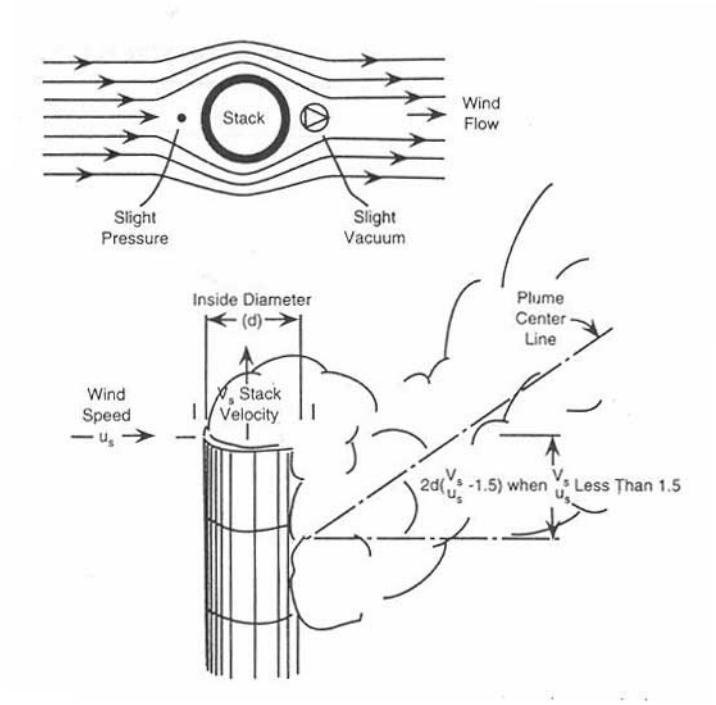
Σχήμα 2.10: Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα στην διάρκεια του 24ώρου. Πηγή:[57]



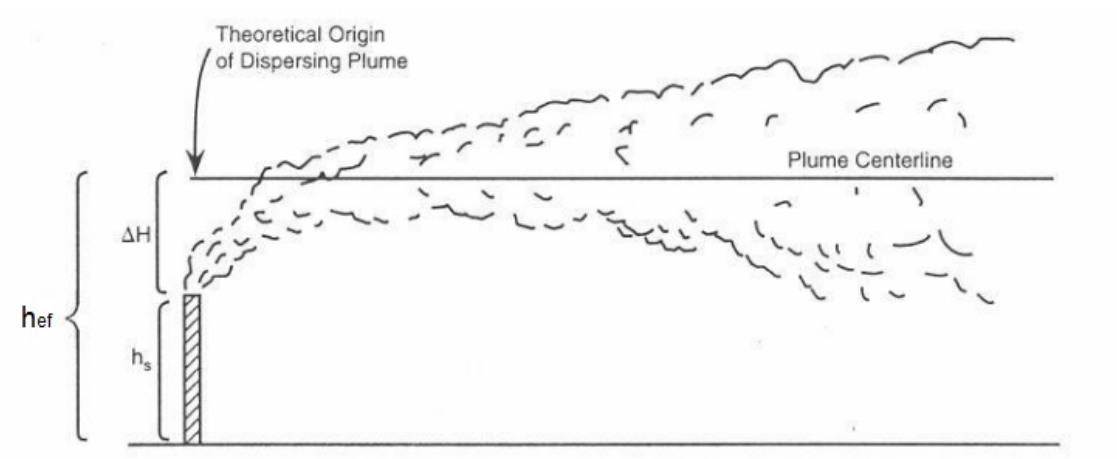
Σχήμα 2.11: Φαινόμενα πλαγιάς-κοιλάδας. Πηγή:[18]



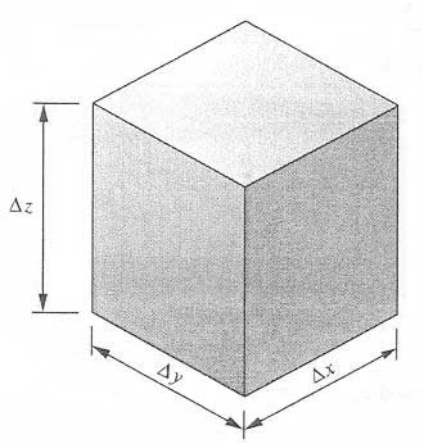
Σχήμα 2.12: Είδη πλουμίου ανάλογα με την ευστάθεια. Πηγή :[40]



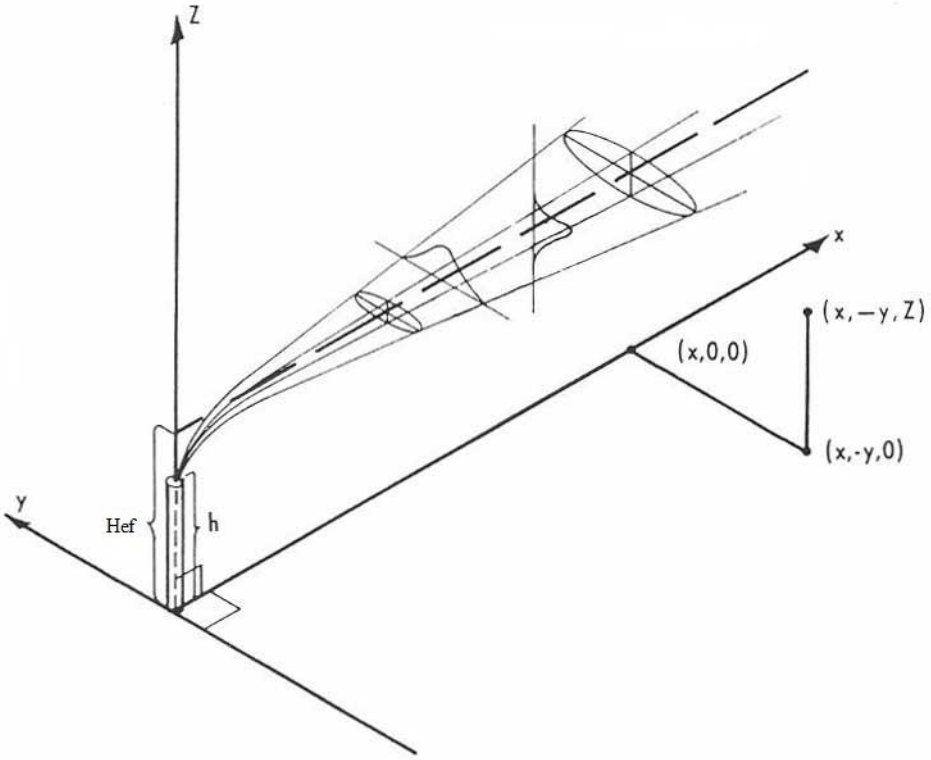
Σχήμα 2.13: Φαινόμενο κατωρεύματος στην καπνοδόχο. Πηγή :[116]



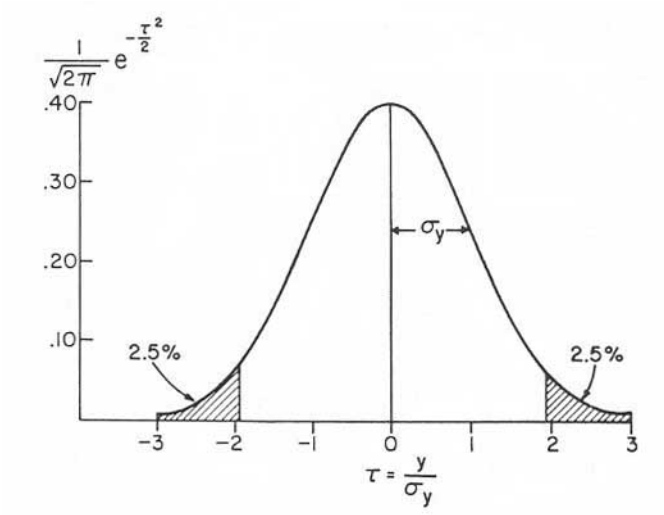
Σχήμα 2.14: Ανύψωση πλουμίου. Πηγή :[116]



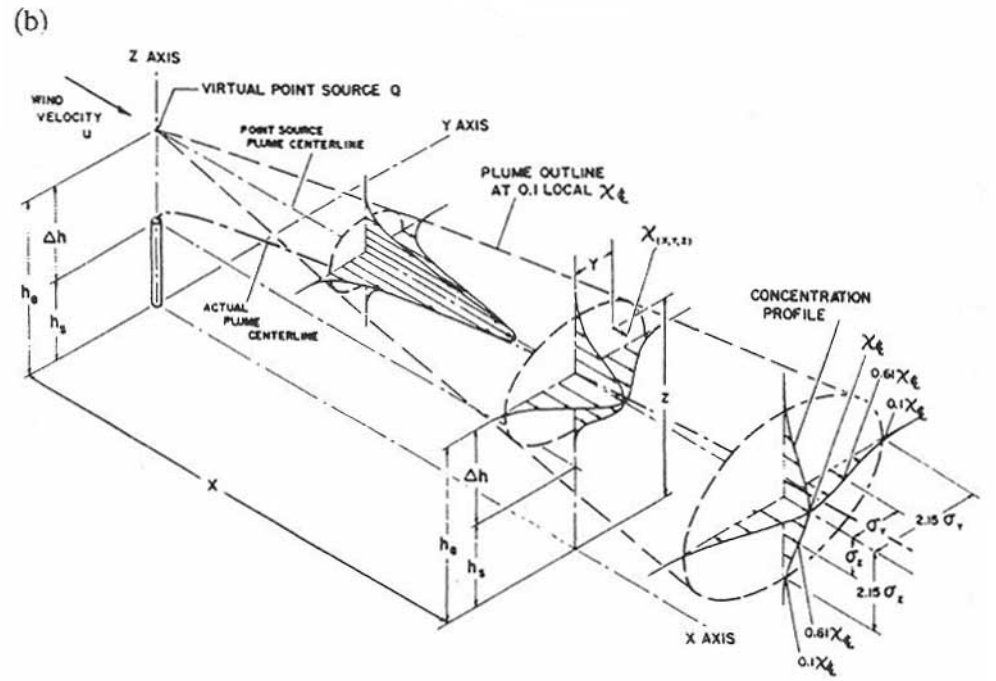
Σχήμα 2.15: Διαστάσεις απειροστού κύβου. Πηγή :[42]



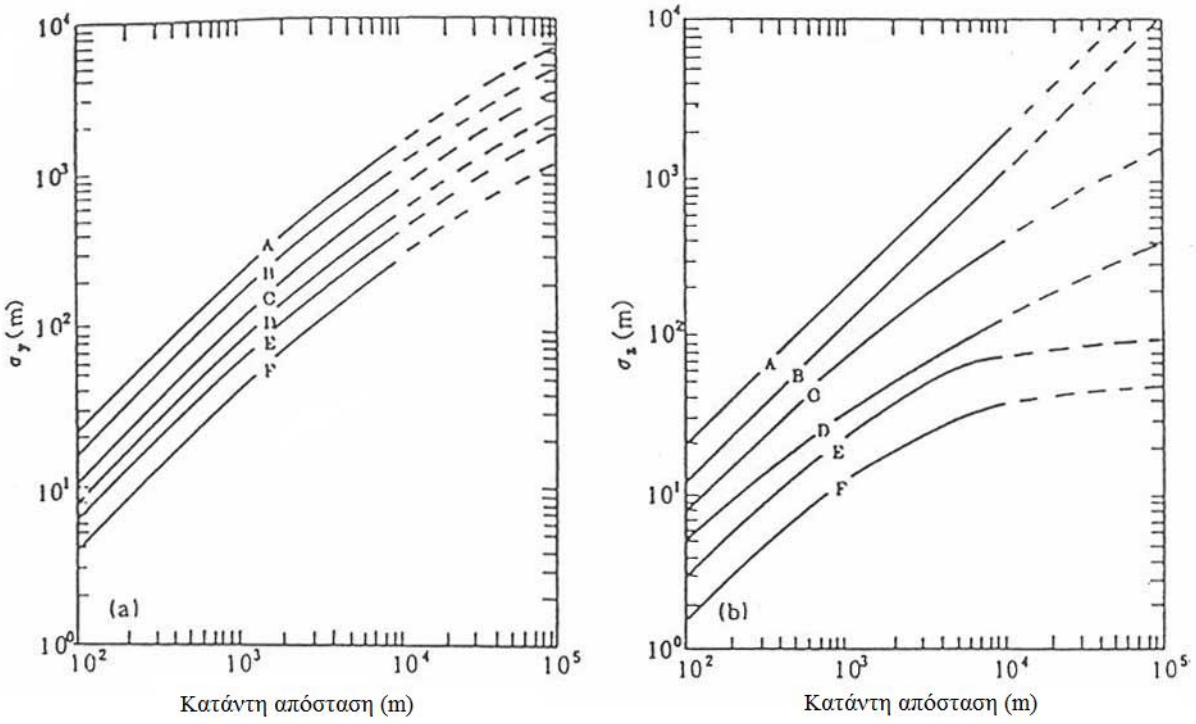
Σχήμα 2.16: Σύστημα συντεταγμένων για γκαουσιανό πλούμιο. Πηγή :[192]



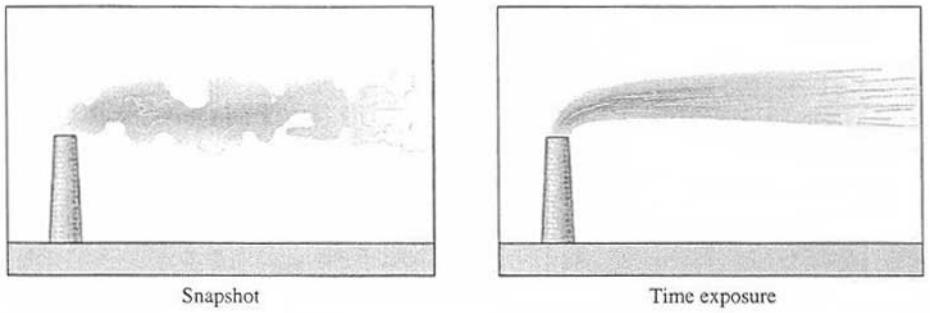
Σχήμα 2.17: Καμπύλη κανονικής κατανομής. Πηγή:[139]



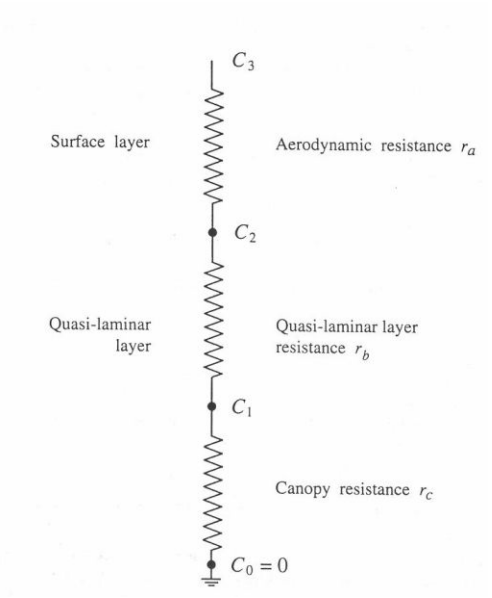
Σχήμα 2.18: Κατανομή της συγκέντρωσης των ρύπων σύμφωνα με το μοντέλο Gauss. Πηγή:[212]



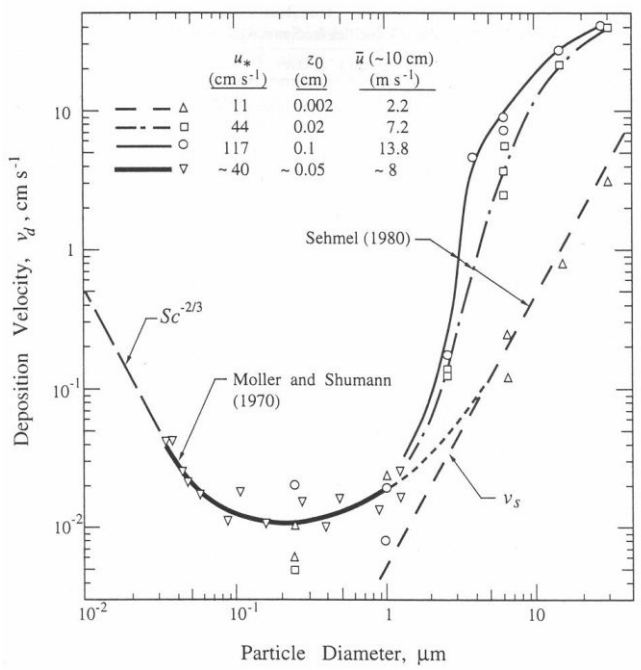
Σχήμα 2.19: Καμπύλες υπολογισμού των σ_y και σ_z. Πηγή :[9]



Σχήμα 2.20: Μορφή πλουμίου στιγμιαίας και μεγάλης χρονικής διάρκειας έκθεσης. Πηγή :[42]



Σχήμα 2.21: Αντιστάσεις ξηρής εναπόθεσης. Πηγή :[169]



Σχήμα 2.22: Ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης σε σχέση με την διάμετρο του σωματιδίου. Πηγή :[169]

Κεφάλαιο 3

Κώδικες υπολογισμού ατμοσφαιρικής διασποράς ραδιενεργών ρύπων, που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της ΔΔ

3.1 Εισαγωγή

Η διασπορά των ρύπων στην ατμόσφαιρα είναι ένα σύνθετο φαινόμενο το οποίο περιγράφεται από τις εξισώσεις, που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2. Προκειμένου να μελετηθεί το συγκεκριμένο φαινόμενο αναπτύχθηκαν τα τελευταία 30 χρόνια σύνθετα υπολογιστικά προγράμματα, τα οποία χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις, που παρουσιάσαμε, παρέχουν αποτελέσματα σχετικά με την ατμοσφαιρική διασπορά των ρύπων. Μάλιστα με την υπολογιστική δύναμη, που διατίθεται σήμερα είναι δυνατόν να προσομοιωθούν πολύ περίπλοκα φαινόμενα της διασποράς των ρύπων στην ατμόσφαιρα, πράγμα το οποίο δεν μπορούσε να πραγματοποιηθεί πριν την ανάπτυξη των υπολογιστών. Έτσι είναι πλέον δυνατή η μελέτη της διασποράς των ρύπων για εκτεταμένες περιοχές και με αρκετή λεπτομέρεια.

Τα συγκεκριμένα προγραμμάτα, που από εδώ και στο εξής θα αναφέρονται ως «κώδικες», στηρίζονται συνήθως στην εξίσωση Gauss (βλ. παράγραφο 2.2.4). Για να πραγματοποιηθεί η εκτέλεση τους είναι απαραίτητα τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής, για την οποία πραγματοποιείται η μελέτη, τα δεδομένα, που αφορούν στην εκπομπή των ρύπων (π.χ. διάμετρος και ύψος καμινάδας, ταχύτητα εξόδου καυσαερίων κτλ.), καθώς και δεδομένα της τοπογραφίας της υπό μελέτη περιοχής. Οι κώδικες μετά την εκτέλεση τους μας παρέχουν την συγκέντρωση των ρυπαντών σε επιλεγμένα σημεία.

Οι ρυπαντές αυτοί μπορεί να είναι είτε συμβατικοί (όπως τα τα SO_2, NO_x) όσο

και ραδιενεργοί (όπως τα $^{238}\mathrm{U}$ και $^{210}\mathrm{Pb}$). Έτσι υπάρχουν πλέον διαθέσιμοι κώδικες ατμοσφαιρικής διασποράς τόσο για συμβατικούς όσο και για ραδιενεργούς ρύπους. Ενδεικτικά αναφέρουμε τους κώδικες AERMOD, CDTMplus, ISC3 LT, οι οποίοι προορίζονται για συμβατικούς ρύπους, και τους κώδικες CAP-88, GENII και ORION-II, οι οποίοι προορίζονται για ραδιενεργούς ρύπους. Τέλος ο κώδικας ADMS3 μπορεί να κάνει υπολογισμούς τόσο για συμβατικούς όσο και για ραδιενεργούς ρύπους. Για περισσότερες λεπτομέρειες ο ενδιαφερόμενος μπορεί να ανατρέξει στην παράγραφο 3.3.2, όπου γίνεται διεξοδική αναφορά, ενώ για κώδικες αποκλειστικά για ραδιενεργούς ρύπους μπορεί να δει επίσης την βιβλιογραφία [126].

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω ένας από τους στόχους της παρούσας ΔΔ είναι η μελέτη της διασποράς φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων από τους ΑΗΣ της περιοχής της Μεγαλόπολης. Προκειμένου να γίνει αυτό θα χρησιμοποιηθούν οι κώδικες ORION-II και GENII. Σε αυτό το κεφάλαιο αρχικά θα γίνει περιγραφή δύο των κωδίκων και στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι επεμβάσεις και οι τροποποιήσεις, που χρειάστηκε να γίνουν σε αυτούς, ώστε να επιτευχθεί η λειτουργία τους στα υπολογιστικά συστήματα του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

3.2 Ο κώδικας ORION-II

3.2.1 Γενικά

Ο κώδικας ORION-II αναπτύχθηκε από τους Asano et al. [9] σε γλώσσα Fortran-IV και δημοσιεύτηκε το 1987. Γράφτηκε αρχικά για χρήση σε Η/Υ IBM 370 και 380, όμως χρησιμοποιήθηκε στην συνέχεια και σε μεταγενέστερα συστήματα. Ο συγκεκριμένος κώδικας, ο οποίος κάνει υπολογισμούς μεγάλης χρονικής διάρκειας (*long term dispersion model*), κατασκευάστηκε με σκοπό την χρησιμοποίηση του σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας πυρηνικών καυσίμων. Επίσης είναι δυνατή η χρήση του για διασπορά ραδιενεργών ρύπων, που προκύπτουν από ατμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας και έχουν ως καύσιμο γαιάνθρακες, αλλά μέχρι στιγμής δεν έχουν πραγματοποιηθεί εκτελέσεις τέτοιου είδους. Το βασικό μέγεθος, που υπολογίζει ο κώδικας είναι η ατμοσφαιρική συγκέντρωση των εκπεμπόμενων ραδιενεργών ισοτόπων (Cim^{-3}) σε μηδενικό ύψος από το έδαφος σε επιλεγμένα σημεία της υπό μελέτης περιοχής. Υπολογίζει επίσης και τον ρυθμό απόθεσης των ραδιοϊσοτόπων στο έδαφος. Μπορεί να εφαρμόζεται με ασφάλεια για αποστάσεις από $100\,\mathrm{m}$ μέχρι και $30\,\mathrm{km}$ από την πηγή εκπομπής σύμφωνα με όσα έχουν αναπτυχθεί στην παράγραφο 2.2.4.3. Ο κώδικας εκτός από υπολογισμό της διασποράς των ρύπων κάνει και εκτίμηση της ραδιενεργής δόσης, που δέχεται ο μέσος κάτοικος του υπό διερεύνηση χώρου. Ο αναγνώστης μπορεί να δει στο σχήμα 3.1 ένα σχηματικό διάγραμμα με τα αποτελέσματα, τα οποία

παράγει ο κώδικας, καθώς και με τα δεδομένα τα οποία χρειάζονται για την εκτέλεση του.

Ο ORION-II διανέμεται δωρεάν από την Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (Nuclear Energy Agency) του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Organisation for Economic Co-operation and Development), οποία θα αναφέρεται ως εξής ως NEA-OECD. Ο ORION-II είναι ανοιχτό λογισμικό δηλαδή ο χρήστης έχει την δυνατότητα να διαβάζει και να επεμβαίνει στον πηγαίο κώδικα. Αυτό ήταν βασικό πλεονέκτημα, ώστε να επιλεχθεί να χρησιμοποιηθεί στην παρούσα ΔΔ. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα του είναι η δυνατότητα του να συμπεριλαμβάνει πάνω από μια πηγές εκπομπών σε μία μόνο εκτέλεση καθώς και η ικανότητα του να λαμβάνει υπόψη του την τοπογραφία του εδάφους σε μεγάλο βαθμό. Στα μειονεκτήματα του μπορεί κανείς να συμπεριλάβει την αδυναμία του να πραγματοποιήσει υπολογισμούς για ισότοπα, που ανήκουν σε ραδιενεργές αλυσίδες, καθώς και την έλλειψη εξισώσεων για ανύψωση θερμών πλουμίων (βλ. παράγραφο 3.2.5).

Ο Orion-II για τον υπολογισμό της διασποράς των ρύπων χρησιμοποιεί μια τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης Gauss. Στους υπολογισμούς συμπεριλαμβάνει τα ακόλουθα φαινόμενα:

- Ραδιενεργός διάσπαση των ισοτόπων στον χρονικό διάστημα, για το οποίο γίνεται ο υπολογισμός.
- Βαρυτική επικάθηση (*gravitational settling*) των εκπεμπόμενων σωματιδίων.
- Ξηρή απόθεση (*dry deposition*) των εκπεμπόμενων σωματιδίων
- Απόθεση λόγω ατμοσφαιρικής κατακρήμνισης (*precipitation scavenging*) των εκπεμπόμενων σωματιδίων

3.2.2 Βασικές εξισώσεις υπολογισμού του κώδικα ORION-II

Ο Orion-II προκειμένου να πραγματοποιήσει τους υπολογισμούς εργάζεται σε πολικές συντεταγμένες, όπου το κέντρο του συστήματος αντιστοιχεί σε ένα ορισμένο σημείο του πεδίου. Οι γωνίες μετρώνται από την διεύθυνση του βορρά και η θετική φορά είναι η δεξιόστροφη. Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται σε δεδομένες αποστάσεις από το κέντρο, τις οποίες ορίζει ο χρήστης. Με βάση το κέντρο του συστήματος ο κώδικας χωρίζει το επίπεδο, στο οποίο κάνει τους υπολογισμούς, σε 16 τομείς (ανά 22.5°) όσες και οι διευθύνσεις του ανέμου. Για κάθε τομέα υπολογίζει την μέση συγκέντρωση για το χρονικό διάστημα, που επιθυμεί ο χρήστης, και για την απόσταση από το κέντρο, που έχει ορίσει. Σημειώνεται ότι η θέση των πηγών εκπομπής δίνεται σε πολικές συντεταγμένες.

Ο κώδικας έχει την δυνατότητα να πραγματοποιεί υπολογισμούς συγκεντρώσεων στον κάθε τομέα με 3 διαφορετικούς τρόπους. Μπορεί να υπολογίζει την συγκέντρωση στον άξονα κάθε τομέα, την μέση συγκέντρωση σε κάθε τομέα, καθώς και την μέση συγκέντρωση κάθε τομέα λαμβάνοντας υπόψη και τους δύο γειτονικούς τομείς. Οι παραπάνω εναλλακτικές δυνατότητες παρέχονται και για τον υπολογισμό του ρυθμού απόθεσης των ραδιοϊσοτόπων στο έδαφος. Οι σχετικές εξισώσεις για την κάθε περίπτωση παρουσιάζονται ακολούθως:

3.2.2.1 Υπολογισμός της συγκέντρωσης στον άξονα του κάθε τομέα

Η συγκέντρωση δίνεται από τον ακόλουθο τύπο [9, σελ. 4]:

$$\chi(x,0,0) = \sum_{s=A}^{G} \frac{F_{sw}Q_i}{\pi\sigma_{ys}\sigma_{zs}} < U_{sw} >^{-1} exp\left(-\frac{H_{eds}^2}{2\sigma_{zs}^2}\right) f_{Di}f_{Pi}f_{Ri} \tag{3.1}$$

$$H_{eds} = H_0 + \delta H_{ds} - L_d - V_{gi}x < U_{sw} >^{-1} \tag{3.2}$$

όπου:
$\chi(\mathrm{x},0,0)$: Αξονική συγκέντρωση του ισοτόπου i στην διεύθυνση d (m).
$\mathrm{F_{sw}}$: Συχνότητα εμφάνισης διεύθυνσης ανέμου με ευστάθεια s.
$\mathrm{Q_i}$: Ρυθμός εκπομπής του ισοτόπου i ($\mathrm{Cis^{-1}}$).
σ_{ys}, σ_{zs}: Παράμετροι διασποράς (m).
$< \mathrm{U_{sw}} >^{-1}$: Μέση αντίστροφη ταχύτητα στην διεύθυνση d για ευστάθεια s ($\mathrm{secm^{-1}}$).
x: Απόσταση του σημείου υπολογισμού από την πηγή εκπομπής (m).
$\mathrm{H_{eds}}$: Ενεργό ύψος πλουμίου για διεύθυνση d με ευστάθεια s (m).
$\mathrm{H_0}$: Ύψος καμινάδας από την επιφάνεια της θάλασσας (m).
$\Delta\mathrm{H_{ds}}$: Ανύψωση πλουμίου στην διεύθυνση d (m).
$\mathrm{L_d}$: Υψόμετρο εδάφους από την επιφάνεια της θάλασσας στο σημείο υπολογισμού (m).
$\mathrm{V_{gi}}$: Ταχύτητα βαρυτικής επικάθησης για το ισότοπο i ($\mathrm{msec^{-1}}$).
$\mathrm{f_{Di}}$: Ποσοστό μείωσης της συγκέντρωσης λόγω ξηρής εναπόθεσης.
$\mathrm{f_{Pi}}$: Ποσοστό μείωσης της συγκέντρωσης λόγω κατακρημνίσεων.
$\mathrm{f_{Ri}}$: Ποσοστό μείωσης της συγκέντρωσης λόγω διάσπασης του ισοτόπου.
Για το πως υπολογίζονται τα $\mathrm{f_{Di}}$, $\mathrm{f_{Pi}}$ και $\mathrm{f_{Ri}}$ ο αναγνώστης μπορεί να δει την παράγραφο 3.2.2.4.

3.2.2.2 Μέση συγκέντρωση τομέα

Ο κώδικας έχει την δυνατότητα να υπολογίζει την μέση συγκέντρωση κάθε τομέα. Οι εξίσωση είναι η ακόλουθη [9, σελ. 4]:

$$\chi_{id} = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{8}{\pi}\sum_{s=A}^{G}\frac{F_{sw}Q_i}{\sigma_{zs}x} < U_{sw} >^{-1} exp\left(-\frac{H_{eds}^2}{2\sigma_{zs}^2}\right) f_{Di}f_{Pi}f_{Ri} \tag{3.3}$$

$$H_{eds} = H_0 + \delta H_{ds} - L_d - V_{gi}x < U_{sw} >^{-1} \tag{3.4}$$

Για τους όρους της εξίσωσης ο αναγνώστης μπορεί να δει την προηγούμενη παράγραφο.

3.2.2.3 Μέση συγκέντρωση τομέα λαμβάνοντας υπόψη και τους γειτονικούς τομείς

Επίσης έχει την δυνατότητα να υπολογίζει την συγκέντρωση του κάθε τομέα λαμβάνοντας υπόψη και τους δύο γειτονικούς του τομείς [9, σελ. 5]. Ουσιαστικά εδώ ο κώδικας υπολογίζει ένα σταθμισμένο άθροισμα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων του κεντρικού και των δύο γειτονικών τομέων.

$$\chi_{id} = \sum_{s=A}^{G}\frac{Q_i}{\pi\sigma_{ys}\sigma_{zs}}\sum_{k=-1}^{1}\left(F_{s(w+k)}W_{sk} < U_{s(w+k)} >^{-1}\right) exp\left(-\frac{H_{e(d+k)s}^2}{2\sigma_{zs}^2}\right) f_{Di}f_{Pi}f_{Ri} \tag{3.5}$$

$$H_{eds} = H_0 + \delta H_{ds} - L_d - V_{gi}x < U_{sw} >^{-1} \tag{3.6}$$

όπου:

W_{sk}: παράγοντας στάθμισης τομέα για διεύθυνση k και ευστάθεια s, ο οποίος υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$W_{s1} = W_{s-1} = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\frac{\sigma_{ys}}{y_2 - y_1}\left(erf(\frac{y_2}{\sqrt{2}\sigma_{ys}}) - erf(\frac{y_1}{\sqrt{2}\sigma_{ys}})\right) \tag{3.7}$$

$$W_{s0} = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\frac{\sigma_{ys}}{y_1}erf(\frac{y_1}{\sqrt{2}\sigma_{ys}}) \tag{3.8}$$

$$y_1 = \frac{\pi x}{16}, \quad y_2 = \frac{3\pi x}{16} \tag{3.9}$$

3.2.2.4 Οι παράγοντες ραδιενεργής διάσπασης, βαρυτικής επικάθησης, ξηρής εναπόθεσης και εναπόθεσης λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται οι παράγοντες απομείωσης της συγκεντρώσεως του πλουμίου μετά την εκπομπή του από την καμινάδα. Αυτοί είναι η βαρυτική επικάθηση των σωματιδίων, η ξηρή εναπόθεση των σωματιδίων, η απομείωση λόγω κατακρημνίσεων και βέβαια η ραδιενεργός διάσπαση των ισοτόπων.

Βαρυτική επικάθηση. Σωματίδια με διαμέτρους μεγαλύτερες από $10\mu m$ έλκονται ισχυρά από το βαρυτικό πεδίο και παρουσιάζουν σημαντικές ταχύτητες βαρυτικής επικάθησης, οπότε και το πλούμιο καμπυλώνεται νωρίτερα. Για την μοντελοποίηση αυτού του φαινομένου θεωρείται ότι το ύψος του πλουμίου μειώνεται κατά τον παράγοντα $V_g x < U_{sw} >^{-1}$.

Ξηρή εναπόθεση. Η μείωση της συγκέντρωσης του πλουμίου λόγω ξηρής εναπόθεσης των σωματιδίων στο έδαφος υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$f_{Di} = exp\left(-\sqrt{\frac{2}{\pi}} V_{di} < U_{sw} >^{-1} \int_0^x \frac{1}{\sigma_{zs}} exp(-\frac{H_{eds}^2}{2\sigma_{zs}^2}) dx\right) \tag{3.10}$$

όπου $\mathrm{V_{di}}$ η ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης για το ισότοπο i

Απομείωση λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων. Σε περίπτωση κατακρημνίσεων σωματίδια του πλουμίου αφαιρούνται από αυτό, καθώς εγκλωβίζονται στις σταγόνες της βροχής, όταν αυτές δημιουργούνται (*rainout*), ή παρασύρονται από τις σταγόνες καθώς αυτές πέφτουν προς το έδαφος(*washout*). Ο παράγοντας μείωσης της συγκέντρωσης του πλουμίου f_{Pi} υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$f_{Pi} = exp(-F_{Pr}\Lambda_i x < U_{sw} >^{-1}) \tag{3.11}$$

όπου F_{pr} ο λόγος της διάρκειας των φαινομένων κατακρήμνισης προς το χρονικό διάστημα για το οποίο γίνεται ο υπολογισμός και Λ_i ο ρυθμός αφαίρεσης του ισοτόπου i από την ατμόσφαιρα λόγω κατακρήμνισης (*scavenging rate*).

Ραδιενεργός διάσπαση. Ο παράγοντας μείωσης της συγκέντρωσης ενός ισοτόπου i στο πλούμιο, λόγω ραδιενεργού διάσπασης δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$f_{Ri} = exp(-\lambda_i x < U_{sw}) \tag{3.12}$$

όπου λ_i η σταθερά ραδιενεργού διάσπασης του ισοτόπου i.

3.2.2.5 Υπολογισμός του ρυθμού απόθεσης ραδιοϊσοτόπων στο έδαφος

Ο ORION-II υπολογίζει την απόθεση των ισοτόπων στο έδαφος εξαιτίας της ξηρής όσο και της υγρής απόθεσης. Για τον υπολογισμό του ρυθμού ξηρής απόθεσης $\mathrm{W_{Di}}$ χρησιμοποιεί την ακόλουθη εξίσωση:

$$W_{Di} = V_{Di} \cdot x_{id} \tag{3.13}$$

Για τους όρους της εξίσωσης ο αναγνώστης μπορεί να δει τις παραγράφους 3.2.2.1 και 3.2.2.4.

Για την υγρή απόθεση έχει τρεις διαφορετικές επιλογές όπως και για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης, που περιγράψαμε στις παραγράφους 3.2.2.1, 3.2.2.2 και 3.2.2.3.

Για την περίπτωση υπολογισμού της συγκέντρωσης στον άξονα κάθε τομέα (βλ. παράγραφο 3.2.2.1) ο ρυθμός υγρής απόθεσης $\mathrm{W_{pi}}$ δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$W_{pi} = \sum_{S=A}^{G} \frac{F_{pr}\lambda_i Q_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_{YS}} F_{SW} < U_{SW} >^{-1} f_{Di} f_{Pi} f_{Ri} \tag{3.14}$$

Όταν υπολογίζεται η μέση συγκέντρωση στον τομέα (βλ. παράγραφο 3.2.2.2) ο ρυθμός υγρής απόθεσης $\mathrm{W_{pi}}$ είναι ο ακόλουθος:

$$W_{pi} = \sum_{S=A}^{G} \frac{8F_{pr}\lambda_i Q_i}{\pi x} F_{SW} < U_{SW} >^{-1} f_{Di} f_{Pi} f_{Ri} \tag{3.15}$$

Για την περίπτωση υπολογισμού της μέσης συγκέντρωσης κάθε τομέα λαμβάνοντας υπόψη και τους γειτονικούς τομείς(βλ. παράγραφο 3.2.2.3) ο ρυθμός υγρής απόθεσης $\mathrm{W_{pi}}$ δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$W_{pi} = \sum_{S=A}^{G} \frac{F_{pr}\lambda_i Q_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_{YS}} \sum_{K=-1}^{1} (F_{S(W+K)} W_{SK}) F_{SW} < U_{SW} >^{-1} f_{Di} f_{Pi} f_{Ri} \tag{3.16}$$

3.2.3 Εγκατάσταση του ORION-II στα υπολογιστικά συστήματα του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Ο κώδικάς ORION-II διανέμεται από την NEA (Nuclear Energy Agency) του OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) με την μορφή πηγαίου κώδικα. Προκειμένου να λειτουργήσει χρειάζεται να γίνει μετάφραση και σύνδεση των πηγαίων αρχείων, ώστε να προκύψει το εκτελέσιμο πρόγραμμα του ORION-II. Επίσης μετά την παραγωγή του εκτελέσιμου πρέπει να πραγματοποιηθεί και έλεγχος σωστής λειτουργίας του προγράμματος. Σε αυτή την παράγραφο θα περιγραφούν όλες οι ενέργειες, που πραγματοποιήθηκαν, προκειμένου να εκτελείται με επιτυχία ο ORION-II στα υπολογιστικά συστήματα του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

3.2.3.1 Εγκατάσταση του ORION-II στον Η/Υ Silicon Graphics Indy (SGI)

Αποφασίστηκε να εγκατασταθεί ο ORION-II αρχικά στον Η/Υ SGI υπό το λειτουργικό σύστημα UNIX-IRIX 5.3. Όταν παραλήφθηκε ο κώδικας βρισκόταν σε ένα ενιαίο αρ-

χείο, γεγονός που δυσκόλευε την εποπτεία και την χρήση του, και γι' αυτό χωρίστηκε στα ακόλουθα αρχεία: orion.f, orion1.f, orion2.f, orion3.f, orion4_.f, orion5_.f.
Οι υπορουτίνες του κώδικα κατανεμήθηκαν ως εξής στα εν λόγω αρχεία:

- **orion.f**: main routine.
- **orion1.f**: memory.
- **orion2.f**: imagec.
- **orion3.f**: inputd, outint.
- **orion4_.f**: difcal, plmeq1, plmeq2, plmeq3, efhcal, sigmyz, expcal, outdfa.
- **orion5_.f**: concal, outcoi, metcon, biocon, outcon, bicoeq, matprf, matprf_, doscal, outdsi, dosinh, dosori, dosexs, dosexc, hyoshi, openms, readms, writms.

Αναλυτικό πίνακα με τις υπορουτίνες καθώς και περιγραφή της λειτουργίας της κάθε μιας μπορεί να δει ο αναγνώστης στο εγχειρίδιο του κώδικα [9].

Η μετάφραση και η σύνδεση των επιμέρους υπορουτινών έγινε με την βοήθεια της εντολής make με βάση το αρχείο makefile (βλ. Παράρτημα Α'). Για αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκε ο μεταγλωττιστής Fortan-77 της SGI, που ήταν προεγκαταστημένος στον συγκεκριμένο υπολογιστή.

Κατά την εκτέλεση του κώδικα διαπιστώθηκε ότι στην μορφή που βρισκόταν διάβαζε τα δεδομένα από το πληκτρολόγιο και ο χρήστης θα ήταν αναγκασμένος να πληκτρολογεί σε κάθε εκτέλεση έναν πολύ μεγάλο όγκο δεδομένων. Έτσι αποφασίστηκε να γίνει μια μικρή αλλαγή στα πηγαία αρχεία, ώστε η ανάγνωση των δεδομένων να γίνεται από αρχείο. Η αλλαγή πραγματοποιήθηκε στην υπορουτίνα imagec, που βρίσκεται στο αρχείο orion2.f, και οι προσθήκες γράφτηκαν με μικρούς χαρακτήρες ώστε να ξεχωρίζουν ευκολότερα. Το αρχείο, από το οποίο θα γίνεται η ανάγνωση, ονομάστηκε data και συνδέθηκε με την μεταβλητή mt5, η οποία αντιστοιχεί στην μονάδα (unit) 30. Προηγουμένως η μεταβλητή mt5 αντιστοιχούσε στην μονάδα 5, γι' αυτό γινόταν η ανάγνωση από το πληκτρολόγιο. Ακολουθούν οι σχετικές εντολές:

```
line 20:      DATA mt5/30/                                ORI05270
line 21:      open (mt5, file = 'data')
```

Επίσης διαπιστώθηκε ότι ο κώδικας τύπωνε τα αποτελέσματα των υπολογισμών στην οθόνη, κάτι το οποίο δεν ήταν καθόλου επιθυμητό. Έτσι έγιναν οι ακόλουθες αλλαγές ώστε να τυπώνονται στο αρχείο results.txt, το οποίο συνδέθηκε με την μονάδα 27. Χρειάστηκε λοιπόν να μπει η σχετική open στην main routine στο αρχείο orion.f:

```
line 386:        OPEN (27 , FILE = 'results')
```

Βλέποντας τον κώδικα διαπιστώθηκε ότι όλες οι write ήταν συνδεδεμένες με την μεταβλητή MTO. Αυτή η μεταβλητή ορίζεται με block data στο τέλος της υπορουτίνας outint (αρχείο orion3.f) και ήταν ίση με 6, γι' αυτό και γινόταν η εκτύπωση στην οθόνη. Εμείς επειδή θέλουμε να τυπώνουμε στο αρχείο results, το οποίο είναι συνδεδεμένο στην μονάδα MTO=27, τροποποιήσαμε την DATA, ώστε η MTO να παίρνει τιμή 27. Ακολουθεί η σχετική εντολή:

```
line 517:  DATA mto  ,MTI  ,MT1  ,MT2  ,MT11  ,MT14  ORI10660
line 518:      /27    ,3    ,1    ,2    ,11   ,14/   ORI10670
```

Μετά από αυτές τις επεμβάσεις ακολούθησε νέα μετάφραση και σύνδεση του κώδικα με την βοήθεια της make καθώς και δοκιμαστικό τρέξιμο, ώστε να βεβαιωθούμε ότι οι μετατροπές δουλεύουν σωστά. Τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά: Ο ORION-II μπορούσε πλέον να διαβάζει τα δεδομένα από το αρχείο data και να τυπώνει τα αποτελέσματα στο αρχείο results.

3.2.3.2 Έλεγχος σωστής εγκατάστασης και λειτουργίας του ORION-II με βάση τα αρχεία δεδομένων και αποτελεσμάτων του κατασκευαστή του κώδικα.

Προκειμένου να διαπιστώσουμε ότι ο κώδικας έχει εγκατασταθεί σωστά και οι μαθηματικές εξισώσεις του δουλεύουν ορθώς κάναμε το εξής: Μαζί με τον πηγαίο κώδικα η NEA-OECD διανέμει ένα αρχείο δεδομένων με όνομα DatNea, με το οποίο έκανε εκτέλεση. Επίσης διανέμει και το αρχείο αποτελεσμάτων OutNea, που προέκυψε. Έτσι εμείς εκτελέσαμε των κώδικα χρησιμοποιώντας ως αρχείο δεδομένων το DatNea και συγκρίναμε το αρχείο αποτελεσμάτων, που πήραμε με το OutNea. Από την σύγκριση προέκυψε ότι τα δύο αρχεία αποτελεσμάτων είναι ακριβώς ίδια. Συνεπώς μπορούμε να πούμε ότι ο κώδικας μας μεταγλωττίστηκε σωστά και η εκτέλεση του παράγει τα αναμενόμενα αποτελέσματα, παρότι ο ORION-II έχει γραφτεί σε FORTRAN-IV και εμείς τον μεταγλωττίζουμε με τον f77.

3.2.3.3 Εγκατάσταση του ORION-II σε προσωπικό υπολογιστή PC κάτω από το λειτουργικό σύστημα Windows XP.

Προκειμένου να επιτύχουμε μικρότερους χρόνους εκτέλεσης του ORION-II αποφασίστηκε να μεταφερθεί ο κώδικας σε προσωπικό υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα Windows XP και η μεταγλώττιση του κώδικα να γίνεται με τον μεταγλωττιστή Microsoft Fortran PowerStation.

Έτσι μεταφέρθηκαν τα πηγαία αρχεία του ORION-II σε προσωπικό υπολογιστή στο περιβάλλον του Microsoft Fortran PowerStation. Δοκιμάστηκε να γίνει μετάφραση και

σύνδεση του κώδικα, η οποία απέτυχε, διότι η MS Fortran δεν περιέχει στις βιβλιοθήκες της την μαθηματική συνάρτηση erf(x). Προφανώς αυτή την συνάρτηση την περιείχε η fortran, που ήταν εγκατεστημένη στον SGI, και έτσι όταν γινόταν η κλήση της από τις εντολές του κώδικα δεν εμφανιζόταν κανένα πρόβλημα. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα αναζητήθηκε από τους Press et al. [151, σελ. 213] υλοποίηση της συγκεκριμένης συνάρτησης σε Fortran.

Η erf(x) για την λειτουργία της προϋποθέτει την ύπαρξη της συνάρτησης Γάμμα και της ατελούς συνάρτησης Γάμμα (*incomplete gamma function*), η υλοποίηση των οποίων είναι οι συναρτήσεις gammln και gammp αντίστοιχα. Έπίσης χρειάζονται και οι υπορουτίνες gser, gcf. Έτσι προστέθηκε στο αρχείο orion4_.f ο πηγαίος κώδικας όλων τον παραπάνω υπορουτινών, όπως τον παραθέτουν οι Press et al. [151].

Ακολούθησε μετάφραση και σύνδεση του ORION-II, η οποία ήταν επιτυχής. Δοκιμάσαμε στην συνέχεια να κάνουμε εκτέλεση του κώδικα, η οποία διακόπηκε από τα ακόλουθο σφάλμα.

```
File name missing or blank-please enter file name
Unit 3?
run-time error F6416: OPEN(inout3)
-file not found
```

Το πρόβλημα αυτό οφείλεται στο ότι ο ORION-II έχει γραφτεί σε Fortran-IV και δεν έχει τις κατάλληλες εντολές open για τα αρχεία, που διαχειρίζεται. Η Fortran, που ήταν εγκατεστημένη στον SGI μπορούσε να αναγνωρίζει και να διαχειρίζεται επιτυχώς αυτό το έλλειμα, σε αντίθεση με την MS Fortran PowerStation. Τα αρχεία του ORION-II, τα οποία χρειάζονταν open και φυσικά κατάλληλο όνομα, ήταν τα ακόλουθα και ήταν συνδεδεμένα με τις παρακάτω μονάδες (units): MTI=3, MT1=1, MT2=2, MT4=4, MT11=11, MT12=12, MT13=13, MT14=14. Έτσι προστέθηκαν οι παρακάτω εντολές στην main routine (αρχείο orion.f):

```
line 400: open (3,  file = 'outinp.txt')
line 401: open (2,  file = 'work2.txt', form='unformatted')
line 402: open (11, file = 'concent.txt', form='unformatted')
line 403: open (12, file = 'food.txt', form='unformatted')
line 404: open (13, file = 'intexp.txt', form='unformatted')
line 405: open (14, file = 'extexp.txt', form='unformatted')
line 406: open (4,  file = 'agnosto.txt', form='unformatted')
```

Ακολούθησε μετάφραση, σύνδεση και εκτέλεση του κώδικα. Όλα τα βήματα έγιναν χωρίς να παρουσιαστεί κάποιο μήνυμα σφάλματος. Επίσης πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τα αποτελέσματα, που παρήγαγε ο ORION-II στον SGI, καθώς και με

αυτά, που δίνονται από την NEA-OECD. Ουσιαστικά τα αρχεία ήταν όμοια καθώς οι διαφορές, που υπήρχαν ήταν μιας μονάδας στο τρίτο δεκαδικό ψηφίο των αποτελεσμάτων. Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι η μεταφορά του ORION-II σε PC με λειτουργικό σύστημα Windows XP και μεταγλωττιστή MS Fortran PowerSation πραγματοποιήθηκε επιτυχώς.

Όμως τα αρχεία, που αναφέραμε παραπάνω δεν ήταν αναγνώσιμα. Γι' αυτό δοκιμάστηκε να μετατραπούν σε αρχεία ASCII. Η μετατροπή αυτή όμως προκάλεσε διαφοροποίηση στα αποτελέσματα, που παρήγαγε ο κώδικας, και έτσι αποφασίστηκε να παραμείνουν τα αρχεία αυτά ως έχουν. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται όλα τα βήματα, που έγιναν.

Στον πηγαίο κώδικα, που παραλήφθηκε, οι εντολές write δεν είχαν παράμετρο για την format. Είχαν δηλαδή την μορφή write(MT11). Η απουσία αυτής της παραμέτρου έκανε τα αρχεία να τυπώνονται σε μη-αναγνώσιμη μορφή. Έτσι μετατρέψαμε όλες τις read, write των παραπάνω αρχείων στην ακόλουθη μορφή: write(MT11,*) και ταυτόχρονα ορίσαμε την παράμετρο format στις σχετικές εντολές open ως formatted.

Ακολούθησε μετάφραση, σύνδεση και εκτέλεση χωρίς να εμφανιστεί κανένα μήνυμα σφάλματος. Τα αρχεία ήταν αναγνώσιμα και τα δεδομένα βρίσκονταν σε τέσσερις στήλες χωρίς όμως καμία επικεφαλίδα, οπότε είναι άγνωστο τι περιέχει το κάθε αρχείο και το εγχειρίδιο του ORION-II δεν έχει εκτενή αναφορά γι' αυτό [9, σελ. 36]. Στην συνέχεια συγκρίναμε το αρχείο αποτελεσμάτων results.txt με το αρχείο OutNea, το οποίο μας είχε σταλεί μαζί με τον κώδικα και διαπιστώσαμε ότι παρατηρούνται διαφορές και μάλιστα σημαντικές.

Αυτό συμβαίνει για τον ακόλουθο λόγο: Μετά την μετατροπή αυτών των αρχείων από δυαδικά σε ASCII η εγγραφή των αποτελεσμάτων εκεί γίνεται με κάποια στρογγύλευση (αντίθετα όταν τα αρχεία ήταν δυαδικά δεν γινόταν κάτι τέτοιο). Όμως ο κώδικας στην συνέχεια χρησιμοποιεί ξανά αυτά τα αρχεία και τώρα διαβάζει τα στρογγυλοποιημένα νούμερα, τα οποία εισάγονται σε νέους υπολογισμούς. Έτσι προκαλείται αυτή η διαφοροποίηση στα αποτελέσματα. Με βάση τα παραπάνω αποφασίσαμε να κάνουμε τα συγκεκριμένα αρχεία ξανά δυαδικά ώστε να μην προκαλείται αυτό το πρόβλημα στα αποτελέσματα. Εξάλλου αυτά τα αρχεία δεν παρέχουν κάποια επιπλέον πληροφορία στον χρήστη.

3.2.4 Διερεύνηση σχετικά με τη διαχείριση πατρικού και θυγατρικού ισοτόπου από τον κώδικα ORION-II

Ο κώδικας δεν έχει τη δυνατότητα να κάνει υπολογισμούς για ισότοπα, που ανήκουν σε ραδιενεργές αλυσίδες. Μπορεί όμως να πραγματοποιήσει υπολογισμούς για ένα πατρικό ισότοπο και το θυγατρικό του [9]. Σχετικά με το θυγατρικό ενός ραδιοϊσοτό-

που το εγχειρίδιο του κώδικα αναφέρει μόνο ότι ο ρυθμός εκπομπής του θυγατρικού ισοτόπου Q_i δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση [9, σελ. 4]:

$$Q_i = Q_{i-1}\frac{exp(-\lambda_{i-1}t) - exp(-\lambda_i t)}{\lambda_i - \lambda_{i-1}}\lambda_i f_{D(i-1)} f_{P(i-1)} f_{R(i-1)} \tag{3.17}$$

όπου Q_{i-1} ο ρυθμός εκπομπής του πατρικού ισοτόπου. Τα υπόλοιπα μεγέθη περιγράφονται στην παράγραφο 3.2.2.4. Με δείκτη $i-1$ γίνεται αναφορά στο πατρικό και με δείκτη i στο θυγατρικό ισότοπο.

Τα παραπάνω υποδηλώνουν ότι ο κώδικας δεν μπορεί να λάβει υπόψη του στους υπολογισμούς την ποσότητα του θυγατρικού, που εκπέμπεται μαζί με το πατρικό ισότοπο από την πηγή. Αυτό όμως δεν αναφέρεται ρητά στο εγχειρίδιο του κώδικα [9].

Προκειμένου να βεβαιωθούμε για το γεγονός πραγματοποιήσαμε δοκιμαστική εκτέλεση με πατρικό ισότοπο ^{214}Bi και το θυγατρικό του ^{214}Po. Στο πατρικό ισότοπο εισάγαμε μηδενικό ρυθμό εκπομπής από την πηγή, ενώ για το θυγατρικό ο ρυθμός εκπομπής ήταν διάφορος του μηδενός. Οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις ήταν μηδενικές για το πατρικό και για το θυγατρικό ισότοπο. Εάν ο κώδικας λάμβανε υπόψη του τον ρυθμό εκπομπής του θυγατρικού, που εισάγει ο χρήστης, θα έπρεπε οι συγκεντρώσεις του θυγατρικού να είναι διάφορες του μηδενός. Οι συγκεντρώσεις του θυγατρικού όμως ήταν μηδενικές. Αυτό σημαίνει ότι οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις του θυγατρικού προκύπτουν μόνο από την διάσπαση του πατρικού. Αυτό το αποτέλεσμα επιβεβαιώνει την αρχική υπόθεση, που έγινε σχετικά με λειτουργία του κώδικα.

Για την ορθή αντιμετώπιση αυτού του θέματος μπορεί ο χρήστης να κάνει το εξής: Πραγματοποιεί αρχικά μια εκτέλεση με το πατρικό και το θυγατρικό, όπου υπολογίζεται η ποσότητα του θυγατρικού, η οποία παράγεται από το πατρικό. Στην συνέχεια πραγματοποιεί μια εκτέλεση μόνο με το θυγατρικό, όπου δηλώνεται ο ρυθμός εκπομπής του. Στην εκτέλεση αυτή υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις, που προκύπτουν από την εκπομπή του θυγατρικού. Στην συνέχεια προσθέτοντας τις συγκεντρώσεις των δύο εκτελέσεων του θυγατρικού υπολογίζονται οι συνολικές συγκεντρώσεις του θυγατρικού ισοτόπου.

3.2.5 Ανάλυση και άρση σφαλμάτων στον κώδικα ORION-II

Ένα πρόβλημα, το οποίο χρειάστηκε να αντιμετωπιστεί στα πλαίσια αυτής της ΔΔ είναι ότι ο ORION-II δεν διαθέτει εξισώσεις για τον υπολογισμό της ανύψωσης θερμών πλουμίων, καθώς αρχικά προοριζόταν για μελέτη διασποράς ρύπων από εγκαταστάσεις επεξεργασίας πυρηνικών καυσίμων. Οι εξισώσεις του κώδικα περιορίζονται στην περίπτωση, όπου τα πλούμια δεν έχουν ανύψωση λόγω διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον, αλλά ανυψώνονται μόνο λόγω της ταχύτητας εξόδου τους από την καμινά-

δα [9, σελ. 13]. Για τις εκτελέσεις, που επιθυμούσαμε να πραγματοποιήσουμε, αυτό ήταν προβληματικό, διότι τα καυσαέρια όταν βγαίνουν από τις καμινάδες των ΑΗΣ της Μεγαλόπολης έχουν θερμοκρασίες της τάξεως των 190°C.

Η λύση που δόθηκε ήταν η εξής: Ο ORION-II έχει την δυνατότητα να μπορεί ο χρήστης να εισάγει την ανύψωση του πλουμίου για τις διάφορες μετεωρολογικές συνθήκες μαζί με τα υπόλοιπα δεδομένα [9, σελ. 39]. Έτσι αποφασίστηκε να γραφτεί μια εξωτερική ρουτίνα, η οποία θα υπολογίζει την ανύψωση του πλουμίου και στη συνέχεια να εισάγονται τα αποτελέσματα, που θα δίνει, στον ORION-II. Λεπτομέρειες για την ανάπτυξη της ρουτίνας μπορεί να δει ο αναγνώστης στην παράγραφο 4.2.3

Το θέμα όμως είναι ποια υψομετρική διαφορά θεωρεί ο ORION-II ως ενεργό ύψος πλουμίου (*effective stack height HEDS*). Ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην παράγραφο 2.2.3.5 για λεπτομέριες για το συγκεκριμένο μέγεθος. Για τον ορισμό των υψών των καμινάδων ο κώδικας θεωρεί ως αρχή μέτρησης του ύψους την επιφάνεια της θάλασσας. Για το HEDS όμως το εγχειρίδιο δεν αναφέρει ποια είναι η αρχή μέτρησης αυτού του ύψους.

Προκειμένου να δούμε πώς ορίζεται η μεταβλητή HEDS (ενεργό ύψος πλουμίου) σε αυτή την περίπτωση, μελετήσαμε τον πηγαίο κώδικα. Κατά την μελέτη διαπιστώθηκε ότι στην περίπτωση, κατά την οποία το πλούμιο ορίζεται εξωτερικά, ο κώδικας δεν υπολόγιζε σωστά τον παράγοντα μείωσης της συγκέντρωσης λόγω ξηρής εναπόθεσης. Αυτοί οι υπολογισμοί γίνονται στην συνάρτηση (*function*) DRYDPS, η οποία βρίσκεται στο αρχείο orion4_.f.

3.2.5.1 Διαπίστωση - τεκμηρίωση του προβλήματος

Για να βεβαιωθούμε για το ότι ο κώδικας δεν εργαζόταν σωστά, όταν η ανύψωση του πλουμίου δινόταν από τον χρήστη, κάναμε το εξής: κάναμε μια εκτέλεση του ORION-II δίνοντας εξωτερικά την ανύψωση του πλουμίου και μία εκτέλεση, όπου η ανύψωση υπολογιζόταν από τις εξισώσεις του κώδικα.

Πραγματοποιήσαμε μια εκτέλεση του ORION-II όπου η ανύψωση του πλουμίου υπολογιζόταν εσωτερικά από τις σχετικές εξισώσεις που διαθέτει ο κώδικας. Στην συνέχεια υπολογίσαμε την ανύψωση του πλουμίου χρησιμοποιώντας την ίδια εξίσωση με αυτή, που διαθέτει ο ORION-II, η οποία παρατίθεται ακολούθως.

$$\Delta H = \frac{3W_o D}{u} \tag{3.18}$$

όπου:

ΔH: Η ανύψωση του πλουμίου (m).

W_o: Η ταχύτητα εξόδου των καυσαερίων ($msec^{-1}$).

D: Η εσωτερική διάμετρος της καμινάδας(m).

u: Η ταχύτητα του ανέμου στο μέγιστο ύψος της καμινάδας (msec^{-1}).

Εφαρμόσαμε ενδεικτικά την παραπάνω εξίσωση για τον ΑΗΣ1-2, θέτοντας όπου $\mathrm{W_o}$=$20.5\,\mathrm{msec}^{-1}$ και D=$5\,\mathrm{m}$. Όσον αφορά στην ταχύτητα του ανέμου στο μέγιστο ύψος της καμινάδας διαλέξαμε μια από τις τιμές, που υπολογίζονται στην παράγραφο 5.6.2 και είναι u=$2.27\,\mathrm{msec}^{-1}$. Η τιμή που προέκυψε ήταν ΔH=$135.3\,\mathrm{m}$.

Στην συνέχεια εισάγαμε στον ORION-II τις ανυψώσεις του πλουμίου που υπολογίσαμε και πραγματοποιούμε εκτέλεση με τις υπόλοιπες παραμέτρους ακριβώς ίδιες με την εκτέλεση, όπου η ανύψωση του πλουμίου υπολογίστηκε εσωτερικά στον κώδικα. Περισσότερα για τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές τις εκτελέσεις μπορεί να δει ο αναγνώστης στην παράγραφο 5.6.2. Αναμένουμε ότι τα αποτελέσματα των δύο εκτελέσεων θα είναι όμοια. Παρόλα αυτά τα αποτελέσματα ήταν διαφορετικά. Αυτό φαίνεται στα σχήματα 3.2, 3.3 και 3.4, τα οποία περιέχουν τιμές των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων σε ενδεικτικές διευθύνσεις ανέμου για εσωτερικό υπολογισμό της ανύψωσης πλουμίου από τον ORION-II και εξωτερικό υπολογισμό από τον χρήστη.

Αφού διαπιστώσαμε το πρόβλημα μελετήσαμε τον πηγαίο κώδικα του ORION-II για να δούμε ποιες είναι οι αιτίες. Έτσι διαπιστώθηκαν τα εξής:

- Όταν δίνεται εξωτερικά η ανύψωση του πλουμίου δεν λαμβάνεται σωστά υπόψη το ανάγλυφο του εδάφους.
- Υπάρχει σφάλμα στον υπολογισμό του παράγοντα ξηρής εναπόθεσης.

Ακολούθως παρουσιάζονται αναλυτικά τα προβλήματα καθώς και οι βελτιώσεις, που υιοθετήθηκαν.

3.2.5.2 Ανάλυση της μεθόδου υπολογισμού και προτεινόμενη διόρθωση του τρόπου υπολογισμού της επίδρασης του εδάφους

Για να γίνουν περισσότερο κατανοητές η επίμαχες εντολές του ORION-II καθώς και οι επεμβάσεις, που πραγματοποιήσαμε παρουσιάζουμε συνοπτικά το συγκεκριμένο κομμάτι του κώδικα, το οποίο αποτελείται από τις ακόλουθες υπορουτίνες:

- PLMEQ1: Είναι η υπορουτίνα υπολογισμού της συγκέντρωσης στην περίπτωση που υπολογίζουμε τη συγκέντρωση στον άξονα κάθε τομέα.
- PLMEQ2: Είναι η υπορουτίνα υπολογισμού της συγκέντρωσης στην περίπτωση που υπολογίζουμε τη μέση συγκέντρωση κάθε τομέα.
- PLMEQ3: Είναι η υπορουτίνα υπολογισμού της συγκέντρωσης στην περίπτωση που υπολογίζουμε τη μέση συγκέντρωση κάθε τομέα συμπεριλαμβάνοντας και τους γειτονικούς τομείς.

- EFHCAL: Αυτή η υπορουτίνα υπολογίζει την ανύψωση του πλουμίου και η κλίση της γίνεται από μια εκ των PLMEQ1, PLMEQ2 και PLMEQ3.
- EXPCAL: Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει το εκθετικό κομμάτι της εξίσωσης του Gauss και η κλίση της γίνεται από τις PLMEQ1, PLMEQ2 ή PLMEQ3.
- DRYDPS: Η συγκεκριμένη δεν είναι υπορουτίνα αλλά συνάρτηση και η κλίση της γίνεται από την υπορουτίνα EXPCAL. Σκοπός της DRYDPS είναι ο υπολογισμός του παράγοντα μείωσης της συγκέντρωσης του πλουμίου λόγω ξηρής εναπόθεσης.

Εποπτική παρουσίαση του κομματιού του κώδικα, που περιλαμβάνει τις συγκεκριμένες υπορουτίνες, παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5. Σημειώνεται ότι η υπορουτίνα $\mathrm{PLMEQ_i}$ αντιστοιχεί σε μια εκ των PLMEQ1, PLMEQ2 και PLMEQ3 και το διάγραμμα είναι όμοιο για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις.

Στην συνέχεια παρουσιάζουμε την λειτουργία της EFHCAL και της DRYDPS, όπου και εντοπίζεται το πρόβλημα. Ξεκινάμε με την περίπτωση, όπου η ανύψωση του πλουμίου υπολογίζεται από τον κώδικα εσωτερικά και δεν δίνεται από τον χρήστη σαν δεδομένο. Αρχικά ορίζεται στις PLMEQ1, PLMEQ2 και PLMEQ3 η μεταβλητή HZ0, που είναι η απόσταση μεταξύ του εδάφους στο σημείο υπολογισμού και του μέγιστου ύψους της καμινάδας και υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

```
line 283:   HZ0  = FL0-ZLN                          ORI14400
```

όπου:
FL0: Το ύψος της καμινάδας από την επιφάνεια της θάλασσας (βλ. γραμμή 111).
ZLN: Το υψόμετρο του εδάφους στο σημείο υπολογισμού (βλ. γραμμή 205).

Ουσιαστικά δηλαδή το H0D είναι το ύψος του πλουμίου από το έδαφος σε ένα συγκεκριμένο σημείο υπολογισμού, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.6. Έτσι ανάλογα με την διαμόρφωση του εδάφους το H0D θα μεταβάλλεται στα διάφορα σημεία. Τα DHD, FL0 όπως είναι φυσικό δεν μεταβάλλονται αλλά παραμένουν σταθερά, οπότε η μεταβολή του H0D εξαρτάται μόνο από το υψόμετρο του εδάφους ZLN.

Η ανύψωση του πλουμίου (height of plume rise) DHD υπολογίζεται στην υπορουτίνα EFHCAL. Στην ίδια υπορουτίνα στην γραμμή 738 του αρχείου orion4_.f, η οποία αντιστοιχεί στην γραμμή ORI18950 του ενιαίου αρχείου του κώδικα υπολογίζεται το ενεργό ύψος εκπομπής *(effective release height)* H0D για το συγκεκριμένο σημείο υπολογισμού.

```
line 738:   H0D  = HZ0+DHD                          ORI18950
```

Στην περίπτωση τώρα, που η ανύψωση του πλουμίου δίνεται εξωτερικά από τον χρήστη με το αρχείο δεδομένων, η εξίσωση είναι η ακόλουθη:

```
line 750:          H0D  = HEDS(JJJWD,JST,JSO)      ORI19070
```

όπου HEDS η ανύψωση του πλουμίου όπως ορίζεται από τον χρήστη.

Βλέπουμε λοιπόν ότι ο κώδικας θέτει σε όλα τα σημεία υπολογισμού το ύψος του πλουμίου από το έδαφος H0D ίσο με το ενεργό ύψος πλουμίου HEDS, που εισάγει ο χρήστης και ισούται με το ύψος της καμινάδας συν την ανύψωση του πλουμίου. Αγνοείται δηλαδή η επίδραση του εδάφους στο H0D και ουσιαστικά όλοι οι υπολογισμοί γίνονται με την παραδοχή ότι το έδαφος είναι επίπεδο.

Εμείς επειδή θέλουμε να συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς η επίδραση του εδάφους (όπως συμβαίνει όταν η ανύψωση του πλουμίου υπολογίζεται από τον κώδικα) κάνουμε το εξής: Αφαιρούμε από το HEDS το υψόμετρο του εδάφους ZLN και για να είναι σωστή η εξίσωση ο χρήστης πρέπει να δηλώνει το ενεργό ύψος πλουμίου με σημείο αναφοράς την επιφάνεια της θάλασσας και όχι την βάση της καμινάδας. Δηλαδή:

HEDS=(υψόμετρο στην βάση της καμινάδας)+(ύψος καμινάδας)+(ανύψωση πλουμίου)

Με δεδομένα όλα τα παραπάνω η παραπάνω εντολή τροποποιείται ως εξής:

```
line 750:          H0D  = HEDS(JJJWD,JST,JSO)-zln      ORI19070
```

Έτσι τώρα σε οποιοδήποτε σημείο υπολογισμού το H0D ισούται με την απόσταση του πλουμίου από την επιφάνεια του εδάφους (της οποίας το υψόμετρο μπορεί να ποικίλει).

3.2.5.3 Ανάλυση της μεθόδου υπολογισμού και προτεινόμενη διόρθωση του τρόπου υπολογισμού του παράγοντα ξηρής εναπόθεσης

Η DRYDPS για τον υπολογισμό του ολοκληρώματος της εξίσωσης 3.10 έχει μια επαναληπτική μέθοδο, η οποία χωρίζει την απόσταση μεταξύ πηγής και σημείου υπολογισμού σε 50 ίσα μέρη με πλάτος DX, όπως φαίνεται στις εντολές των γραμμών 947 και 948.

```
line 947:   DATA NX1/ 50 /                          ORI21030
line 948:   DX   = RLN/NX1                          ORI21040
```

Σε κάθε επανάληψη η απόσταση μεταξύ πηγής και νέου σημείου υπολογισμού HXX αυξάνει κατά DX:

```
line 954:   HXX  = HXX+DX                           ORI21110
```

Αφού υπολογιστεί το HXX ξεκινά ο υπολογισμός του περιεχομένου του ολοκληρώματος για την τιμή HXX, που ισχύει στην συγκεκριμένη επανάληψη:

$$\frac{1}{\sigma_{zs}} exp(-\frac{H_{eds}^2}{2\sigma_{zs}^2}) \tag{3.19}$$

Για τον υπολογισμό του H_{eds} καλεί την EFHCAL η οποία του επιστρέφει την τιμή του DHD (ανύψωση του πλουμίου). Στην συνέχεια υπολογίζει το H_{eds} με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

```
line 956:   HE = HZ0+DHD-HXX*T                    ORI21130
```

Το T ισούται με:

```
line 952:   T = RVG*HARW                          ORI21090
```

όπου:
RVG: η ταχύτητα βαρυτικής επικάθησης του σωματιδίου
HARW: η αντίστροφη ταχύτητα του ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου.

Στην περίπτωση, που ο υπολογισμός της ανύψωσης του πλουμίου γίνεται από τον κώδικα, όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται σωστά. Όταν όμως η ανύψωση του πλουμίου παρέχεται εξωτερικά από τον χρήστη με το αρχείο δεδομένων, συμβαίνει το εξής:

Η DRYDPS επιχειρεί να υπολογίσει και πάλι την ανύψωση του πλουμίου από την εξίσωση της γραμμής 956. Όμως τώρα η τιμή του DHD, που επιστρέφει η EFHCAL στην DRYDPS, είναι μηδέν (έγινε έλεγχος με τον debugger), αφού η EFHCAL δεν κάνει αυτόν τον υπολογισμό αλλά θέτει εξ' αρχής ότι:

```
line 750:   H0D  = HEDS(JJJWD,JST,JSO)-zln        ORI19070
```

Το πρόβλημα δηλαδή είναι ότι ενώ εμείς έχουμε δηλώσει στον ORION-II ότι το ενεργό ύψος πλουμίου θα παρέχεται από τον χρήστη, η DRYDPS επιχειρεί να το υπολογίσει με τις κλασσικές εξισώσεις, που διαθέτει ο κώδικας.

Συνεπώς, για να δουλεύει σωστά ο κώδικας, θα πρέπει η DRYDPS να υπολογίζει διαφορετικά το HE στην περίπτωση, που το ενεργό ύψος του πλουμίου παρέχεται από τον χρήστη. Ο όρος $HZ0 + DHD$ παριστάνει την απόσταση του πλουμίου από το έδαφος στο σημείο υπολογισμού πριν συμπεριλάβουμε την επίδραση της ταχύτητας βαρυτικής επικάθησης, αφού HZ0 είναι το ύψος της καμινάδας και DHD η ανύψωση του πλουμίου. Με βάση τα παραπάνω η απόσταση του πλουμίου από το έδαφος στο σημείο υπολογισμού (για την περίπτωση που το ενεργό ύψος πλουμίου παρέχεται από τον χρήστη) θα δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

```
line 961:   he = h0d - hxx*t
```

Επιπλέον χρειάζεται η προσθήκη μιας IF THEN - ELSE ώστε να εξασφαλίζεται ότι ο έλεγχος του προγράμματος θα περνά από την παραπάνω εξίσωση μόνο όταν το ενεργό ύψος πλουμίου παρέχεται από τον χρήστη, οπότε η μεταβλητή IOP2 γίνεται ίση με 3. Η υλοποίηση όλων των παραπάνω φαίνεται στις ακόλουθες εντολές:

```
line 960:   if (iop2 .eq. 3) then
line 961:     he = h0d - hxx*t
line 962:   else
line 963:     HE   = HZ0+DHD-HXX*T  !original ORION-II statement ORI21130
line 964:   endif
```

3.2.5.4 Τεκμηρίωση της επιτυχίας των επεμβάσεων

Στην συνέχεια έγινε επιτυχής μετάφραση και σύνδεση του ORION-II και το νέο εκτελέσιμο, που προέκυψε ονομάστηκε orionDev.exe. Το αρχείο ανάγνωσης δεδομένων ονομάστηκε data.txt και το αρχείο αποτελεσμάτων results.txt.

Ακολούθησαν λεπτομερείς έλεγχοι σωστής λειτουργίας του κώδικα στο συγκεκριμένο σημείο με την βοήθεια του debugger, που διαθέτει η MS Fortran PowerStation: Έτσι έγινε εκτέλεση 'βήμα-βήμα' τόσο για την περίπτωση, που η ανύψωση πλουμίου υπολογίζεται από τον κώδικα, όσο και για την περίπτωση, που το ενεργό ύψος πλουμίου το παρέχει ο χρήστης. Οι τιμές που λάμβαναν κάθε φορά οι μεταβλητές ήταν οι αναμενόμενες ενώ και ο έλεγχος του προγράμματος περνούσε κάθε φορά από τις σωστές εντολές.Ακολούθως ελέγχθηκε μήπως κάποια από τις μεταβλητές, που υπεισέρχονται σε εκείνο το σημείο στους υπολογισμούς, χρησιμοποιείται παρακάτω και οι νέες τους τιμές εισάγουν σφάλμα στην εκτέλεση του κώδικα. Ελέγχθησαν όλες οι σχετικές υπορουτίνες αλλά δεν προέκυψε κάτι.

Προκειμένου να επιβεβαιωθούμε για το σωστό της επέμβασης έγινε το ακόλουθο: Κάναμε μια εκτέλεση του ORION-II στην αρχική του μορφή, πριν την επέμβαση. Σε αυτή την εκτέλεση η ανύψωση του πλουμίου υπολογίστηκε εσωτερικά από τις εξισώσεις του κώδικα. Γι' αυτά τα μετεωρολογικά δεδομένα, που εισάγαμε, υπολογίσαμε εμείς την ανύψωση του πλουμίου χρησιμοποιώντας τις ίδιες εξισώσεις με τον ORION-II. Στην συνέχεια εκτελέσαμε την τροποποιημένη μορφή του κώδικα, δίνοντας εξωτερικά την ανύψωση του πλουμίου, που υπολογίσαμε προηγουμένως. Περισσότερα για τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές τις εκτελέσεις μπορεί να δεί ο αναγνώστης στην παράγραφο 5.6.2. Ακολούθως συγκρίναμε τις δύο διαφορετικές υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις και ήταν όμοιες, όπως φαίνεται στα σχήματα 3.7 και 3.8. Αυτό δείχνει ότι η τροποποιημένη μορφή του ORION-II, όταν εκτελείται με εξωτερική εισαγωγή της ανύψωσης του πλουμίου, δίνει όμοια αποτελέσματα με την αρχική μορφή του κώδικα, όταν αυτός υπολογίζει την ανύψωση του πλουμίου εσωτερικά. Αυτό δεν συνέβαινε πριν

την επέμβαση όπως φαίνεται στα σχήματα 3.2 3.3 και 3.4, που παρουσιάζονται στις σελίδες 88, 88.

Με βάση όλα τα παραπάνω βλέπουμε λοιπόν ότι η νέα μορφή του κώδικα δίνει τα αναμενόμενα αποτελέσματα και επομένως μπορούμε να πούμε ότι η τροποποιημένη μορφή του ORION-II εργάζεται σωστά και ότι η διόρθωση ήταν επιτυχής. Σημειώνεται ότι ο πηγαίος κώδικας του ORION-II, όπως προέκυψε μετά την επιτυχημένη διόρθωση, περιέχεται στο CD, το οποίο συνοδεύει την παρούσα ΔΔ.

3.3 Ο κώδικας GENII

3.3.1 Γενικά

Ο κώδικας GENII είναι ένας κώδικας υπολογισμού ατμοσφαιρικής διασποράς ραδιενεργών ισοτόπων. Αναπτύχθηκε από τους Napier et al. [128] στο PNNL (Pacific Northwest National Laboratory). Η πρώτη του έκδοση δημοσιεύτηκε το 1988 και ακολούθησε το 2002 η δεύτερη (version 2.0). Είναι λογισμικό κλειστού κώδικα καθώς, στην διανομή περιλαμβάνονται μόνο τα εκτελέσιμα αρχεία. Η δεύτερη έκδοση διατίθεται αποκλειστικά για προσωπικούς υπολογιστές (PC), που διαθέτουν λειτουργικό σύστημα MS Windows 2000 ή XP και η διάθεση γίνεται από την US EPA μέσα από την ιστοσελίδα της. Ο κώδικας διαθέτει παραθυρικό περιβάλλον για την επικοινωνία του με τον χρήστη, το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 3.9.

Ο GENII πραγματοποιεί υπολογισμούς μεγάλης χρονικής διάρκειας (*long term dispersion model*) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκλύσεις, που συμβαίνουν στην επιφάνεια του εδάφους καθώς και για ανυψωμένες πηγές. Υπολογίζει τόσο τις προκύπτουσες συγκεντρώσεις στα επιλεγμένα από τον χρήστη σημεία του επιπέδου όσο και τις αντίστοιχες ραδιενεργές δόσεις, που επιβαρύνουν τον πληθυσμό. Έχει τη δυνατότητα να συμπεριλαμβάνει στους υπολογισμούς του το φαινόμενο των ραδιενεργών αλυσίδων ενώ δεν έχει δυνατότητα να υπολογίζει την επίδραση του εδάφους, καθώς θεωρεί πάντα το πεδίο ενδιαφέροντος ως επίπεδο μηδενικού ύψους.

Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιαστούν ο τρόπος με τον οποίο έγινε η επιλογή του συγκεκριμένου κώδικα, οι βασικότερες εξισώσεις, που χρησιμοποιεί, καθώς και θέματα, τα οποία σχετίζονται με την εγκατάσταση και λειτουργία του κώδικα. Περισσότερα μπορεί να δει ο αναγνώστης στο εγχειρίδιο χρήσης του κώδικα [127] και στην τεκμηρίωση ανάπτυξης του [128].

3.3.2 Η επιλογή του κώδικα

Όπως είδαμε στην παράγραφο 3.2.4 ο ORION-II παρουσιάζει αδυναμία στους υπολογισμούς συγκεντρώσεων ισοτόπων, που ανήκουν σε αλυσίδες, όπως το ^{238}U, το ^{226}Ra,

ο ^{210}Pb και το ^{232}Th. Γι' αυτό τον λόγο αναζητήθηκαν και άλλοι κώδικες, οι οποίοι θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της διασποράς ραδιενεργών ρύπων από τις καμινάδες των ατμοηλεκτρικών σταθμών στην Μεγαλόπολη. Βασικά κριτήρια στην αναζήτηση ήταν:

- Η δυνατότητα του κώδικα να κάνει υπολογισμούς για μεγάλα χρονικά διαστήματα (ελάχιστο διάστημα το έτος). Κώδικες που προσομοιάζουν το φαινόμενο για μερικές ώρες ή μέρες σίγουρα δίνουν λεπτομερέστερα αποτελέσματα, αλλά αυτά ισχύουν μόνο για τις μετεωρολογικές συνθήκες, που επικρατούσαν εκείνο το περιορισμένο χρονικά διάστημα. Καθώς οι μετεωρολογικές συνθήκες είναι μεταβαλλόμενες κατά την διάρκεια του έτους γίνεται αντιληπτό ότι με τον παραπάνω τρόπο γίνεται μια πολύ περιορισμένη προσέγγιση του φαινομένου.

- Η δυνατότητα του κώδικα να πραγματοποιεί τους υπολογισμούς χωρίς να χρειάζεται μετεωρολογικά δεδομένα (ταχύτητα, διεύθυνση ανέμου κ.α.) της ανώτερης ατμόσφαιρας, διότι η ΕΜΥ διαθέτει τέτοιες παρατηρήσεις μόνο για την Αθήνα, την Θεσσαλονίκη και το Ηράκλειο. Η διενέργεια ραδιοβολίσεων από μέρους μας για την μέτρηση τέτοιων μεγεθών, προϋποθέτει την αγορά πολύ δαπανηρού εξοπλισμού και επιπλέον ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας ΔΔ.

- Επίσης καλό θα ήταν ο κώδικας να είναι ανοιχτός, δηλαδή να παρέχονται στον χρήστη τα πηγαία αρχεία από τα οποία παράγεται το εκτελέσιμο πρόγραμμα. Η χρησιμότητα μιας τέτοιας δυνατότητας φάνηκε παραπάνω.

Η έρευνα για την επιλογή κατάλληλου κώδικα πραγματοποιήθηκε στο διαδίκτυο και επικεντρώθηκε κυρίως στις βάσεις δεδομένων της *NEA-OECD* και της *US EPA (Environmental Protection Agency)*. Από την έρευνα στα πλαίσια αυτής της ΔΔ προέκυψαν τα εξής:

- Ο CTDMplus και ο AERMOD είναι κώδικες με πάρα πολλές δυνατότητες αλλά χρειάζονται δεδομένα της ανώτερης ατμόσφαιρας για να τρέξουν, οπότε απορρίπτονται εξ αρχής.

- Ο ISC3 LT δεν έχει δυνατότητα να συμπεριλάβει στους υπολογισμούς την ραδιενεργή διάσπαση των στοιχείων και συνεπώς δεν μπορεί να μας εξυπηρετήσει.

- Ένας κώδικας ο οποίος θα μπορούσε να μας εξυπηρετήσει είναι ο CAP-88. Όμως εμείς στο πεδίο μας έχουμε πηγές εκπομπής ραδιενεργών ισοτόπων σε δύο διαφορετικά σημεία, πράγμα που δεν έχει την δυνατότητα ο συγκεκριμένος κώδικας να το λάβει υπόψη του. Επίσης ο CAP-88 στους υπολογισμούς του θεωρεί ότι το

έδαφος είναι επίπεδο κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στην κοιλάδα της Μεγαλόπολης.

- Ένας κώδικας με πάρα πολλές δυνατότητες είναι ο ADMS3. Σε αντίθεση με τους προηγούμενους είναι εμπορικό πακέτο με κλειστό πηγαίο κώδικα και με τεράστιο κόστος απόκτησης, οπότε δεν μας ταιριάζει. Συγκεντρωτικά στοιχεία για τους εν λόγω κώδικες μπορεί να δει κανείς στον πίνακα 3.1.

Τελικά επιλέχθηκε ο GENII version 2, ο οποίος έχει δυνατότητα να κάνει υπολογισμούς για ισότοπα, που ανήκουν σε ραδιενεργές αλυσίδες, μπορεί να κάνει τρεξίματα για πολλαπλές πηγές και επίσης μπορεί να κάνει εκτενή δοσιμετρία σύμφωνα με την επιβάρυνση, που προκύπτει από την έκλυση. Από τα τρία κριτήρια, που θέσαμε στην αρχή, μόνο αυτό του ανοιχτού κώδικα δεν ικανοποιείται. Παρόλα αυτά επιλέγουμε αυτόν τον κώδικα διότι εκπληρώνει καλύτερα από όλους τους υπόλοιπους τις απαιτήσεις μας. Μετά την αρχική επιλογή κατεβάσαμε τον κώδικα από το site της EPA [203], ώστε να τον εγκαταστήσουμε στα υπολογιστικά συστήματα του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Η έκδοση, που παρέχει η EPA είναι κατάλληλη για προσωπικούς υπολογιστές, οι οποίοι έχουν εγκατεστημένο το λειτουργικό σύστημα Windows XP ή Windows 2000.

3.3.3 Βασικές εξισώσεις υπολογισμού του κώδικα GENII

3.3.3.1 Εξισώσεις διασποράς των ρύπων

Ο GENII, όπως και ο ORION-II, είναι ένας κώδικας, που οι εξισώσεις του στηρίζονται στην εξίσωση του Gauss [128, σελ. 40]. Όμοια και εδώ το επίπεδο χωρίζεται σε 16 τομείς (ανά 22.5°) και η συγκέντρωση κάθε τομέα δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\chi(\theta_i, r, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} U \sigma_z \theta_w} Q'(r) G(z) \tag{3.20}$$

όπου:

$\chi(\theta_i, r, z)$: Η συγκέντρωση σε απόσταση r, στον τομέα θ_i, σε ύψος z.

$Q'(r)$: Η μάζα του ισοτόπου, που απελευθερώνεται, διορθωμένη για ξηρή εναπόθεση και ραδιενεργή διάσπαση.

θ_w: Το πλάτος του τομέα.

U: Η ταχύτητα του ανέμου.

σ_z: Η παράμετρος κάθετης διασποράς.

$G(z)$: Ο κάθετος παράγοντας, που δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$G(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} exp[-\frac{(2nH + (h_{eff} - z))^2}{2\sigma_z^2}] + exp[-\frac{(2nH - (h_{eff} - z))^2}{2\sigma_z^2}] \quad (3.21)$$

h_{eff}: Το ενεργό ύψος πλουμίου.
H: Το πάχος του ύψους μίξης.

Σχετικά με την ανύψωση του πλουμίου και τις αντίστοιχες εξισώσεις μπορεί να δει ο αναγνώστης στο σχετικό εγχειρίδιο του GENII [128, σελ. 51] καθώς και στην παράγραφο 2.2.3.2 της παρούσης.

3.3.3.2 Κατακόρυφο προφίλ ανέμου

Ο GENII διαθέτει εξισώσεις για τον υπολογισμό του προφίλ του ανέμου, στην περίπτωση που οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου έχουν γίνει σε άλλο ύψος από αυτό της καμινάδας [128, σελ. 57]. Σημειώνεται ότι ο ORION-II δεν διαθέτει τέτοιες εξισώσεις. Οι εξισώσεις αυτές είναι βασισμένες στο διαβατικό μοντέλο προφίλ ανέμου, το οποίο έχει ως βασικά μεγέθη εκτίμησης την ατμοσφαιρική ευστάθεια και την τραχύτητα της επιφάνειας του εδάφους (*surface roughness*).

Το συγκεκριμένο μοντέλο βασίζεται στην θεωρία ομοιότητας για το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα των Monin και Obukhov. Η βασική υπόθεση της θεωρίας ομοιότητας είναι ότι ένας αριθμός μεγεθών στο ατμοσφαιρικό στρώμα κοντά στο έδαφος συμπεριλαμβανομένου και του προφίλ της ταχύτητας του ανέμου είναι ομοιόμορφες συναρτήσεις (*universal functions*) της ταχύτητας τριβής (*friction velocity*), της κλίμακας μήκους *(length scale) L* και του ύψους πάνω από το έδαφος.

Η κλίμακα μήκους L είναι πιο γνωστή ως *μήκος Monin-Obukhov* και ο λόγος z/L σχετίζεται με την ατμοσφαιρική ευστάθεια. Όταν ο λόγος z/L είναι αρνητικός (π.χ. < -2) η ατμόσφαιρα είναι ασταθής. Το αντίθετο συμβαίνει όταν ο λόγος είναι θετικός οπότε η ατμόσφαιρα είναι ευσταθής. Τέλος όταν ο λόγος είναι μηδέν η ατμόσφαιρα είναι ουδέτερη. Το διαβατικό προφίλ ταχύτητας ανέμου δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$U(z) = \frac{u_*}{k}[ln(\frac{z}{z_o}) - \psi(\frac{z}{L})] \quad (3.22)$$

όπου:

$U(z)$: Ταχύτητα ανέμου στο ύψος z (m/sec).
u_*: Ταχύτητα τριβής (m/sec).
k: Σταθερά von Karman ίση περίπου με 0.4.
z: Ύψος (m).
z_o: Μέτρο της τραχύτητας της επιφάνειας του εδάφους (m).
ψ: Παράγοντας διόρθωσης ευστάθειας.
L: Μήκος Monin-Obukhov (m).
Το $\psi(z/L)$ εξαρτάται από την ευστάθεια της ατμόσφαιρας: Για ευσταθείς συνθήκες η τιμή του είναι:

$$\psi(z/L) = -a\frac{z}{L} \tag{3.23}$$

Η τιμή του a κυμαίνεται από 4.7 έως 5.2. Ο GENII λαμβάνει τιμή ίση με 5. Όταν επικρατούν ασταθείς συνθήκες το $\psi(z/L)$ δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\psi(z/L) = ln\left[\left(\frac{1+x^2}{2}\right)\left(\frac{1+x}{2}\right)^2\right] - 2arctanx + \frac{\pi}{2} \tag{3.24}$$

$$x = (1 - 16\frac{z}{L})^{1/4} \tag{3.25}$$

3.3.3.3 Εξισώσεις υπολογισμού της ταχύτητας ξηρής εναπόθεσης

Σε αντίθεση με τον ORION-II, όπου η ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης ορίζεται από τον χρήστη, ο GENII διαθέτει σειρά εξισώσεων για τον υπολογισμό αυτού του μεγέθους[128]. Η σχετική θεωρία έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 2.3.1.

Για μικρά σωματίδια ($\sim 1\mu m$) ή για αέρια ο GENII χρησιμοποιεί την εξίσωση 2.49, την οποία την έχουμε ήδη αναφέρει στην παράγραφο 2.3.1.

$$V_d = \frac{1}{r_a + r_s + r_t} \tag{3.26}$$

Η αεροδυναμική αντίσταση r_a υπολογίζεται απ' ευθείας από την ταχύτητα του ανέμου $U(z)$ στο ύψος υπολογισμού και την ταχύτητα τριβής (*friction velocity*) u_* με την βοήθεια του ακόλουθου τύπου:

$$r_a = \frac{U(z)}{u_*^2} \tag{3.27}$$

Σχετικά τώρα με το ύψος υπολογισμού ισχύουν τα εξής: Η συγκέντρωση του ρυπαντή είναι περίπου σταθερή για $z < 0.2\sigma_z$ με την προϋπόθεση όμως η απόσταση x από την πηγή να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε το σ_z να είναι μεγαλύτερο ή ίσο με το ύψος της καμινάδας. Έτσι για τις περισσότερες εκλύσεις, που πραγματοποιούνται σε μεγάλο ύψος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ταχύτητα, που μετράται σε ύψος $10m$.

Η επιφανειακή αντίσταση r_s εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα τριβής u_* και υπολογίζεται ως εξής:

$$r_s = \frac{2.6}{0.4u_*} = \frac{6.5}{u_*} \tag{3.28}$$

όπου 2.6 είναι μια αδιάστατη εμπειρική σταθερά και 0.4 είναι η σταθερά του von Karman.

Για την αντίσταση μεταφοράς r_t, ο GENII έχει προεπιλεγμένες τιμές 10 και 100 s/m για αέρια και σωματίδια αντίστοιχα. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα να εισάγει ο χρήστης δικές του τιμές.

Η εξίσωση 3.26 είναι κατάλληλη για μικρά σωματίδια όπου η ταχύτητα βαρυτικής επικάθησης V_g μπορεί να αγνοηθεί. Όταν η τελευταία είναι σημαντική, η εξίσωση 3.26 τροποποιείται ως εξής:

$$V_d = \frac{1}{r_a + r_s + r_t + r_a r_s V_g} + V_g \tag{3.29}$$

Για τον υπολογισμό της $\mathrm{V_g}$ ο GENII χρησιμοποιεί μια ελαφρώς τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης 2.51 την οποία παραθέτουμε ακολούθως:

$$V_g = \frac{(\rho - \rho_{AIR}) g d_p^2 c_2 S_{CF}}{18\mu} \tag{3.30}$$

όπου:
ρ = Πυκνότητα του σωματιδίου ($\mathrm{gcm^{-3}}$).
ρ_{AIR} = Πυκνότητα του αέρα (=$1.2 \times 10^3\,\mathrm{gcm^{-3}}$).
$\mathrm{d_p}$ = Διάμετρος του σωματιδίου (μm).
μ = Δυναμική συνεκτικότητα του αέρα (=$1.81 \times 10^{-4}\,\mathrm{gcm^{-1}s^{-1}}$).
$\mathrm{c_2}$ = Σταθερά μετατροπής μονάδων (=$1 \times 10^{-8}\,\mathrm{cm^2}\mu\mathrm{m^{-2}}$).
$\mathrm{S_{CF}}$ = Παράγοντας διόρθωσης ολίσθησης, ο οποίος υπολογίζεται από μια τροποποιημένη (όσον αφορά το λ) μορφή της εξίσωσης 2.52:

$$S_{CF} = 1 + \frac{2x_2\left(a_1 + a_2 exp(-\frac{a_3 d_p}{x_2})\right)}{10^{-4} d_p} \tag{3.31}$$

όπου $\mathrm{x_2}$, $\mathrm{a_1}$, $\mathrm{a_2}$, και $\mathrm{a_3}$ σταθερές με τιμές 6.5×10^{-6}, 1.257, 0.4 και 0.55×10^{-4} αντίστοιχα.

3.3.4 Δοσιμετρία με την βοήθεια του κώδικα GENII

Ο κώδικας GENII έχει την δυνατότητα να πραγματοποιεί υπολογισμούς για ατομική δόση, που προκύπτει από την διασπορά των ραδιενεργών ισοτόπων στο περιβάλλον. Ο

κώδικας στους υπολογισμούς του λαμβάνει υπόψη τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Εσωτερική έκθεση λόγω εισπνοής των ραδιενεργών ισοτόπων, που βρίσκονται στον ατμοσφαιρικό αέρα. Τα ισότοπα, τα οποία έχουν εκπεμφθεί στην ατμόσφαιρα, εισπνέονται και εισέρχονται στην αναπνευστική οδό και στην συνέχεια στον πνεύμονα. Κατά την διαδρομή τους εάν διασπαστούν θα εκπέμψουν ακτινοβολία, η οποία θα αλληλεπιδράσει με τους ιστούς του πνεύμονα κυρίως. Εάν τα ισότοπα παραμείνουν μέσα στον πνεύμονα και δεν απομακρυνθούν γίνεται κατανοητό ότι η επιβάρυνση των ιστών θα είναι διαρκής.

- Εσωτερική έκθεση λόγω κατάποσης τροφών, που περιέχουν ραδιενεργά ισότοπα. Αυτή προέρχεται από κατάποση καρπών, λαχανικών και ζωικών προϊόντων που έχουν παραχθεί στην υπό έρευνα περιοχή, καθώς και από κατάποση χώματος της εν λόγω περιοχής. Τα ισότοπα μετά την εκπομπή τους στην ατμόσφαιρα εναποτίθενται στο έδαφος ή επάνω στα φυτά. Ακολουθεί απορρόφηση μέρους των ισοτόπων είτε με την βοήθεια των ριζών από το χώμα είτε από τα απ΄ ευθείας από τα φύλλα. Στην συνέχεια ο άνθρωπος καταναλώνει τους καρπούς των φυτών είτε το φύλλωμα τους (π.χ. μαρούλια). Τα φυτά τα οποία έχουν απορροφήσει τα ισότοπα μπορεί να καταναλωθούν και από τα οικόσιτα ζώα. Έτσι τα εκπεμπόμενα ισότοπα περνούν στην τροφική αλυσίδα μέσω του γάλακτος, των αυγών καθώς και του κρέατος, που προέρχονται από τα συγκεκριμένα ζώα. Με τον ένα ή τον άλλο τρόπο τα εκπεμπόμενα ισότοπα θα καταλήξουν στην γαστρεντερική οδό, όπου κατά την διάσπαση τους θα ακτινοβολούν τους γύρω ιστούς. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι εξισώσεις του GENII λαμβάνουν υπόψη τους την απομείωση της συγκέντρωσης των ισοτόπων, που συμβαίνει στο χρονικό διάστημα από την απόθεση των ισοτόπων στο έδαφος μέχρι την κατανάλωση των τροφών από τον άνθρωπο.

- Εξωτερική έκθεση λόγω ακτινοβολίας των ραδιενεργών ισοτόπων, που έχουν εναποτεθεί στο έδαφος. Τα εκπεμπόμενα ισότοπα εναποτίθενται στο έδαφος και στην συνέχεια διασπόμενα εκπέμπουν ακτινοβολία, η οποία πλήττει τους ιστούς, αυτών που θα βρεθούν σε εύλογη απόσταση.

- Εξωτερική έκθεση λόγω ακτινοβολίας των ραδιενεργών ισοτόπων, που βρίσκονται στον ατμοσφαιρικό αέρα. Τα εκπεμπόμενα ισότοπα, που βρίσκονται ακόμη στην ατμόσφαιρα διασπώνται και εκπέμπουν ακτινοβολία, η οποία αλληλεπιδρά με τους ιστούς του σώματος, αυτών που βρίσκονται στην εν λόγω περιοχή.

Οι παραπάνω τρόποι επιβάρυνσης, που λαμβάνει υπόψη του ο GENII παρουσιάζονται στο σχήμα 3.10.

Για τον υπολογισμό των δόσεων ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τους συντελεστές που θα χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς. Έτσι έχει να επιλέξει μεταξύ των συντελεστών που προτείνουν οι ICRP 30 [88] και Federal Guidance Report 11 [50] & Federal Guidance Report 12 [49], καθώς και των συντελεστών που προτείνουν οι ICRP 60 [89] και Federal Guidance Report 12 [49] & Federal Guidance Report 13 [48]. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιήσει και τους EPA Slope Factors, που είναι ένα υποσύνολο του Federal Guidance Report 13 [127].

Οι παραπάνω συντελεστές είναι κυρίως συντελεστές μετατροπής δόσεων (*Dose conversion factors*) καθώς και συντελεστές απορρόφησης ραδιενεργών ισοτόπων που βρίσκονται στο έδαφος από τα φυτά (*Concentration factors for uptake of radionuclides from soil*). Οι παραπάνω συντελεστές εφαρμόζονται στις εξισώσεις υπολογισμού των δόσεων, που χρησιμοποιεί ο κώδικας και περιγράφονται στο εγχειρίδιο σχεδιασμού του κώδικα [128, σελ. 107 κ.εξ.] και μπορεί να ανατρέξει εκεί ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης.

3.3.5 Εγκατάσταση του κώδικα GENII στα υπολογιστικά συστήματα του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Ο GENII διανέμεται από την EPA με την μορφή ενός εκτελέσιμου έτοιμου προς εγκατάσταση σε λειτουργικό σύστημα Windows 2000 ή XP. Τρέχοντας το συγκεκριμένο εκτελέσιμο ο χρήστης εγκαθιστά τον κώδικα με την βοήθεια ενός βοηθού εγκατάστασης (*wizard*).

Κατά την διαδικασία εγκατάστασης του κώδικα παρουσιάστηκε το μήνυμα σφάλματος του σχήματος 3.11. Επιλέξαμε cancel και η εγκατάσταση συνεχίστηκε. Στην συνέχεια της εγκατάστασης παρουσιάστηκε ακόμα ένα μήνυμα σφάλματος, το οποίο φαίνεται στο σχήμα 3.12. Πατώντας OK η εγκατάσταση συνεχίστηκε μέχρι τέλους βγάζοντας μάλιστα μήνυμα ότι ήταν επιτυχής. Πάντως παρά τα μηνύματα σφάλματος ο κώδικας έτρεχε χωρίς προβλήματα ή άλλες εμφανείς ενδείξεις κακής λειτουργίας.

Δοκιμάσαμε να απεγκαταστήσουμε τον κώδικα και να κάνουμε νέα εγκατάσταση αλλά τα μηνύματα σφάλματος εμφανίστηκαν εκ νέου. Στην συνέχεια εγκαταστήσαμε τον κώδικα σε διαφορετικό υπολογιστή αλλά το πρόβλημα παρέμεινε.

Το μήνυμα σχετικά με τα Microsoft Data Access Components (MDAC) οφείλεται στο ότι οι συγκεκριμένες ρουτίνες υπάρχουν ήδη εγκατεστημένες στα Windows XP οπότε και δεν χρειάζεται να εγκατασταθούν εκ νέου, καθώς μάλιστα αυτές των XP είναι περισσότερο πρόσφατες. Τα MDAC υπάρχουν στην διανομή του κώδικα για την περίπτωση, που αυτός εγκατασταθεί σε υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα Windows 95, 98 ή Me, τα οποία δεν διαθέτουν τις παραπάνω ρουτίνες. Το παραπάνω συμπέρασμα μας το επιβεβαίωσε και ο συγγραφέας του κώδικα B. Napier σε προσωπική

επικοινωνία: Μας είπε μάλιστα απλώς να αγνοήσουμε το συγκεκριμένο μήνυμα. Την ίδια συμβουλή μας έδωσε και για το δεύτερο μήνυμα, που εμφανίζεται κατά την εγκατάσταση (self-registration error). Σύμφωνα με τον Napier και τα δύο οφείλονται σε προγραμματιστικές αδυναμίες και δεν προκαλούν κανένα πρόβλημα στην σωστή λειτουργία του κώδικα. Συνεπώς μπορούμε να πούμε ότι ο GENII έχει εγκατασταθεί και λειτουργεί σωστά.

Κατά την λειτουργία του GENII διαπιστώθηκε και το ακόλουθο, το οποίο δεν αναγράφεται πουθενά στο εγχειρίδιο χρήσης του κώδικα [127]: Ο προεπεξεργαστής μετεωρολογικών δεδομένων τρέχει επιτυχώς μόνο εάν στην καρτέλα *joint frequency info* ο αριθμός των κλάσεων ατμοσφαιρικής ευστάθειας είναι ίσος με τον αριθμό των κλάσεων, που έχουμε στο αρχείο των μετεωρολογικών δεδομένων. Το ίδιο ισχύει και για τον αριθμό των κλάσεων της ταχύτητας του ανέμου. Επίσης κατά την λειτουργία του προεπεξεργαστή των μετεωρολογικών δεδομένων εμφανίζονται τα ακόλουθα μηνύματα σφάλματος σε περιβάλλον DOS:

```
Invalid handle
Invalid handle
Invalid handle
Forrtl: the handle is invalid
Forrtl: severe<38>:error during write, unit 6, file CONOUT$
Invalid handle
Invalid handle
Invalid handle
Invalid handle
Invalid handle
```

Σύμφωνα με τον B. Napier (προσωπική επικοινωνία) ο χρήστης μπορεί να αγνοεί την εμφάνιση αυτών των μηνυμάτων καθώς δεν σημαίνουν τίποτα όσον αφορά στην σωστή λειτουργία του κώδικα.

Κάνοντας δοκιμαστικές εκτελέσεις του κώδικα διαπιστώθηκε ότι παρουσιάζεται σφάλμα και σταματάει η εκτέλεση εάν στο σενάριο περιλαμβάνονται τα θυγατρικά του ραδονίου. Σε επικοινωνία, που ακολούθησε με τον συγγραφέα του κώδικα B. Napier, ο τελευταίος μας είπε ότι ο κώδικας όντως έχει κάποιο σφάλμα στο σημείο, που χειρίζεται τα θυγατρικά του ραδονίου, και μας προμήθευσε με μια νέα έκδοση, η οποία δεν είχε βγει στην δημοσιότητα όταν γινόταν η εγκατάσταση και οι εκτελέσεις του GENII, και αντιμετωπίζει επιτυχώς το πρόβλημα.

Επίσης, παρατηρήθηκε ότι το παραθυρικό περιβάλλον του κώδικα, που δέχεται τα δεδομένα για τον υπολογισμό της τύρβης (building wake), που προκαλούν τα κτίρια λειτουργίας των σταθμών, δεν μπορεί να λειτουργήσει σωστά, καθώς αδυνατεί να διατη-

ρήσει και να αποθηκεύσει τις τιμές, που εισάγει ο χρήστης. Έτσι όλοι οι υπολογισμοί, που πραγματοποιούνται δεν λαμβάνουν υπόψη τους το φαινόμενο της τύρβης, που προκαλούν τα κτίρια των σταθμών.

Τέλος διαπιστώθηκε το ακόλουθο πρόβλημα στην λειτουργία του κώδικα σχετικά με την εισαγωγή τιμών του συντελεστή επαναιώρησης (*resuspension factor*) στο παραθυρικό περιβάλλον του κώδικα. Οποιαδήποτε τιμή συντελεστή επαναιώρησης και να εισάγει ο χρήστης η εκτέλεση πραγματοποιείται με την προεπιλεγμένη τιμή που διαθέτει ο κώδικας και είναι $1 \times 10^{-9}\,\mathrm{m}^{-1}$. Αυτό διαπιστώνεται κατά την ανάγνωση του αρχείου αποτελεσμάτων .epa, όπου αναφέρονται οι παράμετροι, με τις οποίες έγινε η εκτέλεση του κώδικα. Μάλιστα στις διάφορες δοκιμαστικές εκτελέσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν, δεν παρατηρήθηκε καμία διαφοροποίηση στα αποτελέσματα, είτε δόθηκαν τιμές για τον συντελεστή επαναιώρησης είτε όχι.

3.3.6 Παρατηρήσεις

Στις παραγράφους, που προηγήθηκαν παρουσιάστηκαν οι δύο κώδικες και η λειτουργία τους. Ο κάθε ένας διαθέτει ορισμένα πλεονεκτήματα και ορισμένα μειονεκτήματα.

Ο ORION-II έχει ως βασικό πλεονέκτημα ότι είναι λογισμικό ανοικτού κώδικα και μάλιστα ανεξάρτητο πλατφόρμας δηλαδή είναι δυνατόν να εργαστεί κάτω από διαφορετικά λειτουργικά συστήματα, όπως δείχθηκε και στην παράγραφο 3.2.3.3. Επίσης έχει την δυνατότητα να λαμβάνει υπόψη του στους υπολογισμούς την επίδραση του εδάφους. Στα αρνητικά του σημεία περιλαμβάνονται η έλλειψη εξισώσεων για θερμά πλούμια καθώς και για ισότοπα, που ανήκουν σε ραδιενεργές αλυσίδες. Επίσης δεν διαθέτει γραφικό περιβάλλον για τον χρήστη.

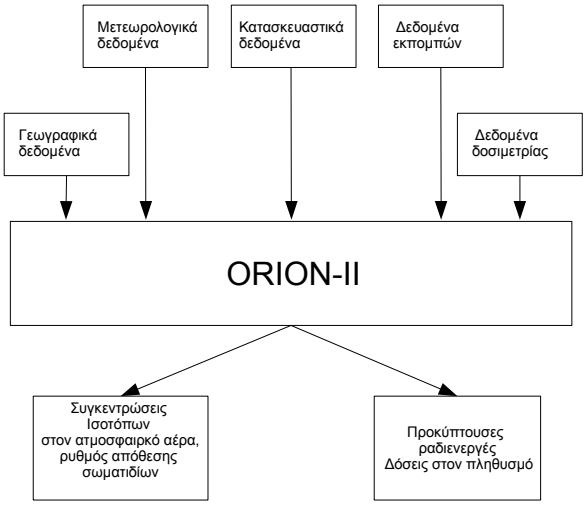
Ο GENII διαθέτει ενσωματωμένες ρουτίνες για την ανύψωση θερμών πλουμίων όσο και για ισότοπα ραδιενεργών αλυσίδων. Στα θετικά του σημεία συγκαταλέγεται επίσης η ύπαρξη γραφικού περιβάλλοντος για την επικοινωνία με τον χρήστη. Στα αρνητικά συμπεριλαμβάνονται το ότι είναι λογισμικό κλειστού κώδικα και ότι μπορεί να εγκατασταθεί μόνο σε Windows 2000 ή XP. Τέλος δεν μπορεί να λάβει υπόψη του την επίδραση του εδάφους στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις.

Πίνακες Κεφαλαίου

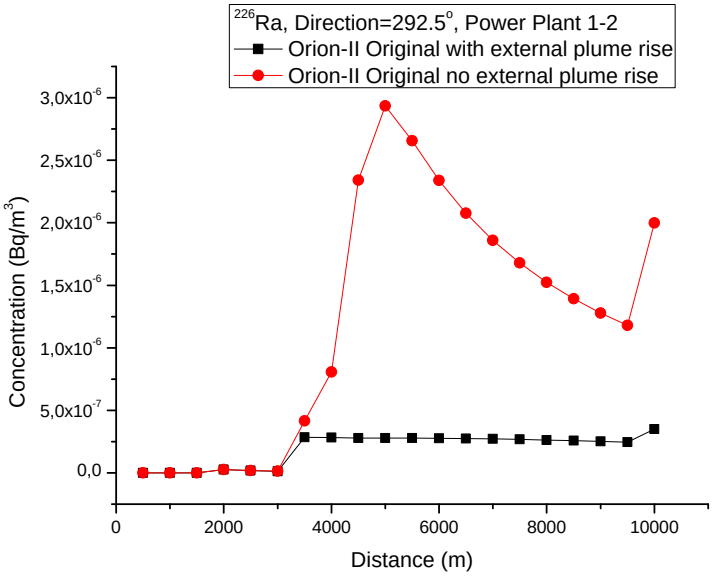
Κώδικας	*Οργανισμός ανάπτυξης*	*χρονολογία*
ADMS	CERC [23]	2004
AERMOD	AMS [201]	2004
CAP-88	US EPA [200]	2002
CTDMplus	US EPA [196]	1989
GENII	PNNL [127]	2002
ISC3 LT	US EPA [202]	1995

Πίνακας 3.1: Κώδικες υπολογισμού ατμοσφαιρικής διασποράς ρύπων

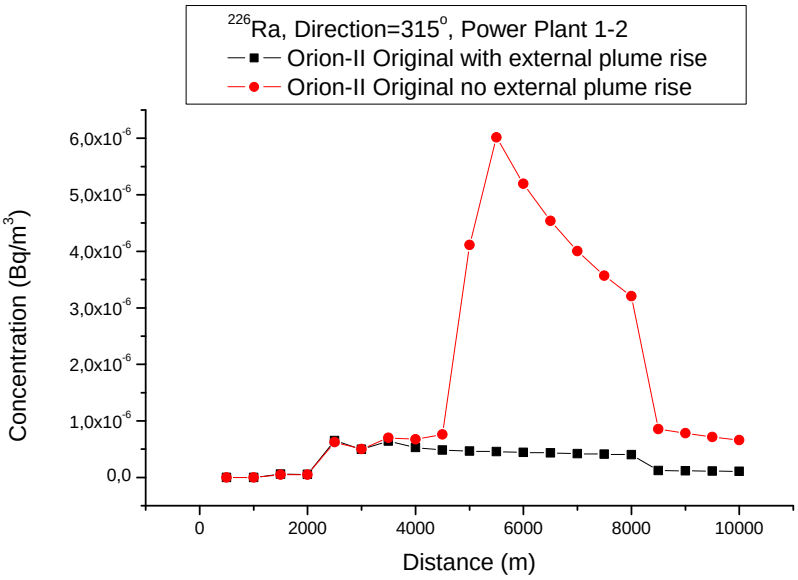
Σχήματα Κεφαλαίου



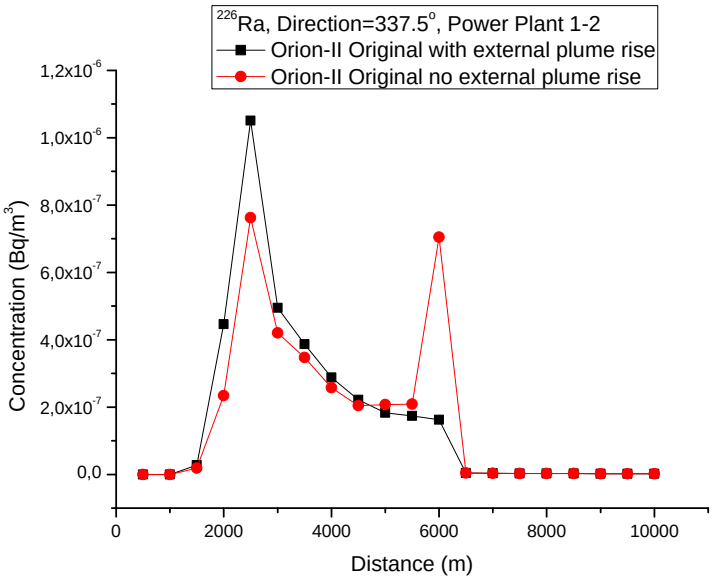
Σχήμα 3.1: Σχηματική δομή του κώδικα ORION-II



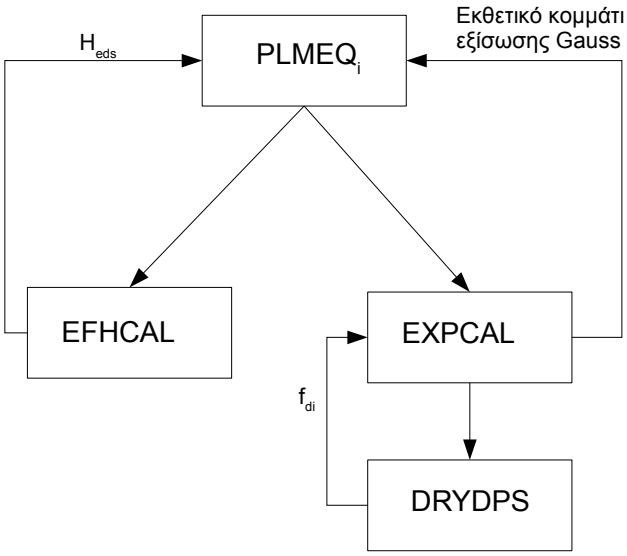
Σχήμα 3.2: Συγκριτικό γράφημα για εκτελέσεις του ORION-II με εσωτερικό υπολογισμό και εξωτερική δήλωση της ανύψωσης του πλουμίου αντίστοιχα, για διεύθυνση 292.5°



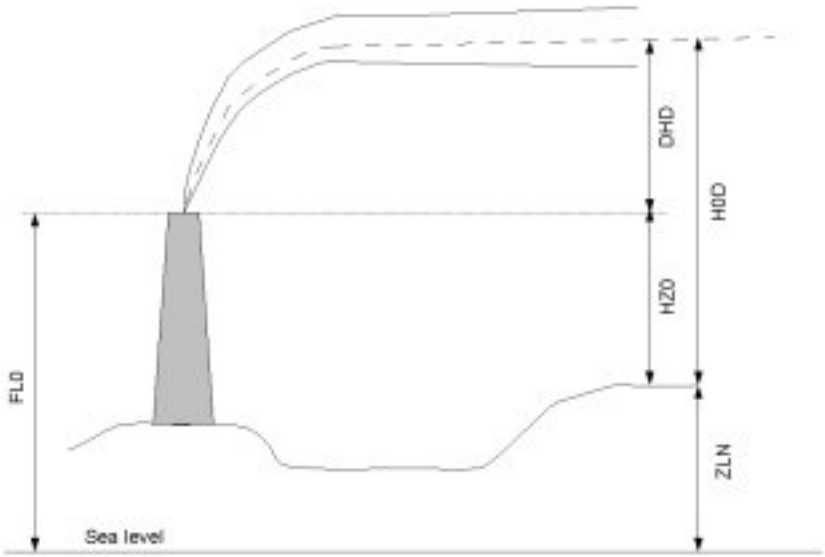
Σχήμα 3.3: Συγκριτικό γράφημα για εκτελέσεις του ORION-II με εσωτερικό υπολογισμό και εξωτερική δήλωση της ανύψωσης του πλουμίου αντίστοιχα, για διεύθυνση 315°



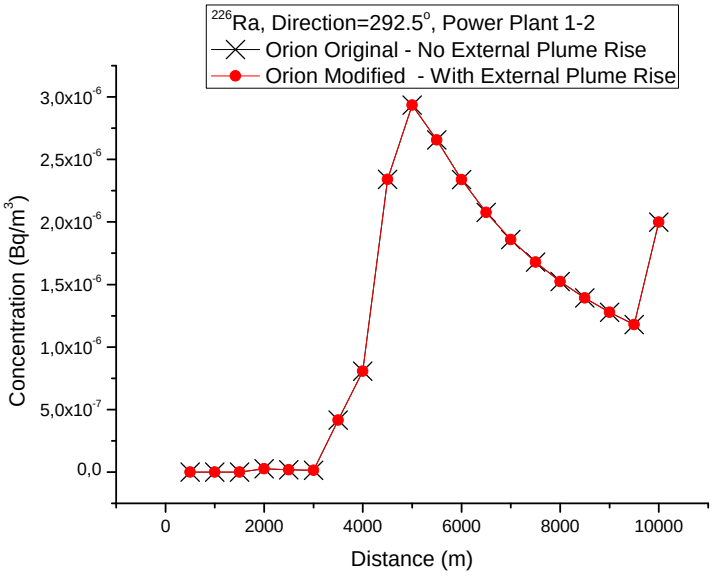
Σχήμα 3.4: Συγκριτικό γράφημα για εκτελέσεις της αρχικής μορφής του ORION-II με εσωτερικό υπολογισμό και εξωτερική δήλωση της ανύψωσης του πλουμίου αντίστοιχα, για διεύθυνση 337.5°



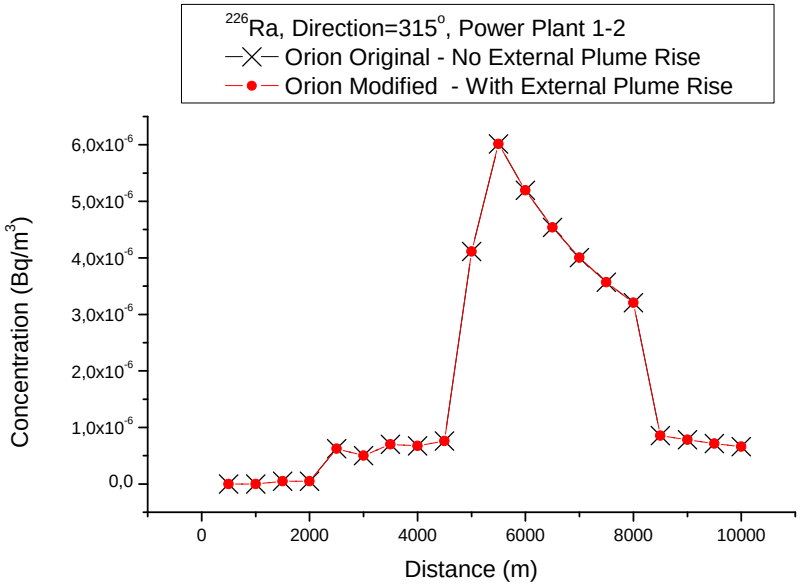
Σχήμα 3.5: Εποπτική παρουσίαση των υπορουτινών $\mathrm{PLMEQ_i}$, EXPCAL, EFHCAL και της συνάρτησης DRYDPS



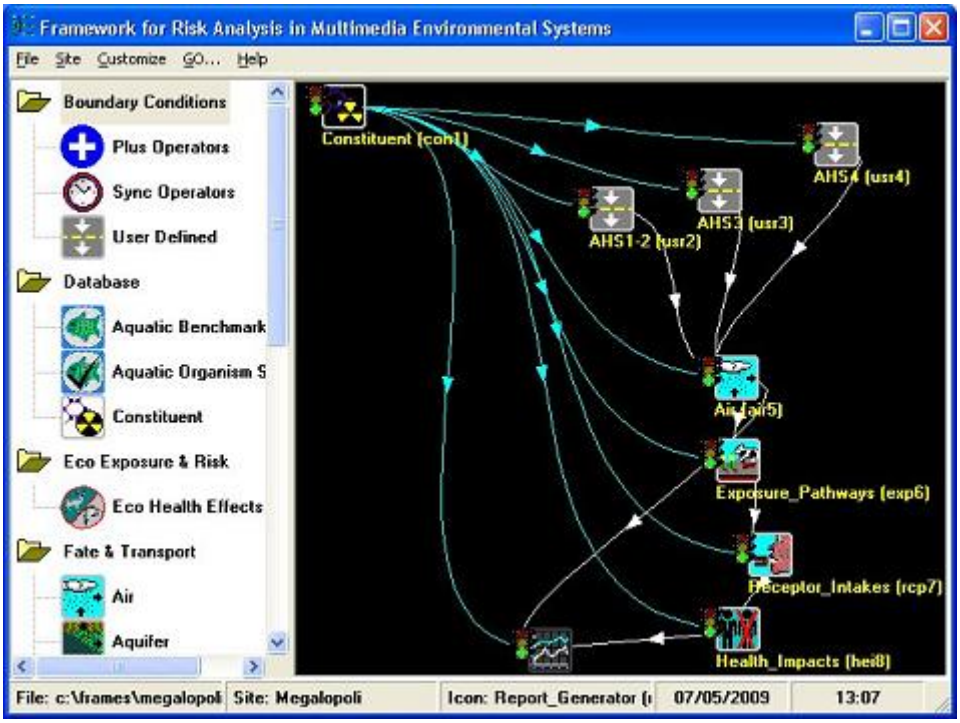
Σχήμα 3.6: Η ανύψωση του πλουμίου και τα σχετικά μεγέθη του ORION-II



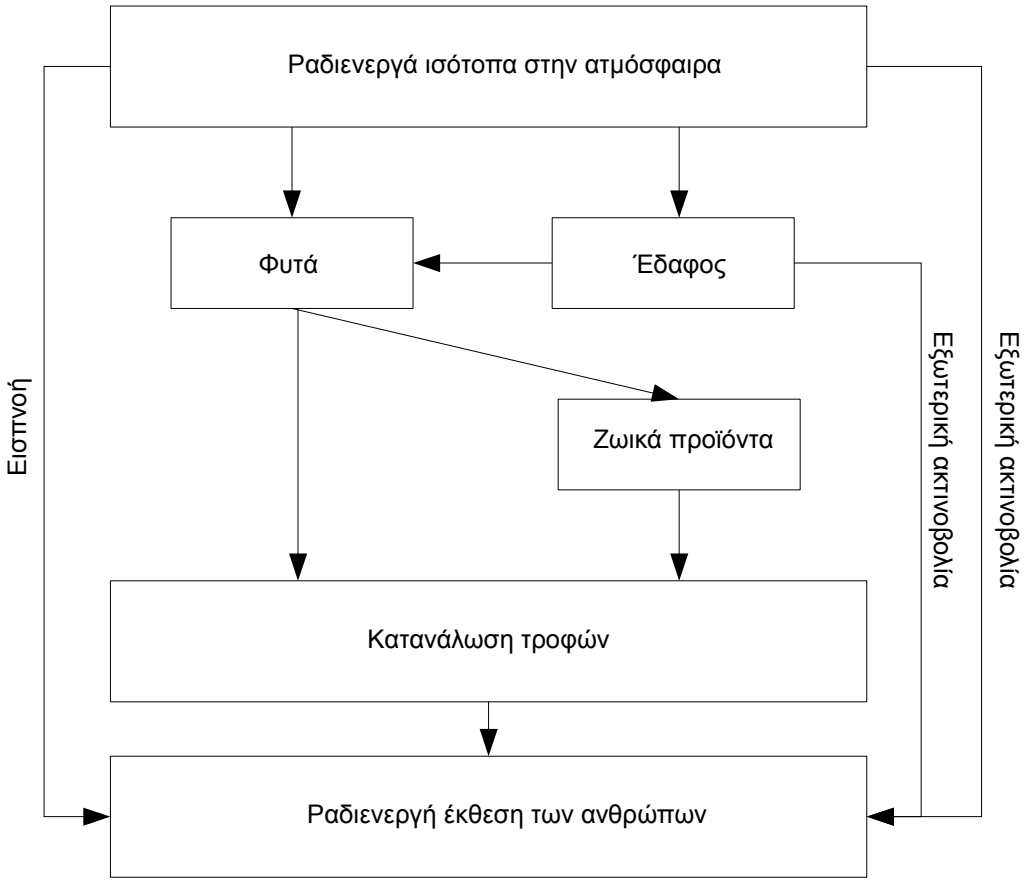
Σχήμα 3.7: Συγκριτικό γράφημα για εκτελέσεις της αρχικής και της τροποποιημένης μορφής του ORION-II με εσωτερικό υπολογισμό και εξωτερική δήλωση της ανύψωσης του πλουμίου αντίστοιχα, για διεύθυνση 292.5°



Σχήμα 3.8: Συγκριτικό γράφημα για εκτελέσεις της αρχικής και της τροποποιημένης μορφής του ORION-II με εσωτερικό υπολογισμό και εξωτερική δήλωση της ανύψωσης του πλουμίου αντίστοιχα, για διεύθυνση 315°



Σχήμα 3.9: Το παραθυρικό περιβάλλον εργασίας του κώδικα GENII



Σχήμα 3.10: Τρόποι ραδιενεργής επιβάρυνσης του ανθρώπου που λαμβάνει υπόψη του ο GENII

Σχήμα 3.11: Σφάλμα Microsoft Data Access Components

Σχήμα 3.12: Σφάλμα self-registration

Κεφάλαιο 4

Ανάπτυξη πρόσθετου λογισμικού για την ολοκληρωμένη λειτουργία των κωδίκων ORION-II και GENII

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο της ΔΔ θα παρουσιαστούν όλες τα προγράμματα και οι ρουτίνες, που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια αυτής της διατριβής, προκειμένου να τεθούν σε λειτουργία για την συγκεκριμένη εφαρμογή οι κώδικες ORION-II και GENII. Στην παρουσίαση θα περιλαμβάνεται, όπου κρίνεται απαραίτητο, και η θεωρία, στην οποία βασίζονται. Τα προγράμματα αυτά αναπτύχθηκαν προκειμένου να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία προετοιμασίας των δεδομένων εισαγωγής, όσο και για να γίνει δυνατή η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των κωδίκων ORION-II και GENII. Όλα γράφτηκαν σε γλώσσα Fortran 77 και τα εκτελέσιμα αρχεία παράχθηκαν με τον μεταγλωττιστή MS Fortran PowerStation, ο οποίος έτρεχε σε προσωπικό υπολογιστή (PC) με λειτουργικό σύστημα Windows XP. Τα προγράμματα, που αναπτύχθηκαν είναι τα ακόλουθα:

- *METPREP*: Είναι ένας μετεωρολογικός προεπεξεργαστής, δηλαδή ένα πρόγραμμα, το οποίο επεξεργάζεται τα πρωτογενή μετεωρολογικά δεδομένα, που λαμβάνονται από έναν μετεωρολογικό σταθμό, και τα παρέχει σε κατάλληλη μορφή, ώστε να χρησιμοποιηθούν από τον ORION-II. Περισσότερα μπορεί να δει κανείς στην παράγραφο 4.2.

- *GEOCALC*: Είναι ένα πρόγραμμα, το οποίο υπολογίζει τις γεωγραφικές συντεταγμένες κάθε σημείου υπολογισμού, που έχουμε ορίσει στον ORION-II. Σημειώνεται ότι τα σημεία υπολογισμού στον ORION-II ορίζονται σε σχέση με το κέντρο, που καθορίζει ο χρήστης. Η ανάπτυξη του συγκεκριμένου προγράμματος παρουσιάζεται στην παράγραφο 4.3.

- *TRANSHEIGHT*: Είναι ένα πρόγραμμα, το οποίο αλλάζει την μορφή του αρχείου υψομέτρων των σημείων υπολογισμού. Λεπτομέρειες για το συγκεκριμένο πρόγραμμα παρουσιάζονται στις παραγράφους 4.5 και Β'.12.

- *OTRAN, OGT, GTCONC, GTDOSE, GGTCONC* και *GGTDOSE*: Είναι προγράμματα μετατροπής των αποτελεσμάτων, που παράγουν ο ORION-II και ο GENII. Για περισσότερες λεπτομέρειες ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην παράγραφο 4.4.

4.2 Ο μετεωρολογικός προεπεξεργαστής *metprep* για τον κώδικα ORION-II

4.2.1 Γενικά

Ο ORION-II είναι ένας κώδικας, ο οποίος κάνει υπολογισμούς συγκεντρώσεων και δοσιμετρίας για μεγάλα χρονικά διαστήματα και παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.2. Για την λειτουργία του ο ORION-II χρειάζεται τα ακόλουθα μετεωρολογικά στοιχεία:

- Μέση ταχύτητα ανέμου ανά διεύθυνση ανέμου και κατηγορία ατμοσφαιρικής ευστάθειας. Κάθε διεύθυνση ανέμου έχει εύρος 22.5°, οπότε υπάρχουν 16 διαφορετικές διευθύνσεις ανέμου (βλ. πίνακα 4.1). Έχοντας υπόψη μας ότι οι κατηγορίες ατμοσφαιρικής ευστάθειας είναι 6, αντιλαμβανόμαστε ότι η μέση ταχύτητα του ανέμου θα δίνεται από τον χρήστη σε μορφή δισδιάστατου πίνακα 6x16 με 96 στοιχεία. Σημειώνεται ότι η μέση ταχύτητα του ανέμου αναφέρεται στο χρονικό διάστημα, που έχουμε επιλέξει να γίνει ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων και των ρυθμών απόθεσης π.χ. ένα έτος.

- Συχνότητα εμφάνισης κάθε διεύθυνσης ανέμου ανά κατηγορία ατμοσφαιρικής ευστάθειας. Έχοντας υπόψη μας ότι υπάρχουν 16 διαφορετικές διευθύνσεις ανέμου και 6 κατηγορίες ατμοσφαιρικής ευστάθειας αντιλαμβανόμαστε ότι η συχνότητα εμφάνισης διεύθυνσης ανέμου θα παρέχεται από τον χρήστη σε μορφή δισδιάστατου πίνακα 16x6.

Οι συνήθεις μετεωρολογικοί σταθμοί όμως μετράνε ταχύτητα, διεύθυνση ανέμου και θερμοκρασία περιβάλλοντος και δίνουν ολοκληρωμένα αποτελέσματα για χρονικά διαστήματα από 10min έως 1h. Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι χρειάζεται ένας μετεωρολογικός προεπεξεργαστής, ο οποίος με βάση τα πρωτογενή μετεωρολογικά δεδομένα των σταθμών θα υπολογίζει τις επεξεργασμένες τιμές των στοιχείων, που χρειάζεται ο ORION-II για την εκτέλεση του και αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Αναλυτικότερα ένας μετεωρολογικός προεπεξεργαστής είναι ένα πρόγραμμα, το οποίο έχει ως δεδομένα εισαγωγής τα πρωτογενή στοιχειά, που παράγει ένας μετεωρολογικός σταθμός, όπως ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου. Τα δεδομένα αυτά επεξεργάζονται κατάλληλα από τον προεπεξεργαστή, έτσι ώστε να παράγουν αποτελέσματα, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν από κώδικες υπολογισμού ατμοσφαιρικής διασποράς ρύπων, όπως ο ORION-II. Τα παραγόμενα αποτελέσματα του μετεωρολογικού προεπεξεργαστή συνήθως είναι η μέση ταχύτητα ανέμου ανά διεύθυνση ανέμου και κατηγορία ατμοσφαιρικής ευστάθειας καθώς και η συχνότητα εμφάνισης κάθε διεύθυνσης ανέμου ανά κατηγορία ατμοσφαιρικής ευστάθειας.

Έτσι πραγματοποιήθηκε έρευνα σχετικά με τους μετεωρολογικούς προεπεξεργαστές, που υπάρχουν ήδη διαθέσιμοι και έχουν αναπτυχθεί για συνεργασία με άλλους κώδικες ατμοσφαιρικής διασποράς. Το κύριο ερώτημα ήταν εάν τα αποτελέσματα, που παράγουν αυτοί οι επεξεργαστές, είναι συμβατά με αυτά, που απαιτούνται για την εκτέλεση του ORION-II. Επίσης σημαντικό ήταν να μην χρειάζονται δεδομένα της ανώτερης ατμόσφαιρας για την εκτέλεση τους, διότι δεν υπήρχε η δυνατότητα να έχουμε τέτοια δεδομένα στην διάθεση μας. Ακολούθως παραθέτουμε τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας:

- AERMET: Αυτός ο προεπεξεργαστής είναι κατασκευασμένος για τον κώδικα AERMOD και για την λειτουργία του απαιτεί δεδομένα της ανώτερης ατμόσφαιρας και όχι μόνο επιφανειακές μετρήσεις.

- PCRAMMET: Ομοίως και αυτός ο επεξεργαστής χρειάζεται δεδομένα της ανώτερης ατμόσφαιρας, οπότε δεν μπορεί να μας χρησιμεύσει.

- MPRM: Αυτός ο επεξεργαστής χρησιμοποιεί ως βάση του τον PCRAMMET, οπότε δεν μας είναι χρήσιμος.

- STAR: Ο συγκεκριμένος προεπεξεργαστής θα μπορούσε να μας είναι χρήσιμος καθώς ως δεδομένα εισαγωγής δέχεται μόνο μετρήσεις επιφανείας. Όμως τα αποτελέσματα, που παράγει, δεν είναι συμβατά με αυτά, που ζητάει ο ORION-II. Συγκεκριμένα ο STAR δεν υπολογίζει την μέση ταχύτητα ανέμου ανά διεύθυνση και ευστάθεια. Αυτός κατηγοριοποιεί τις ταχύτητες ανέμου σε 6 διαφορετικές κλάσεις (0-1.54m/sec, 1.54-3.09 m/sec, 3.09-5.14m/sec, 5.14-8.23m/sec, 8.23-10.80m/sec, >10.80m/sec). Στην συνέχεια κατανέμει τις συχνότητες εμφάνισης ανά διεύθυνση ανέμου, κατηγορία ατμοσφαιρικής ευστάθειας και ανά κατηγορία ταχύτητας ανέμου. Βλέπουμε δηλαδή ότι οι συχνότητες εμφάνισης ανέμου, που υπολογίζει ο STAR είναι διαφορετικές από αυτές, που χρειάζεται ο ORION-II.

Έτσι ως μόνη λύση απέμεινε, προκειμένου να γίνεται με την βοήθεια υπολογιστή η επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων, η κατασκευή μετεωρολογικού προεπεξεργαστή αποκλειστικά για τον ORION-II. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ενός προγράμματος, το οποίο θα διαβάζει τα πρωτογενή μετεωρολογικά δεδομένα, τα οποία καταγράφει ο σταθμός, και με βάση αλγόριθμους υπολογισμού της ατμοσφαιρικής ευστάθειας να υπολογίζει για κάθε καταγραφή την ευστάθεια. Στην συνέχεια θα πρέπει να γίνεται κατανομή της συγκεκριμένης εγγραφής σε κάποιο από τα 96 στοιχεία του πίνακα, ανάλογα με την κατηγορία ευστάθειας, που προέκυψε, και την διεύθυνση ανέμου της. Έτσι θα μπορούμε ακολούθως να υπολογίσουμε την μέση ταχύτητα ανέμου ανά κατηγορία ατμοσφαιρικής ευστάθειας και διεύθυνσης ανέμου καθώς και την συχνότητα εμφάνισης διεύθυνσης ανέμου ανά κατηγορία ατμοσφαιρικής ευστάθειας.

Για αυτό το σκοπό αναπτύχθηκε ο μετεωρολογικός προεπεξεργαστής *metprep*, ο οποίος υλοποιεί όλες τις παραπάνω λειτουργίες. Για την εκτέλεση του απαιτούνται μετεωρολογικά δεδομένα (ταχύτητα, διεύθυνση ανέμου, θερμοκρασία περιβάλλοντος) και κατασκευαστικά δεδομένα των ΑΗΣ (ύψος καμινάδας, εσωτερική διάμετρος καμινάδας, ταχύτητα εξόδου καυσαερίων), τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στην παράγραφο 4.2.7. Τα παραγόμενα αποτελέσματά του προγράμματος (ταχύτητα ανέμου ανά διεύθυνση ανέμου και κατηγορία ατμοσφαιρικής ευστάθειας, συχνότητα εμφάνισης κάθε διεύθυνσης ανέμου ανά κατηγορία ατμοσφαιρικής ευστάθειας) παρουσιάζονται αναλυτικά στην παράγραφο 4.2.9. Η λειτουργία του *metprep* περιγράφεται στην παράγραφο 4.2.8 και φαίνεται επίσης και στα λογικά διαγράμματα των σχημάτων 4.1 και 4.2.

Στις ακόλουθες παραγράφους θα περιγραφεί η ανάπτυξη του μετεωρολογικού προεπεξεργαστή *metprep* και θα παρουσιαστούν οι μεθοδολογίες και οι εξισώσεις, πάνω στις οποίες βασίστηκε. Αρχικά θα αναφερθεί η μεθοδολογία εκτίμησης της ατμοσφαιρικής ευστάθειας, που χρησιμοποιήθηκε. Η γνώση της ατμοσφαιρικής ευστάθειας είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της ανύψωσης του πλουμίου και του ύψους ανάμιξης, των οποίων οι εξισώσεις θα περιγραφούν ακολούθως. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι εξισώσεις υπολογισμού του κατακόρυφου προφίλ της ταχύτητας ανέμου καθώς και ο τρόπος, με τον οποίο πραγματοποιείται η διαχείριση των διαστημάτων άπνοιας. Θα ακολουθήσει η περιγραφή της λειτουργίας του *metprep*, καθώς και των αποτελεσμάτων, που παράγει. Τέλος θα γίνει αναφορά στους ελέγχους καλής λειτουργίας του προγράμματος, που πραγματοποιήθηκαν.

4.2.2 Μεθοδολογία εκτίμησης ατμοσφαιρικής ευστάθειας κατά P-G

Το πρώτο πράγμα, που αποφασίστηκε, ήταν με ποια μεθοδολογία θα γίνεται ο υπολογισμός της ατμοσφαιρικής ευστάθειας κατά Pasquill-Gifford (P-G), στην οποία αναφερθήκαμε στην παράγραφο 2.2.2. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι αυτή του Turner [198, σελ. 6-12]. Σε αυτήν η εκτίμηση της ευστάθειας γίνεται με βάση το ηλιακό ύψος (*solar altitude*), την νέφωση, το ύψος της νέφωσης και την ταχύτητα του ανέμου. Με δεδομένο όμως ότι οι συνήθεις μετεωρολογικοί σταθμοί δεν μετράνε την νέφωση και το ύψος της, γίνεται αντιληπτό ότι θα πρέπει να αναζητηθούν εναλλακτικές μέθοδοι για την εκτίμηση της ευστάθειας.

Μια άλλη μέθοδος είναι αυτή της ηλιακής ακτινοβολίας/Δέλτα-Τ. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την ταχύτητα του ανέμου σε συνδυασμό με την ολική ηλιακή ακτινοβολία κατά την διάρκεια της ημέρας. Κατά την διάρκεια της νύχτας η εκτίμηση γίνεται με βάση την ταχύτητα του ανέμου και την κάθετη θερμοκρασιακή διαφορά (σε ύψος 2 και 10 m). Για περισσότερα βλ. [198, σελ. 6-15]. Και γι' αυτή την μέθοδο είναι δύσκολο να ανεβρεθούν μετεωρολογικά δεδομένα οπότε δεν μπορούμε να την εφαρμόσουμε.

Επίσης υπάρχει και η μέθοδος σ_E η οποία βασίζεται στην ατμοσφαιρική τύρβη και χρησιμοποιεί τις τιμές της τυπικής απόκλισης της κάθετης διεύθυνσης του ανέμου σε συνδυασμό με το μέτρο της οριζόντιας ταχύτητας του ανέμου. Μια παρόμοια με την προηγούμενη είναι η μέθοδος σ_A. Βασίζεται και αυτή στην ατμοσφαιρική τύρβη και χρησιμοποιεί τις τιμές της τυπικής απόκλισης της οριζόντιας διεύθυνσης του ανέμου σε συνδυασμό με το μέτρο της οριζόντιας ταχύτητας του ανέμου. Αυτά τα δύο μεγέθη καταγράφονται από την πλειονότητα των μετεωρολογικών σταθμών οπότε αποφασίζουμε να υιοθετήσουμε την μέθοδο σ_A στην κατασκευή της *metprep*. Οι τιμές του σ_A πρέπει να είναι ωριαίες για την σωστή λειτουργία της μεθόδου [198, σελ.6-19].

Με βάση αυτή την μέθοδο γίνεται μια αρχική εκτίμηση της ευστάθειας σύμφωνα την τυπική απόκλιση της οριζόντιας διεύθυνσης του ανέμου σ_A. Ανάλογα δηλαδή με την τιμή της σ_A, την οποία γνωρίζουμε από τις μετρήσεις, εκλέγεται η αρχική ευστάθεια σύμφωνα με τον πίνακα 4.2. Στην συνέχεια υπολογίζεται η τελική τιμή της ατμοσφαιρικής ευστάθειας με βάση το μέτρο της ταχύτητας του ανέμου, την αρχική τιμή της ευστάθειας, που υπολογίσαμε προηγουμένως και το εάν είναι μέρα ή νύχτα. Αυτό γίνεται ως εξής: Εξετάζουμε αρχικά εάν το χρονικό διάστημα που αναφερόμαστε είναι νύχτα ή μέρα και κατευθυνόμαστε ανάλογα στο αντίστοιχο σημείο του πίνακα 4.3. Σημειώνεται ότι ως νύχτα θεωρείται το χρονικό διάστημα μια ώρα πριν την δύση του ηλίου έως και μια ώρα μετά την ανατολή του [197, σελ. 37]. Ακολούθως με βάση την αρχική εκτίμηση της ευστάθειας, που πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του πίνακα 4.2, και το μέτρο της ταχύτητας του ανέμου εκλέγεται η τελική τιμή της

ευστάθειας κατά P-G.

4.2.3 Εξισώσεις υπολογισμού της ανύψωσης του πλουμίου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω (βλ. παράγραφο 3.2.5) ο ORION-II δεν έχει την δυνατότητα να υπολογίζει την ανύψωση του πλουμίου στην περίπτωση, που αυτό ανυψώνεται λόγω άνωσης, όπως συμβαίνει στην Μεγαλόπολη. Παρέχει όμως την δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει ο ίδιος την ανύψωση μέσω του αρχείου δεδομένων. Αυτό γίνεται ως εξής: Ο χρήστης παρέχει μια τιμή ανύψωσης ανά διεύθυνση ανέμου και κατηγορία ατμοσφαιρικής ευστάθειας. Δηλαδή παρέχει 16x6=96 τιμές για την ανύψωση του πλουμίου.

Αποφασίστηκε ο υπολογισμός αυτών των τιμών να αποτελεί μέρος της ρουτίνας metprep, ώστε με μια και μοναδική εκτέλεση της ρουτίνας να παράγονται όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την εκτέλεση του ORION-II. Άλλωστε για την διενέργεια των υπολογισμών πρέπει πρώτα να γνωρίζουμε την ατμοσφαιρική ευστάθεια, ώστε να εκλέξουμε τις κατάλληλες εξισώσεις. Αυτές έχουν περιγραφεί ήδη στην παράγραφο 2.2.3.2, οπότε δεν συντρέχει λόγος να τις παραθέσουμε εκ νέου.

4.2.4 Εξισώσεις υπολογισμού του ύψους ανάμιξης (*mixing height*)

Όπως είδαμε και στην παράγραφο 2.2.2 οι ουσίες, οι οποίες εκπέμπονται στο Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (ΑΟΣ) διασπείρονται οριζόντια και κάθετα λόγω της τύρβης (θερμικής και μηχανικής) και τελικά αναμειγνύονται στο ΑΟΣ. Γι' αυτό έχει επικρατήσει να ονομάζεται και στρώμα μίξης ή ανάμιξης (*mixing layer*). Το στρώμα ανάμιξης συμπίπτει με το ΑΟΣ εάν το τελευταίο ορίζεται ως η τυρβώδης περιοχή της ατμόσφαιρας, η οποία συνορεύει με το έδαφος. Το ύψος του στρώματος ανάμιξης είναι ένα πολύ σπουδαίο μέγεθος και η τιμή του είναι πολύ σημαντική για τα μοντέλα ατμοσφαιρικής διάχυσης, διότι το ασταθές ημερήσιο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα είναι δυνατόν να περιορίζει την άνοδο των ρύπων πάνω από ένα ορισμένο ύψος λόγω της ύπαρξης της ζώνης παράσυρσης.

Γι' αυτό είναι απαραίτητη η γνώση του προκειμένου να ελέγξουμε εάν είναι μεγαλύτερο από το ενεργό ύψος του πλουμίου. Εάν όντως συμβαίνει κάτι τέτοιο δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα, και το ενεργό ύψος πλουμίου υπολογίζεται όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.2.3.2 και εξής.

Για την περίπτωση, που το αρχικά υπολογιζόμενο ενεργό ύψος του πλουμίου είναι μεγαλύτερο από το ύψος ανάμιξης, θεωρήσαμε ότι το πλούμιο δεν μπορεί να εισέλθει καθόλου μέσα στην ζώνη παράσυρσης, οπότε το τελικό ύψος του πλουμίου δεν μπορεί

να είναι μεγαλύτερο από το ύψος ανάμιξης. Έτσι θα τροποποιείται το ενεργό ύψος πλουμίου ώστε να είναι πάντα το πολύ ίσο με το με το ύψος ανάμιξης.

Όλα τα παραπάνω ισχύουν για ασταθείς συνθήκες, καθώς όπως έχουμε δει στην παράγραφο 2.2.2 σε ουδέτερες ή ευσταθείς συνθήκες η άνοδος του πλουμίου δεν περιορίζεται από το ΑΟΣ.

Πραγματοποιούμε αυτή την θεώρηση στις ασταθείς συνθήκες, η οποία δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα, όπως περιγράφεται και στην παράγραφο 2.2.2.3, διότι ο ORION-II θεωρεί ότι η ατμόσφαιρά μέσα στην οποία γίνεται η διασπορά των ρύπων είναι ομογενής και αγνοεί την ύπαρξη του ύψους ανάμιξης. Εμείς θα εφαρμόσουμε αυτή την απλή μεθοδολογία ώστε να ληφθεί υπόψη η ύπαρξη του ύψους ανάμιξης κατά τρόπο προσεγγιστικό.

Υπάρχουν δύο τρόποι για την εύρεση του ύψους ανάμιξης. Μπορεί αφενός να ληφθεί με μετρήσεις στο προφίλ της ατμόσφαιρας (είτε ραδιοβολίσεις, είτε μετρήσεις από απόσταση όπως sodar, lidar κτλ). Αφετέρου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μαθηματικά μοντέλα, που έχουν αναπτυχθεί γι' αυτό τον σκοπό. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούν ως δεδομένα εισαγωγής μετεωρολογικές μετρήσεις στην επιφάνεια του εδάφους και με βάση αυτές τις μετρήσεις υπολογίζουν το ύψος ανάμιξης. Είναι προφανές ότι η δεύτερη μέθοδος έχει πολύ μικρότερο κόστος και μπορεί να εφαρμοστεί πολύ πιο εύκολα, αφού δεν απαιτεί σχεδόν καθόλου προσωπικό και εξοπλισμό.

Έτσι πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα προκειμένου να βρεθεί το κατάλληλο μοντέλο υπολογισμού του ύψους ανάμιξης. Λαμβάνοντας υπόψη τα μεγέθη, που καταγράφουν οι συνήθεις μετεωρολογικοί σταθμοί (ταχύτητα ανέμου, τυπική απόκλιση της διεύθυνσης του ανέμου, θερμοκρασία περιβάλλοντος) εκλέξαμε το μοντέλο των Nath and Patil [131]. Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε εν συντομία μερικά μοντέλα υπολογισμού του ύψους ανάμιξης, ώστε να μπορεί να ανατρέξει ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης:

- Μια πολύ ενδιαφέρουσα τεχνική είναι αυτή, που έχει αναπτύξει ο Erbrink [52, 53]. Βασίζεται στον διαχωρισμό της τυπικής απόκλισης της διεύθυνσης του ανέμου σε μια συνιστώσα αργής διακύμανσης σ_{vl} και σε μια συνιστώσα γρήγορης διακύμανσης σ_{vs}. Θα μπορούσαμε κι εμείς να εφαρμόσουμε αυτή την μεθοδολογία, όμως απαιτούνται τα πρωτογενή δεδομένα, που καταγράφει ο μετεωρολογικός σταθμός, ώστε να υπολογιστούν τα σ_{vl} και σ_{vs}. Επειδή δεν έχουμε πρόσβαση σε τέτοια δεδομένα, δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτό το μοντέλο.

- Ένα άλλο μοντέλο είναι αυτό, που ανάπτυξαν οι Batchvarova and Gryning [14]. Είναι παρόμοιο με αυτό των Nath and Patil [131] και θα μπορούσαμε να το εφαρμόσουμε, αλλά δεν διαθέτουμε αρκετά δεδομένα για τον υπολογισμό της αισθητής ροής θερμότητας (*sensible heat flux*) $\mathrm{H_o}$.

- Υπάρχει επίσης και το μοντέλο των Fatogoma and Jacko [55], το οποίο για τον υπολογισμό του H_o, χρησιμοποιεί επιφανειακές μετρήσεις (ταχύτητα ανέμου, θερμοκρασία περιβάλλοντος και νέφωση). Βασίζεται σε εμπειρικές εξισώσεις, που ανέπτυξαν οι Holtslag and Van Ulden [79]. Το παραπάνω μοντέλο είναι εύκολο στην εφαρμογή του με την προϋπόθεση ότι υπάρχουν μετρήσεις της νέφωσης διαθέσιμες. Το μόνο πρόβλημα είναι ότι ορισμένοι εμπειρικοί συντελεστές έχουν παραμετροποιηθεί για τα εδάφη και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες της Ολλανδίας, ενώ δεν παρέχονται τιμές για περιοχές με διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες.

- Ο αναγνώστης θα μπορούσε επίσης να δει δύο δημοσιεύσεις, οι οποίες κάνουν ανασκόπηση σε υπολογιστικές μεθόδους εκτίμησης του ύψους ανάμιξης καθώς και σε μεθόδους, που βασίζονται σε μετρήσεις στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας: Η πρώτη είναι αυτή των Irwin and Paumier [92] και η δεύτερη εκείνη των Seibert et al. [168].

Ακολούθως θα παρουσιαστεί εκτενώς το μοντέλο των Nath and Patil [131].

4.2.4.1 Υπολογισμός του ύψους ανάμιξης σε ασταθείς συνθήκες

Η διαφορική εξίσωση του ύψους ανάμιξης σύμφωνα με το μοντέλο των Nath and Patil [131] είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{H_o}{\gamma h}(1 + 2C_k) + 2C_k C_N^3 \frac{u_*^3 T}{g\gamma h^2} \tag{4.1}$$

όπου:
h: Ύψος ανάμιξης.
g: Επιτάχυνση της βαρύτητας στην επιφάνεια του εδάφους.
T: Θερμοκρασία της ατμόσφαιρας στην επιφάνεια του εδάφους.
u_*: Ταχύτητα τριβής.
$C_k, C_K C_N^3$: Εμπειρικές σταθερές με τιμές 0.2 και 0.5 αντίστοιχα.
γ: Ο ρυθμός μεταβολής της δυνητικής θερμοκρασίας (*potential temperature gradient*) στο στρώμα ακριβώς επάνω από το ύψος ανάμιξης και σύμφωνα με την παραδοχή του μοντέλου είναι πάντοτε μεγαλύτερο του μηδενός.
H_o: Αισθητή ροή θερμότητας (*sensible heat flux*).

Εάν τώρα στην διαφορική εξίσωση θέσουμε:

$$A = \frac{H_o}{\gamma}(1 + 2C_k) \tag{4.2}$$

$$B = 2C_K C_N^3 \frac{u_*^3 T}{g\gamma} \tag{4.3}$$

η εξίσωση 4.1 παίρνει την εξής μορφή:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{A}{h} + \frac{B}{h^2} \tag{4.4}$$

Το πρώτο κομμάτι της εξίσωσης αντιπροσωπεύει την θερμική τύρβη και το δεύτερο την μηχανική, που οφείλεται στην ταχύτητα του ανέμου. Για την λύση της παραπάνω διαφορικής θα χρησιμοποιήσουμε την αριθμητική μέθοδο Runge-Kutta 4ης τάξης (βλ. Παπαγεωργίου [228, σελ. 172]). Πριν ασχοληθούμε με την λύση της διαφορικής ας δούμε πως υπολογίζονται τα μεγέθη A και B:

Για τον υπολογισμό του A απαραίτητο μέγεθος είναι η αισθητή ροή θερμότητας $\mathrm{H_o}$, η οποία δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$H_o = -\frac{u_*^3 T}{\kappa g L} \tag{4.5}$$

όπου:
κ: Η σταθερά von Karman=0.4
L: Μήκος Monin-Obukhov
$\mathrm{u_*}$: Ταχύτητα τριβής.
g: Επιτάχυνση της βαρύτητας στην επιφάνεια του εδάφους.
T: Θερμοκρασία της ατμόσφαιρας στην επιφάνεια του εδάφους.

Το μήκος Monin-Obukhov, L υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση [83] εάν γνωρίζουμε την ευστάθεια της ατμόσφαιρας, που επικρατεί.

$$\frac{1}{L} = a z_o^b \tag{4.6}$$

Οι συντελεστές a, b δίνονται από τον πίνακα 4.4 και $\mathrm{z_o}$ είναι η τραχύτητα της επιφάνειας του εδάφους ή αλλιώς αεροδυναμικό ύψος επιφάνειας (*aerodynamic surface roughness*). Οι Seinfeld and Pandis [169, σελ. 873] προτείνουν διαφορετική εξίσωση για τον υπολογισμό του L, αλλά οι Hsu and Zhongde [83] αποδεικνύουν στην εργασία τους ότι η εξίσωση 4.6 παράγει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, οπότε ορθώς εκλέξαμε αυτή. Σύμφωνα με τον Seinfeld [169, σελ. 863] το L είναι το ύψος πάνω από το έδαφος, στο οποίο η μηχανική τύρβη ισούται με την θερμοκρασιακή. Το L είναι επίσης δείκτης ευστάθειας της ατμόσφαιρας. Έτσι όταν $\mathrm{L} > 0$ έχουμε ευσταθείς συνθήκες, όταν $\mathrm{L} < 0$ έχουμε ασταθείς και στις ουδέτερες συνθήκες το L πλησιάζει το άπειρο. Γνωρίζοντας τώρα το L είναι δυνατόν να υπολογιστεί το $\mathrm{H_o}$.

Για τον υπολογισμό του $\mathrm{u_*}$ εργαζόμαστε ως ακολούθως: Υπολογίζουμε αρχικά την τιμή της ομοιόμορφης συνάρτησης στο διαβατικό επιφανειακό προφίλ του ανέμου

(*Universal function in the diabatic surface layer wind profil*) $\psi_{\mathrm{m}}(\frac{\mathrm{z}}{\mathrm{L}})$:

$$\psi_m(\frac{z}{L}) = ln\left[\left(\frac{1+x^2}{2}\right)\left(\frac{(1+x)}{2}\right)^2\right] - 2arctanx + \frac{\pi}{2} \tag{4.7}$$

όπου $\mathrm{x} = (1 - 16\mathrm{z}/\mathrm{L})^{1/4}$ και z το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους, όπου γίνεται η μέτρηση των διάφορων μετεωρολογικών μεγεθών.

Κάνοντας μια μικρή έρευνα στην βιβλιογραφία διαπιστώνουμε την εξίσωση 4.7 προτείνουν και οι Panofsky and Dutton [139, σελ. 134] καθώς και ο Zannetti [212, σελ. 66] με την προϋπόθεση ότι $0 \geq \frac{z}{L} \geq -2$. Πραγματοποιώντας κάποιους πρόχειρους υπολογισμούς για $\mathrm{z} = 10\mathrm{m}$ και $\mathrm{z_o} = 0.1\,\mathrm{m}$ (αεροδυναμικό ύψος επιφάνειας) διαπιστώνουμε ότι οι προϋποθέσεις της παραπάνω ανισότητας ικανοποιούνται. Οι Seinfeld and Pandis [169, σελ. 870] έχουν μια ελαφρώς διαφορετική εξίσωση από την 4.7. Επειδή όμως δεν έχει τόσο ευρεία χρήση αποφασίζουμε να υιοθετήσουμε την εξίσωση 4.7, που παραθέσαμε.

Στην συνέχεια υπολογίζουμε την ταχύτητα τριβής u_* με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

$$u_* = \frac{ku_{10}}{(ln(z/z_o) - \psi_m(z/L))} \tag{4.8}$$

Όπου u_{10} η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10 μέτρων, που είναι το σύνηθες ύψος για τα αισθητήρια μετεωρολογικών σταθμών και $\mathrm{z_o}$ το αεροδυναμικό ύψος επιφάνειας.

Ακολούθως θα προσδιορίσουμε το γ. Με δεδομένο ότι δεν διαθέτουμε μετρήσεις του γ στην ανώτερη ατμόσφαιρα εφαρμόζουμε τον ακόλουθο εναλλακτικό τρόπο, που προτείνεται στην βιβλιογραφία [14], [131], για τον προσδιορισμό του: Κατά την ανάπτυξη του ημερήσιου ασταθούς οριακού στρώματος το θερμοκρασιακό προφίλ στην επιφάνεια της ατμόσφαιρας νωρίς το πρωί ουσιαστικά ανυψώνεται και αποτελεί το στρώμα πάνω από το οριακό. Έτσι εάν ξέρουμε την δομή του θερμοκρασιακού προφίλ στην επιφάνεια της ατμόσφαιρας νωρίς το πρωί μπορούμε να αποφανθούμε περί του γ για όλη την διάρκεια της ημέρας. Αυτό μπορούμε να το υπολογίσουμε εάν ξέρουμε την κατηγορία της ατμοσφαιρικής ευστάθειας, που επικρατεί νωρίς το πρωί, την οποία έχουμε ήδη προσδιορίσει. Τονίζεται ότι η ευστάθεια κατά την διάρκεια της ημέρας μπορεί να αλλάξει.

Για τις τιμές του γ σε ευσταθείς συνθήκες υιοθετούμε αυτές, που προτείνει ο ISC3 [202, σελ. 1-9] και όχι αυτές των Nath-Patil [131], καθώς αυτές του ISC3 χρησιμοποιούνται και στις εξισώσεις υπολογισμού της ανύψωσης του πλουμίου, όπως περιγράψαμε στην παράγραφο 2.2.3.6, ενώ έχουν τύχει στο παρελθόν πολύ μεγαλύτερης χρήσης από τους ερευνητές. Σχετικά τώρα με την τιμή του γ όταν έχουμε ουδέτερη ευστάθεια D, ο Seinfeld [169, σελ. 933] αναφέρει ότι κυμαίνεται από -0.5 έως $0.5\,^{\circ}\mathrm{C}/100\mathrm{m}$. Σύμφωνα με την παραδοχή του μοντέλου [131] το γ πρέπει να είναι

θετικό, οπότε εκλέγουμε $\gamma = 0.1\,^{\circ}\mathrm{C}/100\mathrm{m}$. Λόγω του ότι νωρίς το πρωί η ατμόσφαιρα είναι πάντα ευσταθής ή ουδέτερη, αφού δεν έχει αρχίσει ακόμη να θερμαίνεται το έδαφος και η ατμόσφαιρα από τον ήλιο, δεν πραγματοποιείται προσδιορισμός του γ για ασταθείς συνθήκες. Οι τιμές του γ παρουσιάζονται και στον πίνακα 4.5.
Το $\mathrm{C_k C_N^3}$ είναι εμπειρική σταθερά και οι Nath and Patil [131] προτείνουν τιμή $\mathrm{C_k C_N^3} = 0.5$.

4.2.4.2 Υπολογισμός του ύψους ανάμιξης σε ουδέτερες συνθήκες

Στην περίπτωση, που έχουμε ουδέτερες συνθήκες, ο υπολογισμός του ύψους ανάμιξης γίνεται ως εξής [131]:
Υπολογίζουμε αρχικά την ταχύτητα τριβής $\mathrm{u_*}$:

$$u_* = \frac{k u_{10}}{ln(z/z_o)} \tag{4.9}$$

Η τιμή του ύψους ανάμιξης δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$h = c\frac{u_*}{f} \tag{4.10}$$

όπου f η παράμετρος coriolis, η οποία δίνεται από την εξίσωση $\mathrm{f} = 2\omega \sin\phi$ με ω την γωνιακή ταχύτητα της γης και ϕ το γεωγραφικό πλάτος στο σημείο των υπολογισμών. Για την περιοχή της Μεγαλόπολης το f έχει τιμή $\mathrm{f} = 8\,8 \cdot 10^{-5} \quad \mathrm{rad/sec}$.

Όσον αφορά στον συντελεστή c υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις: Οι Nath and Patil [131] προτείνουν c=0.4. Αυτόν τον συντελεστή τον λαμβάνουν από την εργασία του Yu [211], η οποία είναι σχετικά παλιά (1978). Η χρήση του συγκεκριμένου συντελεστή δίνει πολύ μεγάλα ύψη ανάμιξης. Οι Seinfeld and Pandis [169, σελ. 874] προτείνουν $\mathrm{c} = 0.35$, ενώ ο Arya [8, σελ. 98] μια σχετικά μικρότερη τιμή $\mathrm{c} = 0.3$. Τέλος οι Panofsky and Dutton [139, σελ. 108] προτείνουν $\mathrm{c} = 0.15\text{-}0.25$ με μέση τιμή $\mathrm{c} = 0.2$. Σημειώνουν πάντως ότι με την συγκεκριμένη μεθοδολογία, όταν έχουμε ισχυρούς ανέμους, υπολογίζονται ύψη ανάμιξης μεγαλύτερα από $2\,\mathrm{km}$, τα οποία είναι υπερεκτιμημένα σε σχέση με τα πραγματικά. Εμείς θα επιλέξουμε να εργαστούμε με τους συντελεστές των Panofsky and Dutton (εκλέγουμε για την ρουτίνα μας $\mathrm{c} = 0.17$), διότι οι υπόλοιποι δίνουν πολύ μεγάλα ύψη ανάμιξης (για περισσότερα βλ. παράρτημα Δ'). Με το να υπολογίζουμε το ύψος ανάμιξης σε ουδέτερες συνθήκες συντηρητικά καταλήγουμε και σε συντηρητικούς υπολογισμούς του ύψους ανάμιξης σε ασταθείς συνθήκες, αφού το ύψος ανάμιξης σε ουδέτερες συνθήκες χρησιμοποιείται ενίοτε ως αρχική συνθήκη για την λύση της διαφορικής εξίσωσης 4.1. Μικρότερα ύψη ανάμιξης σε ασταθείς συνθήκες είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε μικρότερες τιμές ενεργού ύψους πλουμίου και επομένως σε μεγαλύτερες υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις, πράγμα το οποίο επιδιώκουμε αφού θέλουμε να προσδιορίσουμε το σενάριο δυσμενέστερων συνθηκών (*worst case*

senario).

4.2.4.3 Υπολογισμός του ύψους ανάμιξης σε ευσταθείς συνθήκες

Εάν επικρατούν ευσταθείς συνθήκες η ταχύτητα τριβής u_* δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση [131]:

$$u_* = \frac{ku_{10}}{ln(z/z_o)} + 4.7\left(\frac{z - z_o}{L}\right) \tag{4.11}$$

και το ύψος ανάμιξης υπολογίζεται ως εξής:

$$h = a\sqrt{\frac{u_* L}{f}} + c \tag{4.12}$$

με a =0.34 και c =113.5.

Ερευνώντας την βιβλιογραφία διαπιστώνουμε ότι οι Panofsky and Dutton [139, σελ. 112], ο Arya [8, σελ. 98] καθώς και ο Zannetti [212, σελ. 53] προτείνουν την ακόλουθη σχέση:

$$h = a\sqrt{\frac{u_* L}{f}} \tag{4.13}$$

με a =0.4 (Garratt [60]).

Κάνοντας κάποιους πρόχειρους υπολογισμούς με τις ίδιες συνθήκες και για τις δύο εξισώσεις διαπιστώνουμε ότι η σχέση των Panofsky and Dutton [139] δίνει κάπως μικρότερα ύψη ανάμιξης από ότι η σχέση των Nath and Patil [131] (βλ. παράρτημα Δ'). Αποφασίζουμε να υιοθετήσουμε την εξίσωση των Panofsky and Dutton [139] διότι:

- Με το να υπολογίζουμε το ευσταθές οριακό στρώμα, το οποίο παρατηρείται μόνο νυχτερινές ώρες, σχετικά συντηρητικά κερδίζουμε το εξής: Η τελευταία νυχτερινή τιμή του h χρησιμοποιείται ως αρχική τιμή για τον υπολογισμό του h στις ημερήσιες συνθήκες. Έτσι το ημερήσιο ύψος ανάμιξης, που υπολογίζουμε, είναι συντηρητικότερο, πράγμα το οποίο επιδιώκουμε, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

- Πάνω από το ευσταθές οριακό στρώμα (*stable boundary layer*) βρίσκεται το κατάλοιπο στρώμα (*residual layer*) το οποίο έχει περισσότερη τύρβη, καθώς διατηρεί τον ημερήσιο αδιαβατικό ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας. Έτσι καταλαβαίνουμε ότι δεν θα εμποδιστεί τυχόν κίνηση και είσοδος του πλουμίου στο κατάλοιπο στρώμα. Στην πραγματικότητα δηλαδή - εάν το κομμάτι του πλουμίου εισέλθει στο κατάλοιπο στρώμα - το πλούμιο διαχέεται με δύο διαφορετικούς τρόπους ανάλογα σε ποιο στρώμα βρίσκεται κάθε κομμάτι του. Για την μοντελοποίηση αυτού του φαινόμενου δεν μπορούμε να κάνουμε πολλά πράγματα, διότι

αφενός δεν έχουμε τιμές για την τύρβη, που επικρατεί στο κατάλοιπο στρώμα, και αφετέρου τα γκαουσσιανά μοντέλα του ORION-II και του GENII θεωρούν ότι το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα μέσα στο οποίο γίνεται η διάχυση των ρύπων είναι ομοιόμορφο. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι το ευσταθές οριακό στρώμα δεν περιορίζει την κίνηση του πλουμίου και την άνοδο του, οπότε δεν μας ενοχλεί τυχόν συντηρητικότερη εκτίμηση του. Ο υπολογισμός του ευσταθούς οριακού στρώματος όμως πραγματοποιείται διότι η τιμή του χρησιμοποιείται ενίοτε σαν αρχική συνθήκη για τον προσδιορισμό του πρώτου ημερήσιου ύψους ανάμιξης στην διαφορική εξίσωση 4.1.

4.2.5 Εξισώσεις υπολογισμού του κατακόρυφου προφίλ της ταχύτητας ανέμου

Είναι γνωστό ότι η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται με το ύψος, λόγω της τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ του ανέμου και του εδάφους. Έτσι η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη κοντά στο έδαφος και αυξάνει όσο απομακρυνόμαστε από αυτό. Αυτό το φαινόμενο παίζει σημαντικό ρόλο στα μοντέλα ατμοσφαιρικής διάχυσης.

Όπως είδαμε παραπάνω (παράγραφος 2.2.4), η εξίσωση Gauss χρησιμοποιεί μια τιμή της ταχύτητας του ανέμου u για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων. Το θέμα είναι σε ποιο ύψος από το έδαφος θεωρείται η ταχύτητα u. Ο Hanna [71, σελ. 58] και ο οδηγός της IAEA [87, σελ. 164] αναφέρουν ρητά ότι χρησιμοποιείται η ταχύτητα στο ενεργό ύψος εκπομπής. Ο Turner [192, σελ. 2-4] θεωρεί ότι η u είναι η ταχύτητα στο ύψος εκπομπής (*release height*), χωρίς να ξεκαθαρίζει εάν αυτό είναι το ενεργό ή το φυσικό ύψος εκπομπής(ύψος καμινάδας). Την ίδια ασαφή διατύπωση έχει και το εγχειρίδιο του ISC3 [202, σελ. 16]. Ούτε και το εγχειρίδιο του ORION-II [9] ξεκαθαρίζει εάν η u θεωρείται στο φυσικό ή στο ενεργό ύψος εκπομπής. Εμείς θα χρησιμοποιήσουμε στο μοντέλο μας την ταχύτητα του ανέμου στο ενεργό ύψος εκπομπής, όπως προτείνει και ο Hanna και η IAEA, αφού οι υπόλοιποι είναι σχετικά ασαφείς. Το ενεργό ύψος εκπομπής υπολογίζεται με βάση τις εξισώσεις, που έχουν παρατεθεί στην παράγραφο 2.2.3.2.

Σχετικά τώρα με την ταχύτητα του ανέμου στο ενεργό ύψος εκπομπής, θα πρέπει να την υπολογίσουμε, αφού δεν διαθέτουμε μετρήσεις σε αυτό το ύψος. Για τους σχετικούς υπολογισμούς θα χρησιμοποιήσουμε τον εκθετικό νόμο [71]:

$$u = u_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^p \tag{4.14}$$

όπου:

u: Η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος υπολογισμού.
u_{ref}: Η μετρούμενη ταχύτητα του ανέμου στο σημείο z_{ref}.
z: Το ύψος στο σημείο υπολογισμού.
z_{ref}: Το ύψος στο σημείο μέτρησης.
p: Εμπειρικός εκθέτης.

Ο εκθετικός νόμος ισχύει για ύψη έως $200\,\mathrm{m}$. Για $z > 200\mathrm{m}$ δεχόμαστε ότι $u = u_{200}$. Ο εκθετικός νόμος δεν διαθέτει την ακρίβεια της εξίσωσης 3.22, όμως είναι πολύ πιο εύκολα εφαρμόσιμος, ενώ ακόμη μπορεί να μας δώσει τιμές και για $z > 100\mathrm{m}$. Ο Irwin [91] παρέχει τιμές για τον εκθέτη p συναρτήσει της κατηγορίας ατμοσφαιρικής ευστάθειας και το εάν βρισκόμαστε σε αστικό χώρο ή σε ανοιχτό πεδίο. Επειδή όμως από τις σχετικές εξισώσεις βλέπουμε ότι το p εξαρτάται τόσο από το αεροδυναμικό ύψος επιφάνειας z_o, όσο και από το ύψος για το οποίο γίνεται ο υπολογισμός, θα προτιμήσουμε για μεγαλύτερη ακρίβεια να ενσωματώσουμε στην ρουτίνα μας τις εξισώσεις υπολογισμού του p. Αναλυτικά:
Στην περίπτωση ασταθών συνθηκών,

$$(\frac{u_*}{uk})^{-1} = ln(z/z_o) + ln\left[\frac{(\zeta_o^2+1)(\zeta_o+1)^2}{(\zeta^2+1)(\zeta+1)^2}\right] + 2[tan^{-1}(\zeta) - tan^{-1}(\zeta_o)] \qquad (4.15)$$

όπου:
u: Η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος z υπολογισμού του p.
u_*: Η ταχύτητα τριβής.
$\zeta = (1 - \gamma z_1/L)^{1/4}$
$\zeta_o = (1 - \gamma z_o/L)^{1/4}$
L: Το μήκος Monin-Obukhov, το οποίο υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 4.6.
z: Το ύψος στο οποίο υπολογίζεται το p.
z_o: Αεροδυναμικό ύψος επιφάνειας
z_1: Το μέσο ύψος ανάμεσα στο ύψος μέτρησης των μετεωρολογικών δεδομένων z_{ref} και στο ύψος υπολογισμού z.
u: Η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος z υπολογισμού του p.
u_*: Η ταχύτητα τριβής.
$\zeta = (1 - \gamma z_1/L)^{1/4}$
$\zeta_o = (1 - \gamma z_o/L)^{1/4}$
γ =15.0. Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη παράμετρος είναι διαφορετική από τον ρυθμό μεταβολής της δυνητικής θερμοκρασίας, που ορίζεται και αυτή με γ.
k: Η σταθερά Von Karman.

Υπολογίζουμε στην συνέχεια την αδιάστατη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου

(*nondimensional wind shear*) ϕ_{m} από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\phi_m = (1 - \gamma z_1/L)^{-1/4} \tag{4.16}$$

Από τις εξισώσεις 4.15 και 4.16 υπολογίζεται το p ως ακολούθως:

$$p = \frac{u_*}{uk}\phi_m \tag{4.17}$$

Πρέπει να αναφέρουμε ότι και οι Panofsky and Dutton [139, σελ. 133] διαθέτουν παρόμοια μεθοδολογία. Διαπιστώσαμε όμως ότι για μεγάλες τιμές του $\mathrm{z_o}$ το p αποκλίνει από τις τιμές που παρέχει ο Irwin. Επειδή δεν διαθέτουμε πειραματικές τιμές, ώστε να κάνουμε τις κατάλληλες συγκρίσεις, επιλέγουμε το μοντέλο του Irwin [91].
Για τις ευσταθείς συνθήκες τώρα έχουμε:

$$(\frac{u_*}{uk})^{-1} = ln(\frac{z_1}{z_o}) + \beta\frac{z_1}{L} \tag{4.18}$$

$$\phi_m = 1 + \beta\frac{z_1}{L} \tag{4.19}$$

όπου $\beta = 2$. Από τις παραπάνω εξισώσεις και με την βοήθεια της εξίσωσης 4.17 υπολογίζουμε το p.

4.2.6 Διαχείριση διαστημάτων άπνοιας

Όταν η ένταση του ανέμου είναι μηδενική (επικρατεί άπνοια) προκαλείται ένα επιπλέον πρόβλημα στην προσπάθεια μοντελοποίησης, αφού τα μοντέλα, που στηρίζονται στις εξισώσεις του Gauss όπως ο ORION-II, δέχονται ότι η υπολογιζόμενη συγκέντρωση είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας του ανέμου. Επιπλέον οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις γίνονται ιδιαίτερα μεγάλες όταν οι εισαγόμενες ταχύτητες στο μοντέλο είναι μικρότερες από $1\,\mathrm{m/sec}$. Στην βιβλιογραφία προτείνονται οι δύο παρακάτω λύσεις [197]:

- Δεχόμαστε ότι το μοντέλο Gauss δεν μπορεί να εφαρμοστεί κατά την διάρκεια άπνοιας και ότι η γνώση αυτή την στιγμή σχετικά με την συμπεριφορά του πλουμίου δεν μας επιτρέπει την ανάπτυξη μιας καλύτερης τεχνικής. Έτσι δεν λαμβάνουμε υπόψη στους υπολογισμούς μας διαστήματα άπνοιας.

- Όταν η μετρούμενη από το ανεμόμετρο ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη από $1\,\mathrm{m/sec}$ προτείνεται η αντικατάστασή της με την τιμή $1\,\mathrm{m/sec}$ και η αντικατάσταση της διεύθυνσης του ανέμου με την διεύθυνση του ανέμου του προηγούμενου χρονικού διαστήματος.

Εμείς αποφασίσαμε να επιλέξουμε την δεύτερη μέθοδο. Καθώς για τον προσδιορισμό της ευστάθειας χρησιμοποιούμε την μέθοδο σ_{A} χρειαζόμαστε και μια τιμή για την τυπική απόκλιση της μέσης διεύθυνσης του ανέμου για το διάστημα της άπνοιας. Η EPA [197] όμως δεν παρέχει καθόλου πληροφορίες για την περίπτωση, που ο προσδιορισμός της ευστάθειας γίνεται με την μέθοδο σ_{A}. Ως πρώτη λύση θα μπορούσαμε να αντικαθιστούμε την τιμή της τυπικής απόκλισης της μέσης διεύθυνσης του ανέμου σ_{A} με την τιμή που είχε στο προηγούμενο διάστημα. Όμως έτσι υπάρχει η περίπτωση η προσδιοριζόμενη ευστάθεια να είναι τελείως διαφορετική από αυτή, που επικρατεί πραγματικά στο πεδίο. Αυτό είναι δυνατόν να συμβεί όταν για ένα χρονικό διάστημα έχουμε μεγάλη ταχύτητα ανέμου και μεγάλη σ_{A} και το επόμενο διάστημα η ένταση του ανέμου είναι μηδέν. Αυτό δεν παρατηρείται ιδιαίτερα συχνά. Πιθανόν όμως και να συμβαίνει εάν το ανεμόμετρο, με το οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις στο πεδίο, έχει υψηλό όριο «ενεργοποίησης». Είναι γνωστό ότι τα φθηνά ανεμόμετρα δεν δίνουν ενδείξεις για ταχύτητες ανέμου κάτω από $2.5\,\mathrm{msec}^{-1}$.

Μια δεύτερη λύση θα μπορούσε να ήταν το να χρησιμοποιούμε την σ_{A} του διαστήματος άπνοιας, αλλά υπάρχει το εξής θέμα: Κατά το διάστημα της άπνοιας υπάρχει η περίπτωση μια στιγμιαία ριπή αέρα να περιστρέψει το ανεμόμετρο σε νέα θέση με αποτέλεσμα η σ_{A} να έχει μεγάλη τιμή χωρίς να συμβαίνει κάτι τέτοιο στην πραγματικότητα.

Έτσι αποφασίζουμε να κάνουμε τα ακόλουθα: Κατά την διάρκεια της άπνοιας η διεύθυνση του ανεμομέτρου δεν αλλάζει ιδιαίτερα. Επομένως και η τυπική απόκλιση της διεύθυνσης της μέσης ταχύτητας του ανέμου σ_{A} θα είναι πολύ μικρή. Αποφασίζουμε λοιπόν να θέσουμε $\sigma_{\mathrm{A}} = 3°$. Από την σχετική μεθοδολογία της EPA [198, σελ. 6-19] προκύπτουν για $\mathrm{u} \leq 1\mathrm{m/sec}$ και $\sigma_{\mathrm{A}} = 3°$ οι ακόλουθες ευστάθειες:

- Ημέρα: Ευστάθεια D

- Νύχτα: Ευστάθεια F

Για να βεβαιωθούμε για την ορθότητα της παραδοχής κάνουμε το εξής: Έστω ότι εκλέγαμε σ_{A} στο διάστημα $3.8\,° \leq \sigma_{\mathrm{A}} < 7.5\,°$. Η ευστάθεια κατά την διάρκεια της ημέρας θα ήταν πάλι D και κατά την διάρκεια της νύχτας E. Αυτό σημαίνει ότι διαλέγοντας σ_{A}=$3\,°$ οδηγούμαστε στην δυσμενέστερη περίπτωση, αφού στους υπολογισμούς μας με ευστάθεια F θα έχουμε την μικρότερη δυνατή ανάμιξη, οπότε και οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις θα είναι μεγαλύτερες, από ότι εάν είχαμε ευστάθεια E. Συνεπώς ορθώς επιλέξαμε σ_{A}=$3\,°$, αφού έτσι οδηγούμαστε σε συντηρητικότερους υπολογισμούς.

4.2.7 Μορφή του *metprep*

Σε αυτή την παράγραφο θα αναφερθούμε στα αρχεία εισαγωγής δεδομένων και στην δομή του προγράμματος *metprep*. Τα αρχεία εισαγωγής δεδομένων του προγράμματος είναι τα ακόλουθα:

- datconstr.txt: Εδώ περιέχονται δεδομένα σχετικά με τις διαστάσεις της καμινάδας, την ταχύτητα εξόδου των καυσαερίων και το αεροδυναμικό ύψος επιφάνειας του εδάφους. Η γραμμογράφηση του αρχείου περιγράφεται στο παράρτημα Η'.

- datmet.txt: Περιέχει τα πρωτογενή μετεωρολογικά δεδομένα, που παράγει ο μετεωρολογικός σταθμός, σε μορφή πίνακα όπου κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε μετρήσεις χρονικού διαστήματος μιας ώρας. Τα δεδομένα αυτά είναι η ημερομηνία και η ώρα της μέτρησης, η ταχύτητα του ανέμου, η διεύθυνση του ανέμου, η τυπική απόκλιση της διεύθυνσης του ανέμου και η θερμοκρασία του αέρα. Η γραμμογράφηση του εν λόγω αρχείου περιγράφεται στο παράρτημα Η'.

- sunrise.txt, sunset.txt: Σε αυτά τα αρχεία έχουν πινακοποιηθεί οι ώρες ανατολής και δύσης αντίστοιχα για τον ελληνικό χώρο για χρονικό διάστημα ενός έτους.

Ο *metprep* αποτελείται από το κύριο πρόγραμμα (*main routine*) και τις ακόλουθες υπορουτίνες:

daymix: Αυτή η υπορουτίνα υπολογίζει το ύψος ανάμιξης σε ασταθείς συνθήκες.

nocmix: Αυτή η υπορουτίνα υπολογίζει το ύψος ανάμιξης σε ουδέτερες και ευσταθείς συνθήκες.

plrise: Η συγκεκριμένη υπορουτίνα υπολογίζει την ανύψωση του πλουμίου.

pcalc: Αυτή η υπορουτίνα υπολογίζει τον εκθέτη p του εκθετικού νόμου για τον υπολογισμό του κατακόρυφου προφίλ της ταχύτητας.

calcdate: Με την βοήθεια αυτής της ρουτίνας επιστρέφονται οι ώρες ανατολής και δύσης του ηλίου για κάθε διαφορετική μέρα του χρόνου από τα αρχεία sunrise.txt, sunset.txt. Δηλαδή η υπορουτίνα ανάλογα με την ημερομηνία ανασύρει την κατάλληλη ώρα ανατολής και δύσης από τα δύο παραπάνω αρχεία. Ειδική μέριμνα λήφθηκε κατά την ανάπτυξη της υπορουτίνας για τα δίσεκτα έτη.

rk4, deriv : Είναι οι υπορουτίνες, που υλοποιούν την αριθμητική λύση της διαφορικής εξίσωσης 4.1 της σελίδας 102.

Οι παραπάνω υπορουτίνες βρίσκονται στα ακόλουθα αρχεία:

- metprep1.f : metprep(main routine)

- mixheight.f : daymix, rk4, derivs, nocmix
- plrise.f : plrise, pcalc
- calcdate.f : calcdate

4.2.8 Η λειτουργία του *metprep*

Σε αυτό το σκέλος θα περιγράψουμε την λειτουργία του *metprep* σε αδρές γραμμές. Ο αναγνώστης, που ενδιαφέρεται για περισσότερες λεπτομέρειες μπορεί να ανατρέξει στο λογικό διάγραμμα (βλ. σχήματα 4.1 και 4.2) καθώς και στον πηγαίο κώδικα του προγράμματος (βλ. παράρτημα Β΄.1).

Το πρόγραμμα αρχικά διαβάζει το αρχείο datconstr.txt, όπου περιέχονται τα κατασκευαστικά δεδομένα. Ακολούθως διαβάζει από το αρχείο μετεωρολογικών δεδομένων datmet.txt την πρώτη εγγραφή μετεωρολογικής πληροφορίας, η οποία αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη ώρα, η οποία θα πρέπει να είναι στην διάρκεια της νύχτας. Στην συνέχεια καλεί την calcdate, η οποία παρέχει την ώρα ανατολής και την ώρα δύσης του ηλίου για την συγκεκριμένη ημέρα. Ακολουθεί ο υπολογισμός της ατμοσφαιρικής ευστάθειας με την μέθοδο σ_{A} και στην συνέχεια ανάλογα με την ευστάθεια καλείται η daymix ή η nocmix για τον υπολογισμό του ύψους ανάμιξης.

Η daymix υπολογίζει το ημερήσιο ύψος ανάμιξης από την λύση της διαφορικής εξίσωσης 4.4. Ως αρχική τιμή του ύψους ανάμιξης για την πρώτη εφαρμογή της διαφορικής εξίσωσης λαμβάνεται το ύψος ανάμιξης της προηγούμενης ώρας, στην οποία η ευστάθεια ήταν D ή E ή F, αφού επρόκειτο για νυχτερινό διάστημα. Σε αυτές τις συνθήκες το ύψος ανάμιξης υπολογίζεται από τις εξισώσεις, που παρατέθηκαν στις παραγράφους 4.2.4.2 και 4.2.4.3 χωρίς να είναι ανάγκη να επιλυθεί κάποια διαφορική εξίσωση.

Η λύση της διαφορικής γίνεται με την επαναληπτική μέθοδο Runge-Kutta 4ης τάξης. Η υλοποίηση της σε Fortran 77 πραγματοποιείται με την βοήθεια των υπορουτινών rk4, derivs, οι οποίες παρέχονται από τους Press et al. [151] και έχουν τροποποιηθεί ελαφρώς για να προσαρμοστούν στο πρόβλημα μας.

Για τον έλεγχο της λύσης της διαφορικής κάναμε το εξής: Ολοκληρώσαμε την εξίσωση 4.4 ως προς t με αρχικές συνθήκες για το ύψος ανάμιξης τις $\mathrm{h_o}$ και $\mathrm{h_1}$, όπου $\mathrm{h_o}$ το αρχικό ύψος και $\mathrm{h_1}$ το τελικό ύψος ανάμιξης. Έτσι προέκυψε με αναλυτικό τρόπο η ακόλουθη εξίσωση:

$$t = \frac{1}{2}\left[\frac{A^2h_1^2 - 2ABh_1 + 2B^2ln(Ah_1 + B)}{A^3}\right] - \frac{1}{2}\left[\frac{A^2h_o^2 - 2ABh_o + 2B^2ln(Ah_o + B)}{A^3}\right] \tag{4.20}$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω εξίσωση την τιμή του ύψους ανάμιξης h_1, που υπολογίζει η ρουτίνα, πήραμε μια τιμή για τον χρόνο t. Στην συνέχεια συγκρίναμε την προκύπτουσα τιμή του t με τον πραγματικό χρόνο, που μεσολάβησε, και είδαμε πόσο καλή είναι η λύση. Εφαρμόζοντας λοιπόν την παραπάνω διαδικασία για αρκετές διαφορετικές τιμές διαπιστώσαμε ότι η αριθμητική λύση μας δίνει πολύ καλά αποτελέσματα, αφού η διαφορά του υπολογιζόμενου αναλυτικά χρόνου t, από τον πραγματικό ήταν της τάξης του χιλιοστού στην πλειονότητα των περιπτώσεων.

Μετά από όλα τα παραπάνω γίνεται συσσώρευση της ταχύτητας του ανέμου, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και του ύψους ανάμιξης σε αντίστοιχους πίνακες 16x6. Οι γραμμές αντιπροσωπεύουν τις διευθύνσεις του ανέμου και οι στήλες τις κατηγορίες ατμοσφαιρικής ευστάθειας. Έτσι ανάλογα με την διεύθυνση του ανέμου της συγκεκριμένης εγγραφής και την ατμοσφαιρική ευστάθεια, που προέκυψε, καταχωρούνται τα παραπάνω μεγέθη σε συγκεκριμένο σημείο στους πίνακες. Επίσης υπάρχει αντίστοιχος πίνακας όμοιων διαστάσεων, όπου γίνεται καταμέτρηση των φορών, που έγινε συσσώρευση στο συγκεκριμένο σημείο στους πίνακες. Στην συνέχεια το πρόγραμμα διαβάζει την επόμενη εγγραφή στο αρχείο μετεωρολογικής πληροφορίας και επαναλαμβάνει όλα τα παραπάνω βήματα.

Αφού το metprep διαβάσει όλο το αρχείο ξεκινά να υπολογίζει (ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια) την μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψους του ανεμομέτρου και την μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στην συνέχεια υπολογίζει το ενεργό ύψος πλουμίου ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια καλώντας την υπορουτίνα plrise.

Ακολουθεί ο υπολογισμός της ταχύτητας του ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου (ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια) με την βοήθεια του εκθετικού νόμου. Ο υπολογισμός του σχετικού εκθέτη γίνεται με κλίση της υπορουτίνας pcalc. Μετά το πέρας των παραπάνω γίνεται έλεγχος για το εάν το ενεργό ύψος πλουμίου είναι μεγαλύτερο από το ύψος ανάμιξης στις ασταθείς συνθήκες. Σε περίπτωση, που κάτι τέτοιο συμβαίνει το πρόγραμμα θέτει ότι το ενεργό ύψος πλουμίου είναι ίσο με το ύψος ανάμιξης του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Ακολουθεί ο υπολογισμός του ποσοστού του χρόνου, όπου έχουμε συνθήκες άπνοιας. Έχοντας πλέον πραγματοποιήσει το πρόγραμμα όλους τους υπολογισμούς ξεκινά να εκτυπώνει τα αποτελέσματα στα σχετικά αρχεία, όπως περιγράφεται αναλυτικότερα στην παράγραφο 4.2.9. Με αυτό το τελευταίο στάδιο ολοκληρώνεται η εκτέλεση του. Αξίζει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και για άλλα μοντέλα, όπως ο GENII, κάνοντας μικρές τροποποιήσεις στον πηγαίο κώδικα και ειδικότερα στην μορφή των αρχείων αποτελεσμάτων.

4.2.9 Παραγόμενα αποτελέσματα του *metprep*

Το *metprep* κατά την εκτέλεση της αποθηκεύει τα παραγόμενα αποτελέσματα σε αρχεία, ώστε να μπορούν να επεξεργαστούν στην συνέχεια από τον χρήστη. Τα αρχεία και τα αντίστοιχα αποτελέσματα είναι τα ακόλουθα:

- *percentage.txt*. Αυτό το αρχείο περιέχει τις απόλυτες συχνότητες εμφάνισης ανέμου ανά διεύθυνση και ευστάθεια. Οι διευθύνσεις του ανέμου είναι 16 και οι κατηγορίες ευστάθειας 6. Συνεπώς τα αποτελέσματα θα παρουσιάζονται με την μορφή ενός πίνακα 16x6.

- *velocity.txt*. Εδώ καταγράφεται η μέση ταχύτητα ανέμου (στο ύψος του ανεμομέτρου) ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια. Ομοίως και εδώ τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε έναν πίνακα 16x6.

- *temperat.txt*. Εδώ περιέχεται η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια. Ομοίως και εδώ τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε έναν πίνακα 16x6.

- *efheight.txt*. Αυτό το αρχείο περιέχει το υπολογιζόμενο ενεργό ύψος πλουμίου ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια και τα αποτελέσματα τοποθετούνται σε έναν πίνακα 16x6.

- *mixfin.txt*. Σε αυτό το αρχείο καταγράφεται το ύψος ανάμιξης ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια. Ομοίως και εδώ τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε έναν πίνακα 16x6.

- *stackvelo.txt*. Εδώ περιέχεται η μέση ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια και τα αποτελέσματα καταγράφονται σε έναν πίνακα 16x6.

- *windrose.txt*. Αυτό το αρχείο περιέχει την συχνότητα εμφάνισης κάθε διεύθυνσης ανέμου (16 διεύθύνσεις) καθώς και την μέση ταχύτητα ανέμου, που αντιστοιχεί σε κάθε διεύθυνση (windrose).

4.2.10 Έλεγχος σωστής λειτουργίας του *metprep*

Για να πιστοποιηθεί η σωστή λειτουργία του *metprep* πραγματοποιήθηκαν πολλαπλοί έλεγχοι. Αρχικά έγινε έλεγχος βήμα-βήμα (step by step) σε κάθε γραμμή κώδικα του προγράμματος με την βοήθεια του debugger. Ο έλεγχος γινόταν ως εξής: Κατασκευάστηκε ένα μικρό μη ρεαλιστικό μετεωρολογικό αρχείο εισόδου και με βάση αυτό υπολογιζόντουσαν τα ενδιάμεσα σχετικά μεγέθη με το χέρι και γινόταν σύγκριση

με τα αποτελέσματα, που έδινε η βηματική εκτέλεση του προγράμματος με την βοήθεια του debugger. Οι έλεγχοι αυτοί έδειξαν ότι οι υπολογισμοί του προγράμματος πραγματοποιούνται σωστά.

Ακολούθησαν κατασκευές αρχείων, που είχαν μόνο μία μετεωρολογική εγγραφή και υπολογισμός με το χέρι των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Τα αρχεία αυτά κατασκευάστηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να ελέγχεται κάθε διαφορετική διακλάδωση του προγράμματος και να πραγματοποιούνται οι ακόλουθοι έλεγχοι:

- Έλεγχος για τον σωστό προσδιορισμό της ατμοσφαιρικής ευστάθειας σε κάθε συνδυασμό περιπτώσεων που περιγράφονται στους πίνακες 4.2 και 4.3 (26 περιπτώσεις).

- Έλεγχος για την ορθή καταχώρηση της μετεωρολογικής εγγραφής στην αντίστοιχη κατηγορία διεύθυνσης ανέμου. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε για κάθε μία από τις 16 διεύθυνσεις ανέμου (16 περιπτώσεις).

- Έλεγχος για την ορθή λειτουργία της υπορουτίνας plrise, που υπολογίζει την ανύψωση του πλουμίου, ανάλογα με την ευστάθεια (2 περιπτώσεις).

- Έλεγχος για την ορθή λειτουργία της υπορουτίνας daymix, που υπολογίζει το ύψος ανάμιξης σε ημερήσιες συνθήκες.

- Έλεγχος για την ορθή λειτουργία της υπορουτίνας nocmix, που υπολογίζει το ύψος ανάμιξης σε νυχτερινές συνθήκες.

- Έλεγχος για την ορθή λειτουργία της υπορουτίνας pcalc, που υπολογίζει τον εκθέτη p, ο οποίος χρησιμοποιείται στον εκθετικό νόμο.

Στην συνέχεια έγιναν εκτελέσεις με βάση τα παραπάνω αρχεία δεδομένων και δεν παρατηρήθηκε κάποιο σφάλμα ή κάποια μη αναμενόμενη συμπεριφορά.

Τέλος κατασκευάστηκε μετεωρολογικό αρχείο το οποίο είχε ωριαίες μετεωρολογικές εγγραφές για χρονικό διάστημα ενός έτους. Όλες οι εγγραφές είχαν ακριβώς τα ίδια μετεωρολογικά δεδομένα, ώστε να είναι δυνατή η επαλήθευση των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκτέλεση με βάση το συγκεκριμένο αρχείο και τα αποτελέσματα ήταν τα αναμενόμενα. Με βάση όλα τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι το πρόγραμμα metprep εργάζεται ορθά.

4.3 Ο προεπεξεργαστής γεωγραφικών δεδομένων *GeoCalc* για τον κώδικα ORION-II

4.3.1 Εισαγωγή

Όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 3.2.2 ο κώδικας ORION-II εργάζεται σε πολικές συντεταγμένες. Προκειμένου να εκτελεστεί ζητάει τα υψόμετρα στα σημεία υπολογισμού της συγκέντρωσης. Τα σημεία υπολογισμού βρίσκονται ακτινικά γύρω από το κέντρο του συστήματος συντεταγμένων και ορίζονται με βάση το κέντρο αυτό. Ο χρήστης με σημείο αναφοράς το κέντρο καθορίζει τις ακτίνες για τις οποίες θα γίνουν οι υπολογισμοί. Για την κάθε δοθείσα ακτίνα ο ORION-II υπολογίζει συγκεντρώσεις ανά 22.5° με γωνία αφετηρίας τις 0° σε σχέση με την διεύθυνση του Βορρά. Ουσιαστικά δηλαδή υπολογίζει την συγκέντρωση σε 16 σημεία, τα οποία συμπίπτουν με τις 16 διευθύνσεις του ανέμου. Οι παραπάνω υπολογισμοί πραγματοποιούνται για κάθε ακτίνα, που όρισε ο χρήστης.

Τα υψόμετρα στα σημεία υπολογισμού μπορούν να αντληθούν από τις διαδικτυακές βάσεις δεδομένων του Google Earth [68] ή του NASA World Wind [129]. Βασική προϋπόθεση είναι όμως είναι να γνωρίζουμε τις γεωγραφικές συντεταγμένες τους ϕ, λ. Αυτό μπορεί να γίνει ως εξής: Για το σημείο του πεδίου, το οποίο ορίσαμε ως κέντρο, γνωρίζουμε τις γεωγραφικές συντεταγμένες του. Γνωρίζοντας τώρα και τις πολικές συντεταγμένες κάθε σημείου υπολογισμού μπορούμε να υπολογίσουμε τις γεωγραφικές συντεταγμένες του, με βάση τον αλγόριθμό που θα παρουσιαστεί ακολούθως. Προκειμένου αυτό να γίνεται αυτοματοποιημένα αποφασίστηκε να κατασκευαστεί το πρόγραμμα *GeoCalc*, ώστε να παράγονται εύκολα τα απαιτούμενα δεδομένα για τον ORION-II.

Ο ORION-II ζητάει τις τιμές των υψομέτρων ανά 22.5° και θεωρεί την κάθε τιμή υψομέτρου αντιπροσωπευτική για ολόκληρο τον τομέα, που ορίζεται. Παίρνοντας από το Google Earth μόνο μια τιμή για κάθε τομέα υπάρχει η πιθανότητα το υψόμετρο να μην είναι αντιπροσωπευτικό για τον υπόλοιπο τομέα αποφασίσαμε να κάνουμε το ακόλουθο: Ο *GeoCalc* θα κάνει μετατροπές ανά 11.25° (για 32 διευθύνσεις δηλαδή). Έτσι σε κάθε τομέα θα έχουμε 3 υψόμετρα από τα οποία θα υπολογίζουμε μια μέση τιμή και αυτήν θα εισάγουμε στον ORION-II. Π.χ. Για την διεύθυνση 0° θα βρίσκουμε τα υψόμετρα επίσης στις 348.75° και στις 11.25° και στον ORION-II θα εισάγουμε τον μέσο όρο τους. Για λόγους πληρότητας θα κατασκευαστεί και μια μορφή της *GeoCalc*, η οποία θα κάνει υπολογισμούς για 16 διευθύνσεις, ανά 22.5° και θα ονομάζεται *geoc16D* (βλ. παράγραφο Β'.3).

4.3.2 Χρησιμοποιούμενη θεωρία για την ανάπτυξη του προγράμματος *GeoCalc*

Προκειμένου να παρουσιάσουμε τον αλγόριθμο μετατροπής των πολικών συντεταγμένων σε γεωγραφικές είναι αναγκαίο να εκθέσουμε ορισμένες έννοιες από την γεωμετρία του ελλειψοειδούς εκ περιστροφής, αφού ως τέτοιο θα θεωρήσουμε τον πλανήτη γη. Η παραδοχή αυτή δεν εισάγει σημαντικά σφάλματα αφού οι αποκλίσεις του ελλειψοειδούς από την επιφάνεια του γεωειδούς δεν υπερβαίνουν τα 100m [217, σελ. 3-1].

Ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής (το οποίο στο εξής θα αναφέρεται ως ελλειψοειδές) δημιουργείται με την περιστροφή μιας έλλειψης γύρω από τον ημιάξονα της (βλ. σχήμα 4.3). Ένα τέτοιο ελλειψοειδές ορίζεται από τους δύο ημιάξονες του a, b και η εξίσωση του σε καρτεσιανές συντεταγμένες είναι η ακόλουθη:

$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{a^2} + \frac{Z^2}{b^2} = 1$$

όπου ο άξονας Z ταυτίζεται με τον άξονα συμμετρίας, ο άξονας X περνά από ένα βασικό, (ή μηδενικό) μεσημβρινό αναφοράς και ο άξονας Y συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα.

Ακολούθως παρουσιάζεται ο αλγόριθμος, που ανέπτυξε ο Kivioja [80, σελ. 62] για τον υπολογισμό των γεωγραφικών συντεταγμένων ενός σημείου εάν γνωρίζουμε τις γεωγραφικές συντεταγμένες ενός άλλου και την μεταξύ τους απόσταση. Έστω λοιπόν ότι έχουμε ένα σημείο με γεωγραφικές συντεταγμένες ϕ_s, λ_s. Θέλουμε να υπολογίσουμε τις γεωγραφικές συντεταγμένες ϕ_f, λ_f ενός άλλου σημείου το οποίο απέχει απόσταση S, ενώ το τμήμα $\mathrm{P_sP_f}$, που ενώνει τα δύο σημεία, σχηματίζει γωνία $\mathrm{a_s}$ με την διεύθυνση του Βορρά στο σημείο $\mathrm{P_s}$ (βλ. σχήμα 4.4).

Αρχικά χωρίζουμε το διάστημα S σε n ίσα στοιχειώδη διαστήματα $\delta\mathrm{S} = \frac{\mathrm{S}}{\mathrm{n}}$ και λαμβάνοντας ένα τέτοιο μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα τόξα $\mathrm{P_iP_{i+1}}$, $\mathrm{P_iQ_i}$ και $\mathrm{Q_iP_{i+1}}$ είναι ευθύγραμμα τμήματα και σχηματίζουν το τρίγωνο $\mathrm{P_iQ_iP_{i+1}}$ (βλ. σχήμα 4.5 στην σελίδα 132). Αυτό συμβαίνει διότι τόξα μεσημβρινού μικρότερα από 10km μπορούμε με ικανοποιητική προσέγγιση να τα θεωρήσουμε τόξα κύκλου με ακτίνα καμπυλότητας M [217, σελ. 3-13]. Επειδή για τέτοια τόξα η αντίστοιχη γωνία είναι πολύ μικρή, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι $\mathrm{arc}\gamma = \mathrm{tan}\gamma = \frac{\mathrm{M}}{\delta\phi}$. Έτσι από το τρίγωνο $\mathrm{P_iQ_iP_{i+1}}$ έχουμε:

$$\delta S cos a_i = M_i \delta\phi_i \tag{4.21}$$

$$\delta S sin a_i = N_i \delta\lambda_i cos\phi_i \tag{4.22}$$

Λύνοντας ως προς $\delta\phi_i$, $\delta\lambda_i$ τις παραπάνω εξισώσεις έχουμε:

$$\delta\phi_i = \frac{\delta S cos a_i}{M_i} \tag{4.23}$$

$$\delta\lambda_i = \frac{\delta S sin a_i}{N_i cos\phi_i} \tag{4.24}$$

Όπου $\mathrm{a_i}$ το αζιμούθιο στο σημείο $\mathrm{P_i}$. Το αζιμούθιο $\mathrm{a_{i+1}}$ στο σημείο $\mathrm{P_{i+1}}$ υπολογίζεται από την σχέση του Clairaut:

$$N_i cos\phi_i sin a_i = N_{i+1} cos\phi_{i+1} sin a_{i+1} = C \tag{4.25}$$

Έτσι οι συντεταγμένες στο σημείο $\mathrm{P_{i+1}}$ θα είναι:

$$\phi_{i+1} = \phi_i + \delta\phi_i \tag{4.26}$$

$$\lambda_{i+1} = \lambda_i + \delta\lambda_i \tag{4.27}$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των $\delta\phi_\mathrm{i}$, $\delta\lambda_\mathrm{i}$ στις παραπάνω εξισώσεις έχουμε:

$$\phi_{i+1} = \phi_i + \frac{\delta S cos a_i}{M_i} \tag{4.28}$$

$$\lambda_{i+1} = \lambda_i + \frac{\delta S sin a_i}{N_i cos\phi_i} \tag{4.29}$$

Όπου:

$\mathrm{M_i}$: Η ακτίνα ακτίνα καμπυλότητας του μεσημβρινού στο σημείο i, η οποία δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση [235], [189] :

$$M_i = \frac{a^2}{b\left(1 + \sqrt{\frac{a^2-b^2}{b^2}} cos^2\phi\right)^{3/2}}$$

$\mathrm{N_i}$: Η ακτίνα καμπυλότητας 1ης κάθετης τομής στο σημείο i, η οποία δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση [235], [189]:

$$M_i = \frac{a^2}{b\left(1 + \sqrt{\frac{a^2-b^2}{b^2}} cos^2\phi\right)^{1/2}}$$

Όσον αφορά στις τιμές των a, b λαμβάνουμε αυτές, που έχει υιοθετήσει και το σύστημα GRS80 (Geodetic Reference System 1980), το οποίο είναι το πιο σύγχρονο πρότυπο αυτή την στιγμή [235, σελ. 69]. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται επίσης από τα περισσότερα GPS. Έτσι έχουμε:
$\mathrm{a} = 6\,378\,187\,\mathrm{m}$
$\mathrm{b} = 6\,356\,752.3141\,\mathrm{m}$

Με διαδοχικές επαναλήψεις του παραπάνω αλγορίθμου μπορούν να υπολογιστούν οι συντεταγμένες $\phi_{\mathrm{f}}, \lambda_{\mathrm{f}}$ στο τελικό σημείο f.

4.3.3 Η ανάπτυξη του προγράμματος *GeoCalc*

Το πρόγραμμα είναι γραμμένο σε γλώσσα Fortran-77 και βασίζεται στον αλγόριθμο, που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Για την ανάπτυξη του αποφασίστηκε ότι το βήμα του αλγορίθμου θα είναι τα $10\,\mathrm{km}$.Το πρόγραμμα *GeoCalc* αποτελείται από την κύρια ρουτίνα και την υπορουτίνα flcalc. (για τον πηγαίο κώδικα βλ. παράρτημα Β΄.2). Η τελευταία καλείται για τον υπολογισμό των ϕ, λ όταν έχουμε περισσότερες από μια επαναλήψεις του αλγορίθμου. Στην πρώτη επανάληψη, όταν η απόσταση είναι μικρότερη ή ίση με $10\,\mathrm{km}$, ο υπολογισμός των ϕ, λ γίνεται μέσα στην κύρια ρουτίνα geocalc. Οι επόμενες επαναλήψεις, εάν χρειάζονται, γίνονται με κλήση της υπορουτίνας flcalc. Ο αναγνώστης μπορεί να δει το λογικό διάγραμμα του προγράμματος στο σχήμα 4.6.

Ο *GeoCalc* προκειμένου να λάβει τα απαραίτητα δεδομένα για την εκτέλεση του διαβάζει το αρχείο *geo.dat1*. Το αρχείο έχει 5 γραμμές και περιλαμβάνει ανά σειρά τα ακόλουθα:

- Αριθμός G των ακτίνων για τις οποίες θα γίνει η μετατροπή.
- Μήκος μεγάλου ημιάξονα της γης a σε m, μήκος μικρού ημιάξονα της γης b σε m.
- Γεωγραφικές συντεταγμένες ϕ, λ του κέντρου, που έχουμε ορίσει.
- Τιμές των ακτίνων $\mathrm{r(i)}$ για τις οποίες θα γίνει η μετατροπή.

Οι αντίστοιχες read είναι χωρίς format, οπότε δεν υπάρχει κάποια ιδιαίτερη ανάγκη μορφοποίησης. Απλώς όταν σε κάποια σειρά έχουμε τουλάχιστον δύο εγγραφές αυτές θα πρέπει να χωρίζονται με κενό. Ακολούθως παρουσιάζονται οι σχετικές εντολές ανάγνωσης:

```
read (10,*) G
read (10,*) a, b
read (10,*) phi, lamda
read (10,*) (r(i), i=1,G)
```

Στο αρχείο *results.out1* παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετατροπών. Κάθε γραμμή, η οποία αφορά ένα σημείο υπολογισμού, περιέχει κατά σειρά: Την απόσταση από το κέντρο, που έχουμε ορίσει (ακτίνα σημείου), την γωνία που σχηματίζει η ακτίνα του σημείου σε σχέση με την διεύθυνση του Βορρά, το υπολογιζόμενο ϕ και το υπολογιζόμενο λ του σημείου. Ενδεικτικά παρουσιάζονται οι δύο πρώτες γραμμές του αρχείου *results.out1*.

```
distance      thita          fi          lamda
5000.0       .000000     37.461271     22.107826
```

4.3.4 Έλεγχος σωστής λειτουργίας του *GeoCalc*

Προκειμένου να ελέγξουμε την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της επαναληπτικής μεθόδου κάναμε τα εξής:

- Έγινε έλεγχος βήμα-βήμα των εντολών τις ρουτίνας και παράλληλα εκτελέστηκαν όλες οι σχετικές εξισώσεις με το χέρι. Τα παραπάνω πραγματοποιήθηκαν για αρκετές διαφορετικές γωνίες και ακτίνες και δεν προέκυψε κανένα σφάλμα.

- Επίσης λαμβάνοντας τις αρχικές και τις τελικές τιμές των ϕ, λ από την ρουτίνα, τις εισάγαμε στο Google Earth και βρίσκαμε με την βοήθεια του την μεταξύ τους απόσταση. Στην συνέχεια συγκρίναμε την τελευταία με την ακτίνα, που είχαμε αρχικά εισάγει στον *GeoCalc*. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι παρατηρούμενες διαφορές ήταν της τάξης του 0.1% ενώ ποτέ δεν ξεπέρασαν το 1%.

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι τα αποτελέσματα, που παράγει η ρουτίνα είναι αξιόπιστα και ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Έτσι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον *GeoCalc* για να κάνουμε τις σχετικές μετατροπές από τις πολικές συντεταγμένες, που διαθέτουμε, σε γεωγραφικές και στην συνέχεια να αντλήσουμε από την βάση δεδομένων του Google Earth τα υψόμετρα στα σημεία, που μας ενδιαφέρουν. Έχοντας πλέον τα υψόμετρα των σημείων μπορούμε να τα εισάγουμε στον ORION-II.

4.4 Προγράμματα μετατροπής αρχείων αποτελεσμάτων των κωδίκων ORION-II και GENII

Τόσο ο ORION-II όσο και ο GENII δίνουν τις συγκεντρώσεις και τους ρυθμούς απόθεσης των ισοτόπων στα σημεία υπολογισμού σε πολικές συντεταγμένες από το κέντρο, το οποίο έχουμε ορίσει. Μάλιστα τα αποτελέσματα δίνονται με την μορφή πίνακα, όπου οι στήλες αντιστοιχούν στις ακτίνες και οι γραμμές στις γωνίες-διευθύνσεις οριζόμενες δεξιόστροφα από τον άξονα του Βορρά.

Θέλοντας να απεικονίσουμε τις συγκεντρώσεις, τους ρυθμούς απόθεσης και τις αντίστοιχες δόσεις στον επίπεδο ή και στον χώρο αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε λογισμικά γραφικής απεικόνισης. Κατά την χρήση τους διαπιστώσαμε ότι είναι αναγκαίο τα δεδομένα να δίνονται σε καρτεσιανές συντεταγμένες, όπου το κέντρο θα είναι το ίδιο με αυτό, που είχαμε ορίσει και για τις πολικές. Μάλιστα θα πρέπει να δίνονται υπό μορφή πίνακα, όπου σε κάθε γραμμή του θα βρίσκονται η τετμημένη x και η τεταγμένη y του σημείου καθώς και η συγκέντρωση ή εκτιμώμενη δόση, όπως φαίνεται στις ακόλουθες γραμμές:

```
   X          Y       Concent(Bq/m^3)
382.683     923.880  2.600E-06
```

Έτσι έγινε κατανοητό ότι χρειάζεται να γραφτεί ένα πρόγραμμα που θα κάνει αυτή την μετατροπή, η οποία δεν θα είναι κοινή και για τους δύο κώδικες, καθώς παράγουν διαφορετικά αρχεία αποτελεσμάτων. Μάλιστα στον ORION-II χρειάζεται να μετατρέπονται οι συγκεντρώσεις από Cim^{-3} σε Bqm^{-3} πριν γίνει η εκτύπωση τους στο αρχείο αποτελεσμάτων. Επίσης για κάθε κώδικα φτιάξαμε περισσότερες από μια παραλλαγές του προγράμματος για λόγους, που θα δούμε ακολούθως: Ο ORION-II καθώς και ο GENII χωρίζουν το επίπεδο σε 16 τομείς των 22.5° και θεωρούν ότι κάθε τομέας έχει ομοιόμορφη συγκέντρωση. Στα αποτελέσματα όμως παρέχουν την συγκέντρωση μόνο στην ακτίνα, που διέρχεται από το κέντρο κάθε τομέα. Για την περίπτωση, που θέλουμε να έχουμε περισσότερα σημεία στο επίπεδο, ώστε να έχουμε καλύτερη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων, κατασκευάσαμε για κάθε πρόγραμμα και μια εναλλακτική παραλλαγή, που δίνει στο αρχείο αποτελεσμάτων 3 σημεία για κάθε τομέα αντί για ένα. Αυτά θα είναι η ακτίνα, που διέρχεται από το κέντρο του τομέα (ανά 22.5° με αρχή τις 0°) και δυο ακόμη ακτίνες με διαφορά $\pm 10^\circ$ από την κεντρική ακτίνα.

Σχετικά με την μετατροπή από τις πολικές συντεταγμένες στις καρτεσιανές έχουμε τα ακόλουθα: Οι τεταγμένες x, y (βλ. σχήμα 4.7) θα δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$y = Rcos\theta \tag{4.30}$$

$$x = Rsin\theta \tag{4.31}$$

όπου:

P: Η απόσταση-ακτίνα του σημείου από το κέντρο, που έχουμε ορίσει.

θ: Η γωνία, που σχηματίζει η ακτίνα R με την διεύθυνση του Βορρά, δηλαδή τον άξονα y.

4.4.1 Προγράμματα μετατροπής για τον κώδικα ORION-II

4.4.1.1 Το πρόγραμμα *otran*

Το πρόγραμμα αυτό επεξεργάζεται αρχεία συγκεντρώσεων και παρουσιάζει στο αρχείο αποτελεσμάτων μόνο τα σημεία, τα οποία παρέχει ο ORION-II και βρίσκονται στο κέντρο κάθε τομέα. Τα σημεία αυτά είναι 16 για κάθε ακτίνα. Για την μετατροπή από τις πολικές σε καρτεσιανές συντεταγμένες χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις 4.30 και 4.31.

Τα δεδομένα διαβάζονται από το αρχείο polarconc.txt και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται στο cartesconc.txt. Το αρχείο polarconc.txt περιέχει τις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις ανά διεύθυνση και απόσταση από το κέντρο, που έχουμε ορίσει. Για να δημιουργήσουμε το polarconc.txt αντιγράφουμε από το αρχείο αποτελεσμάτων results.txt του ORION-II αυτούσιο το κομμάτι, που μας ενδιαφέρει (βλ. παράρτημα Γ'). Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δώσει ο χρήστης κατά την αντιγραφή του πίνακα αποτελεσμάτων από το αρχείο results.txt. Ο πίνακας θα πρέπει να λαμβάνεται ολόκληρος μαζί με την κεφαλίδα και οι ακτίνες υπολογισμού να βρίσκονται στην τρίτη γραμμή του αρχείου polarconc.txt και τα αποτελέσματα να ξεκινούν από την πέμπτη γραμμή του αρχείου. Μόνο έτσι θα γίνεται ορθή ανάγνωση των δεδομένων.

Ολόκληρος ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος *GeoCalc* παρουσιάζεται στο παράρτημα Β'.2.

4.4.1.2 Το πρόγραμμα *ogt*

Το πρόγραμμα, το οποίο επεξεργάζεται αρχεία συγκεντρώσεων, τυπώνει στο αρχείο αποτελεσμάτων 3 σημεία για κάθε τομέα: Το κεντρικό, το οποίο παρέχει ο ORION-II, και δύο με διαφορά $\pm 10^\circ$ από αυτό. Εξυπακούεται ότι αυτά τα τρία σημεία έχουν ίσες συγκεντρώσεις. Τα σημεία αυτά είναι 48 για κάθε ακτίνα και για την μετατροπή τους από τις πολικές στις καρτεσιανές συντεταγμένες χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις 4.30 και 4.31. Τα δεδομένα διαβάζονται από το αρχείο polarconc.txt και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται στο cartesconc960.txt. Όσον αφορά στην δημιουργία του polarconc.txt και στην διαχείριση του ισχύουν όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Ο αναγνώστης μπορεί να δει τον πηγαίο κώδικα του προγράμματος στο παράρτημα Β'.5.

4.4.1.3 Το πρόγραμμα *ogtdeposit*

Το πρόγραμμα, το οποίο επεξεργάζεται αρχεία ρυθμών απόθεσης, τυπώνει στο αρχείο αποτελεσμάτων 3 σημεία για κάθε τομέα: Το κεντρικό, το οποίο παρέχει ο ORION-II, και δύο με διαφορά $\pm 10^\circ$ από αυτό. Εξυπακούεται ότι αυτά τα τρία σημεία έχουν ίσες

συγκεντρώσεις. Τα σημεία αυτά είναι 48 για κάθε ακτίνα και για την μετατροπή τους από τις πολικές στις καρτεσιανές συντεταγμένες χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις 4.30 και 4.31. Τα δεδομένα διαβάζονται από το αρχείο polardepos.txt και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται στο cartessepos960.txt. Όσον αφορά στην δημιουργία του polardepos.txt και στην διαχείριση του ισχύουν όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.4.1.1. Ο αναγνώστης μπορεί να δει τον πηγαίο κώδικα του προγράμματος στο παράρτημα Β΄.6.

4.4.2 Προγράμματα μετατροπής για τον κώδικα GENII

4.4.2.1 Το πρόγραμμα *gtconc*

Το πρόγραμμα αυτό κάνει μετατροπές από τις πολικές σε καρτεσιανές συντεταγμένες για αρχεία συγκεντρώσεων και παρουσιάζει στο αρχείο αποτελεσμάτων μόνο τα σημεία, που παρέχει ο GENII και βρίσκονται στο κέντρο κάθε τομέα. Τα σημεία αυτά είναι 16 για κάθε ακτίνα και η μετατροπή σε καρτεσιανές συντεταγμένες γίνεται όπως και παραπάνω με βάση τις εξισώσεις 4.30 και 4.31.

Τα δεδομένα διαβάζονται από το αρχείο polarconc.txt και τα αποτελέσματα εκτυπώνονται στο αρχείο cartesconc.txt. Το polarconc.txt περιέχει τις υπολογιζόμενες από τον GENII συγκεντρώσεις ανά διεύθυνση και απόσταση από το κέντρο, που ορίσαμε κατά την εκτέλεση του GENII. Για να κατασκευάσουμε το polarconc.txt εργαζόμαστε ως εξής: Από το αρχείο .epa, που παράγει ο Report Generator του GENII αντιγράφουμε το κομμάτι, που μας ενδιαφέρει (βλ. παράρτημα Γ΄). Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί κατά την αντιγραφή, έτσι ώστε οι ακτίνες υπολογισμού να δίνονται στην τέταρτη γραμμή του αρχείου polarconc.txt και οι συγκεντρώσεις να ξεκινούν από την πέμπτη. Μόνο έτσι θα γίνεται ορθή ανάγνωση των δεδομένων.

Ο αναγνώστης μπορεί να δει τον πηγαίο κώδικα του προγράμματος στο παράρτημα Β΄.7

4.4.2.2 Το πρόγραμμα *gtdose*

Το πρόγραμμα αυτό είναι όμοιο με το προηγούμενο, δηλαδή παρέχει 16 σημεία ανά ακτίνα στο αρχείο αποτελεσμάτων cartesdose.txt. Η διαφορά του με την *gtconc* είναι ότι είναι κατασκευασμένο για να διαβάζει αρχεία δόσεων, τα οποία προέρχονται από τα .epa αρχεία του Report Generator, που έχει ο GENII (βλ. παράρτημα Γ΄). Στο αρχείο δεδομένων polardose.txt οι ακτίνες πρέπει να δίνονται στην τέταρτη γραμμή του αρχείου και οι συγκεντρώσεις να ξεκινούν από την πέμπτη. Μόνο έτσι θα γίνεται ορθή ανάγνωση των δεδομένων. Ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος *gtdose* βρίσκεται στο παράρτημα Β΄.8.

4.4.2.3 Το πρόγραμμα *ggtconc*

Το πρόγραμμα αυτό διαβάζει αρχεία συγκεντρώσεων του GENII και είναι σχεδόν όμοιο με το *gtconc*. Διαφέρει στο ότι τυπώνει στο αρχείο αποτελεσμάτων 3 σημεία για κάθε τομέα: Το κεντρικό, το οποίο παρέχει ο GENII, και δύο με διαφορά $\pm 10^\circ$ από αυτό. Εξυπακούεται ότι αυτά τα τρία σημεία έχουν ίσες συγκεντρώσεις. Τα σημεία αυτά είναι 48 για κάθε ακτίνα και για την μετατροπή τους από τις πολικές στις καρτεσιανές συντεταγμένες χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις 4.30 και 4.31. Τα δεδομένα διαβάζονται από το αρχείο polarconc.txt και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται στο cartesconc480.txt. Για να κατασκευάσουμε το polarconc.txt εργαζόμαστε ως εξής: Από το αρχείο .epa, που παράγει ο Report Generator του GENII αντιγράφουμε το κομμάτι, που μας ενδιαφέρει (βλ. παράρτημα Γ'). Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δώσει ο χρήστης έτσι ώστε οι ακτίνες να δίνονται στην τέταρτη γραμμή του αρχείου και οι συγκεντρώσεις να ξεκινούν από την πέμπτη. Μόνο έτσι θα γίνεται ορθή ανάγνωση των δεδομένων. Ο αναγνώστης μπορεί να βρει τον πηγαίο κώδικα του προγράμματος *ggtconc* στο παράρτημα Β'.9.

4.4.2.4 Το πρόγραμμα *ggtdeposit*

Το πρόγραμμα αυτό διαβάζει αρχεία ρυθμών απόθεσης του GENII και τυπώνει στο αρχείο αποτελεσμάτων 3 σημεία για κάθε τομέα. Τα δεδομένα διαβάζονται από το αρχείο polardepos.txt και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται στο cartesdepos480.txt. Για να κατασκευάσουμε το polardepos.txt εργαζόμαστε ως εξής: Από το αρχείο .epa, που παράγει ο Report Generator του GENII αντιγράφουμε το κομμάτι, που μας ενδιαφέρει (βλ. παράρτημα Γ'). Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δώσει ο χρήστης έτσι ώστε οι ακτίνες να δίνονται στην τέταρτη γραμμή του αρχείου και οι ρυθμοί απόθεσης να ξεκινούν από την πέμπτη. Μόνο έτσι θα γίνεται ορθή ανάγνωση των δεδομένων. Ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος παρουσιάζεται στο παράρτημα Β'.10

4.4.2.5 Το πρόγραμμα *ggtdose*

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα διαβάζει αρχεία δόσεων, που παράγονται από τον GENII, και είναι μια παραλλαγή του *gtdose*. Η διαφορά τους είναι ότι η *ggtdose* στο αρχείο αποτελεσμάτων cartesdose480.txt παρέχει για κάθε τομέα 3 σημεία: Το κεντρικό, το οποίο δίνει ο GENII, και και δύο με διαφορά $\pm 10^\circ$ από αυτό. Εξυπακούεται ότι αυτά τα τρία σημεία έχουν ίσες συγκεντρώσεις. Τα σημεία αυτά είναι 48 για κάθε ακτίνα και για την μετατροπή τους από τις πολικές στις καρτεσιανές συντεταγμένες χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις 4.30 και 4.31. Για το αρχείο δεδομένων polardose.txt ισχύει ότι έχουμε αναφέρει και για την ρουτίνα *gtdose*. Ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος βρίσκεται στο παράρτημα Β'.11.

4.5 Το πρόγραμμα μετατροπής αρχείου υψομέτρων *transheight*

Έχοντας συλλέξει από την βάση δεδομένων του Google Earth τα υψόμετρα στα σημεία ενδιαφέροντος έχουμε στην διάθεση μας ένα αρχείο, το οποίο έχει την ακόλουθη μορφή:

```
distance  thita   mean sector height
500.0   .000000        361
500.0   11.250000
500.0   22.500000      360
500.0   33.750000
500.0   45.000000      361
  .         .           .
  .         .           .
  .         .           .
1000.0  .000000        366
1000.0  11.250000
1000.0  22.500000      367
1000.0  33.750000
1000.0  45.000000      361
```

Δηλαδή η απόσταση από το κέντρο παραμένει σταθερή έως ότου η γωνία thita πάρει όλες τις δυνατές τιμές. Στην συνέχεια περνάμε στην επόμενη ακτίνα κ.ο.κ.

Εμείς ενδιαφερόμαστε να κάνουμε διαγράμματα του υψομέτρου σε συνάρτηση με την απόσταση από τον κέντρο για κάθε τιμή της διεύθυνσης. Με την μορφή όμως, που έχει αυτή την στιγμή το αρχείο μας, κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό. Για να είναι εύκολη και όχι χρονοβόρα η παραγωγή των γραφημάτων πρέπει το αρχείο των υψομέτρων να έχει την ακόλουθη μορφή:

```
heights   distance   angle
  500.       361.       .0
 1000.       366.       .0
 1500.       365.       .0
 2000.       355.       .0
  .           .          .
  .           .          .
  .           .          .
  500.       360.     22.5
 1000.       367.     22.5
 1500.       353.     22.5
 2000.       355.     22.5
```

Για να επιτύχουμε κάτι τέτοιο κατασκευάσαμε σε γλώσσα Fortran το πρόγραμμα *transheight*, το οποίο κάνει αυτή την μετατροπή. Το αρχείο δεδομένων ονομάζεται heights.prn και η μορφή του φαίνεται παραπάνω, ενώ το αρχείο, το οποίο παράγει το

πρόγραμμα, λέγεται forgraph.out1. Ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος παρουσιάζεται στο παράρτημα Β'.12.

4.6 Επίλογος

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε η ανάπτυξη όλων των προγραμμάτων, που ήταν απαραίτητα για την ολοκληρωμένη λειτουργία των κωδίκων ORION-II και GENII. Προκειμένου να γίνεται η επεξεργασία των πρωτογενών μετεωρολογικών δεδομένων αυτοματοποιημένα αναπτύχθηκε ο μετεωρολογικός προεπεξεργαστής *metprep*. Επίσης κατασκευάστηκε ο προεπεξεργαστής γεωγραφικών δεδομένων *GeoCalc*, ο οποίος μετατρέπει τις πολικές συντεταγμένες των σημείων υπολογισμού του ORION-II σε γεωγραφικές, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εύρεση των υψομέτρων τους από την βάση δεδομένων του Google Earth [68]. Αναπτύχθηκαν επίσης τα προγράμματα *OTRAN, OGT, GTCONC, GTDOSE, GGTCONC* και *GGTDOSE*, τα οποία μετατρέπουν την μορφή των αρχείων αποτελεσμάτων, που παράγουν οι κώδικες ORION-II και GENII, έτσι ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία τους. Τέλος κατασκευάστηκε το *TRANSHEIGHT*, το οποίο είναι ένα πρόγραμμα μετατροπής της μορφής του αρχείου υψομέτρων των σημείων υπολογισμού. Τα παραπάνω προγράμματα ελέγχθηκαν ενδελεχώς με την βοήθεια αποσφαλματωτή (*debugger*) καθώς και πραγματοποιώντας δοκιμαστικές εκτελέσεις, οι οποίες ήταν επιτυχείς.

Πίνακες Κεφαλαίου

Άνεμος	*διεύθυνση σε* °
N	0
NNE	22.5
NE	45
ENE	67.5
E	90
ESE	112.5
SE	135
SSE	157.5
S	180
SSW	202.5
SW	225
WSW	247.5
W	270
WNW	292.5
NW	315
NNW	337.5

Πίνακας 4.1: Διευθύνσεις ανέμου και σχετικές ονομασίες

Τυπική απόκλιση της οριζόντιας διεύθυνσης του ανέμου σ_A	*Αρχική εκτίμηση ευστάθειας P-G*
$22.5^\circ \leq \sigma_A$	A
$17.5^\circ \leq \sigma_A < 22.5^\circ$	B
$12.5^\circ \leq \sigma_A < 17.5^\circ$	C
$7.5^\circ \leq \sigma_A < 12.5^\circ$	D
$3.8^\circ \leq \sigma_A < 7.5^\circ$	E
$\sigma_A < 3.8^\circ$	F

Πίνακας 4.2: Εκτίμηση της αρχικής τιμής της ευστάθειας P-G ανάλογα με την τυπική απόκλιση της οριζόντιας διεύθυνσης του ανέμου σύμφωνα με την μέθοδο σ_A

Αρχική εκτίμηση ευστάθειας P-G		*ταχύτητα ανέμου (m/sec)*	*τελική τιμή της ευστάθειας P-G*
Ημέρα	A	u <3	A
	A	3≤ u <4	B
	A	4≤ u <6	C
	A	6≤ u	D
	B	u <4	B
	B	4≤ u <6	C
	B	6≤ u	D
	C	u <6	C
	C	6≤ u	D
	D,E ή F	οποιαδήποτε	D
Νύχτα	A	u <2.9	F
	A	2.9≤ u <3.6	E
	A	3.6≤ u	D
	B	u <2.4	F
	B	2.4≤ u <3.0	E
	B	3.0≤ u	D
	C	u <2.4	E
	C	2.4≤ u	D
	D	οποιαδήποτε	D
	E	u <5	E
	E	5≤ u	D
	F	u <3	F
	F	3≤ u <5	E
	F	5≤ u	D

Πίνακας 4.3: Κριτήρια εκτίμησης της τελικής τιμής της ευστάθειας P-G σύμφωνα με την μέθοδο σ_A

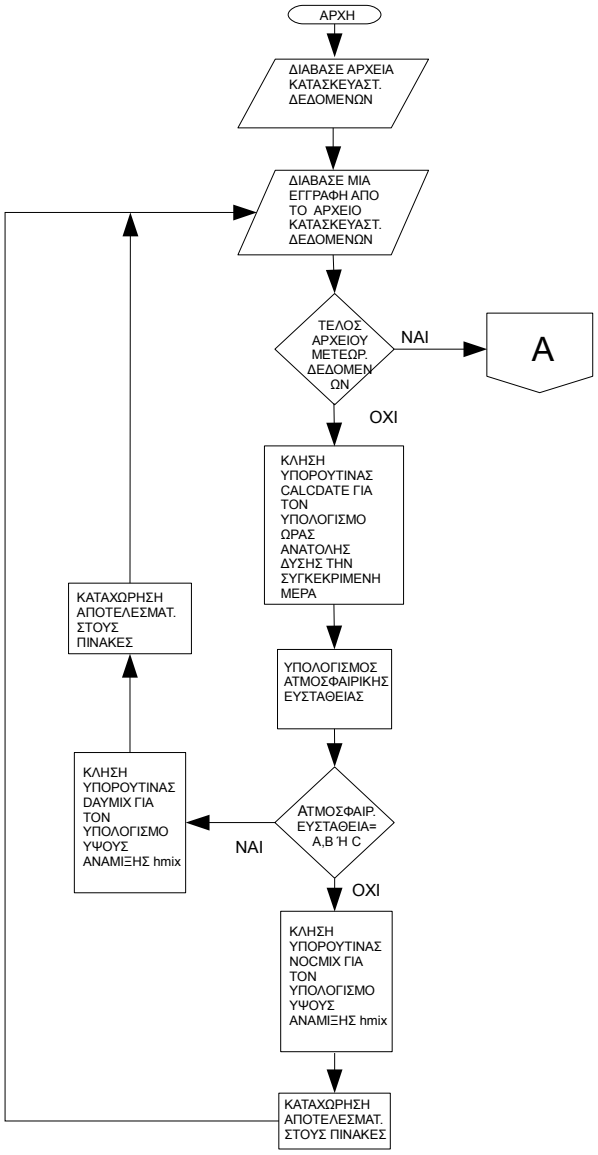
Κατηγορία ευστάθειας P-G	a	b
A	-0.00875	-0.1029
B	-0.03849	-0.1714
C	-0.00807	-0.3049
D	0	0
E	0.00807	-0.3049
F	0.03849	-0.1714

Πίνακας 4.4: Συντελεστές a, b για τον υπολογισμό του μήκους Monin-Obukhov L

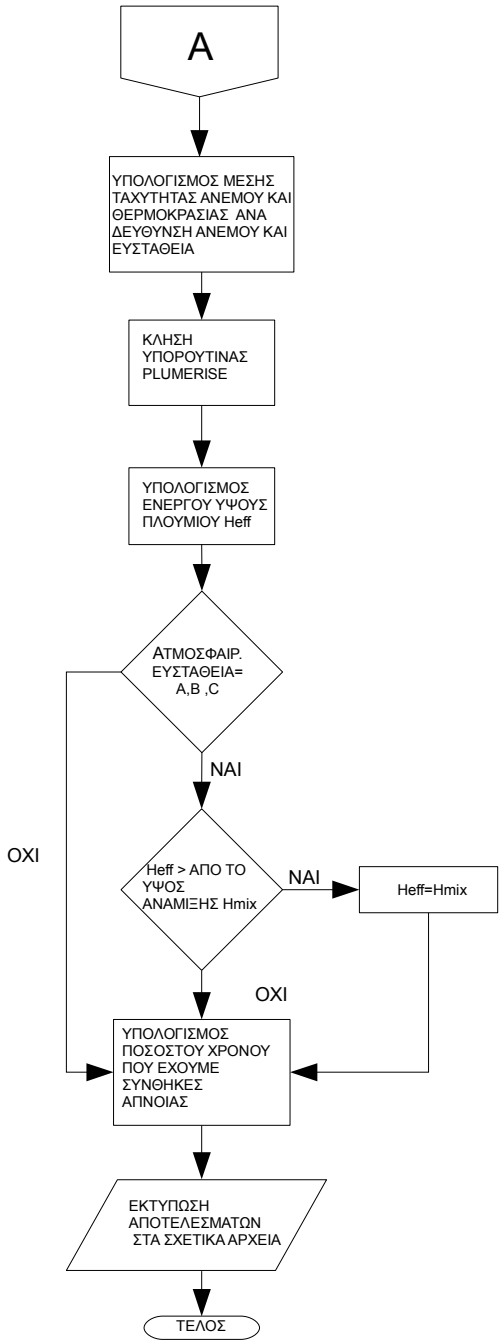
κατηγορία ευστάθειας P-G	γ (Km^{-1})
D	0.001
E	0.020
F	0.035

Πίνακας 4.5: Τιμές του γ σε σχέση με την ευστάθεια P-G.

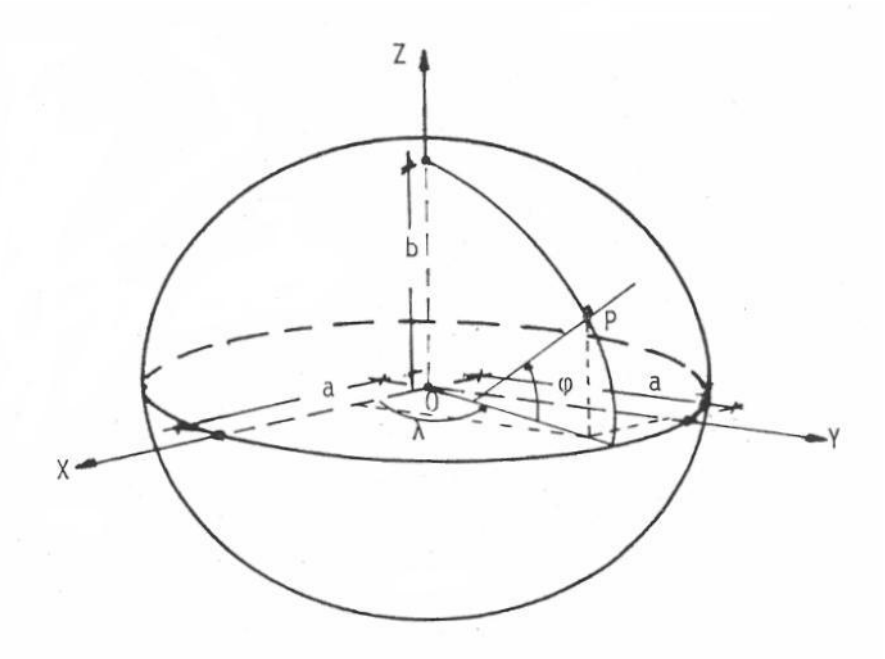
Σχήματα Κεφαλαίου



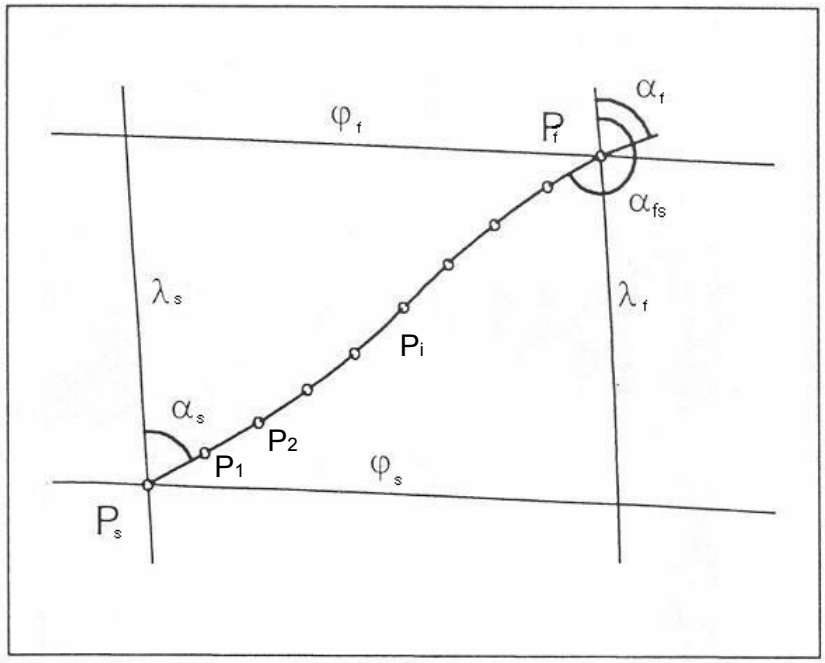
Σχήμα 4.1: Το λογικό διάγραμμα του προγράμματος *metprep*, μέρος Ι.



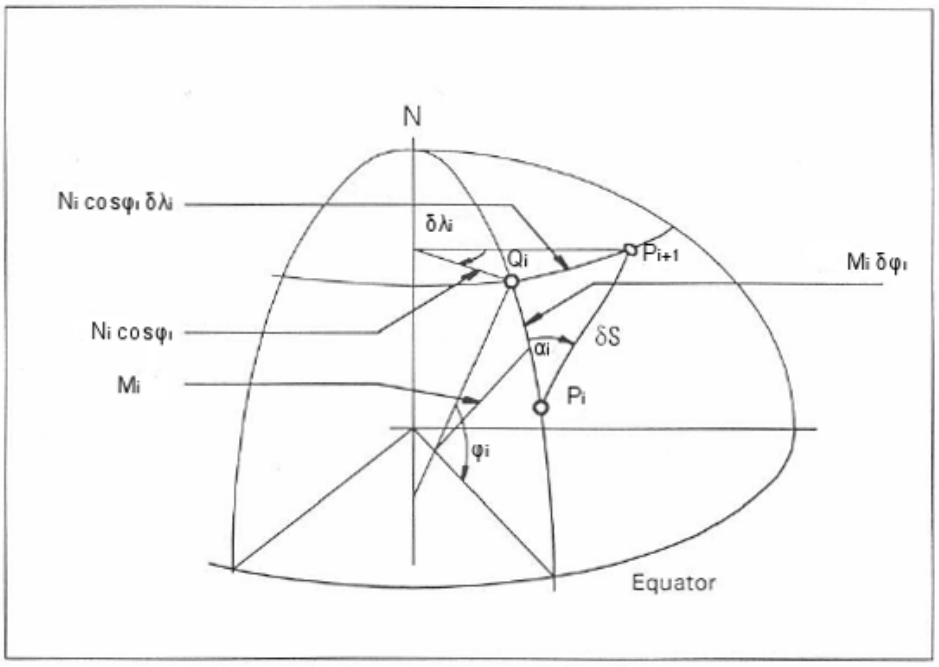
Σχήμα 4.2: Το λογικό διάγραμμα του προγράμματος *metprep*, μέρος ΙΙ.



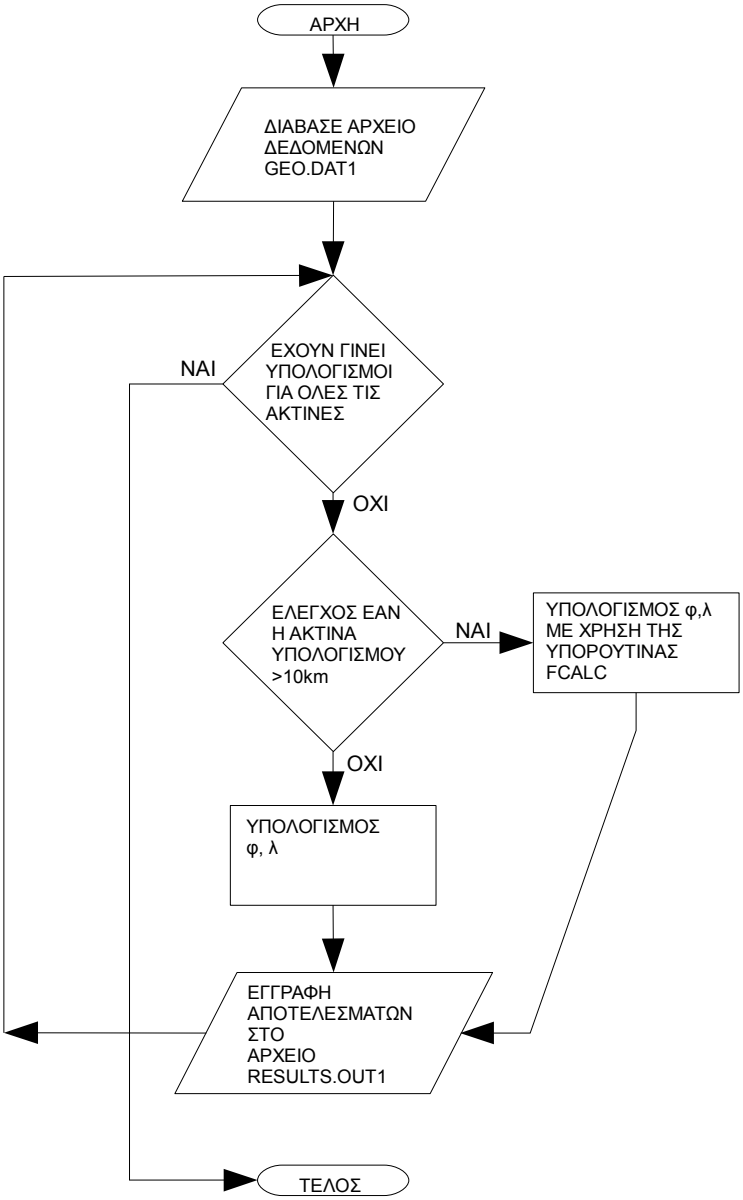
Σχήμα 4.3: Ελλειψοειδές εκ περιστροφής



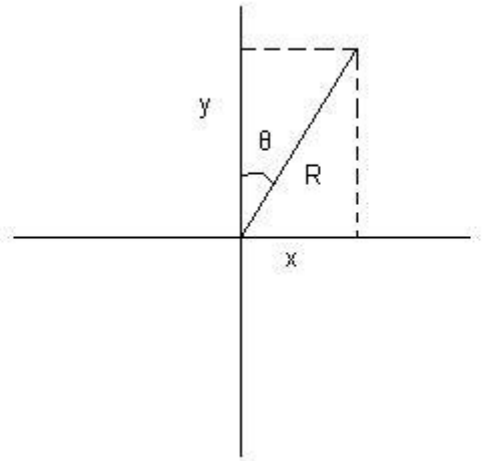
Σχήμα 4.4: Γεωδετικό τόξο χωρισμένο σε στοιχειώδη τμήματα



Σχήμα 4.5: Στοιχειώδες γεωδετικό τρίγωνο



Σχήμα 4.6: Το λογικό διάγραμμα του προγράμματος *GeoCalc*



Σχήμα 4.7: Πολικές και καρτεσιανές συντεταγμένες

Κεφάλαιο 5

Εφαρμογές των κωδίκων ORION-II και GENII στους ΑΗΣ της περιοχής της Μεγαλόπολης

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή των κωδίκων ORION-II και GENII στους ΑΗΣ της περιοχής Μεγαλόπολης. Έτσι πραγματοποιείται αρχικά επιλογή-υπολογισμός παραμέτρων, που είναι απαραίτητες για την εκτέλεση των κωδίκων, όπως η ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης V_d (Dry Deposition Velocity) και η ταχύτητα βαρυτικής επικάθησης των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας V_g (Gravitational Settling Velocity). Ακολούθως παρουσιάζονται τα μετεωρολογικά σενάρια, που κατασκευάστηκαν, ώστε να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου στους εν λόγω κώδικες. Τέλος πραγματοποιείται εκτέλεση των κωδίκων, επεξεργασία των αποτελεσμάτων, που προέκυψαν καθώς και σχολιασμός τους.

5.2 Επιλογή παραμέτρων για την εκτέλεση των κωδίκων ORION-II και GENII

5.2.1 Εισαγωγή

Όπως έχει αναφερθεί για την εκτέλεση των κωδίκων χρειάζονται διάφορες παράμετροι. Δύο πολύ σημαντικές είναι η ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης V_d (Dry Deposition Velocity) και η ταχύτητα βαρυτικής επικάθησης των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας V_g (Gravitational Settling Velocity) και θα αναλυθεί ακολούθως πως υπολογίζονται.

5.2.2 Η ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης V_d

Εκτενής αναφορά για το συγκεκριμένο μέγεθος έχει πραγματοποιηθεί στην παράγραφο 2.3.1. Η V_d μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά στο πεδίο ή να εκτιμηθεί με υπολογισμούς βασισμένους σε αναλυτικά ή εμπειρικά μοντέλα. Σε αυτή την παράγραφο γίνεται συνοπτική παρουσίαση των πιο σημαντικών μοντέλων και περιγράφεται ο τρόπος εκτίμησης της V_d. Επισημαίνεται ωστόσο ότι σύμφωνα με τους Seinfeld and Pandis [169, σελ.970] οι προσπάθειες που έχουν γίνει για την αριθμητική μοντελοποίηση των ήδη διαθέσιμων θεωριών για τον προσδιορισμό της ταχύτητας ξηρής εναπόθεσης ανεξάρτητα από την τοποθεσία δεν έχουν οδηγήσει στα επιθυμητά αποτελέσματα λόγω έλλειψης ερευνών πεδίου (μεσαίας κλίμακας, που να λαμβάνουν υπόψη τους το μέγεθος των σωματιδίων) σε ανομοιογενή βλάστηση ή θάλασσα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να έχουμε εκτιμήσεις μόνο ως προς την τάξη μεγέθους της ταχύτητας ξηρής εναπόθεσης.

Το πιο διαδεδομένο από όλα τα μοντέλα είναι αυτό του Sehmel [166]. Είναι στηριγμένο σε πειράματα όσο και σε αναλυτικούς υπολογισμούς. Έχει χρησιμοποιηθεί ήδη για παρόμοιους σκοπούς με αυτόν της παρούσας ΔΔ [11, σελ.132]. Διαθέτει διαγράμματα για το υπολογισμό της ταχύτητας ξηρής εναπόθεσης για ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων τριβής (10-200 msec^{-1}) και για τρεις τιμές της πυκνότητας των σωματιδίων (1, 4 και 11.5 gcm^{-3}). Το βασικό μειονέκτημα του συγκεκριμένου μοντέλου είναι ότι δεν παρέχει τιμές για διαμέτρους σωματιδίων μεγαλύτερες από $20\,\mu\mathrm{m}$. Επίσης δεν παρέχει τιμές για όλο το εύρος πυκνοτήτων και ταχυτήτων τριβής.

Πολύ χρήσιμο είναι επίσης το μοντέλο των Noll and Fang [136], το οποίο έχει προκύψει από πειραματική διαδικασία, και δίνει τιμές ταχύτητας εναπόθεσης και για μεγάλα σωματίδια (μέχρι $\sim 100\,\mu\mathrm{m}$), κάτι το οποίο είναι η βασική αδυναμία του μοντέλου του Sehmel. Μάλιστα το μοντέλο του Sehmel υποεκτιμά τις ταχύτητες εναπόθεσης για διαμέτρους σωματιδίων μεγαλύτερες από $10\,\mu\mathrm{m}$ [136, σελ.591].

Με σωματίδια με διαμέτρους μεγαλύτερες από 10 μm ασχολείται το μοντέλο των Kim et al. [100], ενώ στην εργασία των Holsen and Noll [78] μπορεί να βρει κανείς μια πολύ καλή σύγκριση μεταξύ των πιο διαδεδομένων μοντέλων. Τέλος μια καλή ανασκόπηση προσφέρει η εργασία των McMahon and Denison [124], η οποία συγκεντρώνει τιμές για την V_d από την βίβλιογραφία για σωματίδια και για αέρια,αν και δεν περιλαμβάνει πρόσφατες εξελίξεις.

Μεγαλύτερη βιβλιογραφική ανάπτυξη ξεφεύγει από τους σκοπούς του παρόντος. Εάν ο αναγνώστης ενδιαφέρεται για περισσότερα μπορεί να ανατρέξει επιπλέον στις εργασίες των Slinn [175], Wesely and Hicks [208], J. Lin et al. [114], Zhang et al. [214], Nho-Kim et al. [135], Hosker [81], Hosker and Lindberg [82], Voldner et al. [206], Ruijgrok et al. [158] και Steen [180].

Όσον αφορά στα μοντέλα ατμοσφαιρικής διάχυσης των ρύπων, που ζητούν ως δε-

δομένο εισαγωγής την ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης $\mathrm{V_d}$, προσθέτουν τους δικούς τους περιορισμούς στον προσδιορισμό της $\mathrm{V_d}$, αφού ζητούν μια και μοναδική τιμή της $\mathrm{V_d}$ για οποιεσδήποτε συνθήκες. Είναι φανερό με βάση αυτά που έχουν αναπτυχθεί στην παράγραφο 2.3.1 ότι η $\mathrm{V_d}$ για μια ευρύτερη περιοχή όπως αυτή της Μεγαλόπολης, όπου η βλάστηση και η ποιότητα του εδάφους εναλλάσσονται αρκετά, δεν είναι δυνατόν να είναι σταθερή και ανεξάρτητη της θέσης ακόμα και για αμετάβλητες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι με την βοήθεια των μοντέλων υπολογισμού της $\mathrm{V_d}$ θα κάνουμε μια εκτίμησή της όσο τον δυνατόν πιο αντιπροσωπευτική, η οποία όμως συχνά θα αποκλίνει από τις πραγματικές τιμές.

Στην συνέχεια θα εκτιμήσουμε την ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης για το πεδίο της περιοχής της Μεγαλόπολης χρησιμοποιώντας το μοντέλο του Sehmel [166]. Η μεθοδολογία συνοπτικά είναι η εξής: Υπολογίζουμε αρχικά την ταχύτητα τριβής *(friction velocity)* $\mathrm{u_*}$ από σχετική εξίσωση. Στην συνέχεια χρησιμοποιούμε πίνακα, που διαθέτει το μοντέλο, το οποίο παρέχει τιμές της $\mathrm{V_d}$ σε σχέση με την ταχύτητα τριβής, την διάμετρο και την πυκνότητα του σωματιδίου. Ακολούθως παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία προσδιορισμού της $\mathrm{V_d}$ σύμφωνα με αυτό το μοντέλο.

Με βάση μετεωρολογικές μετρήσεις πεδίου υπολογίζουμε αρχικά την ταχύτητα τριβής *(friction velocity)* $\mathrm{u_*}$ λύνοντας ως προς $\mathrm{u_*}$ την ακόλουθη εξίσωση:

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z + z_o}{z_o} \tag{5.1}$$

όπου u η ταχύτητα ανέμου στο ύψος του ανεμομέτρου, z το ύψος ανεμομέτρου, $\mathrm{z_o}$ το αεροδυναμικό ύψος επιφάνειας *(aerodynamic surface roughness)*, και k η σταθερά von Karman ίση με 0.41. Από τον πίνακα 6.2 των Panofsky and Dutton [139, σελ.123] επιλέγουμε μια σχετικά αντιπροσωπευτική τιμή του $\mathrm{z_o}$ για το πεδίο της Μεγαλόπολης $\mathrm{z_o} = 0.1\,\mathrm{m}$.

Σχετικά με την ταχύτητα του ανέμου εργαζόμαστε ως εξής: Θα υπολογίσουμε την μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου από τις μηνιαίες τιμές, που παραθέτουν οι Papaefthymiou et al. [140, σελ.258] και φαίνονται στον πίνακα 5.1. Επειδή δεν αναφέρεται το ύψος του ανεμομέτρου, που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις, επιλέγουμε ύψος ανεμομέτρου $\mathrm{z} = 10\,\mathrm{m}$. Αυτό το ύψος είναι το συνήθες για μόνιμα εγκατεστημένα ανεμόμετρα. Μετά τους σχετικούς υπολογισμούς βλέπουμε ότι η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου προκύπτει ίση με $\mathrm{u} = 1.7\,\mathrm{msec^{-1}}$. Με βάση όλα τα παραπάνω προκύπτει τελικά ότι $\mathrm{u_*} = 0.17\,\mathrm{msec^{-1}}$.

Με διάμετρο σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας $8\,\mu\mathrm{m}$ και πυκνότητα $2.4\,\mathrm{gcm^{-1}}$ (βλέπε παράγραφο 5.2.3 για αυτά τα δύο μεγέθη) έχουμε από τον σχετικό πίνακα του Sehmel [166, σελ.1001] ότι:

$$V_d = 0.005\ msec^{-1} \tag{5.2}$$

Ένα άλλο μοντέλο είναι αυτό των Noll and Fang [136, σελ.591]. Για τις παραπάνω τιμές ταχύτητας τριβής, διαμέτρου και πυκνότητας σωματιδίων και χρησιμοποιώντας τον σχετικό πίνακα, που παρέχεται, έχουμε ότι η εναπόθεση στην επάνω μεριά της επιφάνειας είναι $\mathrm{V_d} = 0.006\,\mathrm{msec}^{-1}$. Σημειώνεται ότι το συγκεκριμένο μοντέλο παρέχει τιμές ταχύτητας ξηρής εναπόθεσης και για την κάτω μεριά επιφάνειας, όπως συμβαίνει στα φυλλώματα.

Βλέπουμε λοιπόν ότι γι' αυτές τις διαμέτρους σωματιδίων οι τιμές της ταχύτητας ξηρής εναπόθεσης προκύπτουν πολύ κοντά για τα δυο μοντέλα. Παρόμοιες τιμές προτείνονται από την βιβλιογραφία για την ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης κατά την χρήση κωδίκων υπολογισμού της ατμοσφαιρικής διάχυσης ρύπων. Συγκεκριμένα: Οι Zeevaert et al. [213] σε παρόμοια μελέτη με την παρούσα υιοθετούν $\mathrm{V_d} = 0.01\,\mathrm{msec}^{-1}$. Επίσης το εγχειρίδιο χρήσης του κώδικα GENII [195, σελ. A-14] προτείνει $\mathrm{V_d} = 0.01\,\mathrm{msec}^{-1}$. Αντίθετα οι Baes et al. [11, σελ. 132] προτείνουν μια πιο συντηρητική τιμή με $\mathrm{V_d} = 0.001\,\mathrm{msec}^{-1}$.

Τελικά, υιοθετούμε για τις εκτελέσεις του ORION-II ως βέλτιστη ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης την τιμή $\mathrm{V_d} = 0.005\,\mathrm{msec}^{-1}$. Με δεδομένο ότι ο ORION-II υπολογίζει τιμές συγκεντρώσεων στον αέρα σε μηδενική απόσταση από το έδαφος και ότι αυτές οι συγκεντρώσεις μειώνονται όσο αυξάνεται η ταχύτητα εναπόθεσης (αφού αφαιρούνται σωματίδια από το νέφος με μεγαλύτερο ρυθμό) θα πραγματοποιηθούν εκτελέσεις του κώδικα και με άλλες τιμές $\mathrm{V_d}$, έτσι ώστε να διαπιστωθεί η επίδραση της $\mathrm{V_d}$ στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις.

5.2.3 Η ταχύτητα βαρυτικής επικάθησης $\mathrm{V_g}$

Για την ταχύτητα ταχύτητα βαρυτικής επικάθησης $\mathrm{V_g}$ έχει γίνει εκτενής αναφορά στην παράγραφο 2.3.2. Εδώ θα αναφερθούμε αποκλειστικά στον προσδιορισμό της, ώστε να χρησιμοποιηθεί στους κώδικες ατμοσφαιρικής διασποράς.

Για τον υπολογισμό της $\mathrm{V_g}$ χρησιμοποιούμε την ακόλουθη εξίσωση [169]:

$$V_g = \frac{\rho d_p^2\, gC}{18n} \tag{5.3}$$

όπου:

ρ: η πυκνότητα σωματιδίου

$\mathrm{d_p}$: η διάμετρος του σωματιδίου

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας

n: η δυναμική συνεκτικότητα του αέρα ($1.8 \cdot 10^{-4}\ gsec^{-1}cm^{-1}$)

C: ο συντελεστής διόρθωσης για μικρά σωματίδια:

Η εφαρμογή της εξίσωσης 5.3 σχετικά με την ταχύτητα βαρυτικής επικάθησης V_g

προϋποθέτει ότι τα σωματίδια είναι σφαιρικά.

Αρκετοί ερευνητές μέχρι τώρα έχουν ασχοληθεί με την μορφή των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας. Οι Fisher et al. [58] διαπίστωσαν ότι στον ατμοηλεκτρικό σταθμό, που έκαναν τις μετρήσεις, τουλάχιστον το 75.6% των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας έχει σφαιρική μορφή, ανεξαρτήτα από την διαμέτρο τους. Μάλιστα όσο μικότερη ήταν η διάμετρος των σωματιδίων τόσο μεγαλύτερο ήταν το ποσοστό των σωματιδίων, που ήταν σφαιρικά. Για μέση μετρούμενη διάμετρο $0.92\,\mu\mathrm{m}$ το ποσοστό των σωματιδίων, τα οποία ήταν σφαιρικά, ήταν 96.08%.

Παρόμοιες παρατητρήσεις έκαναν και οι Mamane et al. [117], όπου το 95% των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας ήταν σφαίρες, οι οποίες μάλιστα είχαν σχετικά λείες επιφάνειες, ενώ και οι Parungo et al. [144] αναφέρουν παρόμοια ποσοστά (90%) σφαιρικών σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας στον ατμοηλεκτρικό σταθμό, τον οποίο ερεύνησαν. Οι Hock et al. [76] εξέτασαν δείγματα ιπτάμενης τέφρας, που συλλέχθηκαν στην καμινάδα ατμοηλεκτρικού σταθμού. Διαπίστωσαν ότι τα σωματίδια της ιπτάμενης τέφρας ήταν στην πλειονότητα τους σφαιρικά και συχνά με λείες εξωτερικές επιφάνειες. Όμοια αποφαίνονται και οι Ondov et al. [137] για τα σωματίδια, τα οποία είχαν διάμετρο μεγαλύτερη του $1\,\mu\mathrm{m}$. Σύμφωνα με μελέτη, που αναφέρεται στους Ghosal and Self [62], τα συμπεράσματα ήταν και εδώ παρόμοια. Επίσης στις μικροφωτογραφίες σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας, που δημοσιεύουν οι Henry and Knapp [75] τα σφαιρικά σωματίδια είναι η πλειοψηφία (βλ. σχήμα 5.1). Παρόμοιες φωτογραφίες παρέχουν οι Cheng et al. [30] καθώς και οι Campbell et al. [24].

Βλέπουμε λοιπόν ότι σε αυτές τις έρευνες, που πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικούς ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, οι οποίοι είχαν διαφορετικό ονομαστικό φορτίο, έκαιγαν στερεό καύσιμο διαφορετικής ποιότητας και στους θαλάμους καύσης τους επικρατούσαν διαφορετικές συνθήκες, το αποτέλεσμα είναι πάντα όμοιο και ανεξάρτητο των επιμέρους συνθηκών: Τα σωματίδια της ιπτάμενης τέφρας στην μεγάλη τους πλειοψηφία είναι σφαιρικά. Έτσι μπορούμε να δεχθούμε και εμείς το ίδιο για τους ΑΗΣ της Μεγαλόπολης, χωρίς να βρισκόμαστε μακριά από την πραγματικότητα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.2, όπου παρατίθεται φωτογραφία κόκκου ιπτάμενης τέφρας, που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ και προέρχεται από τους εν λόγω ΑΗΣ.

Σχετικά με την πυκνότητα των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας, η οποία είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της ταχύτητας βαρυτικής επικάθησης, έχουμε τα εξής: Οι Fisher et al. [58] μέτρησαν την διάμετρο και την πυκνότητα των σωματιδίων σε δείγματα ιπτάμενης τέφρας, η οποία συλλέχθηκε μετά τα ηλεκτροστατικά φίλτρα, μέσα στην καπνοδόχο του ατμοηλεκτρικού σταθμού. Τα δείγματα της ιπτάμενης τέφρας χωρίστηκαν σε 4 κλάσεις ανάλογα με την μετρούμενη διάμετρο τους (counting diameter). Διαπίστωσαν ότι η πυκνότητα των σωματιδίων (βλ. πίνακα 5.2) κυμαινόταν από 1.85-$2.45\,\mu\mathrm{m}$, ενώ όσο μειωνόταν η διάμετρος τόσο αύξανε η πυκνότητα των

κλασμάτων της τέφρας.

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η εργασία των Ghosal and Self [62], οι οποίοι μέτρησαν την πυκνότητα σε ιπτάμενες τέφρες, προερχόμενες από 6 διαφορετικούς ατμοηλεκτρικούς σταθμούς. Οι τιμές των πυκνοτήτων κυμάνθηκαν από 1.73-$2.76\,\mathrm{gcm}^{-3}$. Μάλιστα στους 4 από τους 6 ατμοηλεκτρικούς σταθμούς η μέση πυκνότητα των σωματιδίων της τέφρας του κάθε σταθμού ήταν στο διάστημα 2.1-$2.4\,\mathrm{gcm}^{-3}$ και παράλληλα 80% της μάζας της τέφρας του κάθε σταθμού είχε πυκνότητα στο διάστημα 2.0-$2.8\,\mu\mathrm{m}$. Σχετική έρευνα, που πραγματοποιήθηκε στους ΑΗΣ της Πτολεμαΐδας από τους Papastefanou and Charalambous [142] έδειξε ότι για σωματίδια με διαμέτρους μικρότερες από $45\,\mu\mathrm{m}$ η μέση πυκνότητα είναι $2.67\,\mathrm{gcm}^{-3}$.

Από την εργασία των Sakorafa et al. [160] γνωρίζουμε την κατά βάρος σύσταση της ιπτάμενης τέφρας, που παράγεται στους ΑΗΣ Μεγαλόπολης (βλ. πίνακα 5.3). Έχοντας και την πυκνότητα αυτών των ενώσεων [112] μπορούμε να υπολογίσουμε την πυκνότητα των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\rho = \sum \frac{wt_i \rho_i}{100} \tag{5.4}$$

όπου ρ_i η πυκνότητα κάθε χημικής ένωσης και wt η % κατά βάρος σύσταση των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας. Με εφαρμογή του παραπάνω τύπου προκύπτει ότι η μέση πυκνότητα για τα σωματίδια είναι $\rho = 2.85\,\mathrm{gcm}^{-3}$. Αυτός ο υπολογισμός έγινε με την υπόθεση ότι δεν υπάρχουν καθόλου αέρια εγκλείσματα μέσα στα σωματίδια της ιπτάμενης τέφρας. Η παρουσία αέριων εγκλεισμάτων όπως είναι φυσικό θα προκαλούσε μια μείωση της πυκνότητας σε σχέση με αυτήν που υπολογίσαμε. Γνωρίζουμε ότι τις περισσότερες φορές τα σωματίδια της ιπτάμενης τέφρας περιέχουν τέτοια κενά [58], και μόνο σωματίδια με διαμέτρους μικρότερες από $1\mu m$ δεν είναι δυνατόν να έχουν εγκλείσματα [62]. Μάλιστα διαπιστώνεται στην εργασία των Fisher et al. [58] ότι όσο μικραίνει η διάμετρος, τόσο αυξάνει η πυκνότητα των σωματιδίων, γεγονός που επιβεβαιώνει την άποψη ότι τα μεγαλύτερα σωματίδια κατακρατούν με μεγαλύτερη ευκολία αέρια εγκλείσματα. Η ύπαρξη τέτοιων εγκλεισματων έχει εξακριβωθεί και για την τέφρα, που παράγεται στους ΑΗΣ Μεγαλόπολης, χωρίς όμως να γνωρίζουμε σε ποιο ποσοστό [160]. Συνεπώς σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν έως τώρα μπορούμε να δεχθούμε για τους υπολογισμούς αυτής της ΔΔ μια μέση πυκνότητα των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας ίση με $\rho = 2.3\,\mathrm{gcm}^{-3}$. Επισημαίνεται το συγκεκριμένο μέγεθος διαφέρει από την φαινόμενη μακροσκοπική πυκνότητα των δειγμάτων τέφρας, που έχει υπολογιστεί στο παρελθόν από το ΕΠΤ-ΕΜΠ [216].

Όσον αφορά στην διάμετρο των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας, που διαφεύγουν από τις καμινάδες των ΑΗΣ Μεγαλόπολης γνωρίζουμε από προηγούμενες έρευνες του ΕΠΤ-ΕΜΠ ότι η μέση διάμετρος των σωματιδίων της τέφρας, που κατακρατούνται στο

τελευταίο ηλεκτροστατικό φίλτρο (ESP row 4) πριν την παροχέτευση των καυσαερίων στην καμινάδα της μονάδας 4, είναι $21\,\mu\mathrm{m}$ [97]. Επίσης γνωρίζουμε ότι τα ηλεκτροστατικά φίλτρα παρουσιάζουν μια δυσκολία στο να κατακρατούν σωματίδια με μικρές διαμέτρους ενώ αντίθετα είναι πολύ αποτελεσματικά στην συγκράτηση μεγαλύτερων σωματιδίων. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 5.3, όπου στο φίλτρο 4 η πλειονότητα των σωματιδίων, που έχουν κατακρατηθεί, έχουν διαμέτρους πάνω από $10\,\mu\mathrm{m}$. Συνεπώς τα μικρά σωματίδια αποτελούν την πλειοψηφία στην τέφρα, που εκλύεται στην ατμόσφαιρα και επομένως μπορούμε να υποθέσουμε ότι η μέση διάμετρος των σωματιδίων, που διαφεύγουν από τις καμινάδες των ΑΗΣ Μεγαλόπολης, είναι αρκετά μικρότερη των $20\,\mu\mathrm{m}$.

Παράλληλα έχουμε αρκετές αναφορές για σταθμούς με διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και διαφορετικό βαθμό απόδοσης ηλεκτροστατικών φίλτρων, όπου τα σωματίδια που εκπέμπονταν, είχαν κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό διάμετρο μικρότερη από $10\,\mu\mathrm{m}$.

Αναλυτικά: Σύμφωνα με μελέτη, που αναφέρεται στον Tadmor [187] διαπιστώθηκε ότι το 80-90% των σωματιδίων, που διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα από τους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, έχουν διαμέτρους μικρότερες από $10\,\mu\mathrm{m}$. Παρόμοιες τιμές αναφέρει και το Quality of Urban Air Review Group [152, σελ.42]. Οι Ghosal et al. [61] μελέτησαν έξη διαφορετικούς ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, τρεις εκ των οποίων έκαιγαν βουτιμενιούχους γαιάνθρακες και άλλοι τρεις ημιβουτιμενιούχους. Συμπεραίνουν ότι σωματίδια με διαμέτρους κάτω από τα $8\,\mu\mathrm{m}$ αποτελούν πάνω από το 90% της ιπτάμενης τέφρας αριθμητικά και περίπου το 50% κατ' όγκο. Μάλιστα τα δείγματα της ιπτάμενης τέφρας, που εξέτασαν, προέρχονταν από τα φίλτρα (baghouses) και όχι από συλλογή μέσα στην καμινάδα. Αυτό σημαίνει ότι τα σωματίδια του δείγματος είχαν σχετικά μεγαλύτερη διάμετρο από αυτά, που τελικά διέφυγαν. Επίσης οι Fisher et al. [58] μελέτησαν σταθμό, που έκαιγε γαιάνθρακα υψηλής περιεκτικότητας σε τέφρα και υγρασία και χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Συνέλεξαν ιπτάμενη τέφρα μέσα στην καμινάδα του σταθμού, έκαναν μετρήσεις και διαπίστωσαν ότι η διάμεση κατ' όγκον διάμετρος (Volume Median Diameter) των σωματιδίων της τέφρας ήταν $8.55\,\mu\mathrm{m}$. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραπάνω διάμετρος είναι σχετικά μεγαλύτερη από την διάμεση κατά μέτρηση διάμετρο (Count Median Diameter), αφού βρίσκεται με διαφορετικό τρόπο ο μέσος της κατανομής.

Ακόμη μικρότερες διαμέτρους μέτρησαν οι Ondov et al. [137], οι οποίοι ερεύνησαν δύο διαφορετικούς ατμοηλεκτρικούς σταθμούς. Ο σταθμός Α, ο οποίος έκαιγε βουτιμενιούχο γαιάνθρακα, είχε βαθμό απόδοσης ηλεκτροστατικών 99.5-99.8%, ενώ ο σταθμός Β είχε μικρότερη ικανότητα κατακράτησης με β.α. 97%. Τα σωματίδια της ιπτάμενης τέφρας χωρίστηκαν σε δύο κλάσεις ανάλογα με το μέγεθος τους. Η μεγαλύτερη τιμή διαπιστώθηκε, όπως αναμενόταν, στον σταθμό Β, όπου στην κλάση των μεγάλων σω-

ματιδίων (large-particle mode) η μέση διάμετρος κατ' όγκον ήταν $8.1\,\mu\mathrm{m}$. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το ότι στην κλάση των μικρών σωματιδίων (small particle mode) οι διάμετροι ήταν παραπλήσιοι και για τους δύο σταθμούς, ενώ στην κλάση των μεγάλων σωματιδίων ο σταθμός Β είχε αρκετά μεγαλύτερες διαμέτρους εκπεμπόμενων σωματιδίων. Αυτό πιθανόν σημαίνει ότι όσο αυξάνει ο βαθμός απόδοσης του φίλτρου αυξάνει η ικανότητα κατακράτησης των μεγάλων σωματιδίων, ενώ η ικανότητα κατακράτησης των μικρών σωματιδίων ($\mathrm{d} < 1\,\mu\mathrm{m}$) παραμένει σταθερή.

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να επιλέξουμε ως βέλτιστη τιμή διαμέτρου για τους υπολογισμούς αυτής της ΔΔ αυτή των $8\,\mu\mathrm{m}$. Αυτή η τιμή μας εξασφαλίζει ότι θα συμπεριληφθούν οι βαρυτικές δυνάμεις στους υπολογισμούς χωρίς να γίνουν το κυρίαρχο φαινόμενο στην εναπόθεση και να μειώσουν δραματικά τον χρόνο παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Από την εξίσωση 2.51 με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι:

$$V_g = 0.0045 ms^{-1}$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι η $\mathrm{V_g}$ όπως αναμενόταν - σύμφωνα με τον Sehmel [166] - είναι μικρότερη της $\mathrm{V_d}$, την οποία υπολογίσαμε στην παράγραφο 5.2.2. Οι συγγραφείς του ORION-II μάλιστα αναφέρουν [9] ότι για διαμέτρους σωματιδίων μικρότερες από $10\,\mu\mathrm{m}$ δεν χρειάζεται να λαμβάνεται υπόψη η $\mathrm{V_g}$, διότι η τιμή της είναι πολύ μικρή. Εμείς για λόγους πληρότητας την συμπεριλάβαμε στους υπολογισμούς.

5.3 Κατασκευαστικά δεδομένα και δεδομένα εκπομπών των σταθμών ΑΗΣ1-2,3 και 4 της περιοχής της Μεγαλόπολης

Προκειμένου να γίνει η εκτέλεση των κωδίκων είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε αρκετά στοιχεία για τους σταθμούς, όπως το ύψος και η διάμετρος των καπνοδόχων, η ταχύτητα εξόδου των καυσαερίων, η ποσότητα της ιπτάμενης τέφρας, που εκπέμπεται κ.ο.κ. Για αυτό τον λόγο πραγματοποιήθηκε επαφή με την Διεύθυνση Μελετών Κατασκευών Θερμοηλεκτρικών Έργων (ΔΜΚΘ), προκειμένου να μας παράσχουν τα δεδομένα, που χρειαζόμαστε για την εκτέλεση. Τα στοιχεία φαίνονται στους πίνακες 5.4, 5.5 και 5.6.

5.3.1 Υπολογισμός ενεργών διατομών των κτιρίων πλησίον των καμινάδων του σταθμού

Η ενεργή διατομή ενός κτιρίου (*Cross sectional area*) είναι απαραίτητο μέγεθος για την εκτέλεση του κώδικα ORION-II καθώς επηρεάζει την κίνηση του πλουμίου, όταν

αυτό βρίσκεται κοντά στο κτίριο. Ως ενεργή διατομή ενός κτιρίου ορίζεται η κάθετη επιφάνεια του στην διεύθυνση, που φυσάει ο άνεμος [9, σελ. 8]. Σημειώνεται ότι η ενεργός διατομή υπολογίζεται κάθε φορά για δεδομένη διεύθυνση ανέμου. Επειδή όμως ο ORION-II καθώς και ο GENII δέχονται μόνο μια τιμή θα υπολογιστεί μια αντιπροσωπευτική τιμή για την ενεργό διατομή των κτιρίων. Έτσι για τον υπολογισμό της ενεργής διατομής των μονάδων ΑΗΣ1-2,3 και 4 ισχύουν τα ακόλουθα.

5.3.1.1 Οι μονάδες ΑΗΣ1-2 και 3

Οι μονάδες 1-2, και 3 βρίσκονται στον ίδιο χώρο και μάλιστα πολύ κοντά μεταξύ τους. Συγκεκριμένα οι 1, 2 έχουν κοινό κτίριο λέβητα (*Boiler House*) καθώς και κοινή καμινάδα. Η μονάδα 3 βρίσκεται ακριβώς δίπλα και το κτίριο λέβητα της συνορεύει με αυτό των μονάδων 1-2 (βλ. σχήμα 5.4). Γι' αυτό μπορούμε να θεωρήσουμε τα κτίρια λέβητα των δύο μονάδων ως ένα ενοποιημένο κτίριο.

Στην διεύθυνση ανατολής-δύσης βλέπουμε ότι η διατομή των κτιρίων είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των πύργων ψύξης, οπότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι τελευταίοι δεν παίζουν κάποιο ρόλο ως προς την διασπορά των ρύπων. Θεωρούμε ότι η ενεργή διατομή σε αυτή την διεύθυνση είναι η ανατολική πρόσοψη των κτιρίων. Έτσι με βάση με βάση τα στοιχεία των πινάκων 5.4, 5.5 έχουμε:
Πλάτος Boiler House ΑΗΣ1-2: S_{1-2} =77.0 m
Πλάτος Boiler House ΑΗΣ3: S_3 =60.7 m
Ύψος Boiler House ΑΗΣ1-2: h_{1-2} =82.5 m
Ύψος Boiler House ΑΗΣ3: h_3 =87.0 m
Έτσι η ενεργή διατομή του κτιρίου λέβητα των μονάδων 1-2 και 3 στον άξονα Α-Δ θα είναι:

$$A_{1-2,3} = h_{1-2} \cdot S_{1-2} + h_3 \cdot S_3 = 11634.3m^2 \tag{5.5}$$

Στην διεύθυνση Βορρά-Νότου το κτίριο το οποίο επηρεάζει την κίνηση του πλουμίου είναι ο πύργος ψύξης του ΑΗΣ3. Συνεπώς η ενεργή διατομή, η οποία χρειάζεται να υπολογιστεί, είναι αυτή του πύργου ψύξης. Αυτή η διατομή είναι πολύ μικρότερη από αυτή, που υπολογίστηκε στον άξονα Α-Δ.

Οι επικρατούσες διευθύνσεις ανέμου στην περιοχή είναι οι βορειοανατολικές (ΒΑ) και οι ανατολικές νοτιοανατολικές (ΑΝΑ), όπως αναφέρεται στην παράγραφο 5.5.2. Με βάση τα παραπάνω και ότι ο ORION-II δέχεται μόνο μια τιμή για την ενεργό διατομή θα επιλέξουμε ως αντιπροσωπευτική αυτή του άξονα Α-Δ, την οποία υπολογίσαμε ήδη.

5.3.1.2 Η μονάδα 4

Και στην μονάδα αυτή οι βόρειοι και οι νότιοι άνεμοι δεν παίζουν κάποιο ιδιαίτερο ρόλο, αφού σε αυτόν τον άξονα δεν υπάρχει κάποιο κτίριο μπροστά ή πίσω από την καμινάδα.

Επομένως μας ενδιαφέρει τι συμβαίνει στους ανατολικούς και στους δυτικούς ανέμους. Η κατασκευή, η οποία μπορεί να επηρεάσει το πλούμιο είναι το κτίριο λέβητα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.5. Υπολογίζουμε λοιπόν την διατομή του κτιρίου λέβητα στον άξονα Ανατολή-Δύση.
Πλάτος Boiler House ΑΗΣ4: $\mathrm{S_4}$ =51 m
Ύψος Boiler House ΑΗΣ4: $\mathrm{h_4}$ =80 m
Η ενεργή διατομή του κτιρίου της μονάδας 4 θα είναι:

$$A_4 = h_4 \cdot S_4 = 4080m^2 \tag{5.6}$$

Για ανέμους στις ενδιάμεσες διευθύνσεις (π.χ. ΒΑ, ΒΔ, ΝΔ, ΝΑ,...) πιθανόν να έχουμε μεγαλύτερες διατομές, αφού ο άνεμος 'αντιμετωπίζει' μεγαλύτερες επιφάνειες του κτιρίου. Όμως εμάς μας ενδιαφέρει να υπολογίσουμε μια τιμή για μια ενδεικτική μέση κατάσταση, αφού άλλωστε ο κώδικας ORION-II μία τιμή μπορεί να δεχτεί.

5.3.2 Υπολογισμός παραμέτρων εκπομπών των μονάδων 1-2, 3 και 4

Προκειμένου να εκτελέσουμε τον κώδικα είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την ταχύτητα εξόδου των καυσαερίων από την καμινάδα όσο και τον ρυθμό εκπομπής των διάφορων ραδιοϊσοτόπων ($\mathrm{Cisec^{-1}}$). Έτσι υπολογίζουμε στην συνέχεια αυτά τα μεγέθη για τις μονάδες, που μας ενδιαφέρουν, με βάση τα δεδομένα, που λάβαμε από την ΔΕΗ.

Η παροχή όγκου σε μια κυκλική διατομή δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{V} = W \cdot S \tag{5.7}$$

όπου:
$\dot{\mathrm{V}}$: Η παροχή όγκου ($\mathrm{m^3sec^{-1}}$)
W: Η ταχύτητα του ρευστού ($\mathrm{msec^{-1}}$)
S: Το εμβαδόν της κυκλικής διατομής (m)
Συνεπώς η ταχύτητα εξόδου των καυσαερίων θα δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$W = \frac{\dot{V}}{S} \tag{5.8}$$

Με βάση την εξίσωση 5.8 και τα δεδομένα, που έχουμε στην διάθεση μας, προκύπτει ότι η ταχύτητα εξόδου των καυσαερίων από την καμινάδα των μονάδων 1-2 είναι:

$$W_{1-2} = 20.51msec^{-1} \tag{5.9}$$

Σχετικά τώρα με τις εκπομπές τέφρας από την καμινάδα των μονάδων 1-2, έχουμε τα ακόλουθα: Με βάση τον ρυθμό εκπομπής των καυσαερίων $\dot{\mathrm{V}}$ καθώς και την περιεκτικότητα των καυσαερίων σε τέφρα, που παρατέθηκαν στην παράγραφο 5.3, υπολογίζουμε τον ρυθμό εκπομπής τέφρας από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\dot{Q}_{1-2} = \dot{V}_{1-2} \cdot E_{\kappa\pi 1-2} = 0.0201 kgsec^{-1} \tag{5.10}$$

όπου:

$\dot{\mathrm{Q}}_{1-2}$: Ο ρυθμός εκπομπής τέφρας από τις μονάδες 1-2 (kgsec^{-1})

$\mathrm{E}_{\kappa\pi 1-2}$: Το περιεχόμενο των καυσαερίων των μονάδων 1-2 σε τέφρα (kgNm^{-3})

Έχοντας τον ρυθμό εκπομπής τέφρας από την καμινάδα μπορούμε να υπολογίσουμε πλέον τον ρυθμό εκπομπής ραδιοϊσοτόπων και θα εργαστούμε ως εξής: Από προηγούμενη μελέτη του ΕΠΤ-ΕΜΠ [97] γνωρίζουμε ότι το η συγκέντρωση του ^{226}Ra δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές στα διάφορα κλάσματα της τέφρας.

Το ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει προσδιορίσει στο παρελθόν την συγκέντρωση του ^{226}Ra στην ιπτάμενη τέφρα των ΑΗΣ1, ΑΗΣ3 και ΑΗΣ4 και οι τιμές παρουσιάζονται στον πίνακα 5.7. Παρατηρούμε ότι οι συγκεντρώσεις του ^{226}Ra στους τρεις σταθμούς είναι στα ίδια επίπεδα. Έχοντας υπόψη ότι η ποιότητα του καυσίμου πιθανόν αλλάζει με την πάροδο του χρόνου επιλέγουμε να εργαστούμε σε όλους τους ΑΗΣ με την τιμή, που προσδιορίστηκε από τους Karangelos et al. [97], αφού αυτή είναι η πιο πρόσφατη. Συνεπώς η συγκέντρωσή του ^{226}Ra στα σωματίδια της τέφρας, που διαφεύγουν από τις καμινάδες των ΑΗΣ θα είναι ίση με $904\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$.

Επομένως ο ρυθμός εκπομπής ^{226}Ra από τον ΑΗΣ1-2 θα είναι:

$$\dot{C}_{Ra-AHS1-2} = \dot{Q}_{1-2} \cdot C_{Ra-226} = 18.206 Bqsec^{-1} = 4.92 \cdot 10^{-10} Cisec^{-1} \tag{5.11}$$

Όπου:

$\mathrm{C}_{\mathrm{Ra}-226}$: Η συγκέντρωση του ^{226}Ra στην τέφρα

Σύμφωνα με όσα αναπτύχθηκαν για την μονάδα 1-2 έχουμε:

$$W_3 = 20.34 msec^{-1} \tag{5.12}$$

$$\dot{Q}_3 = 0.024 kgsec^{-1} \tag{5.13}$$

$$\dot{C}_{Ra-AHS3} = \dot{Q}_3 \cdot C_{Ra-226} = 21.696 Bqsec^{-1} = 5.86 \cdot 10^{-10} Cisec^{-1} \tag{5.14}$$

Όμοια για την μονάδα 4 έχουμε:

$$W_4 = 20.34 msec^{-1} \tag{5.15}$$

$$\dot{Q}_4 = 0.024 kgsec^{-1} \tag{5.16}$$

$$\dot{C}_{Ra-AHS4} = \dot{Q}_4 \cdot C_{Ra-226} = 21.696 Bqsec^{-1} = 5.86 \cdot 10^{-10} Cisec^{-1} \quad (5.17)$$

5.4 Συλλογή γεωγραφικών δεδομένων για την εκτέλεση του ORION-II

5.4.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να εκτελεστεί ο ORION-II χρειάζεται να οριστεί ένα γεωγραφικό σημείο ως κέντρο, με βάση το οποίο θα δίνονται οι θέσεις των πηγών εκπομπής αλλά και των σημείων υπολογισμού. Επίσης χρειάζονται δεδομένα σχετικά με το υψόμετρο του εδάφους στα σημεία υπολογισμού της συγκέντρωσης όσο και στα σημεία, που βρίσκονται οι πηγές εκπομπής. Έτσι αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η βάση δεδομένων του Google Earth [68] για να αντληθούν τα συγκεκριμένα υψόμετρα. Στις ακόλουθες παραγράφους θα περιγραφεί αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε.

5.4.2 Ορισμός του κέντρου υπολογισμού για την εκτέλεση του ORION-II και της θέσης των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4

Η πρώτη ενέργεια, που πραγματοποιήθηκε ήταν ο εντοπισμός της θέσης των ΑΗΣ1-2,3 και 4 στον χάρτη. Ακολούθησε η εύρεση των συντεταγμένων τους μέσω του Google Earth, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 5.8. Σημειώνεται ότι για τις μονάδες 1-2 και 3 λόγω της εγγύτατης γειτνίασής τους θεωρήσαμε ότι έχουν πρακτικά τις ίδιες συντεταγμένες.

Συγκρίνοντας τις συντεταγμένες των σταθμών και βλέποντας την θέση τους επάνω στο επίπεδο με την βοήθεια του Google Earth (βλ. σχ. 5.6) διαπιστώνουμε ότι οι ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 βρίσκονται σχεδόν επάνω στον άξονα Ανατολής-Δύσης (Α-Δ) με μια μικρή απόκλιση. Στην συνέχεια επάνω στον άξονα Α-Δ, που διέρχεται από τον ΑΗΣ4, εντοπίζουμε το σημείο, που έχει γεωγραφικό μήκος ίσο με αυτό των ΑΗΣ1-2,3. Αυτό το σημείο το ονομάζουμε ΑΗΣ3′ και στο σχήμα 5.6 συμβολίζεται ως AHS3′. Ουσιαστικά δηλαδή το σημείο ΑΗΣ3′ είναι η προβολή του ΑΗΣ1-2,3 στον άξονα Α-Δ, που διέρχεται από τον ΑΗΣ4. Με την βοήθεια του Google Earth μετράμε την απόσταση των σημείων ΑΗΣ1-2,3 - ΑΗΣ3 και διαπιστώνουμε ότι είναι $260\,\mathrm{m}$.

Αποφασίζουμε να ορίσουμε ως Κέντρο Υπολογισμού C το μέσον της απόστασης ΑΗΣ3′ - ΑΗΣ4 η οποία είναι ίση με $\mathrm{D} = 3710\,\mathrm{m}$. Οι συντεταγμένες του Κέντρου παρουσιάζονται στον πίνακα 5.8.

Όπως αναφέρεται στο εγχειρίδιο του ORION-II [9] η θέση των πηγών ορίζεται με βάση την ακτίνα από ένα κέντρο και την γωνία που σχηματίζει η ακτίνα του σε σχέση με την διεύθυνση του Βορρά. Αντιλαμβανόμαστε ότι με το κέντρο, που ορίσαμε είναι

πολύ εύκολο να δηλώσουμε την θέση των πηγών. Ο ΑΗΣ4 βρίσκεται σε απόσταση R_4=1854.9 m από το κέντρο C και η γωνία, που σχηματίζει η ακτίνα με την διεύθυνση του Βορρά είναι ϑ_4 =270°.

Κάνοντας τους σχετικούς υπολογισμούς με την βοήθεια της τριγωνομετρίας έχουμε για τους ΑΗΣ1-2,3: Απόσταση από το κέντρο C του σημείου των σταθμών: $R_{1-2,3}$=1862.5 m. Γωνία της ακτίνας $R_{1-2,3}$ με την διεύθυνση του Βορρά: $\vartheta_{1-2,3=}$ 83.7°. Συγκεντρωτικά τα παραπάνω στοιχεία παρουσιάζονται στον πίνακα 5.9.

Με τον παραπάνω τρόπο καταφέραμε να βρίσκονται οι δύο πηγές (ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4) σχεδόν συμμετρικά σε σχέση με το κέντρο C. Αυτό θα διευκολύνει την κατανόηση και την ερμηνεία των παραγόμενων αποτελεσμάτων.

Τέλος με την βοήθεια του Google Earth βρίσκουμε τα υψόμετρα των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4, τα οποία φαίνονται στον πίνακα 5.9

5.4.3 Καθορισμός και εύρεση υψομέτρων στα σημεία υπολογισμού του ORION-II

Όπως αναφέρεται στο εγχειρίδιο του ORION-II [9] και αναλύσαμε στην παράγραφο 4.3.1 μπορούμε να δηλώσουμε μέχρι 20 διαφορετικές ακτίνες υπολογισμού. Έτσι αποφασίζουμε να πραγματοποιήσουμε υπολογισμούς για ακτίνες από 500 m έως 10 000 m με βήμα 500 m. Για κάθε ακτίνα θα διενεργούνται υπολογισμοί σε 16 διαφορετικές διευθύνσεις. Αυτές λαμβάνονται ανά 22.5 ° με γωνία αφετηρίας τις 0 ° σε σχέση με την διεύθυνση του Βορρά σύμφωνα με το εγχειρίδιο του ORION-II [9].

Για αυτές τις θέσεις θα πρέπει να βρεθούν τα υψόμετρα. Αποφασίστηκε αυτά τα υψόμετρα να αντληθούν από την βάση δεδομένων του Google Earth [68]. Για να γίνει αυτό χρειάζεται όμως να γνωρίζουμε τις γεωγραφικές συντεταγμένες των σημείων, οι οποίες προς το παρόν μας είναι άγνωστες. Γνωρίζουμε μόνο την ακτίνα R και την γωνία ϑ σε σχέση με το Κέντρο Υπολογισμού C, που ορίσαμε στην προηγούμενη παράγραφο, και ξέρουμε τις γεωγραφικές του συντεταγμένες.

Προκειμένου να μπορούμε να βρούμε ανά πάσα στιγμή τις γεωγραφικές συντεταγμένες των σημείων υπολογισμού αναπτύχθηκε ο προεπεξεργαστής γεωγραφικών δεδομένων *GeoCalc* όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.3.

Το εκτελέσιμο του προγράμματος έχει όνομα geoCalc.exe και τα αρχεία δεδομένων και αποτελεσμάτων είναι τα geo.dat1 και results.out1 αντίστοιχα. Περνάμε τα δεδομένα στο αρχείο geo.dat1 με βάση τον τρόπο, που αναφέρεται στην παράγραφο 4.3. Ακολουθεί η εκτέλεση του geoCalc.exe και η παραγωγή των αποτελεσμάτων στο αρχείο results.out1.

Πλέον γνωρίζουμε τις γεωγραφικές συντεταγμένες στα σημεία υπολογισμού και με την βοήθεια του Google Earth αντλούμε τα υψόμετρα στα σημεία υπολογισμού. Όπως

αναλύθηκε και στην παράγραφο 4.3.1 στον ORION-II θα εισάγουμε την μέση τιμή από τα 3 υψόμετρα κάθε τομέα. Αυτά τα υψόμετρα βρίσκονται στα δύο άκρα καθώς και στην μέση κάθε τομέα. Τα μέσα ύψη που υπολογίστηκαν παρατίθενται στο παράρτημα ΣΤ.

Προκειμένου να έχουμε μια άποψη για την εδαφική διαμόρφωση της περιοχής κατασκευάσαμε με βάση το αρχείο υψομέτρων μια τρισδιάστατη απεικόνιση, η οποία φαίνεται στο σχήμα 5.7

5.5 Κατασκευή μετεωρολογικών σεναρίων

5.5.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να γίνει εκτέλεση του ORION-II ή του GENII χρειαζόταν να έχουμε στην διάθεσή μας την μέση ταχύτητα ανέμου ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια της ατμόσφαιρας, καθώς και την συχνότητα εμφάνισης κάθε διεύθυνσης ανέμου ανά ευστάθεια της ατμόσφαιρας. Επειδή υπήρχαν δυσκολίες στην απόκτηση πρωτογενών μετεωρολογικών δεδομένων της περιοχής της Μεγαλόπολης αποφασίστηκε να κατασκευαστούν σχετικά σενάρια, κάνοντας βέβαια κάποιες παραδοχές.

5.5.2 1^0 μετεωρολογικό σενάριο - Σενάριο αναφοράς

Για να κατασκευάσουμε αυτό το σενάριο είχαμε στην διάθεσή μας από την βιβλιογραφία τα ακόλουθα δεδομένα:

- Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου καθώς και επικρατούσα διεύθυνση στην περιοχή της Μεγαλόπολης [140].
- Μέση μηνιαία νέφωση στην περιοχή της Τρίπολης καθώς και αριθμός ημερών κάθε μήνα, που παρατηρήθηκε κάθε μια από τις τρεις κατηγορίες νέφωσης [(0-1.5)/8, (1.6-6.4)/8 και (6.5-8)/8] [220].
- Μέση μηνιαία θερμοκρασία στην περιοχή της Τρίπολης [220].

Με βάση τα παραπάνω αποφασίσαμε να εργαστούμε με μηνιαίες τιμές.

5.5.2.1 Υπολογισμός ποσοστού χρόνου κάθε κατηγορίας νέφωσης

Γνωρίζοντας ήδη την μέση ταχύτητα και επικρατούσα διεύθυνση ανέμου ανά μήνα, αρκεί επομένως να υπολογίσουμε το ποσοστό του χρόνου που αντιστοιχεί σε κάθε κατηγορία ατμοσφαιρικής ευστάθειας ανά μήνα.

Η βασική δυσκολία έγκειται στον προσδιορισμό της ατμοσφαιρικής ευστάθειας. Για αυτόν τον προσδιορισμό το πιο απαραίτητο στοιχείο είναι η νέφωση. Με τα στοιχεία, που έχουμε στην διάθεση μας, είναι πιο εύκολο να πραγματοποιήσουμε τους υπολογισμούς εάν χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο του Turner [198, σελ. 6-12], η οποία είναι μια πιο εξελιγμένη μέθοδος, που βασίζεται στην κλασσική των Pasquil-Gifford [71].

Σύμφωνα με αυτή την μέθοδο το πιο σημαντικό είναι να γνωρίζουμε πότε η νέφωση είναι μικρότερη και πότε μεγαλύτερη από 4/8. Επίσης είναι τελείως διαφορετική η μεθοδολογία υπολογισμού όταν πρόκειται για μέρα από όταν πρόκειται για νύχτα.

Εμείς θέλουμε να υπολογίσουμε το ποσοστό του χρόνου, που παρατηρείται κάθε κατηγορία ευστάθειας. Περιγράφουμε στην συνέχεια συνοπτικά τον τρόπο εργασίας, ώστε να προσανατολιστεί καλύτερα ο αναγνώστης. Θα ακολουθήσει παρακάτω και λεπτομερής περιγραφή της μεθοδολογίας.

- Υπολογίζουμε των αριθμό των ημερών ανά μήνα που έχουν νέφωση (0-4)/8, (4-6.4)/8 και (6.4-8)/8
- Βρίσκουμε από τους μετεωρολογικούς πίνακες του Smithsonian [115] για κάθε διαφορετικό μήνα τον μέσο αριθμό ωρών, που διαρκεί η ημέρα και η νύχτα αντίστοιχα.
- Πολλαπλασιάζοντας τις δύο παραπάνω τιμές υπολογίζουμε τον αριθμό των ωρών ανά μήνα που παρατηρείται κάθε κατηγορία νέφωσης .
- Διαιρούμε με τον αριθμό των ωρών του έτους ($8760\,\mathrm{h}$), ώστε να υπολογίσουμε το ποσοστό του χρόνου, που παρατηρείται κάθε κατηγορία νέφωσης.

Αναλυτικά τώρα έχουμε: Από την ΕΜΥ γνωρίζουμε τον αριθμό των ημερών, που παρατηρείται νέφωση (0-1.5)/8, (1.6-6.4)/8 και (6.5-8)/8. Αποφασίζουμε λοιπόν να χωρίσουμε την μεσαία κατηγορία στα δύο ως εξής: Το κέντρο της είναι τα 4/8. Έτσι δεχόμαστε ότι οι μισές μέρες της κατηγορίας έχουν νέφωση από 1.6/8-4/8 και οι άλλες μισές από 4/8-6.4/8. Μπορούμε λοιπόν τώρα να υπολογίσουμε πόσες μέρες κάθε μήνα έχουν νέφωση μικρότερη από 4/8.

Επειδή η μεθοδολογία υπολογισμού είναι διαφορετική εάν πρόκειται για μέρα ή νύχτα αποφασίζουμε να εργαστούμε με τον αριθμό των ωρών κάθε μήνα, που αντιστοιχούν σε μέρα και σε νύχτα. Για αυτό τον λόγο χρησιμοποιούμε τους πίνακες του Smithsonian [115, σελ. 508] για την εύρεση της μέσης διάρκειας της ημέρας (ηλιοφάνεια) σε ώρες κάθε μήνα. Έτσι για κάθε μήνα με βάση την 17η ημέρα εκλέγουμε τις ώρες ηλιοφάνειας.

Για τον Φεβρουάριο χρησιμοποιούμε την 13η ημέρα. Επίσης λόγω του ότι το γεωγραφικό πλάτος της Μεγαλόπολης δεν αντιστοιχεί σε κάποια από τις εγγραφές στους πίνακες κάνουμε γραμμική παρεμβολή. Επειδή η ΕΡΑ [198, σελ. 6-12] θεωρεί ως

νύχτα το διάστημα μια ώρα πριν την δύση καθώς και το διάστημα μια ώρα μετά την ανατολή αφαιρούμε από τις τιμές ηλιοφάνειας, που έχουμε από το Smithsonian Meteorological Tables, 2 ώρες.

Πολλαπλασιάζοντας για κάθε μήνα τις ώρες διάρκειας της ημέρας (ηλιοφάνεια) με τον αριθμό των ημερών/μήνα, που παρατηρείται κάποια κατηγορία νέφωσης, υπολογίζουμε τις ώρες/μήνα, που σημειώθηκε αυτή η κατηγορία νέφωσης ενώ ήταν ημέρα. Με όμοιο τρόπο υπολογίζουμε τα αντίστοιχα ποσοστά για την νύχτα. Διαιρώντας αυτά τα νούμερα με τις συνολικές ώρες του έτους ($8760\,\mathrm{h}$) υπολογίζουμε το ποσοστό εμφάνισης κάθε διαφορετικής ατμοσφαιρικής συνθήκης και τα αποτελέσματα φαίνονται στους πίνακες 5.10 και 5.11.

5.5.2.2 Υπολογισμός μέσου ηλιακού ύψους

Έχοντας κάνει τα παραπάνω μπορούμε να υπολογίσουμε ένα μέσο ηλιακό ύψος (Solar altitude) για κάθε μήνα πράγμα απαραίτητο για τον προσδιορισμό της ευστάθειας (βλ. [115, σελ. 495 κ.εξ.]). Ακολούθως παρουσιάζεται η μεθοδολογία υπολογισμού του ηλιακού ύψους:

1. Από τον πίνακα 169, σελ. 495 επιλέγουμε για την 17η ημέρα κάθε μήνα (για τον Φεβρουάριο εκλέγουμε την 13η ημέρα) την απόκλιση του ηλίου (*declination of the sun*) και την εξίσωση χρόνου (*equation of time*).

2. Υπολογίζουμε τώρα την πραγματική ηλιακή ώρα (*true solar time*) ως εξής: Στην τοπική ώρα (*local standard time*) προσθέτουμε $4\,\mathrm{min}$ για κάθε μοίρα ανατολικά του Greenwich και υπολογίζουμε την μέση τοπική ηλιακή ώρα (*local mean solar time*). Εάν προσθέσουμε στην τελευταία το *equation of time*, που έχουμε βρει από τον πίνακα 169 υπολογίζουμε την πραγματική ηλιακή ώρα (*true solar time*).

3. Εκλογή τοπικής ώρας (*local standard time*). Η πρώτη σκέψη είναι να επιλέξουμε 12.00πμ. Όμως αυτή την ώρα ο ήλιος είναι στο μέγιστο ύψος του, οπότε η αστάθεια της ατμόσφαιρας θα είναι πολύ κοντά στην μέγιστη τιμή της, οπότε και η ανάμιξη των ρύπων θα είναι πολύ καλή. Εμείς θα προτιμούσαμε να οδηγηθούμε σε συντηρητικότερες εκτιμήσεις σχετικά με την ανάμιξη των ρύπων. Έτσι επιλέγουμε για τους υπολογισμούς τοπική ώρα ίση με 9.30πμ. Κάνοντας για τους 12 μήνες τους σχετικούς υπολογισμούς διαπιστώνουμε ότι οι τιμές της πραγματικής ηλιακής ώρας κυμαίνονται γύρω από τις 11.00πμ. Επειδή τα διαγράμματα, που χρησιμοποιούμε, δεν μας προσφέρουν ιδιαίτερα μεγάλη ακρίβεια αποφασίζουμε τελικά να κάνουμε τους σχετικούς υπολογισμούς με πραγματική ηλιακή ώρα ίση με 11.00πμ για όλους τους μήνες. Σημειώνεται ότι κατασκευάστηκε και εναλλακτικό σενάριο επιλέγοντας διαφορετική τοπική ηλιακή ώρα προκειμένου να

δούμε την επίδρασή της στα αποτελέσματα. Περισσότερα παρουσιάζονται στην παράγραφο 5.5.3.

4. Οι πίνακες, που έχουμε στην διάθεσή μας για τον υπολογισμό του ηλιακού ύψους , είναι για γεωγραφικό πλάτος 35N και 40N. Έτσι κάνουμε γραμμική παρεμβολή προκειμένου να υπολογίσουμε το ηλιακό ύψος για το γεωγραφικό πλάτος της Μεγαλόπολης, που είναι 37.24.

5.5.2.3 Υπολογισμός κλάσης ηλιακής έκθεσης και ατμοσφαιρικής ευστάθειας

Τώρα μπορούμε με βάση την μεθοδολογία του Turner [198] να προσδιορίσουμε την κλάση ηλιακής έκθεσης (*insolation class*) και στην συνέχεια την κατηγορία ευστάθειας για τα διαστήματα, που αντιστοιχούν σε μέρα και σε νέφωση $\leq$4/8. Όταν η νέφωση είναι μεγαλύτερη από 4/8 ο Turner χρησιμοποιεί το ύψος της νέφωσης για να εκλέξει insolation class number 1 ή 2. Εμείς επειδή δεν έχουμε καμία πληροφορία σχετικά με το ύψος της νέφωσης εκλέγουμε insolation class 1, αφού αυτή η κατηγορία δίνει σχετικά συντηρητικότερες τιμές ατμοσφαιρικής ευστάθειας. Για τιμές νέφωσης μεγαλύτερες από 6.4/8 θεωρούμε ότι έχουμε πλήρη κάλυψη και εκλέγουμε insolation class number 0, οπότε και η ευστάθεια είναι ουδέτερη (D) για οποιαδήποτε τιμή ανέμου.

Για την περίπτωση της νύχτας ο Turner διακρίνει δύο περιπτώσεις: Όταν η νέφωση είναι μικρότερη από 4/10 και όταν είναι μεγαλύτερη από 4/10. Εμείς επειδή δεν έχουμε σχετική κατηγοριοποίηση θα κάνουμε την επιλογή με κριτήριο νέφωσης τα 5/10 (ή 4/8). Έτσι για νέφωση μεγαλύτερη από 5/10 εκλέγουμε radiation index=-1 και για νέφωση μικρότερη από 5/10 εκλέγουμε radiation index=-2. Μάλιστα για τις ταχύτητες ανέμου, που έχουμε εμείς, δεν παρουσιάζεται κάποια σημαντική διαφορά στις επιλεγόμενες ευστάθειες.

Έχοντας υπολογίσει παραπάνω το ετήσιο ποσοστό, που παρατηρείται κάθε διαφορετική ατμοσφαιρική συνθήκη, στην οποία μάλιστα ξέρουμε πλέον την ευστάθεια καθώς και την διεύθυνση του ανέμου, μπορούμε πλέον αθροίζοντας τα ποσοστά, τα οποία έχουν όμοια ατμοσφαιρική ευστάθεια και διεύθυνση ανέμου να υπολογίσουμε την συχνότητα εμφάνισης κάθε διεύθυνσης ανέμου ανά ευστάθεια της ατμόσφαιρας. Επίσης μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση ταχύτητα ανέμου ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια της ατμόσφαιρας. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται στους πίνακες 5.12 και 5.13.

5.5.2.4 Υπολογισμός ανύψωσης πλουμίου

Για να υπολογίσουμε την ανύψωση του πλουμίου ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια της ατμόσφαιρας χρειάζεται να γνωρίζουμε την μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια της ατμόσφαιρας (βλ. εξισώση 2.8 κ.εξ.). Γνωρίζουμε

ήδη ανά μήνα την μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος, την ταχύτητα και την διεύθυνση του ανέμου. Επίσης έχουμε στην διάθεση μας και τα δεδομένα για την νέφωση [220]. Με τον τρόπο, που περιγράφτηκε παραπάνω για την ταχύτητα του ανέμου, υπολογίζουμε την μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος ανά διεύθυνση ανέμου και κατηγορία ευστάθειας και τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 5.14.

Στην συνέχεια υπολογίζουμε την ανύψωση του πλουμίου για κάθε ΑΗΣ σύμφωνα με την μεθοδολογία, που έχει αναπτυχθεί στο κεφάλαιο 2.2.3.2, καθώς και την ταχύτητα του ανέμου στο ενεργό ύψος του πλουμίου σύμφωνα με την εξίσωση 4.14 χρησιμοποιώντας τις τιμές για την ταχύτητα εξόδου των καυσαερίων, που υπολογίσαμε στην παράγραφο 5.3.2.

Αρχικά υπολογίζουμε την ροή άνωσης $\mathrm{F_b}$ με βάση την εξίσωση 2.8. Στην συνέχεια υπολογίζουμε την ταχύτητα ανέμου στο ύψος των καμινάδων με βάση τον εκθετικό νόμο (βλ. εξίσωση 4.14). Ακολούθως κάνουμε έλεγχο για πιθανή βύθιση του πλουμίου λόγω κατωρεύματος. Το φαινόμενο αυτό δεν συμβαίνει εάν $\mathrm{w_s} > 1.5\,\mathrm{u_s}$. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για καμία τιμή της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος των καμινάδων $\mathrm{u_s}$ δεν έχουμε βύθιση του πλουμίου. Συνεπώς υπολογίζουμε την ανύψωση του πλουμίου χωρίς να λάβουμε υπόψη μας την εξίσωση 2.7. Έχοντας τώρα την ανύψωση του πλουμίου μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα του ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου με βάση την εξίσωση 4.14. Στους πίνακες 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23 φαίνονται τα απότελέσματα για τους ΑΗΣ1-2, 3 και 4.

5.5.3 2^0 μετεωρολογικό σενάριο

Όπως είδαμε στην παράγραφο 5.5.2.2 η τοπική ώρα εκλέχθηκε βάση παραδοχών. Προκειμένου να δούμε την επίδραση αυτού του μεγέθους στα αποτελέσματα κατασκευάζουμε ένα δεύτερο εναλλακτικό μετεωρολογικό σενάριο. Εδώ ως τοπική ώρα (*local standard time*) επιλέγουμε 13.00, ενώ στο προηγούμενο σενάριο είχαμε επιλέξει 9.30 (βλ. παράγραφο 5.5.2.2). Υπολογίζουμε την πραγματική ηλιακή ώρα (*true solar time*) για κάθε μήνα και παρατηρούμε ότι οι τιμές κυμαίνονται γύρω από τις 14.30. Λόγω έλλειψης μεγάλης ακρίβειας στα σχετικά διαγράμματα αποφασίζουμε να κάνουμε όλους τους υπολογισμούς με πραγματική ηλιακή ώρα ίση με 14.30. Με βάση την μεθοδολογία, που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 5.5.2 υπολογίζουμε τις νέες τιμές και τα αποτελέσματα φαίνονται στους πίνακες 5.24, 5.25, 5.26, 5.27, 5.28, 5.29, 5.30, 5.31, 5.32, 5.33, 5.34 και 5.35. Με βάση αυτές τις τιμές καθώς και του $1^{ου}$ σεναρίου θα πραγματοποιηθούν στην συνέχεια οι εκτελέσεις των κωδίκων. Στον πίνακα 5.36 παρουσιάζονται τα δύο σενάρια, που κατασκευάστηκαν, και τα χαρακτηριστικά τους.

5.6 Παρουσίαση των εκτελέσεων που πραγματοποιήθηκαν με τον κώδικα ORION-II

5.6.1 Εισαγωγή

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστούν οι κυριότερες και σημαντικότερες εκτελέσεις, που πραγματοποιήθηκαν με τον κώδικα ORION-II. Αρχικά παρατίθεται εκτέλεση στηριζόμενη στο 1ο μετεωρολογικό σενάριο και στις τιμές των παραμέτρων, οι οποίες ορίστηκαν παραπάνω. Στην συνέχεια έγιναν παραμετρικές εκτελέσεις με βάση την ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης, ώστε να διαπιστωθεί η επίδρασή της στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις. Πραγματοποιήθηκαν επίσης παραμετρικές εκτελέσεις σε σχέση με το μέγεθος των σωματιδίων. Ακολούθησαν εκτελέσεις, οι οποίες έλεγξαν την επίδραση του αναγλύφου του εδάφους στα αποτελέσματα του κώδικα και παρουσιάζονται στην παράγραφο 5.6.5. Ακόμη εκτελέστηκε ο κώδικας με βάση το 2ο μετεωρολογικό σενάριο και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα με αυτά του 1ου σεναρίου. Τέλος για να ελεγχθεί η επίδραση της βροχής στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές εκτελέσεις σε σχέση με τον ρυθμό βροχόπτωσης και την χρονική διάρκεια της βροχόπτωσης. Τα στοιχεία κάθε εκτέλεσης και ο αντίστοιχος κωδικός της παρουσιάζονται στον πίνακα 5.37.

5.6.2 Αρχική εκτέλεση του ORION-II

Η εκτέλεση αυτή, η οποία έχει κωδικό 15, ήταν η πρώτη, που πραγματοποιήθηκε και έγινε με βάση το 1ο μετεωρολογικό σενάριο. Οι ταχύτητες ξηρής εναπόθεσης και βαρυτικής επικάθησης, που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτές που επιλέχθηκαν στις παραγράφους 5.2.2 και 5.2.3 αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι στην υπόψη εκτέλεση του κώδικα με βάση το 1ο μετεωρολογικό σενάριο δεν εισήχθησαν δεδομένα σχετικά με την βροχόπτωση.

5.6.2.1 Τα απαιτούμενα δεδομένα για την εκτέλεση του κώδικα

Προκειμένου να γίνει η εκτέλεση του κώδικα έγινε εισαγωγή των δεδομένων στο αρχείο δεδομένων data.txt σύμφωνα με τον τρόπο, που παρουσιάζεται στο εγχειρίδιο του κώδικα [9]. Ακολούθησε η εκτέλεση του κώδικα τρέχοντας το πρόγραμμα orionDev.exe. Το παραγόμενο αρχείο αποτελεσμάτων είναι το results.txt. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με το εκτελέσιμο αρχείο orionDev.exe και τα αρχεία δεδομένων και αποτελεσμάτων παρέχονται στην παράγραφο 3.2.5.4. Σημειώνεται ότι τα αρχεία δεδομένων και αποτελεσμάτων για όλες τις εκτελέσεις που πραγματοποιήθηκαν καθώς και ο πηγαίος κώδικας του orionDev.exe περιέχονται στο CD, το οποίο συνοδεύει την παρούσα ΔΔ.

Η εκτέλεση αυτή, η οποία έχει κωδικό 15 πραγματοποιήθηκε με βάση το 1ο μετεωρολογικό σενάριο, το οποίο παρουσιάζεται στην παράγραφο 5.5.2. Σημειώνεται ότι το ενεργό ύψος πλουμίου, πρέπει να δίνεται στον κώδικα με βάση την επιφάνεια της θάλασσας. Τα απαραίτητα γεωγραφικά δεδομένα, που εισήχθησαν στο data.txt, παρουσιάζονται στην παράγραφο 5.4.3. Τα κατασκευαστικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν δίδονται στην παράγραφο 5.3. Στην ίδια παράγραφο δίδονται και τα δεδομένα εκπομπών που εισήχθησαν. Ως εκπεμπόμενο ισότοπο λήφθηκε το ^{226}Ra, το οποίο έχει σταθερά διάσπασης $\lambda = 1.372 \times 10^{-11}\,\mathrm{s}^{-1}$ και ουσιαστικά παραμένει αδιάσπαστο κατά την διάρκεια της εκπομπής του από τις καμινάδες των ΑΗΣ. Ο ρυθμός εκπομπής του ^{226}Ra από τις καμινάδες των ΑΗΣ υπολογίστηκε στην παράγραφο 5.3.2.

Η εκτέλεση αυτή πραγματοποιήθηκε με βάση τις αρχικές εκτιμήσεις για την ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης $\mathrm{V_d}$ και την ταχύτητα βαρυτικής επικάθησης $\mathrm{V_g}$ των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας, όπως περιγράφτηκαν στις παραγράφους 5.2.2 και 5.2.3 αντίστοιχα. Για λόγους πληρότητας αναφέρονται ακολούθως:

- $\mathrm{V_d} = 0.005\,\mathrm{msec}^{-1}$
- $\mathrm{V_g} = 0.0045\,\mathrm{msec}^{-1}$

5.6.2.2 Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις δίνονται στο σύστημα συντεταγμένων του ORION-II, το οποίο παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.2.2. Προκειμένου να παραχθούν τα απαραίτητα διαγράμματα είναι απαραίτητο να γίνει μετατροπή των συντεταγμένων σε καρτεσιανές με κέντρο όμοιο με αυτό στο σύστημα συντεταγμένων του ORION-II. Για αυτό τον σκοπό αναπτύχθηκαν τα προγράμματα *otran*, *ogt* και *ogtDeposit*, που περιγράφονται αναλυτικά στην παράγραφο 4.4.1. Στην ίδια παράγραφο περιγράφεται και διαδικασία, που ακολουθείται προκειμένου να γίνει η εν λόγω μετατροπή. Σημειώνεται επίσης ότι προκειμένου να παραχθούν τα δισδιάστατα και τα τρισδιάστατα γραφήματα χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Surfer, το οποίο παράγει το πλέγμα της χαρτογράφησης με την στατιστική μέθοδο kriging. Για περισσότερα ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην βιβλιογραφία [185, σελ.317]. Πρέπει να αναφερθεί ακόμη ότι είναι δυνατόν μετά την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων με την μέθοδο kriging να προκύψουν σε ορισμένα σημεία του πλέγματος τιμές μεγαλύτερες από αυτές, που υπολογίστηκαν με την βοήθεια των κωδίκων ORION-II και GENII.

5.6.2.3 Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης

Ο ORION-II όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 3.2, υπολογίζει την ατμοσφαιρική συγκέντρωση των εκπεμπόμενων ραδιενεργών ισοτόπων σε μηδενικό ύψος από το

έδαφος. Τα δισδιάστατα και τρισδιάστατα γραφήματα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων, που παράγονται από το αρχείο των αποτελεσμάτων results.txt, παρουσιάζονται στα σχήματα 5.8 και 5.9 αντίστοιχα. Από αυτά τα σχήματα παρατηρούμε ότι υψηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται βορειοδυτικά του ΑΗΣ4 και οφείλονται κυρίως στα υψηλά υψόμετρα του εδάφους σε αυτά τα σημεία. Εκτενής διερεύνηση γίνεται στην παράγραφο 5.6.5. Αξιοσημείωτες συγκεντρώσεις σημειώνονται και νοτιοανατολικά του κέντρου υπολογισμού, που βρίσκεται στο κέντρο του γραφήματος. Για λόγους αρτιότερης εποπτείας παρέχεται στο σχήμα 5.10 χάρτης της περιοχής με όμοιες διαστάσεις και προσανατολισμό με το γράφημα 5.8.

Από την εκτέλεση του ORION-II προκύπτει ότι στις διευθύνσεις $0°$, $180°$, $202.5°$ οι συγκεντρώσεις του ^{226}Ra είναι μηδενικές. Η μέγιστη υπολογιζόμενη συγκέντρωση ^{226}Ra είναι $7.99\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$ και η συγκέντρωση ^{226}Ra στην τέφρα, που εκπέμπεται λήφθηκε ίση με $904\,\mathrm{Bqm}^{-3}$. Σε ανάλογη μελέτη, που πραγματοποίησαν οι Zeevaert et al. [213] σε ατμοηλεκτρικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που χρησιμοποιούσε γαιάνθρακες και η συγκέντρωση του ^{226}Ra στην τέφρα ήταν $700\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$, υπολογίστηκε η συγκέντρωση του ^{226}Ra και η μέγιστη τιμή ήταν $4.5 \times 10^{-3}\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$, τιμή αρκετά χαμηλότερη από την μέγιστη συγκέντρωση, που υπολογίσαμε εμείς στην Μεγαλόπολη. Η Μανωλοπούλου [225] σε μελέτη, που πραγματοποίησε στους ΑΗΣ της περιοχής της Πτολεμαΐδας υπολόγισε μέγιστη συγκέντρωση ^{226}Ra $611\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$ και η συγκέντρωση του ^{226}Ra στην εκπεμπόμενη τέφρα κυμαινόταν από $142\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$-$605\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$. Υπολογισμό της συγκέντρωσης του ^{226}Ra στον αέρα σε περιοχή γύρω από ΑΗΣ, πραγματοποίησαν και οι Alvarez and Garzon [3] και η μέγιστη συγκέντρωση ήταν $3.5\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$. Σημειώνεται ότι στην παραπάνω μελέτη η συγκέντρωση του ^{226}Ra στην ιπτάμενη τέφρα λήφθηκε ίση με $135\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$. Όλα τα παραπάνω παρέχονται στον πίνακα 5.38. Οι Bem et al. [16] πραγματοποίησαν μετρήσεις ^{226}Ra στο περιβάλλον τριών ΑΗΣ στην Πολωνία και η μέγιστη μετρούμενη συγκέντρωση ήταν $2.75\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη, που πραγματοποίησαν οι Hoetzl and Winkler [77]. Σε αυτή την μελέτη μέτρησαν συγκεντρώσεις ^{226}Ra στην ατμόσφαιρα στην επιφάνεια του εδάφους σε περιοχή στην Γερμανία, που βρισκόταν μακριά από ΑΗΣ και η μέγιστη συγκέντρωση ^{226}Ra ήταν $3.3\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$. Βλέπουμε λοιπόν ότι συγκεντρώσεις ^{226}Ra στην ατμόσφαιρα τάξης μεγέθους $\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$ μπορεί να οφείλονται σε επαναιώρηση χώματος από το έδαφος και δεν είναι απαραίτητο ότι οφείλονται στην λειτουργία ΑΗΣ. Διαπιστώνουμε ότι παρουσιάζεται μεγάλη κύμανση στις τιμές, που παρέχονται στην βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα αυτής της ΔΔ συμφωνούν περισσότερο ως προς την τάξη μεγέθους με τις τιμές, που παρέχουν οι Bem et al. [16]. Με βάση όλα τα παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι οι συγκεντρώσεις, που υπολογίστηκαν από τον ORION-II είναι μέσα στα πλαίσια των τιμών, που αναφέρονται στην βιβλιογραφία και δεν φαίνονται ιδιαίτερα υψηλές.

Όσον αφορά στον ρυθμό απόθεσης του ^{226}Ra στην περιοχή η μέγιστη τιμή, που υπολογίστηκε ήταν $0.040\,\mu\mathrm{Bqs^{-1}m^{-2}}$. Όπως ήταν αναμενόμενο οι υψηλές τιμές παρατηρούνται βορειοδυτικά του ΑΗΣ4. Δισδιάστατη και τρισδιάστατη απεικόνιση του ρυθμού απόθεσης στην περιοχή παρουσιάζεται στα σχήματα 5.11 και 5.12 αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα αυτά έχουν την ίδια μορφή με τα αντίστοιχα για τις συγκεντρώσεις του ^{226}Ra. Αυτό συμβαίνει διότι ο ρυθμός απόθεσης όταν δεν υπάρχει υγρή απόθεση είναι ανάλογος της συγκέντρωσης, όπως φαίνεται από την ακόλουθη εξίσωση [9]:

$$W_{Di} = V_{Di}\chi_{id} \tag{5.18}$$

όπου:

$\mathrm{W_{Di}}$: Ο ρυθμός απόθεσης του ισοτόπου.

$\mathrm{V_{Di}}$: Η ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης του ισοτόπου.

χ_{id}: Η συγκέντρωση του ισοτόπου. Σημειώνεται ότι αυτή η εξίσωση ισχύει μόνο για ξηρή απόθεση και όχι όταν υπάρχουν κατακρημνίσεις.

Με βάση την μέγιστη τιμή του ρυθμού απόθεσης υπολογίζουμε την επιβάρυνση του ^{226}Ra σε επιφανειακό χώμα πάχους $1\,\mathrm{cm}$ για χρονικό διάστημα 1 έτους και προκύπτει $0.126\,\mathrm{Bqkgr^{-1}}$.

Οι Rouni et al. [157], πραγματοποίησαν μετρήσεις στην περιοχή και παρέχουν χάρτη της συγκέντρωσης του ^{226}Ra στο επιφανειακό χώμα της περιοχής. Οι μέγιστες μετρούμενες συγκεντρώσεις του ^{226}Ra παρατηρούνται βόρεια των δύο ΑΗΣ, σε διαφορετικό σημείο δηλαδή από ότι στα διαγράμματα 5.11 και 5.12. Επίσης σύμφωνα με τους Rouni et al. [157] οι συγκεντρώσεις του ^{226}Ra σε πάχος $1\,\mathrm{cm}$ επιφανειακού χώματος κυμαίνονται από 23-337 $\mathrm{Bqkgr^{-1}}$. Επισημαίνεται ότι αυτές οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για αποστάσεις έως $10\,\mathrm{km}$ από το κέντρο υπολογισμού της παρούσας ΔΔ. Υπολογίζοντας τον χρόνο που χρειάζεται για να επιτευχθεί συγκέντρωση ίση με $23\,\mathrm{Bqkgr^{-1}}$ σύμφωνα με τον μέγιστο ρυθμό απόθεσης ^{226}Ra, που έδωσε ο ORION-II, διαπιστώνουμε ότι απαιτούνται 182.5 έτη. Σημειώνεται ότι για την πυκνότητα του χώματος δεχτήκαμε ότι είναι ίση με $1\,\mathrm{grcm^{-3}}$. Έχοντας υπόψη μας τα παραπάνω και το ότι ο παλαιότερος σταθμός εγκαταστάθηκε στην περιοχή πριν από περίπου 40 έτη μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι ποσότητες του ^{226}Ra στο χώμα της περιοχής δεν μπορούν να αποδοθούν - κατά κύριο λόγο - σε εναπόθεση τέφρας, που διασπείρεται από τις καμινάδες των ΑΗΣ, αλλά μάλλον στο φυσικά περιεχόμενο ^{226}Ra στο έδαφος. Αξίζει να αναφερθεί επίσης ότι σε άλλη μελέτη που έχει πραγματοποιήσει το ΕΠΤ-ΕΜΠ προέκυψε ότι η μέση τιμή της συγκέντρωσης του ^{226}Ra σε δείγματα επιφανειακού χώματος, τα οποία συγκεντρώθηκαν από όλη την Ελλάδα, ήταν $25\pm19\,\mathrm{Bqkgr^{-1}}$ [5].

5.6.3 Εξέταση της επίδρασης της ταχύτητας ξηρής εναπόθεσης V_d στα αποτελέσματα του ORION-II: Εκτελέσεις 14 και 16

Θέλοντας να διαπιστώσουμε την επίδραση της ταχύτητας ξηρής εναπόθεσης V_d στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις κάναμε παραμετρικές εκτελέσεις του ORION-II με βάση την V_d. Στην εκτέλεση 14 υιοθετήσαμε τιμή $V_d = 0.001\,\mathrm{msec}^{-1}$, που είναι μικρότερη από αυτή της εκτέλεσης 15, η οποία θυμίζουμε ήταν $0.005\,\mathrm{msec}^{-1}$. Στην εκτέλεση 16 θέσαμε την τιμή της $V_d = 0.01\,\mathrm{msec}^{-1}$, η οποία είναι μεγαλύτερη από αυτήν της εκτέλεσης 15. Καμία από τις υπόλοιπες παραμέτρους δεν μεταβλήθηκε.

5.6.3.1 Εκτέλεση με κωδικό 14

Σε αυτή την εκτέλεση θέσαμε την $V_d = 0.001\,\mathrm{msec}^{-1}$. Όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές και παράμετροι παρέμειναν σταθερές και ίσες με αυτές στην εκτέλεση 15. Τα παραγόμενα διαγράμματα παρουσιάζουν την ίδια μορφή με αυτά της εκτέλεσης 15 και παρατίθενται στα σχήματα 5.13 και 5.14. Η μέγιστη υπολογιζόμενη συγκέντρωση ήταν $8.6\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$. Συγκρίνοντας με το εύρος των συγκεντρώσεων της εκτέλεσης 15 διαπιστώσαμε ότι η μείωση της V_d επιφέρει μια πολύ μικρή αύξηση στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις, η οποία όμως είναι σχεδόν ανεπαίσθητη.

Αντίθετα οι ρυθμοί απόθεσης του ^{226}Ra ήταν αισθητά μειωμένοι και η μέγιστη υπολογιζόμενη τιμή ήταν $0.009\,\mu\mathrm{Bqs}^{-1}\mathrm{m}^{-2}$. Παρατηρούμε ότι μείωση της V_d 10 φορές προκάλεσε μείωση κατά 4.4 φορές του ρυθμού απόθεσης. Το ότι είχαμε μεγάλη μεταβολή στον ρυθμό απόθεσης, ενώ στην επιφανειακή συγκέντρωση του ^{226}Ra δεν συνέβει το ίδιο, οφείλεται στο ότι η επιφανειακή συγκέντρωση είναι ένα μέγεθος το οποίο δεν επηρεάζεται σημαντικά από την V_d. Στα σχήματα 5.15 και 5.16 παρουσιάζονται δισδιάστατα και η τρισδιάστατα γραφήματα αντίστοιχα του ρυθμού απόθεσης και όπως ήταν αναμενόμενο οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται βορειοδυτικά του ΑΗΣ4.

5.6.3.2 Εκτέλεση με κωδικό 16

Σε αυτή την εκτέλεση θέσαμε την $V_d = 0.01\,\mathrm{msec}^{-1}$. Όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές και παράμετροι παρέμειναν σταθερές και ίσες με αυτές στην εκτέλεση 15. Τα δισδιάστατα και τρισδιάστατα γραφήματα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra στην ατμόσφαιρα στην επιφάνεια του εδάφους παρουσιάζονται στα σχήματα 5.17 και 5.18. Η μορφή τους είναι όμοια με αυτά των εκτελέσεων 14 και 15. Η μέγιστη υπολογιζόμενη συγκέντρωση ^{226}Ra ήταν $7.37\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$. Συγκρίνοντας με τις εκτελέσεις 14 και 15 βλέπουμε ότι οι διαφορές δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Παρατηρούμε ότι ενώ η V_d αυξήθηκε 10 φορές σε σχέση με την εκτέλεση 14 δεν σημειώθηκε ανάλογη μείωση στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις.

Αντίθετα ο ρυθμός απόθεσης ^{226}Ra σημείωσε αύξηση σε σχέση με τις εκτελέσεις 14 και 15 και η μέγιστη τιμή που παρατηρήθηκε ήταν $0.074\,\mu\mathrm{Bqs^{-1}m^{-2}}$. Και εδώ οι μέγιστες τιμές παρατηρήθηκαν βορειοδυτικά του ΑΗΣ4. Τα δισδιάστατα και τρισδιάστατα γραφήματα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης παρουσιάζονται στα σχήματα 5.19 και 5.20.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των τιμών των συγκεντρώσεων καθώς και του ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra μεταξύ των εκτελέσεων 14 και 16, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί με τις ακραίες τιμές $\mathrm{V_d}$. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η σύγκριση μεταξύ των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων έγινε αφαίρεση των τιμών της εκτέλεσης 16 από αυτές της εκτέλεσης 14. Η μεγαλύτερη διαφορά που παρατηρήθηκε ήταν $1.39\,\mu\mathrm{Bqm^{-3}}$. Οι περισσότερες τιμές όμως ήταν μικρότερες από $1 \times 10^{-3}\,\mu\mathrm{Bqm^{-3}}$. Βλέπουμε δηλαδή ότι δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες διαφορές μεταξύ των δύο εκτελέσεων. Το σχετικό γράφημα με τις διαφορές παρουσιάζεται στο σχήμα 5.21. Παρατηρούμε ότι ποιοτικά δεν αλλάζει κάτι σε σχέση με τα γραφήματα 5.13 και 5.17 των εκτελέσεων 14 και 16. Οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται, εκεί που βρίσκονται και οι μέγιστες υπολογιζόμενες τιμές της συγκέντρωσης του ^{226}Ra.

Πραγματοποιήθηκε επίσης σύγκριση μεταξύ των υπολογιζόμενων ρυθμών απόθεσης ^{226}Ra των δύο εκτελέσεων, η οποία έγινε με αφαίρεση των τιμών της εκτέλεσης 14 από τις τιμές της εκτέλεσης 16. Η μέγιστη διαφορά ήταν $6.51 \times 10^{-2}\,\mu\mathrm{Bqs^{-1}m^{-2}}$. Το σχετικό γράφημα παρουσιάζεται στο σχήμα 5.22. Όμοια με παραπάνω οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται στα σημεία, όπου υπολογίστηκαν οι μέγιστες τιμές ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra.

5.6.4 Εξέταση της επίδρασης της διαμέτρου των σωματιδίων στις εκτελέσεις του ORION-II: Εκτέλεση 17

5.6.4.1 Περιγραφή της εκτέλεσης

Οι εκτελέσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν μέχρι τώρα έγιναν με την παραδοχή ότι τα σωματίδια της τέφρας, που διαφεύγουν έχουν διάμετρο $8\,\mu\mathrm{m}$, όπως αναφέρεται στην παράγραφο 5.2.3. Προκειμένου να διαπιστώσουμε την επίδραση στα αποτελέσματα σωματιδίων με μεγαλύτερη διάμετρο, που πιθανόν διαφεύγουν από τις καμινάδες των ΑΗΣ της Μεγαλόπολης, αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί εκτέλεση, η οποία θα περιλαμβάνει και σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου. Σημειώνεται ότι όπως και στις προηγούμενες εκτελέσεις και εδώ οι υπολογισμοί έγιναν απουσία βροχόπτωσης.

Η εκτέλεση αυτή πραγματοποιήθηκε ως εξής: Δεχτήκαμε ότι από τις καμινάδες των ΑΗΣ εκπέμπονται σωματίδια δύο διαφορετικών διαμέτρων. Η κατανομή μάζας μεταξύ των μικρών και των μεγάλων σωματιδίων επελέγη ως 65%-35% αντίστοιχα. Αυτή είναι μια λογική εκτίμηση εάν λάβουμε υπόψη μας ότι τα ηλεκτροστατικά φίλτρα συγ-

κρατούν με μεγάλη επιτυχία τα μεγάλα σωματίδια ενώ είναι λιγότερο αποδοτικά στην συγκράτηση σωματίδιών μικρότερης διαμέτρου.

Για τα σωματίδια μικρής διαμέτρου εκλέξαμε ως διάμετρο $\mathrm{d_A} = 8\,\mu\mathrm{m}$, όπως είχαμε επιλέξει και στις προηγούμενες εκτελέσεις. Για την εκλογή διαμέτρου των μεγάλων σωματιδίων εργαστήκαμε ως ακολούθως: Παρατηρώντας την κατανομή των σωματιδίων, που κατακρατούνται στα φίλτρα του ΑΗΣ4, στο σχήμα 5.3 μπορούμε να συμεράνουμε ότι η εκλογή διαμέτρου $\mathrm{d} = 30\,\mu\mathrm{m}$ είναι μια λογική εκτίμηση. Για αυτή την διάμετρο υπολογίζουμε την ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης $\mathrm{V_d}$ σύμφωνα με την μεθοδολογία, που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 5.2.2. Η ταχύτητα βαρυτικής επικάθησης υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 5.3. Σύμφωνα με τα παραπάνω για τα μεγάλα σωματίδια με διάμετρο $\mathrm{d_B} = 30\,\mu\mathrm{m}$ λαμβάνουμε:

- $\mathrm{V_{dB}} = 0.073\,\mathrm{msec}^{-1}$
- $\mathrm{V_{gB}} = 0.063\,\mathrm{msec}^{-1}$

Ο ρυθμός εκπομπής για τα μικρά και για τα μεγάλα σωματίδια σε κάθε ΑΗΣ υπολογίζεται σύμφωνα με την κατανομή μάζας, που αναφέραμε παραπάνω, και φαίνεται στον πίνακα 5.39.

Η εκτέλεση πραγματοποιήθηκε ως εξής εξής: Στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων data.txt κάναμε δυο διαφορετικές εγγραφές για το ^{226}Ra. Μια για τα μικρά σωματίδια A ($\mathrm{d_A} = 8\,\mu\mathrm{m}$) και μια για τα μεγάλα σωματίδια B($\mathrm{d_B} = 30\,\mu\mathrm{m}$). Σε κάθε εγγραφή δηλώθηκαν σύμφωνα με το εγχειρίδιο του κώδικα [9] η ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης $\mathrm{V_d}$, η ταχύτητα βαρυτικής επικάθησης $\mathrm{V_g}$, η σταθερά διάσπασης του ^{226}Ra και ο ρυθμός εκπομπής ανάλογα εάν πρόκειται για σωματίδια A ή B.

5.6.4.2 Αποτελέσματα της εκτέλεσης

Τα παραγόμενα γραφήματα παρουσιάζονται στα σχήματα 5.23 και 5.24. Παρατηρούμε ότι δεν έχουν ιδιαίτερες διάφορες σε σχέση με τα γραφήματα της εκτέλεσης 15, που παρουσιάζονται στα σχήματα 5.8 και 5.9. Αυτό συμβαίνει διότι όλες οι υπόλοιπες παράμετροι της εκτέλεσης δεν διαφοροποιήθηκαν. Η μέγιστη υπολογιζόμενη συγκέντρωση ^{226}Ra ήταν $6.35\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$. Παρατηρούμε ότι εδώ η μέγιστη συγκέντρωση είναι λίγο χαμηλότερη σε σχέση με τις εκτελέσεις 14, 15 και 16. Αυτό είναι αναμενόμενο διότι τα μεγάλα σωματίδια B λόγω του μεγάλου βάρους τους εγκαταλείπουν γρηγορότερα το πλούμιο. Έτσι οι συγκεντρώσεις του ραδίου στον ατμοσφαιρικό αέρα στην επιφάνεια του εδάφους είναι μικρότερες.

Ο μέγιστος υπολογιζόμενος ρυθμός απόθεσης ^{226}Ra ήταν $0.048\,\mu\mathrm{Bqs}^{-1}\mathrm{m}^{-2}$ και είναι 16.67% αυξημένος σε σχέση με τον αντίστοιχο της εκτέλεσης 15, που ήταν $0.040\,\mu\mathrm{Bqs}^{-1}\mathrm{m}^{-2}$. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού τα μεγάλα σωματίδια των $30\,\mu\mathrm{m}$ έχουν

μεγαλύτερη ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ταχύτητα βαρυτικής επικάθησης V_g των σωματιδίων δεν παίζει κανένα ρόλο στον ρυθμό απόθεσης. Τυχόν αύξηση της απλώς καμπυλώνει το πλούμιο σε μικρότερη απόσταση από την πηγή. Τα παραγόμενα γραφήματα παρουσιάζονται στα σχήματα 5.25 και 5.26. Η μορφή τους είναι παρόμοια με τα γραφήματα των προηγούμενων εκτελέσεων και οι υψηλές τιμές του ρυθμού απόθεσης παρατηρούνται και πάλι βορειοδυτικά του ΑΗΣ4.

5.6.5 Εξέταση της επίδρασης του υψομέτρου στις εκτελέσεις του ORION-II: Εκτελέσεις 18 και 19

Ορισμένα σημεία υπολογισμού που επιλέξαμε, και παρουσιάζονται στο παράρτημα ΣΤ, έχουν μεγαλύτερα υψόμετρα από το ενεργά ύψη πλουμίου των τριών σταθμών, που υπολογίστηκαν στην παράγραφο 5.5.2.4 . Έτσι σύμφωνα με τους Liu and Liptak [116] για να γίνουν υπολογισμοί σε αυτά τα σημεία είναι απαραίτητη η χρήση κωδίκων σύνθετου εδάφους (*Complex terrain models*). Επειδή ο ORION-II δεν διαθέτει τόσο εξελιγμένες εξισώσεις για αυτού του είδους τους υπολογισμούς αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν παραμετρικές εκτελέσεις με βάση τα υψόμετρα, ώστε να διαπιστωθεί η επίδραση τους στα αποτελέσματα. Σημειώνεται ότι όπως και προηγουμένως δεν λήφθηκε υπόψη στα αποτελέσματα η βροχόπτωση.

5.6.5.1 Εκτέλεση 18

Σε αυτή την εκτέλεση, σε όποιες θέσεις το υψόμετρο ήταν μεγαλύτερο από $650\,\mathrm{m}$, τέθηκε στο αρχείο δεδομένων ίσο με $650\,\mathrm{m}$. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρήθηκαν όμοιες με αυτές της εκτέλεσης 15 και ακολούθησε εκτέλεση του κώδικα. Το συγκεκριμένο ύψος επιλέχθηκε, ώστε να είναι σίγουρα χαμηλότερο από το ενεργό ύψος του πλουμίου, και επίσης να είναι παρόμοιο με τα υψόμετρα των περισσότερων ορεινών όγκων που περιβάλλουν την κοιλάδα της Μεγαλόπολης, όπως παρουσιάζονται στο παράρτημα ΣΤ. Τρισδιάστατη απεικόνιση του αναγλύφου της περιοχής μετά την τροποποίηση, που πραγματοποιήθηκε στα υψόμετρα, παρουσιάζεται στο σχήμα 5.27.

Η μέγιστη υπολογιζόμενη συγκέντρωση ^{226}Ra στην εκτέλεση 18 ήταν $7.69\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$ και είναι ελάχιστα μικρότερη από την μέγιστη συγκέντρωση της εκτέλεσης 15, που ήταν $7.99\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$. Στις περισσότερες διευθύνσεις οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις ^{226}Ra δεν διαφέρουν από αυτές της εκτέλεσης 15. Για τις διευθύνσεις, στις οποίες παρατηρούνται διαφορές στις συγκεντρώσεις, κατασκευάστηκαν συγκριτικά διαγράμματα, τα οποία παρουσιάζονται στα σχήματα 5.28, 5.29, 5.30 και 5.31. Οι Στην εκτέλεση 15 προέκυψαν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από ότι στην εκτέλεση 18, διότι στον υπολογισμό που κάνει ο ORION-II στην εκτέλεση 15 το έδαφος είναι πολύ πιο κοντά στο πλούμιο.

Ο μέγιστος ρυθμός απόθεσης ^{226}Ra, που υπολογίστηκε ήταν $0.038\,\mu\mathrm{Bqs}^{-1}\mathrm{m}^{-2}$ και είναι ελάχιστα μικρότερος από αυτόν της εκτέλεσης 15, που ήταν $0.040\,\mu\mathrm{Bqs}^{-1}\mathrm{m}^{-2}$. Στις περισσότερες διευθύνσεις ο υπολογιζόμενος ρυθμός απόθεσης του ^{226}Ra δεν διαφέρει από αυτόν της εκτέλεσης 15. Για τις διευθύνσεις, στις οποίες παρατηρούνται διαφορές στους ρυθμούς απόθεσης, κατασκευάστηκαν συγκριτικά διαγράμματα, τα οποία παρουσιάζονται στα σχήματα 5.32, 5.33, 5.34 και 5.35. Παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα αυτά έχουν την ίδια μορφή με τα αντίστοιχα για τις συγκεντρώσεις του ^{226}Ra. Αυτό συμβαίνει διότι ο ρυθμός απόθεσης όταν δεν υπάρχει υγρή απόθεση είναι ανάλογος της συγκέντρωσης, όπως αναλύθηκε εκτενώς στην παράγραφο 5.6.2.

Ενδιαφέρον έχει να διερευνηθεί με βάση την σχετική θεωρία τι συμβαίνει με τις συγκεντρώσεις στα σημεία αυξημένου υψομέτρου. Σίγουρα στις ασταθείς και πιθανόν στις ουδέτερες συνθήκες το πλούμιο θα ανυψωθεί κατά την διέλευσή του πάνω από έναν ορεινό όγκο, όπως αναφέρει ο Hanna [71, σελ. 161]. Συνεπώς η συγκέντρωση εκεί θα είναι μικρότερη από αυτή, που υπολογίζει ο ORION-II όταν έχουμε εισάγει τα πραγματικά ύψη. Αυτό συμβαίνει διότι ο ORION-II θεωρεί ότι η τροχιά του πλουμίου δεν μεταβάλλεται σε ύψος όταν συναντήσει κάποιο εμπόδιο, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$H_{eds} = H_o + \Delta H_{ds} - L_d - V_g \cdot x \cdot < U_{SW} >^{-1} \tag{5.19}$$

Όπου:
$\mathrm{H_{eds}}$: Η απόσταση του πλουμίου από το έδαφος στο εν λόγω σημείο υπολογισμού
$\mathrm{H_o}$: Το ύψος της καμινάδας από την επιφάνεια της θάλασσας
$\Delta\mathrm{H_{ds}}$: Η ανύψωση του πλουμίου
$\mathrm{L_d}$: Το υψόμετρο του εδάφους από την επιφάνεια της θάλασσας
$\mathrm{V_g}$: Η ταχύτητα βαρυτικής επικάθησης x: Η απόσταση του σημείου υπολογισμού από την καμινάδα
$\mathrm{U_{SW}}$: Η αντίστροφη ταχύτητα του ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου

Δηλαδή στο επίμαχο σημείο το ύψος του πλουμίου θα μειωθεί κατά το ύψος του εμποδίου. Σύμφωνα με την εξίσωση ο ORION-II θεωρεί ότι ότι το πλούμιο δεν ακολουθεί τις διαμορφώσεις του εδάφους αλλά έχει πάντα σταθερό ύψος. Έτσι εάν το $\Delta\mathrm{L_d}$ είναι μεγάλο το $\mathrm{H_{eds}}$ θα μειωθεί πάρα πολύ. Εάν μάλιστα το $\Delta\mathrm{L_d}$ είναι μεγαλύτερο από το αρχικό ενεργό ύψος πλουμίου το τελευταίο θα προσκρούσει στην πλαγιά αφού θα έχω $\mathrm{H_{eds}} = 0$. Ο κώδικας μάλιστα έχει ειδική πρόβλεψη στις ρουτίνες του να θέτει $\mathrm{H_{eds=}}0$ σε αυτή την περίπτωση, όπως φαίνεται στις γραμμές 315, 488, 613 και 965 του αρχείου orion4_.f. Η αρίθμηση των παραπάνω γραμμών σύμφωνα με τον ORION-II είναι ORI14720, ORI16450, ORI17700, ORI21140 αντίστοιχα. Στην πραγματικότητα

το πλούμιο δεν θα προσκρούσει ποτέ στην πλαγιά σε ασταθείς συνθήκες, διότι θα ακολουθεί την διαμόρφωση της και θα ανεβαίνει παράλληλα με αυτή. Έτσι οι πραγματικές συγκεντρώσεις στα σημεία της πλαγιάς θα είναι μικρότερες από αυτές, που υπολογίζει ο ORION-II, αφού τα σημεία της πλαγιάς θα βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση σε σχέση με τον ORION-II από την κεντρική γραμμή του πλουμίου. Στις ευσταθείς συνθήκες ο Hanna [71] αναφέρει ότι το πλούμιο διατηρεί σταθερή ανύψωση. Έτσι το ενεργό ύψος πλουμίου μειώνεται κατά το υψόμετρο του εδάφους. Αν το υψόμετρο του εδάφους είναι μεγαλύτερο από το ενεργό ύψος πλουμίου τότε το πλούμιο ενδέχεται να προσκρούει σε αυτό. Γι' αυτή την περίπτωση βλέπουμε ότι οι εξισώσεις του ORION-II προσεγγίζουν αρκετά καλά την πραγματικότητα.

5.6.5.2 Εκτέλεση 19

Προκειμένου να εξακριβώσουμε την επίδραση του αναγλύφου της περιοχής στα αποτελέσματα θεωρήσαμε σε αυτή την εκτέλεση ότι η περιοχή είναι τελείως επίπεδη και θέσαμε το υψόμετρο του εδάφους σε όλα τα σημεία ίσο με $380\,\mathrm{m}$, το οποίο ισούται με το υψόμετρο του ΑΗΣ1-2,3. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι παρέμειναν σταθερές και ίσες με αυτές της εκτέλεσης 15.

Η μέγιστη υπολογιζόμενη συγκέντρωση ήταν $1.83\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$ και είναι σχετικά χαμηλότερη από αυτή της εκτέλεσης 15, όπως αναμενόταν. Δισδιάστατες και τριασδιάστατες απεικονίσεις των συγκεντρώσεων παρουσιάζονται στα σχήματα 5.36 και 5.37. Βλέπουμε ότι σε αυτή την εκτέλεση η μορφή των διαγραμμάτων είναι διαφορετική και οι υψηλές συγκεντρώσεις παρατηρούνται νοτιοανατολικά των ΑΗΣ1-2,3 σε αντίθεση με την εκτέλεση 15 όπου ήταν βορειοδυτικά του ΑΗΣ4, όπως φαίνεται και στα διαγράμματα 5.8 και 5.9. Αυτό συμβαίνει διότι στην εκτέλεση 15 οι συγκεντρώσεις δυτικά του κέντρου υπολογισμού ήταν υψηλές λόγω του αυξημένου υψομέτρου, οπότε και το πλούμιο βρισκόταν σε μικρότερη απόσταση από το έδαφος.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει να συγκρίνουμε τις συγκεντρώσεις των δύο εκτελέσεων σε κάθε διεύθυνση υπολογισμού. Στις διευθύνσεις από $45\,^\circ$-$225\,^\circ$ καθώς και $337.5\,^\circ$ οι συγκεντρώσεις είναι όμοιες. Στις διευθύνσεις $247.5\,^\circ$, $270\,^\circ$, $292.5\,^\circ$ και $315\,^\circ$ οι συγκεντρώσεις τις παρούσας εκτέλεσης είναι μειωμένες σε σύγκριση με αυτές της εκτέλεσης 15 στα σημεία, όπου είχαμε μεγάλα υψόμετρα. Στα σχήματα 5.38, 5.39, 5.40 και 5.41 παρουσιάζονται τα συγκριτικά γραφήματα για τις διευθύνσεις, που παρατηρούνται διαφορές.

Σύμφωνα με τα παραπάνω για την εκτέλεση 19 συμπεραίνουμε τα ακόλουθα: Οι συγκεντρώσεις στα σημεία μεγάλου υψομέτρου είναι χαμηλότερες σε σχέση με αυτές της εκτέλεσης 15. Στα σημεία, όπου δεν έχουμε μεγάλα υψόμετρα οι συγκεντρώσεις δεν παρουσιάζουν διαφορές.

Όσον αφορά στον ρυθμό απόθεσης ^{226}Ra η μέγιστη τιμή του ήταν $0.0091\,\mu\mathrm{Bqs}^{-1}\mathrm{m}^{-2}$

και είναι αρκετά μειωμένη σε σχέση με την εκτέλεση 15, που ήταν $0.040\,\mu\mathrm{Bqs}^{-1}\mathrm{m}^{-2}$. Δισδιάστατες και τρισδιάστατες απεικονίσεις του ρυθμού απόθεσης παρουσιάζονται στα σχήματα 5.42 και 5.43. Παρατηρούμε ότι οι οι τιμές είναι σχετικά ομοιόμορφα κατανεμημένες στο επίπεδο και η μέγιστη τιμή παρατηρείται βορειοδυτικά του ΑΗΣ1-2,3 σε πολύ μικρή απόσταση. Συγκρίνοντας με τις τιμές της εκτέλεσης 15 στις αντίστοιχες διευθύνσεις διαπιστώνουμε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις είναι όμοιες. Διαφοροποιήσεις έχουμε στις διευθύνσεις $247.5\,^{\circ}$, $270\,^{\circ}$, $292.5\,^{\circ}$ και $315\,^{\circ}$. Τα σχετικά διαγράμματα παρουσιάζονται στα σχήματα 5.44, 5.45, 5.46 και 5.47. Παρατηρούμε ότι η μορφή τους είναι όμοια με τα αντίστοιχα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων αφού ο ρυθμός απόθεσης είναι ανάλογος της συγκέντρωσης όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.6.5.1. Σύμφωνα με τα παραπάνω για την εκτέλεση 19 συμπεραίνουμε ότι οι ρυθμοί απόθεσης στα σημεία μεγάλου υψομέτρου είναι χαμηλότεροι σε σχέση με αυτούς της εκτέλεσης 15. Στα σημεία, όπου δεν έχουμε μεγάλα υψόμετρα οι ρυθμοί δεν παρουσιάζουν διαφορές.

5.6.6 Εξέταση της επίδρασης της βροχόπτωσης στα αποτελέσματα του ORION-II: Εκτελέσεις 20, 21 και 22

5.6.6.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να διερευνήσουμε την επίδρασή της βροχής στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις από τον ORION-II αποφασίστηκε να γίνουν οι οι εκτελέσεις που παρουσιάζονται στην παράγραφο αυτή. Για την εκτέλεση του κώδικα χρειάζεται να γνωρίζουμε το ποσοστό του χρόνου, που σημειώθηκε βροχόπτωση στην υπό μελέτη περίοδο, καθώς και έναν μέσο ρυθμό αφαίρεσης των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας από την ατμόσφαιρα λόγω βροχόπτωσης (*precipitation scavenging rate*) Λ_{p}. Ο Λ_{p} μπορεί να υπολογιστεί από σχετικό πίνακα, που παρέχουν οι Boubel et al. [18, σελ. 288] σε συνάρτηση με την διάμετρο των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας καθώς και τον ρυθμό βροχόπτωσης (mmhour^{-1}).

Το πρόβλημα, που είχαμε να αντιμετωπίσουμε, ήταν ότι δεν είχαμε στην διάθεσή μας δεδομένα για την βροχοπτώση στην περιοχή της Μεγαλόπολης και συνεπώς δεν είχαμε κάποια εκτίμηση τόσο για τον ρυθμό βροχόπτωσης όσο και για το ποσοστό του χρόνου, που σημειώθηκε βροχόπτωση στην υπό μελέτη περίοδο. Έτσι αποφασίσαμε να επιλέξουμε κατ' εκτίμηση τιμές για τα δύο αυτά μεγέθη και να γίνει παραμετρική εκτέλεση του ORION-II, ώστε να διαπιστωθεί η επίδρασή τους στις προκύπτουσες συγκεντρώσεις. Οι Zeevaert et al. [213] πάντως στις εκτελέσεις του μοντέλου τους επιλέγουν κατ' εκτίμηση $\Lambda_{\mathrm{p}} = 5 \times 10^{-5}\,\mathrm{sec}^{-1}$.

Στις εκτελέσεις αυτές όλες οι παράμετροι ήταν ίδιες με αυτές της εκτέλεσης 15, η οποία είναι βασισμένη στο 1ο μετεωρολογικό σενάριο. Η μόνη διαφοροποίηση ήταν η

εισαγωγή βροχόπτωσης.

5.6.6.2 Εκτέλεση 20

Σαν μια πρώτη προσέγγιση επιλέξαμε ως ποσοστό χρόνου, που σημειώθηκε βροχόπτωση, το 15%. Όσον αφορά το Λ_{p} μπορεί να υπολογιστεί από τον πίνακα, που παρέχει ο Boubel [18, σελ. 288]. Χρειαζόμαστε όμως την διάμετρο του σωματιδίου της ιπτάμενης τέφρας και τον ρυθμό βροχόπτωσης (mmh^{-1}). Επειδή δεν είχαμε ακριβή στοιχεία για τον ρυθμό βροχόπτωσης επιλέξαμε κατ' εκτίμηση μια τιμή για το Λ_{p} και θα δούμε ακολούθως πως επηρεάζει τις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις. Γνωρίζουμε ότι ο παράγοντας απομείωσης του πλουμίου λόγω βροχόπτωσης δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση [9]:

$$f_{pi} = exp(-F_{pr} \cdot \Lambda_p \cdot x \cdot U^{-1}) \tag{5.20}$$

Όπου:

$\mathrm{F_{pr}}$: Το ποσοστό του χρόνου, όπου σημειώθηκε βροχόπτωση

x: Η απόσταση του σημείου από την πηγή εκπομπής

U: Η ταχύτητα του ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου

Βλέπουμε λοιπόν ότι όσο αυξάνει το Λ_{p} τόσο μειώνεται το $\mathrm{F_{pi}}$. Η υπολογιζόμενη συγκέντρωση είναι ανάλογη του $\mathrm{F_{pi}}$. Επομένως όσο αυξάνει το Λ_{p} τόσο θα μειώνεται η υπολογιζόμενη συγκέντρωση. Δηλαδή όσο αυξάνει ο Λ_{p} τόσο αυξάνει η ποσότητα των σωματιδίων, που παρασύρονται, και επομένως μειώνεται η συγκέντρωση των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Επιλέγουμε διάμετρο σωματιδίων d =8μμ και με βάση το διάγραμμα του Boubel κάνουμε δοκιμαστικούς υπολογισμούς:

- rainfall rate=$1\,\mathrm{mmh}^{-1} \rightarrow \Lambda_{\mathrm{p}} = 1.7 \times 10^{-4}\,\mathrm{sec}^{-1}$
- rainfall rate=$3\,\mathrm{mmh}^{-1} \rightarrow \Lambda_{\mathrm{p}} = 4 \times 10^{-4}\,\mathrm{sec}^{-1}$
- rainfall rate=$5\,\mathrm{mmh}^{-1} \rightarrow \Lambda_{\mathrm{p}} = 6 \times 10^{-4}\,\mathrm{sec}^{-1}$

Ερευνώντας στην βιβλιογραφία βρήκαμε ότι οι Zeevaert et al. [213] προκειμένου να κάνουν παρόμοιες εκτελέσεις με αυτές της παρούσας ΔΔ υπέθεσαν ότι $\Lambda_{\mathrm{p}} = 5 \times 10^{-5}\,\mathrm{sec}^{-1}$. Εμείς επιλέγουμε rainfall rate=$3\,\mathrm{mmh}^{-1}$ και $\Lambda_{\mathrm{p}} = 4 \times 10^{-4}\,\mathrm{sec}^{-1}$, ο οποίος είναι ένας μέσος ρυθμός βροχόπτωσης, όπως φαίνεται από το διάγραμμα του Boubel. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται όμοιες με αυτές της εκτέλεσης 15.

Συγκρίνοντας τις συγκεντρώσεις αυτής της εκτέλεσης με τις αντίστοιχες της εκτέλεσης 15 διαπιστώνουμε ότι είναι σχεδόν όμοιες. Συγκρίνοντας τα αρχεία των αποτελεσμάτων διαπιστώσαμε ότι στα σημεία, όπου υπάρχουν διαφορές, αυτές είναι πολύ μικρές και τις περισσότερες φορές εντοπίζονται στο 2ο η στο 3ο δεκαδικό. Ακόμα και όταν είναι στο 1ο δεκαδικό η διαφορά είναι 1 ή το πολύ 2 μονάδες. Επειδή αυτές οι

διαφορές δεν είναι αξιόλογες δεν παραθέτουμε νέα διαγράμματα συγκεντρώσεων καθώς είναι όμοια με αυτά της εκτέλεσης 15.

Αντίθετα οι υπολογιζόμενοι ρυθμοί απόθεσης ^{226}Ra ήταν αρκετά διαφορετικοί σε σχέση με την εκτέλεση 15. Η μέγιστη υπολογιζόμενη τιμή σε αυτή την εκτέλεση ήταν $0.25\,\mu\mathrm{Bqs}^{-1}\mathrm{m}^{-2}$. Η τιμή αυτή είναι 6.25 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της εκτέλεσης 15. Τα δισδιάστατα και τρισδιάστατα διαγράμματα του ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra παρουσιάζονται στα σχήματα 5.48 και 5.49. Παρατηρούμε μάλιστα ότι η μορφή των διαγραμμάτων είναι αρκετά διαφορετική από ό,τι στις εκτελέσεις χωρίς την ύπαρξη βροχόπτωσης. Εδώ οι υψηλές τιμές παρατηρούνται αρκετά κοντά στους ΑΗΣ. Αυτό συμβαίνει διότι λόγω της βροχής ένα μεγάλο μέρος των σωματιδίων εναποτίθεται σε μικρό χρονικό διάστημα αφότου εγκαταλείψει τις καμινάδες. Βλέπουμε λοιπόν ότι η ύπαρξη κατακρημνίσεων αυξάνει σημαντικά τον ρυθμό απόθεσης ^{226}Ra, όπως ήταν αναμενόμενο.

Οι Rouni et al. [157] πραγματοποίησαν μετρήσεις ^{226}Ra στο επιφανειακό χώμα στην περιοχή της Μεγαλόπολης. Σε αυτές τις μετρήσεις παρατηρήθηκαν βόρεια των ΑΗΣ υψηλές συγκεντρώσεις ^{226}Ra, οι οποίες κυμαίνονταν από $100\text{-}337\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.57. Τα σημεία των υψηλών αποθέσεων ^{226}Ra, όπως προσδιορίστηκαν σε αυτή την εκτέλεση του ORION-II, δεν ταυτίζονται με τα σημεία των υψηλών συγκεντρώσεων ^{226}Ra, που προσδιορίστηκαν από τους Rouni et al. [157], όπως φαίνεται στο σχήμα 5.50. Υπολογίζοντας τον χρόνο, που χρειάζεται για να επιτευχθεί συγκέντρωση ^{226}Ra στο χώμα ίση με $100\,\mathrm{Bqkgr}^{-1}$ σύμφωνα με τον μέγιστο ρυθμό απόθεσης ^{226}Ra, που υπολογίστηκε από τον ORION-II, διαπιστώνουμε ότι απαιτούνται 126 έτη. Σημειώνεται ότι για την πυκνότητα του χώματος δεχτήκαμε ότι είναι ίση με $1\,\mathrm{grcm}^{-3}$. Έχοντας υπόψη μας τα παραπάνω και το ότι ο παλαιότερος σταθμός εγκαταστάθηκε στην περιοχή πριν από περίπου 40 έτη συμπεραίνουμε ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ^{226}Ra σε σχέση με την υπόλοιπη περιοχή, που έχουν παρατηρηθεί βόρεια των ΑΗΣ, δεν φαίνεται να οφείλονται σε εναπόθεση διασπειρόμενων σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας από τους ΑΗΣ αλλά στο φυσικά περιεχόμενο ^{226}Ra στο έδαφος.

5.6.6.3 Εκτέλεση 21

Προκειμένου να διαπιστώσουμε την επίδραση του ποσοστού χρόνου βροχόπτωσης αυξήσαμε την τιμή του από 15% σε 30%. Τα υπόλοιπα στοιχεία παρέμειναν ακριβώς ίδια και ακολουθησε εκτέλεση.

Συγκρίνοντας τις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις με τις αντίστοιχες της εκτέλεσης 20 διαπιστώνουμε ότι οι διαφορές, που υπάρχουν είναι ελάχιστες. Είναι της ίδιας τάξης μεταξύ της εκτέλεσης 15 και της εκτέλεσης 20. Λίγο μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται στις διευθύνσεις $247.5\,^{\circ}$, $270\,^{\circ}$, $292.5\,^{\circ}$ και $315\,^{\circ}$ και μάλιστα για ακτίνες μεγαλύτερες των $6000\,\mathrm{m}$, όπου έχουμε αυξημένα υψόμετρα.

Αντίθετα ο ρυθμός απόθεσης του ^{226}Ra στο έδαφος επηρεάστηκε σημαντικά από την αύξηση του χρόνου βροχόπτωσης και η μέγιστη υπολογιζόμενη τιμή ήταν $0.50\,\mu\mathrm{Bqs^{-1}m^{-2}}$, διπλάσιος δηλαδή από τον αντίστοιχο της εκτέλεσης 20. Βλέπουμε δηλαδή ότι διπλασιασμός του ποσοστού χρόνου βροχόπτωσης οδηγεί και σε διπλασιασμό του ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra. Η μορφή των δισδιάστατων και τρισδιάστατων διαγραμμάτων, που παρουσιάζονται στα σχήματα 5.51 και 5.52, είναι παρόμοια με τα αντίστοιχα διαγράμματα της εκτέλεσης 20, πράγμα που ήταν αναμενόμενο αφού δεν άλλαξε κάποιος άλλος παράγοντας της εκτέλεσης.

5.6.6.4 Εκτέλεση 22

Θέλοντας να διαπιστώσουμε την επίδραση του Λ_p στα αποτελέσματα πραγματοποιήσαμε εκτέλεση με $\Lambda_\mathrm{p} = 6 \times 10^{-4}\,\mathrm{sec}^{-1}$. Το ποσοστό χρόνου βροχόπτωσης διατηρήθηκε στο 30% όμοιο με αυτό της εκτέλεσης 21.

Συγκρίνοντας το αρχείο των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra της εκτέλεσης 22 με αυτό της εκτέλεσης 15 διαπιστώνουμε ότι οι διαφορές, που υπάρχουν, είναι ελάχιστες και ουσιαστικά είναι αμελητέες, όπως και στις εκτελέσεις 20 και 21. Δηλαδή οι συγκεντρώσεις ^{226}Ra στην ατμόσφαιρα στην επιφάνεια του εδάφους παραμένουν πρακτικά σταθερές και δεν επηρεάζονται από την ύπαρξη βροχόπτωσης

Αντίθετα οι υπολογιζόμενοι ρυθμοί απόθεσης ^{226}Ra ήταν αυξημένοι σε σχέση με την εκτέλεση 21. Η μέγιστη τιμή, που υπολογίστηκε ήταν $0.74\,\mu\mathrm{Bqs^{-1}m^{-2}}$ και ήταν 33.3% αυξημένη σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή της εκτέλεσης 21. Παρατηρούμε λοιπόν ότι αύξηση του Λ_p προκαλεί σημαντική αύξηση στον ρυθμό απόθεσης ^{226}Ra. Τα δισδιάστα και τρισδιάστατα διαγράμματα του ρυθμού απόθεσης παρουσιάζονται στα σχήματα 5.53 και 5.54 και έχουν την ίδια μορφή με αυτά των εκτελέσεων 20 και 21, γεγονός αναμενόμενο αφού δεν μεταβλήθηκε κάποιος άλλος παράγοντας της εκτέλεσης.

5.6.7 Εξέταση της επίδρασης της τιμής της τοπικής ώρας στα αποτελέσματα του ORION-II: Εκτέλεση 23

Αυτή η εκτέλεση πραγματοποιήθηκε με βάση το 2ο μετεωρολογικό σενάριο, που κατασκευάσαμε, προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση της της τοπικής ώρας (*Local standard time*) στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις. Περισσότερα για το 2ο μετεωρολογικό σενάριο μπορεί να δει ο αναγνώστης στην παράγραφο 5.5.3.

Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι παρέμειναν σταθερές και όμοιες με αυτές της εκτέλεσης 15. Η μέγιστη υπολογιζόμενη συγκέντρωση ^{226}Ra ήταν $8.05\,\mu\mathrm{Bqm^{-3}}$ και είναι σχεδόν στα ίδια επίπεδα με αυτήν της εκτέλεσης 15. Στις περισσότερες διευθύνσεις οι συγκεντρώσεις είναι όμοιες με αυτές της εκτέλεσης 15. Σε ορισμένες διευθύνσεις παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις, οι οποίες όμως δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Εν-

δεικτικά παρουσιάζουμε τα γραφήματα 5.55 και 5.56, τα οποία αντιστοιχούν στις διευθύνσεις $67.5\,^{\circ}$ και $157.5\,^{\circ}$.

Ο μέγιστος ρυθμός ήταν $0.04\,\mu\mathrm{Bqs}^{-1}\mathrm{m}^{-2}$ και η τιμή αυτή είναι ίση με αυτή, που προέκυψε από την εκτέλεση 15. Οι υπολογιζόμενοι ρυθμοί απόθεσης είναι όμοιοι στις περισσότερες διευθύνσεις με τους αντίστοιχους της εκτέλεσης 15. Σε ορισμένες διευθύνσεις παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις χωρίς να είναι όμως ιδιαίτερα σημαντικές. Κατ' αναλογία συμβαίνει ό,τι και με τις συγκεντρώσεις αφού στην περίπτωση, που δεν έχουμε κατακρημνίσεις ο ρυθμός απόθεσης είναι ανάλογος της συγκέντρωσης, όπως φαίνεται και από την εξίσωση 5.18.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι όταν η τοπική ώρα μεταβάλλεται στα όρια, που μπορούμε να επιλέξουμε, οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις και ο ρυθμός απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος δεν μεταβάλλονται σημαντικά.

5.6.8 Συμπεράσματα που προέκυψαν από τις παραμετρικές εκτελέσεις του ORION-II

Στον πίνακα 5.40 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι εκτελέσεις, οι οποίος πραγματοποιήθηκαν με τον κώδικα ORION-II. Στον εν λόγω πίνακα αναφέρονται η μεταβαλλόμενη παράμετρος, η μέγιστη υπολογιζόμενη συγκέντρωση και ο μέγιστος ρυθμός απόθεσης. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

- Η μεταβολή της ταχύτητας ξηρής εναπόθεσης $\mathrm{V_d}$ έχει πολύ μικρή επίδραση στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις ^{226}Ra στον ατμοσφαιρικό αέρα στην επιφάνεια του εδάφους από τον ORION-II. Αντίθετα αύξηση της ταχύτητας ξηρής εναπόθεσης προκαλεί αξιοσημείωτη αύξηση στον ρυθμό απόθεσης του ^{226}Ra στο έδαφος.

- Η ύπαρξη μεγάλων σωματιδίων τέφρας ($\mathrm{d_B} = 30\,\mu\mathrm{m}$) στο πλούμιο μειώνει τις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις, καθώς αυτά τα σωματίδια τείνουν να εγκαταλείπουν νωρίτερα το πλούμιο. Αντίθετα ο ρυθμός απόθεσης του ^{226}Ra στο έδαφος παρουσιάζεται αυξημένος κατά 16.67% λόγω τις ύπαρξης των χονδρόκοκκων σωματιδίων, τα οποία έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης.

- Οι εξισώσεις του ORION-II για την διασπορά ρύπων σε περιοχές με υψόμετρα μεγαλύτερα από το ενεργό ύψος πλουμίου δεν περιγράφουν ικανοποιητικά το φαινόμενο και οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις αναμένεται να είναι σχετικά μεγαλύτερες από τις πραγματικές.

- Η βροχόπτωση δεν φαίνεται να επηρεάζει ιδιαίτερα τις συγκεντρώσεις ^{226}Ra στον ατμοσφαιρικό αέρα στην επιφάνεια του εδάφους, που υπολογίζει ο ORION-II.

Αντίθετα ο ρυθμός απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος εξαρτάται σημαντικά από το φαινόμενο. Αύξηση του ποσοστού χρόνου βροχόπτωσης προκαλεί ανάλογη αύξηση στον ρυθμό απόθεσης του ^{226}Ra. Επίσης αύξηση του ρυθμού αφαίρεσης των σωματιδίων από την ατμόσφαιρα λόγω βροχόπτωσης Λ_{p} προκαλεί αύξηση του ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra.

- Η εκλογή της τοπικής ώρας (*Local standard time*) κατά την κατασκευή των μετεωρολογικών σεναρίων φαίνεται ότι δεν είναι κρίσιμος παράγοντας, καθώς η αλλαγή της δεν έχει ιδιαίτερη επίδραση στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις και στον ρυθμό απόθεσης του ^{226}Ra.

- Από τις εκτελέσεις, που έγιναν χωρίς δεδομένα βροχόπτωσης, η εκτέλεση 15 παρουσιάζεται ως η πλέον αντιπροσωπευτική με βάση της δυνατότητες, που διαθέταμε. Όσον αφορά στις εκτελέσεις με βροχόπτωση η έλλειψη σχετικών δεδομένων δεν μας επιτρέπει να αποφανθούμε για το ποια εκτέλεση πλησιάζει περισσότερο την πραγματικότητα. Με την βοήθεια όμως των παραμετρικών εκτελέσεων μπορέσαμε να διαπιστώσουμε την επίδραση της βροχόπτωσης στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις και στον ρυθμό απόθεσης του ^{226}Ra.

- Οι υψηλότερες σε σχέση με την υπόλοιπη περιοχή συγκεντρώσεις ^{226}Ra στο χώμα, που παρατηρήθηκαν βόρεια των ΑΗΣ από τους Rouni et al. [157], δεν οφείλονται σε εναπόθεση διασπειρόμενης τέφρας από τους σταθμούς, αλλά μάλλον στο φυσικά περιεχόμενο ^{226}Ra στο έδαφος. Χάρτης των συγκεντρώσεων του ^{226}Ra στο επιφανειακό χώμα $1\,\mathrm{cm}$ στην περιοχή της Μεγαλόπολης, όπως μετρήθηκαν από τους Rouni et al. [157] παρουσιάζεται στο σχήμα 5.57.

5.7 Παρουσίαση των εκτελέσεων που πραγματοποιήθηκαν με τον κώδικα GENII

5.7.1 Εισαγωγή

Ο κώδικας GENII είναι ένας κώδικας με πολλές δυνατότητες στον υπολογισμό διασποράς ραδιενεργών ρύπων και ανάμεσα στις άλλες δυνατότητές του είναι και ο υπολογισμός της ατμοσφαρικής διασποράς ραδιενεργών ισοτόπων. Περισσότερα μπορεί να δει ο αναγνώστης στην παράγραφο 3.3. Χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας ΔΔ ως εναλλακτικός κώδικας λόγω ορισμένων πλεονεκτημάτων, που διαθέτει όπως η δυνατότητά του να συμπεριλαμβάνει στους υπολογισμούς ισότοπα, που ανήκουν σε ραδιενεργές αλυσίδες. Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν οι εκτελέσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με τον κώδικα GENII καθώς και ο υπολογισμός παραμέτρων

απαραίτητων για την εκτέλεση του εν λόγω κώδικα.

5.7.2 Υπολογισμός των συντεταγμένων των ΑΗΣ1,2-3 και ΑΗΣ4 στο σύστημα συντεταγμένων του GENII

Ο GENII για τον ορισμό των θέσεων των πηγών εκπομπής χρησιμοποιεί σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων. Η θέση κάθε πηγής ορίζεται σύμφωνα με την ανατολική συντεταγμένη (*easting coordinate*) και την βόρεια συντεταγμένη (*northing coordinate*) από το κέντρο υπολογισμού που έχουμε ορίσει, όπως αναφέρει το εγχειρίδιο χρήσης του κώδικα [127].

Ως κέντρο υπολογισμού ορίζουμε αυτό, που χρησιμοποιήσαμε στον ORION-II, και έχει γεωγραφικές συντεταγμένες ϕ=37.415 409 °, λ=22.086 857 °. Με βάση αυτό το κέντρο οι συντεταγμένες του ΑΗΣ4 υπολογίζονται σχετικά εύκολα ως εξής: Ο ΑΗΣ4 βρίσκεται σε γωνία $270\,^\circ$ σε σχέση με την διεύθυνση του Βορρά. Συνεπώς θα έχει βόρεια συντεταγμένη ίση με $0\,\mathrm{m}$ ενώ η ανατολική του συντεταγμένη θα είναι ίση με την απόσταση του από το κέντρο υπολογισμού και συνεπώς ίση με $-1854.9\,\mathrm{m}$.

Ο υπολογισμός της θέσης του ΑΗΣ1,2-3 είναι κάπως πιο περίπλοκος. Στο σχήμα 5.58 φαίνεται η θέση του σταθμού σε σχέση με το κέντρο υπολογισμού. Εμείς γνωρίζουμε από τις αποστάσεις CB και CA των σημείων A και B από το κέντρο υπολογισμού C, όπως υπολογίστηκαν στην παράγραφο 5.4.2. Εφαρμόζοντας το πυθαγόρειο θεώρημα έχουμε ότι $\mathrm{AB} = 205.4\,\mathrm{m}$. Συνεπώς οι συντεταγμένες του ΑΗΣ1-2,3 θα είναι: Ανατολική συντεταγμένη=$1851.2\,\mathrm{m}$ και βόρεια συντεταγμένη=$205.4\,\mathrm{m}$. Αναλυτικά οι συντεταγμένες και των δύο σταθμών παρουσιάζονται στον πίνακα 5.41

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι ο GENII έχει την δυνατότητα να κάνει υπολογισμό για μόνο 10 διαφορετικές ακτίνες από το κέντρο υπολογισμού. Έτσι αποφασίσαμε να πραγματοποιήσουμε υπολογισμούς για ακτίνες $1000\,\mathrm{m}$ εώς $10\,000\,\mathrm{m}$ με βήμα $1000\,\mathrm{m}$. Δηλαδή θα γίνουν υπολογισμοί για ακτίνες $1000\,\mathrm{m}$, $2000\,\mathrm{m}$, ... $10\,000\,\mathrm{m}$.

5.7.3 Η τροποποίηση της μορφής του 1ου μετεωρολογικού σεναρίου ώστε να είναι δυνατή ή χρήση του στον GENII

Ο GENII χρησιμοποιεί για την εισαγωγή των μετεωρολογικών δεδομένων την μορφή STAR [127]. Η μορφή αυτή χρησιμοποιεί τους 16 γνωστούς τομείς διεύθυνσης ανέμου, που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.2.2, τις 6 κλάσεις ατμοσφαιρικής ευστάθειας κατά P-G και 6 κλάσεις ταχύτητας ανέμου. Αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 5.42:

Κάθε εγγραφή είναι το ποσοστό χρόνου, που αντιστοιχεί σε έναν συνδυασμό διεύθυνσης ανέμου, κλάσης ατμοσφαιρικής ευστάθειας και κλάσης ταχύτητας ανέμου. Το αρχείο μετεωρολογικών δεδομένων μορφής STAR αποτελείται από 96 γραμμές και 6

στήλες. Οι 16 πρώτες γραμμές αντιστοιχούν στις 16 διευθύνσεις ανέμου ατμοσφαιρικής ευστάθειας A, οι 16 επόμενες στις 16 διευθύνσεις ανέμου ευστάθειας B κ.ο.κ. Η 1η στήλη αντιστοιχεί στην 1η κλάση ταχύτητας ανέμου, η 2η στήλη στην 2η κλάση ταχύτητας ανέμου κοκ. Στον μήτρα, που δημιουργείται με τον παραπάνω τρόπο ο χρήστης δηλώνει σε κάθε θέση την συχνότητα εμφάνισης αυτής της ατμοσφαιρικής συνθήκης. Περισσότερα μπορεί να δει ο αναγνώστης στην βιβλιογραφία [127].

Η μορφή αυτή δήλωσης των μετεωρολογικών δεδομένων είναι λίγο διαφορετική από αυτή που χρησιμοποιεί ο ORION-II. Για αυτό τον λόγο ήταν απαραίτητο να γίνει μετατροπή σε αυτή την μορφή του 1ου μετεωρολογικού σεναρίου, το οποίο παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.5.2. Σε αυτό το μετεωρολογικό σενάριο γνωρίζουμε την μέση ταχύτητα ανέμου ανά διεύθυνση ανέμου και ατμοσφαιρική ευστάθεια καθώς και την αντίστοιχη συχνότητα εμφάνισης. Έτσι με βάση τις κλάσεις ανέμου, που αναφέρθηκαν παραπάνω, κατανεμήθηκαν οι εγγραφές του 1ου μετεωρολογικού σεναρίου στις αντίστοιχες του αρχείου μετεωρολογικών δεδομένων του GENII. Το συγκεκριμένο αρχείο, που ονομάστηκε metScen01.str παρατίθεται στο παράρτημα Z′.

Σημειώνεται ότι στους υπολογισμούς, που πραγματοποιεί ο GENII, χρησιμοποιεί για κάθε κλάση ταχύτητας ανέμου μια τιμή ταχύτητας. Ο κώδικας διαθέτει προεπιλεγμένες τιμές αλλά ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ορίσει τις δικές του τιμές εάν θέλει. Στην παρούσα ΔΔ χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες τιμές του GENII, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 5.42

Ο GENII ζητάει επίσης τις μηνιαίες ελάχιστες και μέγιστες θερμοκρασίες της περιοχής. Αυτές λαμβάνονται από τους πίνακες της ΕΜΥ [220] για την περιοχή της Τρίπολης καθώς δεν έχουμε στην διάθεση μας τιμές για την Μεγαλόπολη.

5.7.4 Εκλογή παραμέτρων για την εκτέλεση του GENII

Προκειμένου να εκτελεστεί ο GENII είναι απαραίτητη η δήλωση ορισμένων παραμέτρων. Για την θέση του μετεωρολογικού σταθμού, που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ζητούνται τα ακόλουθα στοιχεία:

- Γεωγραφικό πλάτος του μετεωρολογικού σταθμού. Δηλώθηκε το γεωγραφικό πλάτος, που έχει το κέντρο υπολογισμού, διότι δεν διατίθεται η ακριβή θέση του σταθμού.
- Ύψος ανεμομέτρου από το έδαφος: $10\,\mathrm{m}$. Για περισσότερα βλ. 5.2.2.
- Τραχύτητα επιφανείας στο σημείο μέτρησης (αλλιώς αεροδυναμικό ύψος επιφάνειας στο εν λόγω σημείο): $0.1\,\mathrm{m}$. Για περισσότερα βλ. 5.2.2.
- Τραχύτητα επιφανείας στο σημείο εφαρμογής (αλλιώς αεροδυναμικό ύψος επιφάνειας στο εν λόγω σημείο): $0.1\,\mathrm{m}$. Για περισσότερα βλ. 5.2.2.

Επίσης ο GENII ζητάει το μέγεθος των σωματιδίων, που εκπέμπονται από τους ΑΗΣ. Σύμφωνα με αυτά, που αναπτύχθηκαν στις παραγράφους 5.2.3 και 5.6.8, δηλώθηκε διάμετρος σωματιδίων d=8 $\mu\mathrm{m}$. Τέλος τα κατασκευαστικά δεδομένα διατηρήθηκαν όμοια με αυτά στις εκτελέσεις του ORION-II.

5.7.5 Δεδομένα εκπομπών ραδιοϊσοτόπων για την εκτέλεση του GENII

Όπως έχει αναφερθεί ο κώδικας GENII έχει την δυνατότητα να κάνει υπολογισμούς για ισότοπα, που ανήκουν σε ραδιενεργές αλυσίδες. Διαθέτει βιβλιοθήκη φυσικών και τεχνητών ισοτόπων, όπου υπάρχουν καταχωρημένα τα ισότοπα των ραδιενεργών σειρών, οι χρόνοι ημιζωής τους και οι μεταξύ τους σχέσεις (παραγωγή - κατανάλωση). Σημειώνεται ότι στην βιβλιοθήκη έχουν καταχωρηθεί μόνο τα μακρόβια ισότοπα, που έχουν χρόνο ημιζωής μεγαλύτερο από $10\,\mathrm{min}$ [128, σελ. 15]. Όταν επιλεχθεί ένα πατρικό ισότοπο από τον χρήστη τα θυγατρικά του επιλέγονται αυτόματα. Έτσι εάν ο χρήστης δηλώσει το ^{226}Ra ως ισότοπο εκπομπής αυτόματα ο κώδικας θεωρεί ότι εκπέμπονται και τα θυγατρικά ισότοπα ^{222}Rn, ^{210}Bi, ^{210}Pb και ^{210}Po. Δηλώνοντας το ^{238}U ο κώδικας θεωρεί ότι εκπέμπεται και το θυγατρικό του ^{234}Th. Τέλος με δήλωση του ^{232}Th ο κώδικας θεωρεί ότι εκπέμπονται και τα θυγατρικά ^{228}Th, ^{228}Ra, ^{224}Ra και ^{212}Pb.

Ο κώδικας λαμβάνει υπόψη του τόσο την εκπομπή των ισοτόπων από τις καμινάδες όσο και την παραγωγή θυγατρικών κατά την φάση της διασποράς. Όσον αφορά στο ^{222}Rn, που είναι αέριο, ο κώδικας θεωρεί ότι όλη η ποσότητα, η οποία παράγεται από την διάσπαση του ^{226}Ra στο εσωτερικό των σωματιδίων της τέφρας, διαφεύγει στην ατμόσφαιρα. Αυτό δεν είναι απόλυτα ρεαλιστικό διότι μεγάλη ποσότητα του παραγόμενου ραδονίου παραμένει στο εσωτερικό της τέφρας όπως είναι γνωστό από την βιβλιογραφία [46], [120]. Αυτή η θεώρηση γίνεται διότι είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί η συμπεριφορά του ραδονίου στην ιπτάμενη τέφρα. Σύμφωνα με αυτή την θεώρηση οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις ραδονίου θα είναι μεγαλύτερες από τις πραγματικές.

Με βάση τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι είναι απαραίτητη η γνώση της συγκέντρωσης αυτών των στερεών ισοτόπων στην εκπεμπόμενη τέφρα, όσο και της ποσότητας του ραδονίου, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εκτέλεση. Στην συνέχεια θα γίνει αναφορά σε κάθε ισότοπο και στον τρόπο, που υπολογίστηκε η συγκέντρωση του στην ιπτάμενη τέφρα, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ.

5.7.5.1 Συγκέντρωση του ^{238}U στην ιπτάμενη τέφρα, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4

Στην έρευνα, που πραγματοποίησε το ΕΠΤ-ΕΜΠ, στον ΑΗΣ4 της Μεγαλόπολης [97] δεν επιβεβαιώθηκε στατιστικά ότι η συγκέντρωση του ^{238}U αυξάνει όσο μειώνεται το μέγεθος του κόκκου της τέφρας, ότι έχουμε δηλαδή εμπλουτισμό των σωματιδίων της τέφρας σε ^{238}U. Έτσι δεχόμαστε ότι τα σωματίδια της τέφρας, που διαφεύγουν από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 έχουν συγκέντρωση ^{238}U ίση με την μέση τιμή που παρέχουν οι Karangelos et al.[97] για την τέφρα του ΑΗΣ4, η οποία είναι $964\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$. Αυτή η παραδοχή δεν είναι μακρυά από την πραγματικότητα καθώς η ποιότητα του λιγνίτη είναι κοινή για όλους τους σταθμούς.

5.7.5.2 Συγκέντρωση του ^{234}Th στην ιπτάμενη τέφρα, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4

Σχετικά τώρα με την συγκέντρωση του ^{234}Th στην ιπτάμενη τέφρα, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ, οι Zeevaert et al.[213] θεωρούν ότι η συγκέντρωση του ^{234}Th είναι ίση με αυτή του ^{238}U. Έτσι δεχόμαστε ότι η συγκέντρωση του ^{234}Th θα είναι $964\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$.

5.7.5.3 Συγκέντρωση του ^{226}Ra στην ιπτάμενη τέφρα, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4

Για τους λόγους, που αναλύθηκαν στην παράγραφο 5.3.2, εκτιμούμε ότι η συγκέντρωση του ^{226}Ra είναι ίση με $904\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$.

5.7.5.4 Συγκέντρωση των ^{210}Pb, ^{210}Po και ^{210}Bi στην ιπτάμενη τέφρα, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4

Όπως έχει αναφερθεί εκτενώς στην παράγραφο 2.1.3.3 στα μικρότερα σωματίδια της ιπτάμενης τέφρας παρατηρείται εμπλουτισμός στις συγκεντρώσεις του ^{210}Pb καθώς και των ^{210}Po, ^{210}Bi. Στην βιβλιογραφία δεν διατίθενται στοιχεία σχετικά με τις συγκεντρώσεις των εν λόγω στοιχείων στην τέφρα, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4. Οι Coles et al.[34] και ο Tadmor[187] αναφέρουν ότι οι συγκεντρώσεις αυτών των ισοτόπων είναι 2-4 φορές μεγαλύτερες από αυτήν του ^{226}Ra. Οι Zeevaert et al.[213], οι οποίοι πραγματοποίησαν μελέτη παρόμοια με αυτή την ΔΔ, δέχτηκαν ότι τα παραπάνω ισότοπα παρουσιάζουν συγκεντρώσεις 4πλάσιες από αυτήν του ^{226}Ra. Η ίδια παραδοχή γίνεται και στην παρούσα ΔΔ, δηλαδή ότι τα ισότοπα της σειράς του ουρανίου ^{210}Pb, ^{210}Po και ^{210}Bi παρουσιάζουν συγκέντρωση στην τέφρα, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4, ίση με $4\mathrm{x}904\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$=$3616\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$. Η

συγκεκριμένη παραδοχή θεωρείται αρκετά ρεαλιστική διότι στο 4ο και τελευταίο ηλεκτροστατικό φίλτρο του ΑΗΣ4 Μεγαλόπολης ο λόγος της συγκέντρωση του ^{210}Pb προς την συγκέντρωση του ^{226}Ra κυμαίνεται από 3.12-3.47 σύμφωνα με τους Karangelos et al. [97].

5.7.5.5 Συγκέντρωση του ^{232}Th στην ιπτάμενη τέφρα, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4

Σύμφωνα με όσα αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 2.1.3.3 το ^{232}Th είναι ισότοπο, το οποίο δεν εμπλουτίζεται στα μικρότερα κλάσματα της ιπτάμενης τέφρας. Το ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει προσδιορίσει στο παρελθόν την συγκέντρωση του ^{232}Th στην ιπτάμενη τέφρα των ΑΗΣ1, ΑΗΣ3 και ΑΗΣ4 και οι τιμές είναι $55\pm2\,\mathrm{Bqkg^{-1}}$, $56\pm1\,\mathrm{Bqkg^{-1}}$ και $53\pm4.7\,\mathrm{Bqkg^{-1}}$ αντίστοιχα και παρουσιάζονται στον πίνακα 5.7. Παρατηρούμε ότι οι συγκεντρώσεις του ^{232}Th στους τρεις σταθμούς είναι στα ίδια επίπεδα. Έχοντας υπόψη ότι η ποιότητα του καυσίμου πιθανόν αλλάζει με την πάροδο του χρόνου επιλέγουμε να εργαστούμε σε όλους τους ΑΗΣ με την τιμή, που προσδιορίστηκε από τους Karangelos et al. [97], αφού αυτή είναι η πιο πρόσφατη. Συνεπώς η συγκέντρωσή του ^{232}Th στα σωματίδια της τέφρας, που διαφεύγουν από τις καμινάδες των ΑΗΣ θα είναι ίση με $53\,\mathrm{Bqkg^{-1}}$.

5.7.5.6 Συγκέντρωση των ισοτόπων ^{228}Th, ^{228}Ra, ^{224}Ra και ^{212}Pb στην ιπτάμενη τέφρα, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4

Τα συγκεκριμένα ισότοπα ανήκουν στην ραδιενεργή αλυσίδα του ^{232}Th. Επειδή δεν διατίθενται στη βιβλιογραφία δεδομένα σχετικά με τις συγκεντρώσεις των συγκεκριμένων θυγατρικών στην ιπτάμενη τέφρα θεωρούμε ότι βρίσκονται σε ραδιενεργή ισορροπία με το ^{232}Th και συνεπώς η συγκέντρωσή τους θα είναι ίση με $53\,\mathrm{Bqkg^{-1}}$ σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.7.5.5. Γνωρίζουμε ότι η παραδοχή αυτή είναι επισφαλής, λόγω πιθανού εμπλουτισμού της ιπτάμενης τέφρας σε ^{212}Pb, αλλά καθώς οι συγκεντρώσεις των ισοτόπων αυτής της σειράς είναι πολύ μικρότερες από αυτές της σειράς του ^{238}U θεωρούμε ότι δεν έχει σοβαρή επίδραση στα αποτελέσματα.

5.7.5.7 Συγκέντρωση του ^{40}K στην ιπτάμενη τέφρα, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4

Σύμφωνα με όσα αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 2.1.3.3 το ^{40}K είναι ισότοπο, το οποίο δεν εμπλουτίζεται στα μικρότερα κλάσματα της ιπτάμενης τέφρας. Η συγκέντρωση του ^{40}K στην ιπτάμενη τέφρα στους ΑΗΣ1, ΑΗΣ3 και ΑΗΣ4 έχει προσδιοριστεί στο παρελθόν από το ΕΠΤ-ΕΜΠ και οι τιμές είναι $449\pm47\,\mathrm{Bqkg^{-1}}$, $502\pm21\,\mathrm{Bqkg^{-1}}$ και

$454 \pm 11\,\mathrm{Bqkg^{-1}}$ αντίστοιχα και παρατίθενται στον πίνακα 5.7. Διαπιστώνεται ότι οι συγκεντρώσεις στους 3 ΑΗΣ βρίσκονται στο ίδια επίπεδα. Έχοντας υπόψη ότι η ποιότητα του καυσίμου αλλάζει με την πάροδο του χρόνου επιλέγουμε να εργαστούμε σε όλους τους ΑΗΣ με την τιμή, που προσδιορίστηκε από τους Karangelos et al. [97], αφού αυτή είναι η πιο πρόσφατη. Έτσι δεχόμαστε ότι η συγκέντρωση του ^{40}K στα σωματίδια της τέφρας, που διαφεύγουν από τις καμινάδες των ΑΗΣ είναι ίση $454\,\mathrm{Bqkg^{-1}}$.

5.7.5.8 Υπολογισμός του ρυθμού εκπομπής των ισοτόπων ^{238}U, ^{234}Th, ^{226}Ra, ^{210}Pb, ^{210}Po, ^{210}Bi, ^{232}Th, ^{228}Th, ^{228}Ra, ^{224}Ra, ^{212}Pb και ^{40}K από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4

Με τρόπο όμοιο με αυτόν που χρησιμοποιήσαμε στην παράγραφο 5.3.2 υπολογίζουμε τον ρυθμό εκπομπής των εν λόγω ισοτόπων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους πίνακες 5.43, 5.44, 5.45, 5.46.

5.7.5.9 Υπολογισμός του ρυθμού εκπομπής ^{222}Rn από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4

Για τον υπολογισμό του ρυθμού εκπομπής ^{222}Rn από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 θα εργαστούμε διαφορετικά από ό,τι στα άλλα ισότοπα καθώς το συγκεκριμένο είναι αέριο και δεν συγκρατείται καθόλου στα ηλεκτροστατικά φίλτρα των σταθμών.

Γνωρίζουμε από την βιβλιογραφία [105] την συνολική απόδοση κάθε ΑΗΣ, και κάθε μια παρουσιάζεται στον πίνακα 5.47. Από τις εκθέσεις, που εκδίδει ο ΔΕΣΜΗΕ (Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) [219] υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι των παραγόμενων ισχύων $\mathrm{P_p}$ των μονάδων ΑΗΣ1-2, ΑΗΣ3 και ΑΗΣ4 για τα έτη 2005, 2006 και 2007 και παρουσιάζονται στον πίνακα 5.47. Γνωρίζουμε επίσης από την βιβλιογραφία [97] ότι η θερμογόνος δύναμη H του λιγνίτη, που χρησιμοποιείται στους ΑΗΣ Μεγαλόπολης, είναι $4.2\,\mathrm{MJkg^{-1}}$.

Η προσδιδόμενη ισχύς $\mathrm{P_d}$ σε κάθε ΑΗΣ προκειμένου να παράγει ηλεκτρική ισχύ $\mathrm{P_p}$ δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_d = \frac{P_p}{eff} \tag{5.21}$$

Όπου eff η συνολική απόδοση του ΑΗΣ.

Συνεπώς ο ρυθμός κατανάλωσης λιγνίτη από τον κάθε ΑΗΣ θα είναι:

$$\dot{m} = \frac{P_d}{H} \tag{5.22}$$

Οι υπολογιζόμενες καταναλώσεις σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση παρουσιάζονται στον πίνακα 5.47.

Για να υπολογίσουμε τον ρυθμό εκπομπής ^{222}Rn από τις καμινάδες των ΑΗΣ αρκεί πλέον να γνωρίζουμε το περιεχόμενο του λιγνίτη σε αυτό το ισότοπο, αφού ως αέριο δεν κατακρατείται στα ηλεκτροστατικά φίλτρα. Από τους Karangelos et al. [97] γνωρίζουμε ότι ο ρυθμός εκροής E του ^{222}Rn από τον λιγνίτη είναι $266\,\mu\mathrm{Bqs}^{-1}\mathrm{kg}^{-1}$. Υπολογίζουμε το εκρεόμενο κλάσμα f από την ακόλουθη εξίσωση, όπως έχει περιγραφεί στην παράγραφο 7.4.2.

$$f = \frac{E}{\lambda_{Rn222} C_{Ra226}} \tag{5.23}$$

όπου:

λ_{Rn222}: Η σταθερά διάσπασης του ^{222}Rn

$\mathrm{C}_{\mathrm{Ra226}}$: Η συγκέντρωση του ^{226}Ra στον λιγνίτη, η οποία λαμβάνεται ίση με $295\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$ σύμφωνα με τις μετρήσεις που πραγματοποίησαν οι Karangelos et al. [97] στα δείγματα που μετρήθηκε ο ρυθμός εκροής του ^{222}Rn.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι $\mathrm{E} = 0.424$. Αυτό σημαίνει ότι το 42.4% του παραγόμενου ραδονίου στο εσωτερικό του λιγνίτη διαφεύγει στην ατμόσφαιρα. Συνεπώς η συγκέντρωση του ραδονίου στο εσωτερικό του λιγνίτη θα είναι:

$$C_{Rn222} = (1 - 0.424) C_{Ra226} = 199.3 Bqkg^{-1} \tag{5.24}$$

Σημειώνεται ότι εδώ ως συγκέντρωση του ^{226}Ra στον λιγνίτη λαμβάνεται η μέση τιμή που παρέχουν οι Karangelos et al. [97], η οποία προέκυψε από το εκτεταμένο πρόγραμμα μετρήσεων, που πραγματοποίησαν στους λιγνίτες που χρησιμοποιούνται στους ΑΗΣ Μεγαλόπολης.

Ο ρυθμός εκπομπής ^{222}Rn $\dot{\mathrm{C}}_{\mathrm{Rn222}}$ από τους ΑΗΣ της Μεγαλόπολης θα δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\dot{C}_{Rn222} = \dot{m}(C_{Rn222)} \tag{5.25}$$

όπου $\dot{\mathrm{m}}$ ο ρυθμός κατανάλωσης λιγνίτη

Οι υπολογιζόμενοι ρυθμοί εκπομπής ^{222}Rn για τους ΑΗΣ1-2, ΑΗΣ3 και ΑΗΣ4 δίνονται στον πίνακα 5.48.

5.7.6 Εκτέλεση του GENII με βάση το 1ο μετεωρολογικό σενάριο

5.7.6.1 Εισαγωγή δεδομένων για την πραγματοποίηση των δοσιμετρικών υπολογισμών

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιάσουμε τις επιλογές που κάναμε στον GENII προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί της δοσιμετρίας.

Αρχικά επιλέξαμε το μοντέλο με το οποίο θα πραγματοποιηθεί η δοσιμετρία και αυτό είναι βασισμένο στο ICRP 60 [89] καθώς και στο Federal Guidance Report 12

[49] & Federal Guidance Report 13[48]. Περισσότερα για τα υπόλοιπα μοντέλα, που διαθέτει ο GENII μπορεί να δει ο αναγνώστης στην παράγραφο 3.3.4.

Προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι δοσιμετρικοί υπολογισμοί είναι απαραίτητο να ορίσουμε την κλάση εισπνοής (*Inhalation class*) κάθε ισοτόπου. Ακολούθως παρουσιάζονται οι επιλογές, που πραγματοποιήθηκαν.

- ^{238}U: Για το ουράνιο, που βρίσκεται σε σωματίδια της ιπτάμενης τέφρας, δεν έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες για την απορρόφηση του από τους πνεύμονες. Για αυτή την περίπτωση το ICRP Publication 71 [90] προτείνει κλάση M.

- ^{234}Th, ^{232}Th, ^{228}Th: Το ICRP Publication 71 [90] προτείνει για τα ισότοπα του θορίου, όταν δεν υπάρχουν σχετικές μελέτες όπως για την περίπτωση των σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας, κλάση S και αυτή η κλάση υιοθετείται και εδώ.

- ^{228}Ra, ^{226}Ra, ^{224}Ra: Σύμφωνα με το ICRP Publication 71 [90] για τα ισότοπα του ραδίου προτείνεται τύπος απορρόφησης M (Medium) ή S (slow). Παρατηρούμε από τους πίνακες ότι για την συνολική δόση *effective dose* ο τύπος S δίνει μεγαλύτερους συντελεστές δόσης. Επειδή εργαζόμαστε με βάση την χειρότερη περίπτωση θα επιλέξουμε τύπο εισπνοής S.

- ^{212}Pb, ^{210}Pb: Όμοια με παραπάνω επιλέγουμε κλάση εισπνοής S.

- ^{210}Po: Όμοια με παραπάνω επιλέγουμε κλάση εισπνοής S.

- ^{210}Bi: Το ICRP Publication 71 [90] για το ^{210}Bi προτείνει κλάση F (Fast) ή M (Medium). Εμείς επιλέγουμε κλάση M ώστε να είμαστε στην χειρότερη περίπτωση, αφού αυτή η κλάση προϋποθέτει ότι το ισότοπο παραμένει περισσότερο στον οργανισμό.

- ^{222}Rn: Για αυτό το αέριο ισότοπο επιλέγουμε gas αφού ο GENII παρέχει στον χρήστη αυτή την επιλογή.

- ^{40}K: Για το κάλιο ο ICRP Publication 71 [90] προτείνει κλάση F την οποία και επιλέγουμε.

Σχετικά τώρα με την επαναιώρηση (*resuspension*) επιλέγουμε να μην την συμπεριλάβει στους υπολογισμούς ο GENII, διότι όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.3.5, ο κώδικας παρουσιάζει σφάλμα κατά την πραγματοποίηση των σχετικών υπολογισμών. Η συμβολή του φαινομένου της επαναιώρησης στην υπολογιζόμενη δόση δεν αναμένεται να είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Σε μελέτη υπολογισμού της ετήσιας ατομικής δόσης που προκύπτει από την λειτουργία ΑΗΣ, που πραγματοποίησαν οι Zeevaert et al. [213], η δόση λόγω εισπνοής του πλουμίου είναι $7.9 \times 10^{-3}\,\mu\mathrm{Sv}$, ενώ η δόση λόγω εισπνοής

από επαναιώρηση είναι $1.1 \times 10^{-5}\,\mu\mathrm{Sv}$. Παρατηρείται δηλαδή ότι η δόση λόγω επαναιώρησης είναι σχεδόν 3 τάξεις μεγέθους μικρότερη από την δόση λόγω εισπνοής του πλουμίου.

Όσον αφορά στους τρόπους επιβάρυνσης του οργανισμού, που επιλέγουμε να λαμβάνει υπόψη του ο κώδικας στους δοσιμετρικούς υπολογισμούς, είναι οι ακόλουθοι:

- Κατάποση: Γάλα, κρέας, φυλλώδη λαχανικά, βολβοί(π.χ. πατάτες).
- Αναπνοή: Αναπνοή αέρα εξωτερικού χώρου , αναπνοή αέρα εσωτερικού χώρου.
- Εξωτερική ακτινοβολία: Ακτινοβολία λόγω των ισοτόπων στον αέρα, ακτινοβολία λόγω των ισοτόπων στο έδαφος.

Σχετικά με το χρονικό διάστημα κατά το οποίο θεωρούμε ότι διαρκεί η εκπομπή ραδιοϊοστόπων επιλέγουμε το ένα έτος. Ομοίως για την χρόνο έκθεσης του ανθρώπου επιλέγουμε το ένα έτος. Για όλα τα υπόλοιπα μεγέθη, που χρειάστηκαν για την πραγματοποίηση των υπολογισμών διατηρήσαμε τις προεπιλεγμένες τιμές που διέθετε ο GENII.

5.7.6.2 Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις δίνονται στο σύστημα συντεταγμένων του GENII. Προκειμένου να παραχθούν τα απαραίτητα διαγράμματα είναι απαραίτητο να γίνει μετατροπή των συντεταγμένων σε καρτεσιανές με κέντρο όμοιο με αυτό στο σύστημα συντεταγμένων του GENII. Για αυτό τον σκοπό αναπτύχθηκαν τα προγράμματα *gtconc*, *ggtconc*, *gtdose*, *ggtdose* και *ggtdepos* που περιγράφονται αναλυτικά στην παράγραφο 4.4.2 και παρατίθενται στο παράρτημα Β΄. Ακολούθως θα περιγραφεί η διαδικασία, που ακολουθείται προκειμένου να γίνει η εν λόγω μετατροπή.

- Συγκεντρώσεις: Από το αρχείο αποτελεσμάτων του κώδικα dosim01.epa επιλέγουμε το κομμάτι, που μας ενδιαφέρει και το αντιγράφουμε σε ένα νέο ASCII αρχείο, το οποίο το ονομάζουμε polarconc.txt. Με αρχείο εισαγωγής δεδομένων το polarconc.txt 'τρέχουμε' τα εκτελέσιμα gtconc.exe και ggtconc.exe, τα οποία παράγουν τα αρχεία αποτελεσμάτων cartesconc.txt και cartesconc480.txt αντίστοιχα. Με βάση τώρα τα αρχεία αποτελεσμάτων μπορούμε να προχωρήσουμε στην κατασκευή των σχετικών διαγραμμάτων και γραφημάτων.
- Ρυθμοί απόθεσης: Από το αρχείο αποτελεσμάτων του κώδικα επιλέγουμε το κομμάτι, που μας ενδιαφέρει και το αντιγράφουμε σε ένα νέο ASCII αρχείο, το οποίο το ονομάζουμε polardepos.txt. Με αρχείο εισαγωγής δεδομένων το polardepos.txt 'τρέχουμε' το εκτελέσιμο ggtdepos.exe, το οποίο παράγει το αρχείο

αποτελεσμάτων cartesdepos480.txt. Με βάση τώρα το αρχείο αποτελεσμάτων μπορούμε να προχωρήσουμε στην κατασκευή των σχετικών διαγραμμάτων και γραφημάτων.

- Δόσεις: Από το αρχείο αποτελεσμάτων του κώδικα επιλέγουμε το κομμάτι, που μας ενδιαφέρει και το αντιγράφουμε σε ένα νέο ASCII αρχείο, το οποίο το ονομάζουμε polardose.txt. Με αρχείο εισαγωγής δεδομένων το polardose.txt 'τρέχουμε' τα εκτελέσιμα gtdose.exe και ggtdose.exe, τα οποία παράγουν τα αρχεία αποτελεσμάτων cartesdose.txt και cartesdose480.txt αντίστοιχα. Με βάση τώρα τα αρχεία αποτελεσμάτων μπορούμε να προχωρήσουμε στην κατασκευή των σχετικών διαγραμμάτων και γραφημάτων.

Σημειώνεται ότι δείγματα όλων των παραπάνω αρχείων παρατίθενται στο παράρτημα Γ'.

5.7.6.3 Υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις

Από την εκτέλεση του GENII προκύπτει το αρχείο αποτελεσμάτων dosim01.epa. Σε αυτό διαπιστώνουμε ότι στις διευθύνσεις $202.5°$, $225°$, $247.5°$ οι συγκεντρώσεις του ^{226}Ra ήταν μηδενικές, ενώ και στις διευθύνσεις $22.5°$, $45°$, $67.5°$, $90°$, $180°$ η υπολογιζόμενη συγκέντρωση ήταν μη μηδενική σε ένα μόνο σημείο ανά διεύθυνση. Η μέγιστη υπολογιζόμενη συγκέντρωση ήταν $2.8\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$. Σε ανάλογη μελέτη, που πραγματοποίησαν οι Zeevaert et al. [213] σε ατμοηλεκτρικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που χρησιμοποιούσε γαιάνθρακες και η συγκέντρωση του ^{226}Ra στην ιπτάμενη τέφρα ήταν $700\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$, υπολογίστηκε η συγκέντρωση του ^{226}Ra στον αέρα και η μέγιστη τιμή ήταν $4.5 \times 10^{-3}\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$, τιμή αρκετά χαμηλότερη από την μέγιστη συγκέντρωση, που υπολογίστηκε με τον κώδικα GENII στην Μεγαλόπολη. Σημειώνεται ότι η συγκέντρωση του ^{226}Ra στην εκπεμπόμενη ιπτάμενη τέφρα από τους ΑΗΣ Μεγαλόπολης λήφθηκε ίση με $904\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$ ενώ στην μελέτη των Zeevaert et al. [213] λήφθηκε ίση με $700\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$.

Τα παραγόμενα δισδιάστατα και τρισδιάστατα γραφήματα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων παρουσιάζονται στα σχήματα 5.59 και 5.60 αντίστοιχα. Από αυτά τα σχήματα παρατηρούμε ότι υψηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται δυτικά του κέντρου υπολογισμού, το οποίο βρίσκεται στο κέντρο το γραφήματος. Αξιοσημείωτες συγκεντρώσεις σημειώνονται και νοτιοανατολικά του κέντρου υπολογισμού. Για λόγους καλύτερης εποπτείας παρουσιάζεται στο σχήμα 5.61 χάρτης της περιοχής με όμοιες διαστάσεις και προσανατολισμό με το γράφημα 5.59

Όσον αφορά στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις των υπόλοιπων ισοτόπων έχουμε τα εξής:

- ^{238}U, ^{234}Th: Η μορφή των διαγραμμάτων ήταν όμοια με αυτή του ραδίου και οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις ήταν ελάχιστα μεγαλύτερες καθώς η συγκέντρωση του ^{238}U και του ^{234}Th στην τέφρα είναι ελάχιστα υψηλότερη ($964\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$) από αυτή του ^{226}Ra ($904\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$). Για τους παραπάνω λόγους δεν γίνεται παράθεση των σχετικών διαγραμμάτων. Η μέγιστη υπολογιζόμενη συγκέντρωση ήταν $3.0\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$

- ^{210}Pb, ^{210}Po, ^{210}Bi: Η μορφή των διαγραμμάτων ήταν όμοια με αυτή του ραδίου και οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις ήταν 4 φορές μεγαλύτερες αφού και οι συγκεντρώσεις αυτών των ισοτόπων στην ιπτάμενη τέφρα είναι 4 φορές μεγαλύτερες από αυτές του ραδίου όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.7.5.4. Λόγω ομοιότητας των διαγραμμάτων με αυτά του ^{226}Ra δεν γίνεται παράθεση τους. Η μέγιστη υπολογιζόμενη συγκέντρωση, που είναι όμοια και για τα τέσσερα ισότοπα ήταν $3.0\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$

- ^{232}Th, ^{228}Th, ^{228}Ra, ^{224}Ra, ^{212}Pb : Και εδώ η μορφή των διαγραμμάτων ήταν όμοια με αυτή του ραδίου με τα επίπεδα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων να είναι πολύ μικρότερα, αφού η συγκέντρωση του ^{232}Th και των θυγατρικών του στην ιπτάμενη τέφρα είναι $53\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$. όγω ομοιότητας των διαγραμμάτων με αυτά του ^{226}Ra δεν γίνεται παράθεση τους. Έτσι η μέγιστη υπολογιζόμενη συγκέντρωση ήταν $1.7 \times 10^{-2}\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$.

- ^{222}Rn: Η μορφή των διαγραμμάτων ήταν όμοια με αυτή του ραδίου, για αυτό δεν γίνεται παράθεση τους. Η μέγιστη υπολογιζόμενη συγκέντρωση ήταν $3.5 \times 10^{3}\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$ τιμή αρκετά υψηλότερη από αυτή των υπόλοιπων ισοτόπων. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς ο ρυθμός εκπομπής του ραδονίου είναι αρκετά υψηλός, αφού δεν το ραδόνιο δεν κατακρατείται στα ηλεκτροστατικά και όλη η ποσότητα του εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα.

- ^{40}K: Η μορφή των διαγραμμάτων ήταν όμοια με αυτή του ραδίου με τα επίπεδα των συγκεντρώσεων να είναι σχετικά χαμηλότερα. Λόγω ομοιότητας των διαγραμμάτων με αυτά του ραδίου δεν γίνεται παράθεση τους. Η μέγιστη υπολογιζόμενη συγκέντρωση ήταν $0.53\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$

5.7.6.4 Σύγκριση των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων του GENII με αυτές του ORION-II

Προκειμένου να πραγματοποιήσουμε αυτή την σύγκριση επιλέγουμε από τις εκτελέσεις του ORION-II την εκτέλεση 19. Αυτή η εκτέλεση έχει τις περισσότερες κοινές παραμέτρους με την εκτέλεση του GENII. Έχει πραγματοποιηθεί θεωρώντας το έδαφος επίπεδο όπως ακριβώς κάνει και ο GENII. Οι μέγιστες υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις

είναι στην ίδια τάξη μεγέθους για τις δύο εκτελέσεις: $1.83\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$ για τον ORION-II και $2.8\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$ για τον GENII. Πρέπει όμως να λάβουμε υπόψη μας ότι ο GENII δεν αφαιρεί από το πλούμιο την ποσότητα ισοτόπων, που εναποτίθεται στο έδαφος λόγω ξηρής εναπόθεσης, οπότε οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις είναι ελαφρώς υπερεκτιμημένες [195, σελ. 44]. Η μορφή των διαγραμμάτων που απεικονίζουν τις συγκεντρώσεις είναι διαφορετική για τις δύο εκτελέσεις. Στην εκτέλεση του ORION-II, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.37 οι υψηλές συγκεντρώσεις παρατηρούνται νοτιοανατολικά του ΑΗΣ1-2,3 ενώ στην εκτέλεση του GENII, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.60, οι μέγιστες συγκεντρώσεις παρατηρούνται δυτικά του ΑΗΣ4. Προκειμένου να διαπιστωθεί πόσο μεγάλες είναι οι διαφορές στα αποτελέσματα των δύο κωδίκων έγινε αφαίρεση των συγκεντρώσεων του ORION-II από αυτές του GENII και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 5.62. Παρατηρούμε ότι στα περισσότερα σημεία ο ORION-II παρουσιάζει σχετικά υψηλότερες συγκεντρώσεις από τον GENII. Εξαίρεση αποτελεί η περιοχή βορειοδυτικά του κέντρου υπολογισμού, όπου οι συγκεντρώσεις του GENII είναι αρκετά υψηλότερες από αυτές του ORION-II και η μέγιστη διαφορά είναι $2.62\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$.

Αυτό πιθανόν συμβαίνει για την αιτία που θα αναλυθεί με λεπτομέρεια στην συνέχεια: Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.7.3 η εκτέλεση του GENII πραγματοποιήθηκε με βάση το 1ο μετεωρολογικό σενάριο, το οποίο κατασκευάστηκε για να χρησιμοποιηθεί αρχικά στον ORION-II (βλ. παράγραφο 5.5.2). Σύμφωνα με αυτά, που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.7.3, ο GENII πραγματοποιεί τους υπολογισμούς διασποράς με βάση την προεπιλεγμένη τιμή ταχύτητας ανέμου για κάθε κλάση ταχύτητας. Για την 1η κλάση, που έχει εύρος από $0\text{-}1.54\,\mathrm{msec}^{-1}$ η προεπιλεγμένη τιμή είναι $0.89\,\mathrm{msec}^{-1}$. Από τον πίνακα 5.13, ο οποίος παρέχει την ταχύτητα του ανέμου ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια στο 1ο μετεωρολογικό σενάριο, βλέπουμε ότι στην διεύθυνση ESE η ταχύτητα του ανέμου είναι $1.53\,\mathrm{msec}^{-1}$. Σύμφωνα με τα παραπάνω ο GENII πραγματοποιεί τους υπολογισμούς διασποράς των ισοτόπων με ταχύτητα ανέμου ίση με $0.89\,\mathrm{msec}^{-1}$. Αντίθετα ο ORION-II δεν κάνει κατανομή σε κλάσεις και πραγματοποιεί τους υπολογισμούς με την ακριβή τιμή της ταχύτητας του ανέμου, που υπολογίστηκε στο 1ο μετεωρολογικό σενάριο, η οποία για την διεύθυνση ESE είναι $1.53\,\mathrm{msec}^{-1}$. Από την εξίσωση 2.43 γνωρίζουμε ότι όσο μειώνεται η ταχύτητα του ανέμου τόσο αυξάνουν οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις. Έτσι είναι αναμενόμενο ότι ο GENII θα υπολογίζει μεγαλύτερες τιμές συγκεντρώσεων ^{226}Ra από ότι ο ORION-II στη συγκεκριμένη διεύθυνση.

Η διεύθυνση ανέμου ESE, η οποία πνεεί από γωνία $112.5\,^{\circ}$ σε σχέση με την διεύθυνση του Βορρά (βλ. πίνακα 4.1), προωθεί τους ρύπους βορειοανατολικά του κέντρου υπολογισμού, στα σημεία, όπου παρατηρούνται οι υψηλές συγκεντρώσεις του GENII. Επίσης από το αρχείο μετεωρολογικών δεδομένων metscen01.str, το οποίο παρουσιάζεται στο παράρτημα Z′, βλέπουμε ότι για διεύθυνση ανέμου ESE και ευστάθεια F το

ποσοστό χρόνου είναι 12.4%. Αυτό το ποσοστό είναι το υψηλότερο, που υπάρχει στο συγκεκριμένο αρχείο. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω δικαιολογούνται οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ^{226}Ra, που υπολογίζονται από τον GENII σε σχέση με τον ORION-II, βορειοδυτικά του κέντρου υπολογισμού.

Όσον αφορά στις μικρότερες αποκλίσεις, που παρατηρούνται μεταξύ των δύο μοντέλων, πιθανόν οφείλονται και στους ακόλουθους λόγους:

- Ο GENII υπολογίζει με διαφορετικό τρόπο το κατακόρυφο προφίλ της ταχύτητας του ανέμου από ό,τι ο ORION-II, όπως περιγράψαμε στις παραγράφους 3.3.3.2 και 4.2.5.

- Ο GENII χρησιμοποιεί διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος στον υπολογισμού της ανύψωσης πλουμίου σε σχέση με τον ORION-II. Ο GENII ζητάει για κάθε διαφορετικό μήνα την θερμοκρασία περιβάλλοντος και με αυτή πραγματοποιεί τους υπολογισμούς. Στον ORION-II η ανύψωση του πλουμίου υπολογίζεται με βάση την μέση θερμοκρασία επιφάνειας ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια.

- Ο GENII επίσης διαθέτει εξισώσεις για τον υπολογισμό της $\mathrm{V_d}$ ενώ ο ORION-II δέχεται την $\mathrm{V_d}$ ως εξωτερικό δεδομένο από τον χρήστη. Τα μοντέλα που έχουμε χρησιμοποιήσει για τον υπολογισμό της $\mathrm{V_d}$ για τον ORION-II είναι διαφορετικά από αυτά που διαθέτει ο GENII, όπως φαίνεται στις παραγράφους 3.3.3.3 και 5.2.2.

5.7.6.5 Υπολογιζόμενοι ρυθμοί απόθεσης

Από την εκτέλεση του GENII προκύπτει ότι στις διευθύνσεις $202.5°$, $225°$, $247.5°$ οι ρυθμοί απόθεσης του ^{226}Ra ήταν μηδενικοί, ενώ και στις διευθύνσεις $22.5°$, $45°$, $67.5°$, $90°$, $180°$ οι υπολογιζόμενοι ρυθμοί απόθεσης ήταν διαφορετικοί του μηδενός σε ένα μόνο σημείο σε κάθε διεύθυνση. Τα δισδιάστατα και τρισδιάστατα γραφήματα των υπολογιζόμενων ρυθμών απόθεσης παρουσιάζονται στα σχήματα 5.63 και 5.64. Ο μέγιστος υπολογιζόμενος ρυθμός απόθεσης ήταν $2.0 \times 10^{-2}\,\mu\mathrm{Bqs^{-1}m^{-2}}$, ο οποίος είναι 2.2 φορές μεγαλύτερος από την τιμή που προέκυψε στην εκτέλεση 19 του ORION-II, γεγονός αναμενόμενο αφού και η υπολογιζόμενη συγκέντρωση του ^{226}Ra από τον GENII είναι 1.56 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του ORION-II, όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Το ότι τα ποσοστά δεν είναι όμοια οφείλεται σε διαφορετική ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης που χρησιμοποιεί ο GENII σε σχέση με τον ORION-II. Στον GENII η $\mathrm{V_d}$ υπολογίζεται με βάση το μοντέλο, που περιγράφεται, στην παράγραφο 3.3.3.3 ενώ στον ORION-II η $\mathrm{V_d}$ ορίζεται από τον χρήστη.

Όσον αφορά στους υπολογιζόμενους ρυθμούς απόθεσης των υπόλοιπων ισοτόπων παρατηρούμε τα εξής:

- ^{238}U, ^{234}Th: Η μορφή των διαγραμμάτων ήταν όμοια με αυτή του ραδίου και οι υπολογιζόμενοι ρυθμοί απόθεσης ήταν ελάχιστα μεγαλύτερες. Ο μέγιστος υπολογιζόμενος ρυθμός απόθεσης ήταν $0.021\,\mu\mathrm{Bqs}^{-1}\mathrm{m}^{-2}$

- ^{210}Pb, ^{210}Po, ^{210}Bi: Η μορφή των διαγραμμάτων ήταν όμοια με αυτή του ραδίου και οι υπολογιζόμενοι ρυθμοί απόθεσης ήταν 4 φορές μεγαλύτεροι αφού και οι συγκεντρώσεις αυτών των ισοτόπων στην ιπτάμενη τέφρα είναι 4 φορές μεγαλύτερες από αυτήν του ραδίου όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.7.5.4. Έτσι ο μέγιστος υπολογιζόμενος ρυθμός απόθεσης, που είναι όμοιος και για τα τέσσερα ισότοπα ήταν $0.08\,\mu\mathrm{Bqs}^{-1}\mathrm{m}^{-2}$.

- ^{232}Th, ^{228}Th, ^{228}Ra, ^{224}Ra, ^{212}Pb : Και εδώ η μορφή των διαγραμμάτων ήταν όμοια με αυτή του ραδίου με τα επίπεδα των υπολογιζόμενων ρυθμών απόθεσης να είναι πολύ μικρότερα αφού η συγκέντρωση του ^{232}Th και των θυγατρικών του στην ιπτάμενη τέφρα είναι $53\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$. Έτσι ο μέγιστος υπολογιζόμενος ρυθμός απόθεσης ήταν $0.001\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$.

- ^{222}Rn: Ο μέγιστος υπολογιζόμενος ρυθμός απόθεσης του ^{222}Rn υπολογίστηκε σε $1.5 \times 10^{-4}\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$ και είναι αρκετά χαμηλότερος από τους ρυθμούς απόθεσης των υπόλοιπων ισοτόπων, παρότι οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις είναι υψηλές. Αυτό συμβαίνει διότι το ^{222}Rn είναι αέριο και η ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης του είναι πολύ χαμηλότερων από αυτή των σωματιδίων. Από το διάγραμμα του σχήματος 5.65 βλέπουμε ότι η μορφή του είναι σχετικά διαφορετική από αυτή του ραδίου.

- ^{40}K: Η μορφή των διαγραμμάτων ήταν όμοια με αυτή του ραδίου με τα επίπεδα των ρυθμών απόθεσης να είναι σχετικά χαμηλότερα. Ο μέγιστος υπολογιζόμενος ρυθμός απόθεσης ήταν $0.003\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$.

5.7.6.6 Υπολογιζόμενες δόσεις

Από την εκτέλεση, που πραγματοποιήθηκε, παράχθηκε το αρχείο dosim01.epa. Από το αρχείο αυτό προέκυψε ότι η μέγιστη ετήσια ατομική ενεργή δόση (*individual effective dose*) ήταν $6.4\,\mu\mathrm{Sv}$ και το σημείο μεγίστου βρισκόταν σε απόσταση $1\,\mathrm{km}$ από το κέντρο υπολογισμού και σε γωνία $22.5\,^{\circ}$ από την διεύθυνση του βορρά δεξιόστροφα. Η ετήσια ατομική δόση για κάποιον, που κατοικεί μέσα στην πόλη της Μεγαλόπολης ήταν $1.5\,\mu\mathrm{Sv}$, τιμή που είναι μικρότερη από την μέγιστη ετήσια ατομική δόση. Σημειώνεται ότι στον υπολογισμό των δόσεων συμπεριλήφθηκε η επίδραση των ακόλουθων ισοτόπων: ^{238}U, ^{234}Th, ^{226}Ra, ^{210}Pb, ^{210}Po, ^{210}Bi, ^{232}Th, ^{228}Th, ^{228}Ra, ^{224}Ra, ^{212}Pb και ^{40}K. Όσον αφορά στις διευθύνεις του ανέμου, όπου οι δόσεις ήταν μηδενικές, ισχύουν αυτά που αναφέραμε και στην παράγραφο 5.7.6.3 για τις συγκεντρώσεις. Στα

σχήματα 5.66, 5.67 παρουσιάζονται η δισδιάστατη και τρισδιάστατη απεικόνιση των υπολογιζόμενων ατομικών δόσεων.

Σε παρόμοια μελέτη, που πραγματοποίησαν οι Zeevaert et al. [213] σε ατμοηλεκτρικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου η συγκέντρωση του ^{226}Ra στην εκπεμπόμενη ιπτάμενη τέφρα λήφθηκε ίση με $700\,\mathrm{Bqkg^{-1}}$, υπολογίστηκε η ετήσια ατομική ενεργή δόση και ήταν $4.7 \times 10^{-2}\,\mu\mathrm{Sv}$. Σημειώνεται ότι αυτή η δόση υπολογίστηκε για την χρονική στιγμή των 70 ετών από την έναρξη λειτουργίας του σταθμού. Κατά τον υπολογισμό αυτό δεν λήφθηκε υπόψη η συνεισφορά του ^{40}K ενώ δεν αναφέρεται στο δημοσίευμα εάν πρόκειται για μέση ή μέγιστη τιμή δόσης. Παρατηρούμε λοιπόν ότι η μέγιστη ετήσια ατομική ενεργή δόση, που υπολογίσαμε για την περιοχή της Μεγαλόπολης είναι δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την ετήσια ατομική ενεργή δόση, που υπολογίζουν οι Zeevaert et al. [213]. Αυτή η διαφορά πιθανόν να οφείλεται στο ότι ο ΑΗΣ, που εξέτασαν οι Zeevaert et al. [213], διαθέτει καλύτερα συστήματα κατακράτησης της ιπτάμενης τέφρας σε σχέση με τους ΑΗΣ Μεγαλόπολης. Ένας ακόμη πιθανός λόγος είναι οι διαφορετικές παραδοχές του κάθε μοντέλου καθώς και το ότι δεν αναφέρεται εάν η δόση, που υπολογίζεται, είναι η μέση ή μέγιστη.

Σε μελέτη που διεξήγαγε το NRPB στην Αγγλία, στην οποία η συγκέντρωση του ^{226}Ra στην εκπεμπόμενη ιπτάμενη τέφρα λήφθηκε ίση με $100\,\mathrm{Bqkg^{-1}}$, η μέγιστη ετήσια ατομική ενεργή δόση που προέκυψε ήταν $1.1 \times 10^{-1}\,\mu\mathrm{Sv}$ [176]. Σε σύγκριση με αυτή την μελέτη η τιμή της παρούσας ΔΔ είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη. Με δεδομένο όμως ότι και η ειδική ραδιενέργεια της τέφρας των ΑΗΣ Μεγαλόπολης είναι μια τάξη μεγέθους υψηλότερη από αυτή, που λήφθηκε στην έρευνα του NRPB [176], συμπεραίνεται ότι τα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα. Επισημαίνεται ότι καθοριστικός παράγοντας για την προκύπτουσα δόση είναι η ειδική ραδιενέργεια της ιπτάμενης τέφρας, που εκπέμπεται από κάθε ΑΗΣ.

Σε έρευνα που διεξήγαγε στο παρελθόν το ΕΠΤ-ΕΜΠ στον ελληνικό χώρο υπολόγισε την μέση απορροφώμενη ατομική δόση, που λαμβάνει κάποιος εξαιτίας της ακτινοβόλησης από φυσικά ραδιενεργά ισότοπα, τα οποία βρίσκονται στο έδαφος, και βρέθηκε ίση με $40\,\mathrm{nGyh^{-1}}$ [5]. Η αντίστοιχη μέση ετήσια ατομική ενεργή δόση σύμφωνα με τους συντελεστές μετατροπής που προτείνει ο UNSCEAR [194] είναι $49.1\,\mu\mathrm{Sv}$. Η παραπάνω μέση απορροφώμενη ατομική δόση, που υπολογίστηκε από τους Anagnostakis et al. [5], είναι συγκρίσιμη με την πληθυσμιακά σταθμισμένη μέση απορροφώμενη δόση, που λαμβάνει κανείς όταν βρίσκεται σε εξωτερικό χώρο σε 41 μεγάλες πόλεις τις Ελλάδας, η οποία είναι $31\,\mathrm{nGyh^{-1}}$ σύμφωνα με τους Clouvas et al. [33]. . Επίσης υπολογίστηκε από το ΕΠΤ-ΕΜΠ η ετήσια ατομική ενεργή δόση εξαιτίας της εναπόθεσης στο έδαφος τεχνητών ραδιοϊσοτόπων, που προέρχονται από το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl, ένα χρόνο μετά το συμβάν και είναι [6]:

- $67\,\mu\mathrm{Sv}$ σε περιοχές με την γεωγραφική μέση τιμή απόθεσης ραδιοϊσοτόπων.

- $737\,\mu\mathrm{Sv}$ σε περιοχές με την μέγιστη απόθεση ραδιοϊσοτόπων.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η υπολογιζόμενη μέγιστη ετήσια ενεργή δόση εξαιτίας της λειτουργίας των ΑΗΣ Μεγαλόπολης είναι σχεδόν μία τάξη μεγέθους μικρότερη από την μέση ετήσια ενεργή δόση που δέχεται κάποιος εξαιτίας των φυσικών ραδιοϊσοτόπων του εδάφους καθώς και από την μέση ετήσια ενεργή δόση, που δέχεται κάποιος όταν βρίσκεται σε εξωτερικό χώρο. Επίσης η υπολογιζόμενη μέγιστη ετήσια ενεργή δόση εξαιτίας της λειτουργίας των ΑΗΣ Μεγαλόπολης είναι σχεδόν μία τάξη μεγέθους μικρότερη και από την ετήσια δόση, που οφείλεται στην απόθεση στο έδαφος τεχνητών ραδιοϊσοτόπων, που προέρχονται από το ατύχημα του Chernobyl, για το πρώτο έτος μετά το συμβάν σε περιοχές με την γεωγραφική μέση τιμή απόθεσης ραδιοϊσοτόπων. Σε περιοχές της Ελλάδος με την μέγιστη απόθεση ραδιοϊσοτόπων από το ατύχημα στο Chernobyl η ετήσια ατομική δόση, που προέρχεται από την απόθεση τεχνητών ραδιοϊσοτόπων στο έδαφος, είναι δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την μέγιστη ετήσια ατομική δόση, που υπολογίστηκε σε αυτή την ΔΔ.

Η ετήσια ενεργή δόση που δέχεται κάποιος εξαιτίας όλων των φυσικών πηγών ακτινοβόλησης σύμφωνα με τον UNSCEAR είναι $2400\,\mu\mathrm{Sv}$ [194]. Η συγκεκριμένη τιμή είναι περίπου τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την μέγιστη ετήσια ατομική δόση, που υπολογίστηκε στην παρούσα ΔΔ, για την περιοχή της Μεγαλόπολης. Επίσης σύμφωνα με τα Basic Safety Standards της IAEA η μέγιστη ετήσια ατομική δόση για το κοινό εξαιτίας μιας δραστηριότητας, στην οποία εμπλέκονται ραδιενεργές πηγές, δεν πρέπει να ξεπερνά το $1\,\mathrm{mSv}$ [86]. Βλέπουμε λοιπόν ότι η ετήσια ατομική δόση, που υπολογίστηκε για την περιοχή της Μεγαλόπολης είναι τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερη από το όριο, το οποίο θέτει η IAEA [86]. Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικά και στον πίνακα 5.49

5.7.7 Μετρήσεις ρυθμού γ-δόσης και συγκέντρωσης ^{222}Rn στην περιοχή της Μεγαλόπολης και στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου και υπολογιζόμενοι ρυθμοί δόσης από τον GENII στα σημεία δειγματοληψίας

Στα πλαίσια αυτής της ΔΔ πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ρυθμού γ-δόσης και συγκέντρωσης ^{222}Rn στον αέρα στην περιοχή της Μεγαλόπολης. Για την διενέργεια των μετρήσεων ραδονίου στον αέρα στην περιοχή της Μεγαλόπολης χρησιμοποιήθηκε ο ολοκληρωμένος ανιχνευτής ραδονίου AlphaGuard PQ2000 Pro της εταιρείας Genitron [65]. Για τον προσδιορισμό του ρυθμού γ-δόσης χρησιμοποιήθηκαν τα δοσίμετρα PM1621M και PM1703M της εταιρείας Polimaster, τα οποία μετράνε την ισοδύναμη δόση περιβάλλοντος H*(10) (*Ambient dose equivalent*). Το όργανο PM1621M διαθέτει

ανιχνευτή Geiger-Mueller ενώ το PM1703M έχει ανιχνευτή CsI(Tl). Στην περιοχή της Μεγαλόπολης χρησιμοποιήθηκε επίσης το δοσίμετρο Thyac V survey meter 190 της εταιρείας Victoreen, το οποίο μετράει την ισοδύναμη δόση (*equivalent dose*).

5.7.7.1 Μετρήσεις στην περιοχή της Μεγαλόπολης

Πραγματοποιήθηκαν στις 14/04/2010 μετρήσεις ^{222}Rn στον ατμοσφαιρικό αέρα με το όργανο AlphaGuard και δόσεων με το όργανο Victoreen στα ακόλουθα σημεία:

- Χωριό Κατσίμπαλης (φ=37.4533°, λ=22.0924°)
- Δρόμος Κατσίμπαλη-Καρύταινα (φ=37.4825°, λ=22.0556°)
- Χωριό Κουρουνιός (φ=37.4562°, λ=22.0389°)
- Δρόμος Καρυές προς Καστανοχώρι (φ=37.4177°, λ=22.0406°)

Παράλληλα σε όλο το διάστημα, που διήρκεσε η καμπάνια των μετρήσεων στην περιοχή (7h18min) ήταν σε λειτουργία τα όργανα PM1621M και PM1703M, τα οποία πραγματοποιούσαν δοσιμέτρηση. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στους πίνακες 5.50 και 5.51.

Οι μετρούμενες συγκεντρώσεις ραδονίου στον αέρα κυμάνθηκαν από $17\text{-}29\,\mathrm{Bqm^{-3}}$. Με την βοήθεια του GENII υπολογίστηκε η μέγιστη συγκέντρωση ραδονίου στην περιοχή, η οποία οφείλεται στην εκπομπή του από τους ΑΗΣ της περιοχής, και ήταν $3.5 \times 10^{-3}\,\mathrm{Bqm^{-3}}$, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.7.6.3. Παρατηρούμε ότι οι μετρούμενες συγκεντρώσεις ραδονίου είναι τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από αυτές, που υπολογίστηκαν με τον κώδικα GENII. Αυτό οφείλεται κυρίως στην εκροή ραδονίου από το έδαφος της περιοχής στην ατμόσφαιρα. Εκτενής ανάλυση του φαινομένου της εκροής ραδονίου από το έδαφος πραγματοποιείται στην παράγραφο 7.4.

Οι μετρήσεις ρυθμού γ-δόσης που πραγματοποιήθηκαν στην Μεγαλόπολη με τα όργανα Polimaster είχαν εύρος από $59\text{-}74\,\mathrm{nSvhr^{-1}}$. Οι μετρήσεις με το όργανο Victoreen είχαν εύρος $75\text{-}100\,\mathrm{nSvhr^{-1}}$. Σημειώνεται ότι τα όργανα Polimaster ήταν σε λειτουργία σε όλο το διάστημα που διήρκεσε η καμπάνια των μετρήσεων, με αποτέλεσμα να υπάρχει θωράκιση της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια των μετακινήσεων, ενώ με το όργανο Victoreen πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μόνο στα σημεία δειγματοληψίας. Το ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει πραγματοποιήσει στο παρελθόν μετρήσεις ρυθμού γ-δόσης με το όργανο Victoreen σε διάφορα σημεία στην περιοχή της Μεγαλόπολης και το εύρους τους κυμαίνεται από $50\text{-}331\,\mathrm{nSvhr^{-1}}$ [157]. Σε σχέση με το εύρος τιμών αυτών των μετρήσεων, οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της ΔΔ βρίσκονται μέσα σε αυτό αλλά κοντά στις κατώτατες τιμές.

5.7.7.2 Μέτρηση ρυθμού γ-δόσης με τα όργανα Polimaster στο Κτίριο Κ της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου

Πραγματοποιήθηκαν δύο διαφορετικές μετρήσεις στο Κτίριο Κ της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Η 1η έγινε μέσα σε γραφείο στο ισόγειο του κτιρίου. Στην δεύτερη μέτρηση τα δοσίμετρα τοποθετήθηκαν στο υπόγειο του κτιρίο σε ράφι της αποθήκης των συσκευασμένων δειγμάτων χώματος και τέφρας του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Ακολούθως παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία και τα αποτελέσματα των δύο μετρήσεων.

- **1η μέτρηση:** Πραγματοποιήθηκε στις 11/05/2010. Τα δύο δοσίμετρα τοποθετήθηκαν στο γραφείο ισογείου του Κτιρίου Κ για το χρονικό διάστημα 11:13-16.45. Ο ρυθμός γ-δόσης που κατέγραψε το PM1621M ήταν $57.9\,\mathrm{nSvhr}^{-1}$. Το PM1703M κατέγραψε ρυθμό γ-δόσης $30.7\,\mathrm{nSvhr}^{-1}$. Οι συνολικές δόσεις ήταν $0.3\,\mu\mathrm{Sv}$ και $0.2\,\mu\mathrm{Sv}$ αντίστοιχα. Οι παραπάνω τιμές παρουσιάζονται και στον πίνακα 5.52.

- **2η μέτρηση:** Πραγματοποιήθηκε στις 06/07/2010 στο υπόγειο του Κτιρίου Κ. Τα δοσίμετρα τοποθετήθηκαν σε ράφι της αποθήκης των συσκευασμένων δειγμάτων χώματος και τέφρας του ΕΠΤ-ΕΜΠ για το χρονικό διάστημα 11:31-16:11. Ο ρυθμός γ-δόσης που κατέγραψε το PM1621M ήταν $505.4\,\mathrm{nSvhr}^{-1}$. Το PM1703M κατέγραψε ρυθμό γ-δόσης $1688.4\,\mathrm{nSvhr}^{-1}$. Οι συνολικές δόσεις ήταν $2.4\,\mu\mathrm{Sv}$ και $7.9\,\mu\mathrm{Sv}$ αντίστοιχα. Οι παραπάνω τιμές παρουσιάζονται και στον πίνακα 5.52.

Όπως ήταν αναμενόμενο οι ρυθμοί γ-δόσης, οι οποίοι μετρήθηκαν στην αποθήκη δειγμάτων χώματος και τέφρας του ΕΠΤ-ΕΜΠ ήταν τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους μεγαλύτεροι από αυτούς, που μετρήθηκαν σε γραφείο του ισογείου του Κτιρίου Κ, καθώς και από αυτούς που μετρήθηκαν στα σημεία δειγματοληψίας της περιοχής της Μεγαλόπολης και παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 5.7.7.1.

Οι ρυθμοί γ-δόσης που μετρήθηκαν στο πεδίο της Μεγαλόπολης με τα όργανα Polimaster ήταν μεγαλύτεροι από αυτούς, που μετρήθηκαν σε γραφείο του ισογείου του Κτιρίου Κ. Συγκεκριμένα ο ρυθμός γ-δόσης στο γραφείο του ισογείου του Κτιρίου Κ ήταν $57.9\,\mu\mathrm{Svhr}^{-1}$ και $30.7\,\mu\mathrm{Svhr}^{-1}$ για τα PM1621M και PM1703M αντίστοιχα. Οι ρυθμοί γ-δόσης στην περιοχή της Μεγαλόπολης ήταν $74\,\mu\mathrm{Svhr}^{-1}$ και $59\,\mu\mathrm{Svhr}^{-1}$ για τα PM1621M και PM1703M αντίστοιχα.

Από τα παραπάνω επίσης παρατηρείται ότι τα όργανα Polimaster PM1621M και PM1703M παρουσιάζουν συστηματική διαφοροποίηση μεταξύ τους στις μετρήσεις, που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της ΔΔ. Αυτή η διαφοροποίηση πιθανόν έχει να κάνει με το πεδίο της ακτινοβολίας, στο οποίο εκτίθενται.

5.7.7.3 Ενεργές ατομικές δόσεις στα σημεία δειγματοληψίας όπως υπολογίστηκαν με τον κώδικα GENII

Πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του κώδικα GENII υπολογισμός της ενεργής ατομικής δόσης που οφείλεται στα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα, που εκπέμπονται από τους ΑΗΣ Μεγαλόπολης. Στους υπολογισμούς συμπεριλήφθηκε η δόση που προκύπτει από εισπνοή, κατάποση, εξωτερική δόση από το πλούμιο, εξωτερική δόση από τα ισότοπα, που έχουν εναποτεθεί στο έδαφος. Περισσότερες λεπτομέρειες μπορεί να δει κανείς στις παραγράφους 5.7.6.1 5.7.6.6. Οι υπολογιζόμενες δόσεις στα σημεία δειγματοληψίας κυμαίνονται από 0.2-$0.38\,\mathrm{nSvhr}^{-1}$ και παρουσιάζονται στον πίνακα 5.53.

Οι ρυθμοί ισοδύναμης δόσης, που μετρήθηκαν με το όργανο Victoreen στα σημεία δειγματοληψίας κυμαίνονταν από 75-$100\,\mathrm{nSvhr}^{-1}$. Σημειώνεται ότι το δοσίμετρο καταγράφει και την δόση που οφείλεται: α)στο φυσικό περιεχόμενο του εδάφους σε φυσικά ραδιενεργά ισότοπα των σειρών του ουρανίου και του θορίου, β)στην κοσμική ακτινοβολία.

5.7.8 Συμπεράσματα που προέκυψαν από την χρήση του κώδικα GENII

Ο GENII είναι ένας κώδικας, ο οποίος μπορεί να προσομοιώσει αρκετά ικανοποιητικά το πολύ σύνθετο φαινόμενο της διασποράς ραδιενεργών ισοτόπων από καμινάδες ατμοηλεκτρικών σταθμών. Σημαντικό χαρακτηριστικό του είναι ότι μπορεί να πραγματοποιήσει υπολογισμούς για ισότοπα, που ανήκουν σε ραδιενεργές αλυσίδες. Οι έτοιμες βιβλιοθήκες δεδομένων, που διαθέτει για την πραγματοποίηση δοσιμετρικών υπολογισμών, μειώνουν σημαντικά τον χρόνο, που χρειάζεται να διαθέσει ο χρήστης για να εισάγει δεδομένα, και διευκολύνουν την όλη διαδικασία. Τέλος, είναι ένας κώδικας αρκετά φιλικός στον χρήστη λόγω του παραθυρικού περιβάλλοντος, που διαθέτει.

Όσον αφορά στα παραγόμενα αποτελέσματα στην περίπτωση της Μεγαλόπολης τα σημαντικότερα συμπεράσματα είναι τα ακόλουθα:

- Οι μέγιστες συγκεντρώσεις και οι μέγιστοι ρυθμοί απόθεσης όλων των ισοτόπων παρουσιάζονται βορειοδυτικά του κέντρου υπολογισμού C. Το ίδιο συμβαίνει και με τις ετήσιες ατομικές δόσεις.

- Η μέγιστη υπολογιζόμενη συγκέντρωση ^{226}Ra στον ατμοσφαιρικό αέρα υπολογίστηκε σε $2.8\,\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$.

- Ο μέγιστος υπολογιζόμενος ρυθμός απόθεσης ^{226}Ra υπολογίστηκε σε 2.0×10^{-2} $\mu\mathrm{Bqs}^{-1}\mathrm{m}^{-2}$.

- Η μέγιστη ετήσια ατομική ενεργή δόση υπολογίστηκε σε $6.4\,\mu\mathrm{Sv}$, η οποία είναι τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερη από την μέγιστη επιτρεπόμενη ετήσια ατομική δόση σύμφωνα με την IAEA [86]. Επισημαίνεται ότι το σημείο της μέγιστης ετήσιας ατομικής ενεργής δόσης βρίσκεται σε απόσταση $1\,\mathrm{km}$ από το κέντρο υπολογισμού και σε γωνία $22.5\,^{\circ}$ από την διεύθυνση του βορρά δεξιόστροφα. Επίσης είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερη από την μέση ετήσια ατομική ενεργή δόση, που λαμβάνει κανείς λόγω των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων, που βρίσκονται στα ελληνικά εδάφη [5]. Ακόμη είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερη από την ετήσια ατομική ενεργή δόση εξαιτίας της εναπόθεσης στο ελληνικό έδαφος τεχνητών ραδιοϊσοτόπων, που προέρχονται από το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl . Η δόση αυτή υπολογίστηκε για περιοχές με την μέση γεωγραφική απόθεση ραδιοϊσοτόπων και για το πρώτο έτος μετά το ατύχημα. Επίσης η μέγιστη ετήσια ατομική ενεργή δόση, που υπολογίστηκε σε αυτή την ΔΔ, είναι δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη από την ετήσια ατομική ενεργή δόση, η οποία προκύπτει από τις μέγιστες τιμές εναπόθεσης τεχνητών ραδιοϊσοτόπων προερχόμενων από το πυρηνικό ατύχημα στο στο ελληνικό έδαφος. Η δόση αυτή υπολογίστηκε για τον πρώτο χρόνο μετά το ατύχημα [6]. Τέλος είναι τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερη από την ετήσια ατομική ενεργή δόση που προκαλείται από όλες τις φυσικές πηγές ακτινοβόλησης [194].

- Η ετήσια ατομική ενεργή δόση, που λαμβάνει κάποιος, ο οποίος κατοικεί στην πόλη της Μεγαλόπολης είναι $1.5\,\mu\mathrm{Sv}$. Η τιμή αυτή είναι μικρότερη από την μέγιστη ετήσια ατομική ενεργή δόση, αλλά είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Η ετήσια ατομική ενεργή δόση που λαμβάνει ο κάτοικος της Μεγαλόπολης είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερη από την ετήσια ενεργή δόση, που λαμβάνει κανείς λόγω των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων, που βρίσκονται στα ελληνικά εδάφη. Ακόμη είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερη από την ετήσια ατομική δόση εξαιτίας της εναπόθεσης στο έδαφος τεχνητών ραδιοϊσοτόπων, που προέρχονται από το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl. Η δόση αυτή υπολογίστηκε για το πρώτο έτος μετά το ατύχημα. Επίσης είναι τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερη από την ετήσια ατομική δόση που προκαλείται από όλες τις φυσικές πηγές ακτινοβόλησης [194].

- Οι τιμές του ρυθμού ισοδύναμης δόσης όπως μετρήθηκαν από το όργανο Victoreen στα σημεία δειγματοληψίας στην περιοχής της Μεγαλόπολης κυμάνθηκαν από $75\text{-}100\,\mathrm{nSvhr}^{-1}$. Οι τιμές του ρυθμού ενεργής δόσης όπως υπολογίστηκε από τον GENII στα υπόψη σημεία είχαν εύρος από $0.2\text{-}0.38\,\mathrm{nSvhr}^{-1}$. Σημειώνεται ότι το όργανο λαμβάνει υπόψη του και την δόση που οφείλεται στο φυσικό περιεχόμενο του εδάφους σε φυσικά ραδιενεργά ισότοπα των σειρών του ουρανίου και του θορίου καθώς και στην κοσμική ακτινοβολία.

5.7.9 Συγκριτική αξιολόγηση των κωδίκων ORION-II και GENII

Οι δύο κώδικες, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας ΔΔ, παρουσιάζουν ο καθένας διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ο ORION-II έχει το πλεονέκτημα ότι είναι λογισμικό ανοικτού κώδικα και μπορεί να λάβει υπόψη του στους υπολογισμούς το ανάγλυφο του εδάφους σε ικανοποιητικό βαθμό. Στα μειονεκτήματα του συγκαταλέγονται η αδυναμία του να συμπεριλάβει στους υπολογισμούς το φαινόμενο των ραδιενεργών αλυσίδων και η δυσκολία στην εισαγωγή των δεδομένων καθώς αυτή γίνεται μέσα από ASCII αρχείο. Ο GENII μπορεί να προσομοιώσει καλύτερα το φαινόμενο της διασποράς ραδιενεργών ισοτόπων καθώς συμπεριλαμβάνει στους υπολογισμούς του το φαινόμενο των ραδιενεργών αλυσίδων και διαθέτει κατάλληλες βιβλιοθήκες συντελεστών για την πραγματοποίηση δοσιμετρικών υπολογισμών. Επίσης είναι αρκετά φιλικός στον χρήστη λόγω του παραθυρικού περιβάλλοντος που διαθέτει. Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγεται η αδυναμία του να συμπεριλάβει την επίδραση του ανάγλυφου του εδάφους στους υπολογισμούς και ότι είναι λογισμικό κλειστού κώδικα.

Οι διαφορές στα αποτελέσματα, που παρατηρήθηκαν μεταξύ των δύο κωδίκων οφείλονται κυρίως στις διαφορετικές εξισώσεις, που διαθέτουν σε κάποια στάδια των υπολογισμών, όπως αναφέρθηκε διεξοδικά στην παράγραφο 5.7.6.4. Ο GENII παρείχε αποτελέσματα σχετικά με τις συγκεντρώσεις του ^{222}Rn και των θυγατρικών του, πράγμα που δεν είχε την δυνατότητα να το πραγματοποιήσει ο ORION-II, λόγω της έλλειψης εξισώσεων για ισότοπα, που ανήκουν σε αλυσίδες. Επίσης με την βοήθεια του GENII πραγματοποιήθηκαν δοσιμετρικοί υπολογισμοί και εκτιμήθηκε η μέγιστη ετήσια ατομική δόση, που οφείλεται στα ισότοπα των σειρών του ^{238}U, του ^{232}Th καθώς και στο ^{40}K. Από την άλλη ο GENII λόγω της αδυναμίας του να συμπεριλάβει την επίδραση του ανάγλυφου του εδάφους στους υπολογισμούς δίνει συγκεντρώσεις ελαφρά υποεκτιμημένες σε σύγκριση με τον ORION-II στην περιοχή των μεγάλων υψομέτρων, δυτικά του ΑΗΣ4.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι η επιλογή για την χρήση και των δύο κωδίκων αποδείχτηκε ορθή διότι λειτούργησαν συμπληρωματικά και ο ένας κάλυψε τις όποιες αδυναμίες είχε ο δεύτερος. Έτσι έχουμε πληρέστερη εικόνα για την επίδραση των ΑΗΣ στην περιοχή της Μεγαλόπολης από ό,τι εάν είχε χρησιμοποιηθεί μόνο ο ένας από τους δύο.

Πίνακες Κεφαλαίου

μήνας	*μέση ταχύτητα* $(msec^{-1})$	*επικρατούσα διεύθυνση*
Ιαν.	1.4	ESE
Φεβ.	1.6	NW
Μαρ.	2.1	E
Απρ.	2.2	NW
Μάι.	1.8	NW
Ιουν.	1.8	NW
Ιουλ.	2.3	NW
Αυγ.	2.1	NW
Σεπ.	1.6	ESE
Οκτ.	1.6	E
Νοε.	1.4	SE
Δεκ.	1.6	ESE

Πίνακας 5.1: Μηνιαία ταχύτητα ανέμου στην περιοχή της Μεγαλόπολης. Πηγή:[140]

κλάση	*διάμετρος* (μm)	*πυκνότητα* (gcm^{-3})
1	2.73	1.85
2	2.58	2.19
3	1.14	2.36
4	0.92	2.45

Πίνακας 5.2: Πυκνότητα σωματιδίων ανάλογα με την διάμετρο. Πηγή:[58]

ένωση	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO
wt%	47.59	0.77	19.13	8.46	3.25	9.59
πυκνότητα (gcm^{-3})	2.64	4.26	3.014	5.24	3.58	3.25
ένωση	MnO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	SO_3	
wt%	0.04	0.36	1.68	0.29	2.42	
πυκνότητα (gcm^{-3})	5.43	2.27	2.32	2.39	1.97	

Πίνακας 5.3: Κατά βάρος (%) χημική σύσταση της ιπτάμενης τέφρας των ΑΗΣ Μεγαλόπολης και πυκνότητες των χημικών ενώσεων, που την αποτελούν. Πηγή: [160], [112]

Μονάδες 1-2	
Ύψος καμιναδας	120 m
Εξωτερική διάμετρος καμινάδας στην κορυφή	5.5 m
Εσωτερική διάμετρος καμινάδας στην κορυφή	5.0 m
Μήκος κτιρίου λέβητα	47.55 m
Πλάτος κτιρίου λέβητα	77 m
Ύψος κτιρίου λέβητα	82.5 m
Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων	190 °C
Ρυθμός εκπομπής καυσαερίων	1 450 000 Nm^3h^{-1}
Περιεκτικότητα καυσαερίων σε τέφρα	50 $mgNm^{-3}$
Υψόμετρο τοποθεσίας μονάδας	380 m

Πίνακας 5.4: Κατασκευαστικά δεδομένα ΑΗΣ 1-2 Μεγαλόπολης

Μονάδα 3	
Ύψος καμινάδας	180 m
Εξωτερική διάμετρος καμινάδας στην κορυφή	6.0 m
Εσωτερική διάμετρος καμινάδας στην κορυφή	5.5 m
Μήκος κτιρίου λέβητα	63.61 m
Πλάτος κτιρίου λέβητα	60.71 m
Ύψος κτιρίου λέβητα	87.5 m
Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων	190 °C
Ρυθμός εκπομπής καυσαερίων	1 740 000 Nm^3h^{-1}
Περιεκτικότητα καυσαερίων σε τέφρα	50 $mgNm^{-3}$
Υψόμετρο τοποθεσίας μονάδας	380 m

Πίνακας 5.5: Κατασκευαστικά δεδομένα ΑΗΣ 3 Μεγαλόπολης

Μονάδα 4	
Ύψος καμιναδας	180 m
Εξωτερική διάμετρος καμινάδας στην κορυφή	6.0 m
Εσωτερική διάμετρος καμινάδας στην κορυφή	5.5 m
Μήκος κτιρίου λέβητα	63 m
Πλάτος κτιρίου λέβητα	51 m
Ύψος κτιρίου λέβητα	80 m
Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων	190 °C
Ρυθμός εκπομπής καυσαερίων	1 740 000 Nm^3h^{-1}
Περιεκτικότητα καυσαερίων σε τέφρα	50 $mgNm^{-3}$
Υψόμετρο τοποθεσίας μονάδας	370 m

Πίνακας 5.6: Κατασκευαστικά δεδομένα ΑΗΣ 4 Μεγαλόπολης

	Συγκεντρώσεις ($Bqkg^{-1}$)			
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	Ερευνητής
ΑΗΣ1	807±138	55±2	449±47	Simopoulos and Angelopoulos [173]
ΑΗΣ3	845±71	56±1	502±21	Simopoulos and Angelopoulos [173]
ΑΗΣ4	904±8.6	53±4.7	454±11	Karangelos et al. [97]

Πίνακας 5.7: Συγκεντρώσεις ^{226}Ra, ^{232}Th και ^{40}K στην ιπτάμενη τέφρα των ΑΗΣ1, ΑΗΣ3 και ΑΗΣ4, όπως προσδιορίστηκαν από το ΕΠΤ-ΕΜΠ

	Γεωγραφικό πλάτος φ (°)	*Γεωγραφικό μήκος λ (°)*
ΑΗΣ1-2	37.4177	22.1078
ΑΗΣ3	37.4177	22.1078
ΑΗΣ4	37.4154	22.0659
Κέντρο C	37.4154	22.0869

Πίνακας 5.8: Γεωγραφικές συντεταγμένες φ, λ των ΑΗΣ1-2,3, ΑΗΣ4 καθώς και του Κέντρου Υπολογισμού C

	Ακτίνα R(m)	*Γωνία ϑ(°)*	*Υψόμετρο*(m)
ΑΗΣ1-2,3	1863	83.7	380
ΑΗΣ4	1855	270	370

Πίνακας 5.9: Ακτίνα R, γωνία ϑ και υψόμετρο των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 σε σχέση με το ορισμένο κέντρο C

1^0 Σενάριο - Ημέρα				
Κατηγορία νέφωσης				
	(0-4)/8	(4-6.4)/8	(6.4-8)/8	
ΙΑΝ	0.011	0.007	0.009	
ΦΕΒ	0.011	0.007	0.009	
ΜΑΡ	0.016	0.010	0.009	
ΑΠΡ	0.019	0.013	0.007	
ΜΑΙ	0.025	0.015	0.003	
ΙΟΥΝ	0.030	0.012	0.001	
ΙΟΥΛ	0.034	0.009	0	
ΑΥΓ	0.032	0.008	0	
ΣΕΠ	0.025	0.009	0.001	
ΟΚΤ	0.018	0.009	0.004	
ΝΟΕ	0.013	0.008	0.006	
ΔΕΚ	0.011	0.007	0.008	
σύνολο	0.245	0.114	0.057	0.416

Πίνακας 5.10: Σενάριο 1 (Σενάριο αναφοράς) - Ημέρα. Ετήσια ποσοστά χρόνου (%) ανά μήνα και κατηγορία νέφωσης

1^0 Σενάριο - Νύχτα				
Κατηγορία νέφωσης				
	(0-4)/8	(4-6.4)/8	(6.4-8)/8	
ΙΑΝ	0.023	0.015	0.020	
ΦΕΒ	0.021	0.013	0.016	
ΜΑΡ	0.022	0.014	0.013	
ΑΠΡ	0.021	0.015	0.008	
ΜΑΙ	0.024	0.015	0.003	
ΙΟΥΝ	0.027	0.011	0.001	
ΙΟΥΛ	0.032	0.009	0	
ΑΥΓ	0.036	0.009	0	
ΣΕΠ	0.034	0.012	0.001	
ΟΚΤ	0.030	0.015	0.007	
ΝΟΕ	0.027	0.016	0.0012	
ΔΕΚ	0.024	0.016	0.018	
σύνολο	0.321	0.16	0.088	0.569

Πίνακας 5.11: Σενάριο 1 (Σενάριο αναφοράς) - Νύχτα. Ετήσια ποσοστά χρόνου (%) ανά μήνα και κατηγορία νέφωσης

1^0 Σενάριο							
Ποσοστά χρόνου ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια							
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F	
NW	0.121	0.030	0.034	0.079	0.033	0.200	
ESE	0	0.047	0.023	0.058	0	0.124	
E	0	0.034	0.009	0.045	0.014	0.067	
SE	0	0.018	0.008	0.012	0	0.045	
σύνολο	0.121	0.129	0.074	0.194	0.047	0.436	1

Πίνακας 5.12: Σενάριο 1 (Σενάριο αναφοράς). Ποσοστά χρόνου ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

1^0 Σενάριο						
Μέση ταχύτητα του ανέμου ($msec^{-1}$)						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97
ESE	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53
E	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85
SE	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60

Πίνακας 5.13: Σενάριο 1 (Σενάριο αναφοράς). Μέση ταχύτητα ανέμου στην επιφάνεια του εδάφους ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

1^0 Σενάριο						
Μέση θερμοκρασία επιφάνειας (K)						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	290.67	290.67	290.67	290.67	290.67	290.67
ESE	283.75	283.75	283.75	283.75	283.75	283.75
E	284.40	284.40	284.40	284.40	284.40	284.40
SE	287.75	287.75	287.75	287.75	287.75	287.75

Πίνακας 5.14: Σενάριο 1 (Σενάριο αναφοράς). Μέση θερμοκρασία επιφανείας (K) ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

1^0 Σενάριο						
Ενεργό ύψος (m) πλουμίου ΑΗΣ 1-2						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	1162.02	1162.02	1114.47	976.91	637.48	596.67
ESE	1369.39	1369.39	1306.93	845.39	650.13	605.56
E	1219.01	1219.01	1167.35	941.50	640.96	599.12
SE	1321.97	1321.97	1262.92	865.62	647.60	603.78

Πίνακας 5.15: Σενάριο 1 (Σενάριο αναφοράς). Ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 1-2 (από την επιφάνεια της θάλασσας) ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια (Υψόμετρο σταθμού:$380\,\mathrm{m}$, ύψος καμινάδας:$120\,\mathrm{m}$)

1^0 Σενάριο						
Ταχύτητα ανέμου ($msec^{-1}$) ΑΗΣ 1-2						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	2.43	2.43	2.65	3.08	5.61	10.22
ESE	1.89	1.89	2.07	2.40	4.38	7.97
E	2.28	2.28	2.50	2.90	5.28	9.61
SE	1.97	1.97	2.16	2.51	4.57	8.31

Πίνακας 5.16: Σενάριο 1 (Σενάριο αναφοράς). Ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 1-2 ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

1^0 Σενάριο						
Αντίστροφη ταχύτητα ανέμου ($secm^{-1}$) ΑΗΣ 1-2						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	0.41	0.41	0.38	0.32	0.18	0.10
ESE	0.53	0.53	0.48	0.42	0.23	0.13
E	0.44	0.44	0.40	0.34	0.19	0.10
SE	0.51	0.51	0.46	0.40	0.22	0.12

Πίνακας 5.17: Σενάριο 1 (Σενάριο αναφοράς). Αντίστροφη ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 1-2 ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

1^0 Σενάριο						
Ενεργό ύψος (m) πλουμίου ΑΗΣ 3						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	1277.88	1277.88	1218.25	976.91	699.34	655.36
ESE	1502.73	1502.73	1424.43	845.39	712.17	664.14
E	1339.67	1339.67	1274.91	941.50	702.87	657.78
SE	1451.31	1451.31	1377.28	865.62	709.60	662.38

Πίνακας 5.18: Σενάριο 1 (Σενάριο αναφοράς). Ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 3 (από την επιφάνεια της θάλασσας) ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια (Υψόμετρο σταθμού :380 m, ύψος καμινάδας :180 m)

1^0 Σενάριο						
Ταχύτητα ανέμου ($msec^{-1}$) στον ΑΗΣ 3						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	2.43	2.43	2.65	3.08	5.61	10.22
ESE	1.89	1.89	2.07	2.40	4.38	7.97
E	2.28	2.28	2.50	2.90	5.28	9.61
SE	1.97	1.97	2.16	2.51	4.57	8.31

Πίνακας 5.19: Σενάριο 1 (Σενάριο αναφοράς). Ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 3 ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

1^0 Σενάριο						
Αντίστροφη ταχύτητα ανέμου ($secm^{-1}$) στον ΑΗΣ 3						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	0.41	0.41	0.38	0.32	0.18	0.10
ESE	0.53	0.53	0.48	0.42	0.23	0.13
E	0.44	0.44	0.40	0.34	0.19	0.10
SE	0.51	0.51	0.46	0.40	0.22	0.12

Πίνακας 5.20: Σενάριο 1 (Σενάριο αναφοράς). Αντίστροφη ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 3 ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

1^0 Σενάριο						
Ενεργό ύψος (m) πλουμίου ΑΗΣ 4						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	1267.88	1267.88	1208.25	966.91	689.34	645.36
ESE	1492.73	1492.73	1414.43	835.39	702.17	654.14
E	1329.67	1329.67	1264.91	931.50	692.87	647.78
SE	1441.31	1441.31	1367.28	855.62	699.60	652.38

Πίνακας 5.21: Σενάριο 1 (Σενάριο αναφοράς). Ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 4 (από την επιφάνεια της θάλασσας) ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια (Υψόμετρο σταθμού:$370\,\mathrm{m}$, ύψος καμινάδας:$120\,\mathrm{m}$)

1^0 Σενάριο						
Ταχύτητα ανέμου ($msec^{-1}$) στον ΑΗΣ 4						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	2.43	2.43	2.65	3.08	5.61	10.22
ESE	1.89	1.89	2.07	2.40	4.38	7.97
E	2.28	2.28	2.50	2.90	5.28	9.61
SE	1.97	1.97	2.16	2.51	4.57	8.31

Πίνακας 5.22: Σενάριο 1 (Σενάριο αναφοράς). Ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 4 ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

1^0 Σενάριο						
Αντίστροφη ταχύτητα ανέμου ($secm^{-1}$) στον ΑΗΣ 4						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	0.41	0.41	0.38	0.32	0.18	0.10
ESE	0.53	0.53	0.48	0.42	0.23	0.13
E	0.44	0.44	0.40	0.34	0.19	0.10
SE	0.51	0.51	0.46	0.40	0.22	0.12

Πίνακας 5.23: Σενάριο 1 (Σενάριο αναφοράς). Αντίστροφη ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 4 ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

2^0 Σενάριο						
Ποσοστά χρόνου ανά διεύθυνση και ευστάθεια						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97
ESE	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53
E	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85
SE	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60

Πίνακας 5.24: Σενάριο 2 (Επίδραση τοπικής ώρας). Ποσοστά χρόνου ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

2^0 Σενάριο						
Μέση ταχύτητα του ανέμου ($msec^{-1}$)						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97
ESE	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53
E	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85
SE	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60

Πίνακας 5.25: Σενάριο 2 (Επίδραση τοπικής ώρας). Μέση ταχύτητα (msec^{-1}) ανέμου στην επιφάνεια του εδάφους ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

2^0 Σενάριο						
Μέση θερμοκρασία επιφάνειας (K)						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	290.67	290.67	290.67	290.67	290.67	290.67
ESE	283.75	283.75	283.75	283.75	283.75	283.75
E	284.40	284.40	284.40	284.40	284.40	284.40
SE	287.75	287.75	287.75	287.75	287.75	287.75

Πίνακας 5.26: Σενάριο 2 (Επίδραση τοπικής ώρας). Μέση θερμοκρασία επιφανείας (K) ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

2^0 Σενάριο						
Ενεργό ύψος (m) πλουμίου ΑΗΣ 1-2						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	1162.02	1162.02	1114.47	976.91	637.48	596.67
ESE	1369.39	1369.39	1306.93	845.39	650.13	605.56
E	1219.01	1219.01	1167.35	941.50	640.96	599.12
SE	1321.97	1321.97	1262.92	865.62	647.60	603.78

Πίνακας 5.27: Σενάριο 2 (Επίδραση τοπικής ώρας). Ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 1-2 (από την επιφάνεια της θάλασσας) ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια (Υψόμετρο σταθμού: $380\,\mathrm{m}$, ύψος καμινάδας:$120\,\mathrm{m}$)

2^0 Σενάριο						
Ταχύτητα ανέμου ($msec^{-1}$) στον ΑΗΣ 1-2						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	2.43	2.43	2.65	3.08	5.61	10.22
ESE	1.89	1.89	2.07	2.40	4.38	7.97
E	2.28	2.28	2.50	2.90	5.28	9.61
SE	1.97	1.97	2.16	2.51	4.57	8.31

Πίνακας 5.28: Σενάριο 2 (Επίδραση τοπικής ώρας). Ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 1-2 ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

1^0 Σενάριο						
Αντίστροφη ταχύτητα ανέμου ($secm^{-1}$) στον ΑΗΣ 1-2						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	0.41	0.41	0.38	0.32	0.18	0.10
ESE	0.53	0.53	0.48	0.42	0.23	0.13
E	0.44	0.44	0.40	0.34	0.19	0.10
SE	0.51	0.51	0.46	0.40	0.22	0.12

Πίνακας 5.29: Σενάριο 2 (Επίδραση τοπικής ώρας). Αντίστροφη ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 1-2 ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

2^0 *Σενάριο* *Ενεργό ύψος (m) πλουμίου ΑΗΣ 3*						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	1277.88	1277.88	1218.25	976.91	699.34	655.36
ESE	1502.73	1502.73	1424.43	845.39	712.17	664.14
E	1339.67	1339.67	1274.91	941.50	702.87	657.78
SE	1451.31	1451.31	1377.28	865.62	709.60	662.38

Πίνακας 5.30: Σενάριο 2 (Επίδραση τοπικής ώρας). Ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 3 (από την επιφάνεια της θάλασσας) ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια (Υψόμετρο σταθμού: $380\,\mathrm{m}$, ύψος καμινάδας:$180\,\mathrm{m}$)

2^0 *Σενάριο* *Ταχύτητα ανέμου ($msec^{-1}$) στον ΑΗΣ 3*						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	2.43	2.43	2.65	3.08	5.61	10.22
ESE	1.89	1.89	2.07	2.40	4.38	7.97
E	2.28	2.28	2.50	2.90	5.28	9.61
SE	1.97	1.97	2.16	2.51	4.57	8.31

Πίνακας 5.31: Σενάριο 2 (Επίδραση τοπικής ώρας). Ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 3 ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

2^0 *Σενάριο* *Αντίστροφη ταχύτητα ανέμου ($secm^{-1}$) ston AHS 3*						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	0.41	0.41	0.38	0.32	0.18	0.10
ESE	0.53	0.53	0.48	0.42	0.23	0.13
E	0.44	0.44	0.40	0.34	0.19	0.10
SE	0.51	0.51	0.46	0.40	0.22	0.12

Πίνακας 5.32: Σενάριο 2 (Επίδραση τοπικής ώρας). Αντίστροφη ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 3 ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

2^0 Σενάριο						
Ενεργό ύψος (m) πλουμίου ΑΗΣ 4						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	1267.88	1267.88	1208.25	966.91	689.34	645.36
ESE	1492.73	1492.73	1414.43	835.39	702.17	654.14
E	1329.67	1329.67	1264.91	931.50	692.87	647.78
SE	1441.31	1441.31	1367.28	855.62	699.60	652.38

Πίνακας 5.33: Σενάριο 2 (Επίδραση τοπικής ώρας). Ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 4 (από την επιφάνεια της θάλασσας) ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια (Υψόμετρο σταθμού: $370\,\mathrm{m}$, ύψος καμινάδας:$180\,\mathrm{m}$)

2^0 Σενάριο						
Ταχύτητα ανέμου ($msec^{-1}$) στον ΑΗΣ 4						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	2.43	2.43	2.65	3.08	5.61	10.22
ESE	1.89	1.89	2.07	2.40	4.38	7.97
E	2.28	2.28	2.50	2.90	5.28	9.61
SE	1.97	1.97	2.16	2.51	4.57	8.31

Πίνακας 5.34: Σενάριο 2 (Επίδραση τοπικής ώρας). Ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 4 ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

2^0 Σενάριο						
Αντίστροφη ταχύτητα ανέμου ($secm^{-1}$) στον ΑΗΣ 4						
Ευστάθεια →	A	B	C	D	E	F
NW	0.41	0.41	0.38	0.32	0.18	0.10
ESE	0.53	0.53	0.48	0.42	0.23	0.13
E	0.44	0.44	0.40	0.34	0.19	0.10
SE	0.51	0.51	0.46	0.40	0.22	0.12

Πίνακας 5.35: Σενάριο 2 (Επίδραση τοπικής ώρας). Αντίστροφη ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 4 ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

Σενάριο	*Χαρακτηριστικό σεναρίου*
1ο	Σενάριο αναφοράς (Τοπική ώρα=09.30)
2ο	Επίδραση τοπικής ώρας (Τοπική ώρα=13.00)

Πίνακας 5.36: Μετεωρολογικά σενάρια που κατασκευάστηκαν για τις εκτελέσεις του ORION-II

Κωδικός εκτέλεσης	*Μετεωρολογικό σενάριο*	*Μεταβαλλόμενες Παράμετροι*	Σχόλιο
15	1ο	$V_d = 0.005\,msec^{-1}$	αρχική εκτέλεση
14	1ο	$V_d = 0.001\,msec^{-1}$	επίδραση V_d
16	1ο	$V_d = 0.01\,msec^{-1}$	επίδραση V_d
17	1ο	$d_A = 8\,\mu m$, $d_B = 30\,\mu m$	επίδραση κοκκομετρίας
18	1ο	$h = 650\,m$	επίδραση υψομέτρου
19	1ο	$h = 380\,m$	επίδραση υψομέτρου
20	1ο	$\Lambda_p = 4 \times 10^{-4}\,sec^{-1}$, $F_p = 0.15$	επίδραση βροχόπτωσης
21	1ο	$\Lambda_p = 4 \times 10^{-4}\,sec^{-1}$, $F_p = 0.30$	επίδραση βροχόπτωσης
22	1ο	$\Lambda_p = 6 \times 10^{-4}\,sec^{-1}$, $F_p = 0.30$	επίδραση βροχόπτωσης
23	2ο	Τοπική ώρα=13.00	επίδραση τοπικής ώρας

Πίνακας 5.37: Στοιχεία των εκτελέσεων του ORION-II

Ερευνητής	*υπολογιζόμενη συγκέντρωση ^{226}Ra στον αέρα* (μBqm^{-3})	*συγκέντρωση ^{226}Ra στην ιπτάμενη τέφρα* ($Bqkg^{-1}$)	*συγκέντρωση ^{226}Ra στον λιγνίτη* ($Bqkg^{-1}$)
Alvarez and Garzon [3]	3.5	135	16
Zeevaert et al. [213]	4.5×10^{-3}	700	-
Μανωλοπούλου [225]	611	142-605	44-236

Πίνακας 5.38: Αποτελέσματα εκτελέσεων κωδίκων ατμοσφαιρικής διασποράς και αντίστοιχες συγκεντρώσεις ^{226}Ra στον λιγνίτη και στην εκπεμπόμενη τέφρα στην βιβλιογραφία

	Ρυθμός εκπομπής ^{226}Ra ($Cisec^{-1}$)	
	Μικρά σωματίδια A	*Μεγάλα σωματίδια B*
ΑΗΣ1-2	6.39×10^{-10}	3.44×10^{-10}
ΑΗΣ3	3.81×10^{-10}	2.05×10^{-10}
ΑΗΣ4	3.81×10^{-10}	2.05×10^{-10}

Πίνακας 5.39: Εκτιμώμενος ρυθμός εκπομπής ^{226}Ra για τα μικρά και τα μεγάλα σωματιδία από τους ΑΗΣ Μεγαλόπολης

Κωδικός εκτέλεσης	*Μεταβαλλόμενες παράμετροι*	*Σχόλιο*	*Μέγιστη συγκέντρωση* ^{226}Ra(μBqm^{-3})	*Μέγιστος ρυθμός απόθεσης* ^{226}Ra ($\mu Bqs^{-1}m^{-2}$)
15	$V_d = 0.005\,msec^{-1}$	αρχική εκτέλεση	7.99	0.040
14	$V_d = 0.001\,msec^{-1}$	επίδραση V_d	8.6	0.009
16	$V_d = 0.01\,msec^{-1}$	επίδραση V_d	7.37	0.074
17	$d_A = 8\,\mu m$, $d_B = 30\,\mu m$	επίδραση κοκκομετρίας	6.35	0.048
18	$h = 650\,m$	επίδραση υψομέτρου	7.69	0.038
19	$h = 380\,m$	επίδραση υψομέτρου	1.83	0.0091
20	$\Lambda_p = 4 \times 10^{-4}\,sec^{-1}$, $F_p = 0.15$	επίδραση βροχόπτωσης	7.99	0.25
21	$\Lambda_p = 4 \times 10^{-4}\,sec^{-1}$, $F_p = 0.30$	επίδραση βροχόπτωσης	7.99	0.50
22	$\Lambda_p = 6 \times 10^{-4}\,sec^{-1}$, $F_p = 0.30$	επίδραση βροχόπτωσης	7.99	0.74
23	Τοπική ώρα=13.00	επίδραση τοπικής ώρας	8.05	0.04

Πίνακας 5.40: Συγκεντρωτικός πίνακας των εκτελέσεων του ORION-II

	Ανατολική συντεταγμένη (m)	*Βόρεια συντεταγμένη* (m)
ΑΗΣ1-2,3	1851.2	205.4
ΑΗΣ4	−1854.7	0

Πίνακας 5.41: Συντεταγμένες των σταθμών ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 στο σύστημα του κώδικα GENII

Κλάσεις ταχύτητας ανέμου ($msec^{-1}$)	*προεπιλεγμένη τιμή* ($msec^{-1}$)
0-1.54	0.89
1.54-3.09	2.65
3.09-5.14	4.7
5.14-8.23	7.15
8.23-10.8	9.8
>10.8	12.7

Πίνακας 5.42: Κλάσεις ταχύτητας ανέμου και αντίστοιχες προεπιλεγμένες τιμές ταχύτητας ανέμου στον κώδικα GENII

	^{238}U		^{234}Th		^{226}Ra	
	συγκέντρωση ιπτ. τέφρας ($Bqkg^{-1}$)	*Ρυθμός εκπομπής* ($Bqsec^{-1}$)	*συγκέντρωση ιπτ. τέφρας* ($Bqkg^{-1}$)	*Ρυθμός εκπομπής* ($Bqsec^{-1}$)	*συγκέντρωση ιπτ. τέφρας* ($Bqkg^{-1}$)	*Ρυθμός εκπομπής* ($Bqsec^{-1}$)
ΑΗΣ1-2	964	19.38	964	19.38	904	18.21
ΑΗΣ3	964	23.30	964	23.30	904	21.70
ΑΗΣ4	964	23.30	964	23.30	904	21.70

Πίνακας 5.43: Συγκεντρώσεις στην ιπτάμενη τέφρα και ρυθμός εκπομπής των ισοτόπων ^{238}U, ^{234}Th και ^{226}Ra από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 σύμφωνα με τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στις παραγράφους 5.3.2 και 5.7.5.8

	^{210}Pb		^{210}Po		^{210}Bi	
	συγκέντρωση ιπτ. τέφρας ($Bqkg^{-1}$)	*Ρυθμός εκπομπής* ($Bqsec^{-1}$)	*συγκέντρωση ιπτ. τέφρας* ($Bqkg^{-1}$)	*Ρυθμός εκπομπής* ($Bqsec^{-1}$)	*συγκέντρωση ιπτ. τέφρας* ($Bqkg^{-1}$)	*Ρυθμός εκπομπής* ($Bqsec^{-1}$)
ΑΗΣ1-2	3616	72.82	3616	72.82	3616	72.82
ΑΗΣ3	3616	86.78	3616	86.78	3616	86.78
ΑΗΣ4	3616	86.78	3616	86.78	3616	86.78

Πίνακας 5.44: Συγκεντρώσεις στην ιπτάμενη τέφρα και ρυθμός εκπομπής των ισοτόπων ^{210}Pb, ^{210}Po και ^{226}Bi από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 σύμφωνα με τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στις παραγράφους 5.3.2 και 5.7.5.8

	^{232}Th		^{228}Th		^{224}Ra	
	συγκέντρωση ιπτ. τέφρας ($Bqkg^{-1}$)	*Ρυθμός εκπομπής* ($Bqsec^{-1}$)	*συγκέντρωση ιπτ. τέφρας* ($Bqkg^{-1}$)	*Ρυθμός εκπομπής* ($Bqsec^{-1}$)	*συγκέντρωση ιπτ. τέφρας* ($Bqkg^{-1}$)	*Ρυθμός εκπομπής* ($Bqsec^{-1}$)
ΑΗΣ1-2	53	1.07	53	1.07	53	1.07
ΑΗΣ3	53	1.28	53	1.28	53	1.28
ΑΗΣ4	53	1.28	53	1.28	53	1.28

Πίνακας 5.45: Συγκεντρώσεις στην ιπτάμενη τέφρα και ρυθμός εκπομπής των ισοτόπων ^{232}Th, ^{228}Th και ^{228}Ra από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 σύμφωνα με τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στις παραγράφους 5.3.2 και 5.7.5.8

	^{224}Ra		^{212}Pb		^{40}K	
	συγκέντρωση ιπτ. τέφρας ($Bqkg^{-1}$)	*Ρυθμός εκπομπής* ($Bqsec^{-1}$)	*συγκέντρωση ιπτ. τέφρας* ($Bqkg^{-1}$)	*Ρυθμός εκπομπής* ($Bqsec^{-1}$)	*συγκέντρωση ιπτ. τέφρας* ($Bqkg^{-1}$)	*Ρυθμός εκπομπής* ($Bqsec^{-1}$)
ΑΗΣ1-2	53	1.07	53	1.07	454	3.48
ΑΗΣ3	53	1.28	53	1.28	454	4.19
ΑΗΣ4	53	1.28	53	1.28	454	4.19

Πίνακας 5.46: Συγκεντρώσεις στην ιπτάμενη τέφρα και ρυθμός εκπομπής των ισοτόπων ^{224}Ra, ^{212}Pb, ^{40}K από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 σύμφωνα με τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στις παραγράφους 5.3.2 και 5.7.5.8

	Ισχύς (MW)	*Συνολική απόδοση (%)*	*κατανάλωση λιγνίτη* (kgs^{-1})
ΑΗΣ1-2	155	30.7	120.36
ΑΗΣ3	185.4	29.5	149.6
ΑΗΣ4	178.5	30.4	139.8

Πίνακας 5.47: Συνολική απόδοση, παραγόμενες ισχύες και κατανάλωση λιγνίτη των ΑΗΣ1-2, ΑΗΣ3 και ΑΗΣ4 Μεγαλόπολης

Ρυθμός εκπομπής ^{222}Rn ($Bqsec^{-1}$)		
ΑΗΣ1-2	ΑΗΣ3	ΑΗΣ4
23986.7	31315.4	27867.6

Πίνακας 5.48: Ρυθμός εκπομπής ^{222}Rn από τις καμινάδες των ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4

Υπολογιζόμενες δόσεις και δοσιμετρικά όρια	*Αναφορά*	*Δόση* ($\mu Svyear^{-1}$)	*Σχόλιο*
Μέγιστη ετήσια ατομική ενεργή δόση - περιοχή Μεγαλόπολης	παρούσα ΔΔ	6.45	1 km από το κέντρο υπολογισμού
Ετήσια ατομική ενεργή δόση- Πόλη Μεγαλόπολης	παρούσα ΔΔ	1.5	-
Ετήσια ενεργή δόση από λειτουργία ΑΗΣ	Zeevaert et al. [213]	4.76×10^{-2}	Είναι ασαφές εάν πρόκειται για μέγιστη ή μέση δόση
Ετήσια ενεργή δόση από λειτουργία ΑΗΣ	NRPB [176]	1.1×10^{-1}	-
Ετήσια ενεργή δόση από το έδαφος λόγω φυσικών ραδιοϊσοτόπων	Anagnostakis et al. [5]	49.1	Μέση δόση για την Ελλάδα -
Ετήσια ενεργή δόση λόγω ακτινοβόλησης από το έδαφος εξαιτίας του Chernobyl ένα έτος μετά το ατύχημα	Anagnostakis et al. [6]	67	Υπολογισμός για έναν κάτοικο της περιοχής με την μέση γεωγραφική εναπόθεση
Ετήσια ενεργή δόση λόγω ακτινοβόλησης από το έδαφος εξαιτίας του Chernobyl ένα έτος μετά το ατύχημα	Anagnostakis et al. [6]	737	Υπολογισμός για έναν κάτοικο της περιοχής με την μέγιστη γεωγραφική εναπόθεση
Ετήσια ενεργή δόση από οποιαδήποτε φυσική πηγή ραδιενέργειας	UNSCEAR [194]	2400	-
Όριο ετήσιας ατομικής ενεργής δόσης για το κοινό	IAEA [86]	1000	-

Πίνακας 5.49: Υπολογιζόμενες δόσεις και δοσιμετρικά όρια στην παρούσα ΔΔ και στην βιβλιογραφία

Τοποθεσία	ϕ	λ	*Συγκέντρωση* ^{222}*Rn* (Bqm^{-3})	*Ρυθμός δόσης (Victoreen)* $(nSvhr^{-1})$
Χωριό Κατσίμπαλης	37.4533°	22.0924°	29±22	75
Δρόμος Κατσίμπαλη - Καρύταινα	37.4825°	22.0556°	22±8	95
Χωριό Κουρουνιός	37.4562°	22.0389°	17±9	-
Δρόμος Καρυές προς Καστανοχώρι	37.4177°	22.0406°	-	100

Πίνακας 5.50: Μετρήσεις ^{222}Rn στον ατμοσφαιρικό αέρα και μετρήσεις ρυθμού γ-δόσης με το όργανο Victoreen στην περιοχή της Μεγαλόπολης

	PM1621M	*PM1703M*
Συνολική δόση (μSv)	0.6	0.43
Ρυθμός δόσης (nSvhr^{-1})	74	59

Πίνακας 5.51: Μέτρηση ρυθμού γ-δόσης με τα όργανα PM1621M και PM1703M καθ' όλη την διάρκεια της δειγματοληψίας στην περιοχή της Μεγαλόπολης

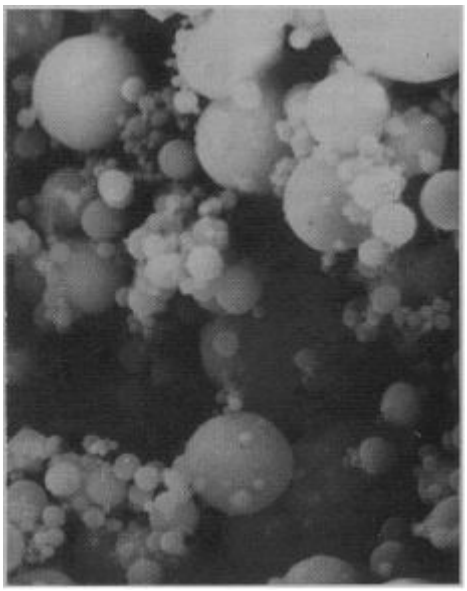
	PM1621M Συνολική δόση (μSv)	*PM1621M Ρυθμός δόσης* ($nSvhr^{-1}$)	*PM1703M Συνολική δόση* (μSv)	*PM1703M Ρυθμός δόσης* ($nSvhr^{-1}$)
Γραφείο Ισογείου	0.3	57.9	0.2	30.7
Υπόγειο Κτιρίου Κ	2.4	505.4	7.9	1688.4

Πίνακας 5.52: Ρυθμοί δόσης όπως μετρήθηκαν από τα όργανα Polimaster σε δύο σημεία του Κτιρίου Κ Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου

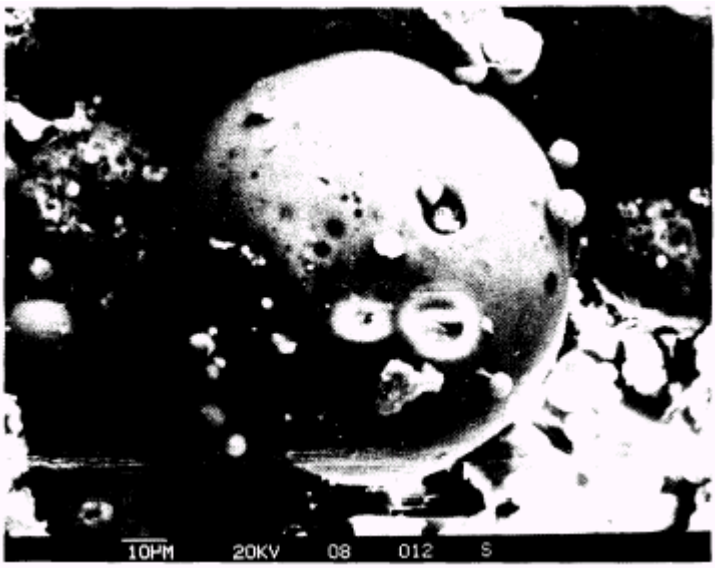
Τοποθεσία	ϕ	λ	*Ρυθμός γ-δόσης (Victoreen)* $(nSvhr^{-1})$	*Ενεργή ατομική δόση σύμφωνα με του GENII* $(nSvhr^{-1})$
Χωριό Κατσίμπαλης	37.4533°	22.0924°	75	0
Δρόμος Κατσίμπαλη - Καρύταινα	37.4825°	22.0556°	95	0.02
Χωριό Κουρουνιός	37.4562°	22.0389°	-	0.38
Δρόμος Καρυές προς Καστανοχώρι	37.4177°	22.0406°	100	0.05

Πίνακας 5.53: Μετρούμενες γ-δόσεις με το όργανο Victoreen και υπολογιζόμενες ενεργές ατομικές δόσεις από τον κώδικα GENII λόγω των εκπεμπόμενων φυσικών ραδιοϊσοτόπων από τους ΑΗΣ Μεγαλόπολης στα σημεία δειγματοληψίας

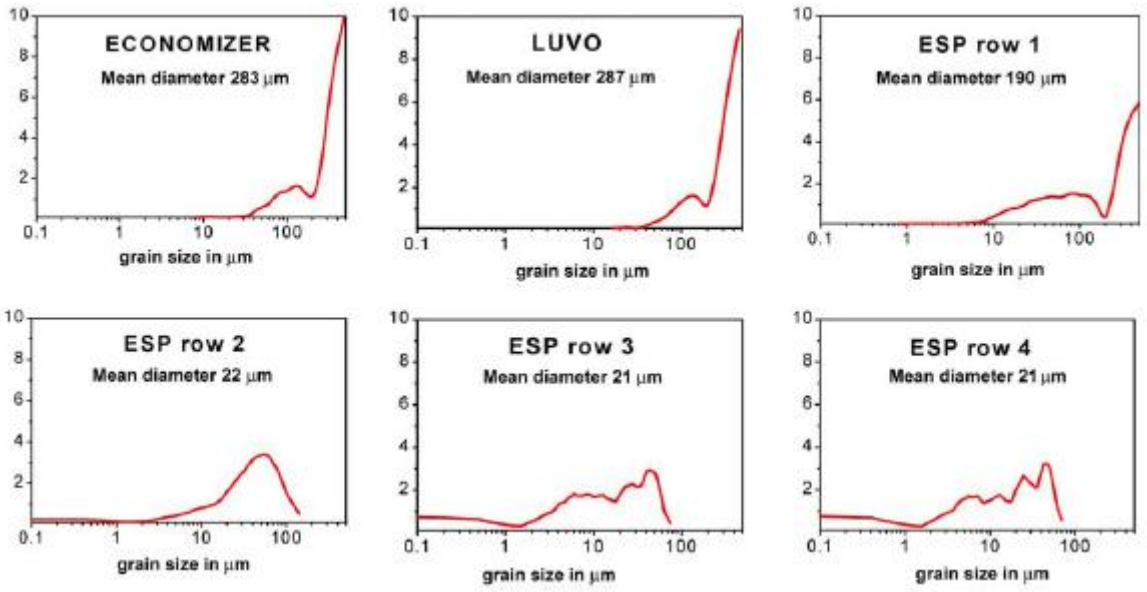
Σχήματα Κεφαλαίου



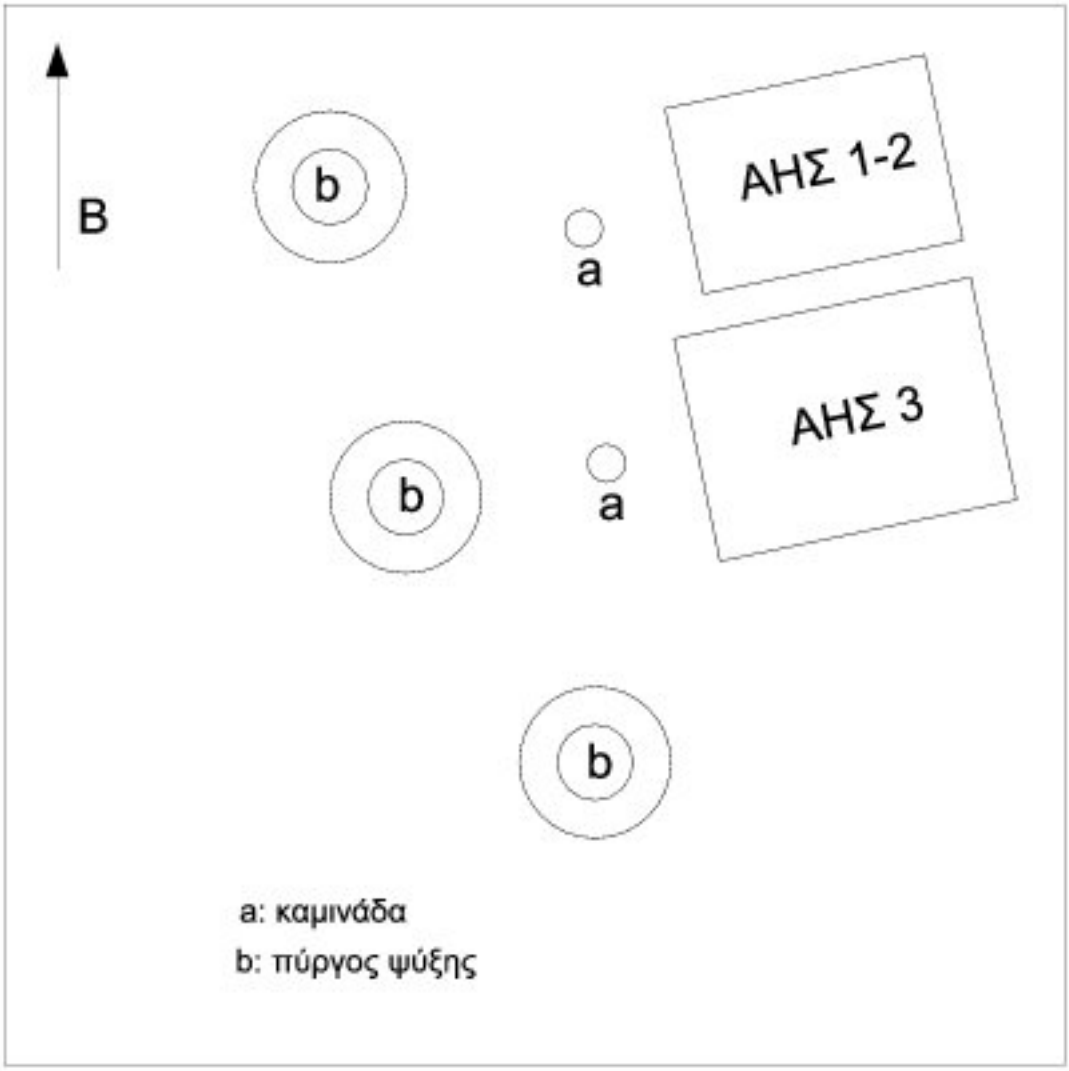
Σχήμα 5.1: Σωματίδια ιπτάμενης τέφρας. Πηγή:[75]



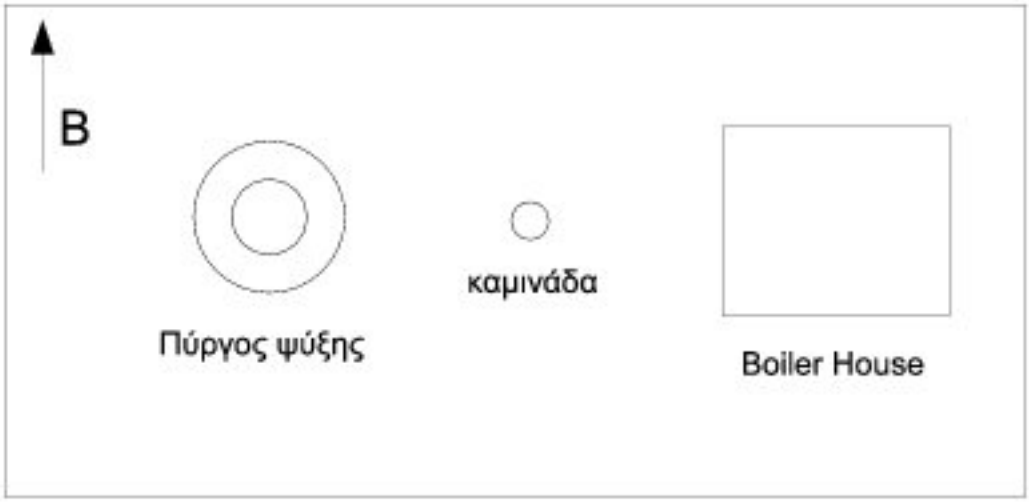
Σχήμα 5.2: Σωματίδια ιπτάμενης τέφρας που προέρχονται από τους ΑΗΣ Μεγαλόπολης. (Πηγή: ΕΠΤ-ΕΜΠ, 1982)



Σχήμα 5.3: Κατανομή της διαμέτρου των σωματιδίων, που συλλέγονται στα διάφορα σημεία του ΑΗΣ 4 στην Μεγαλόπολη. Πηγή :[97]

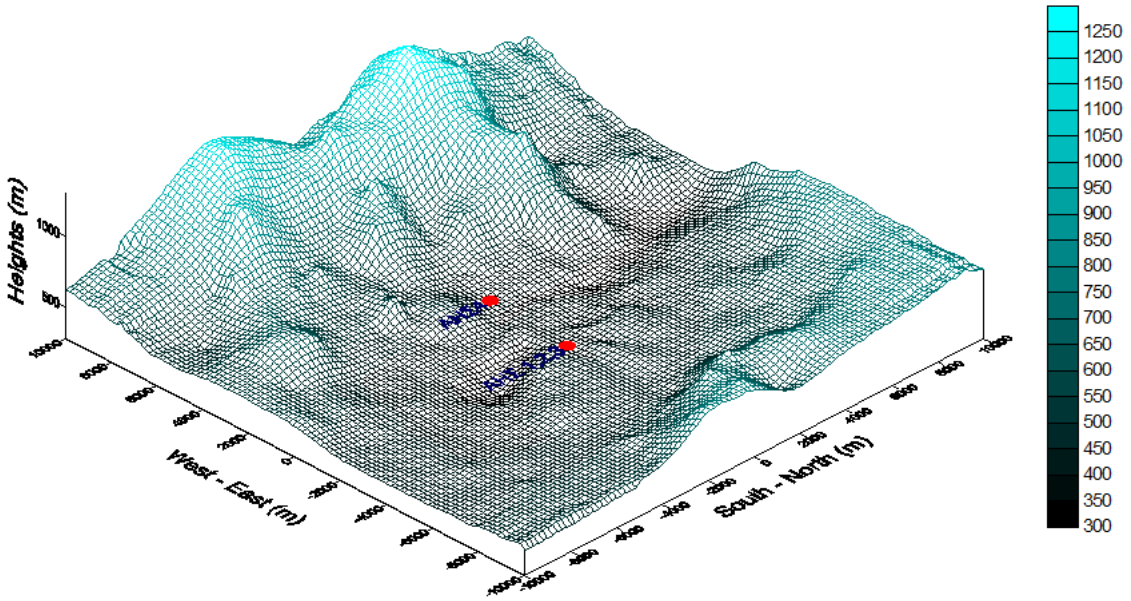


Σχήμα 5.4: Οι μονάδες ΑΗΣ1-2, 3

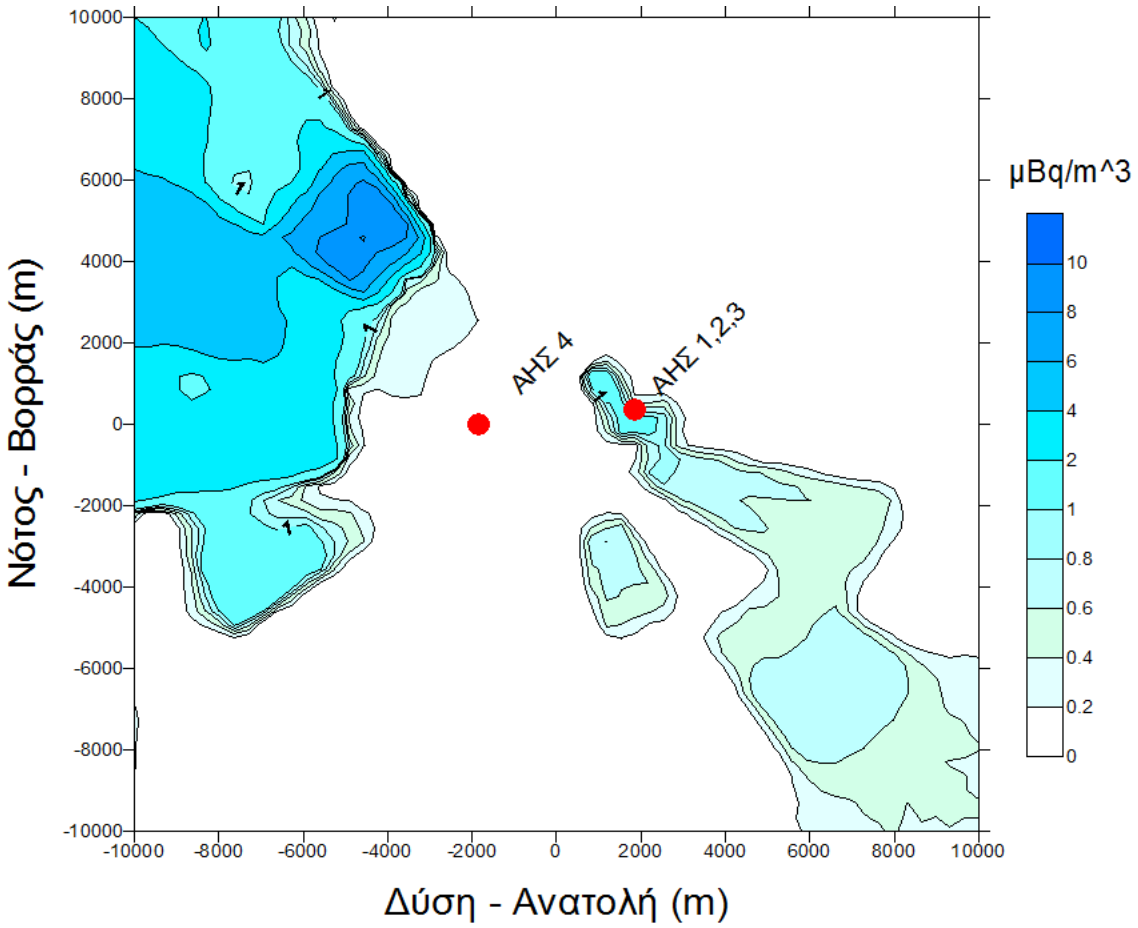


Σχήμα 5.5: Η μονάδα ΑΗΣ4

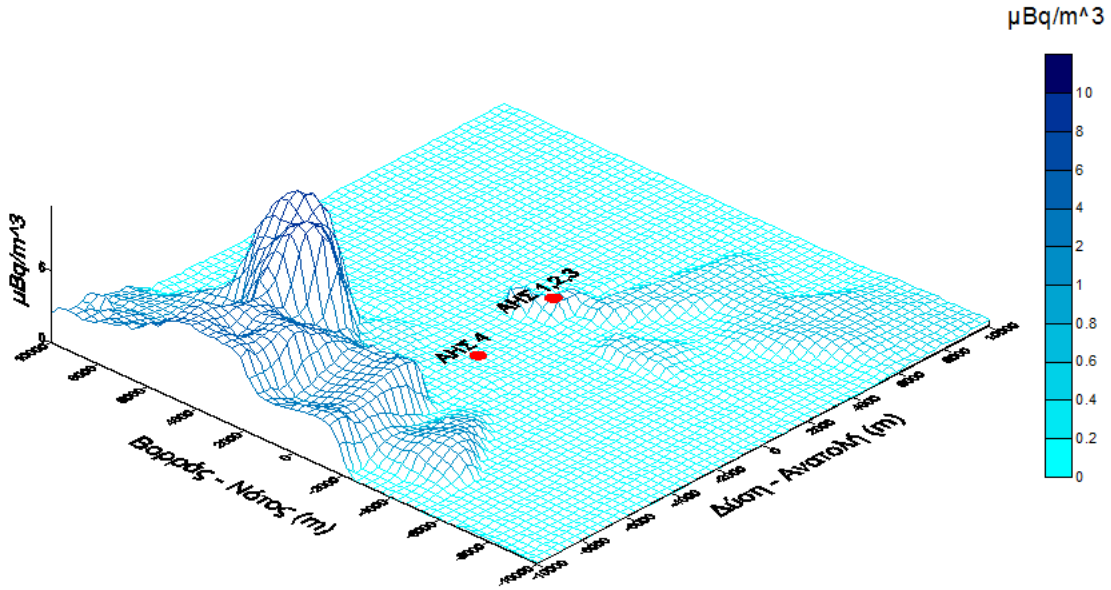
Σχήμα 5.6: Θέση των σταθμών ΑΗΣ1-2,3 και ΑΗΣ4 στις δορυφορικές φωτογραφίες του Google Earth



Σχήμα 5.7: Τρισδιάστατη απεικόνιση των υψομέτρων της περιοχής της Μεγαλόπολης

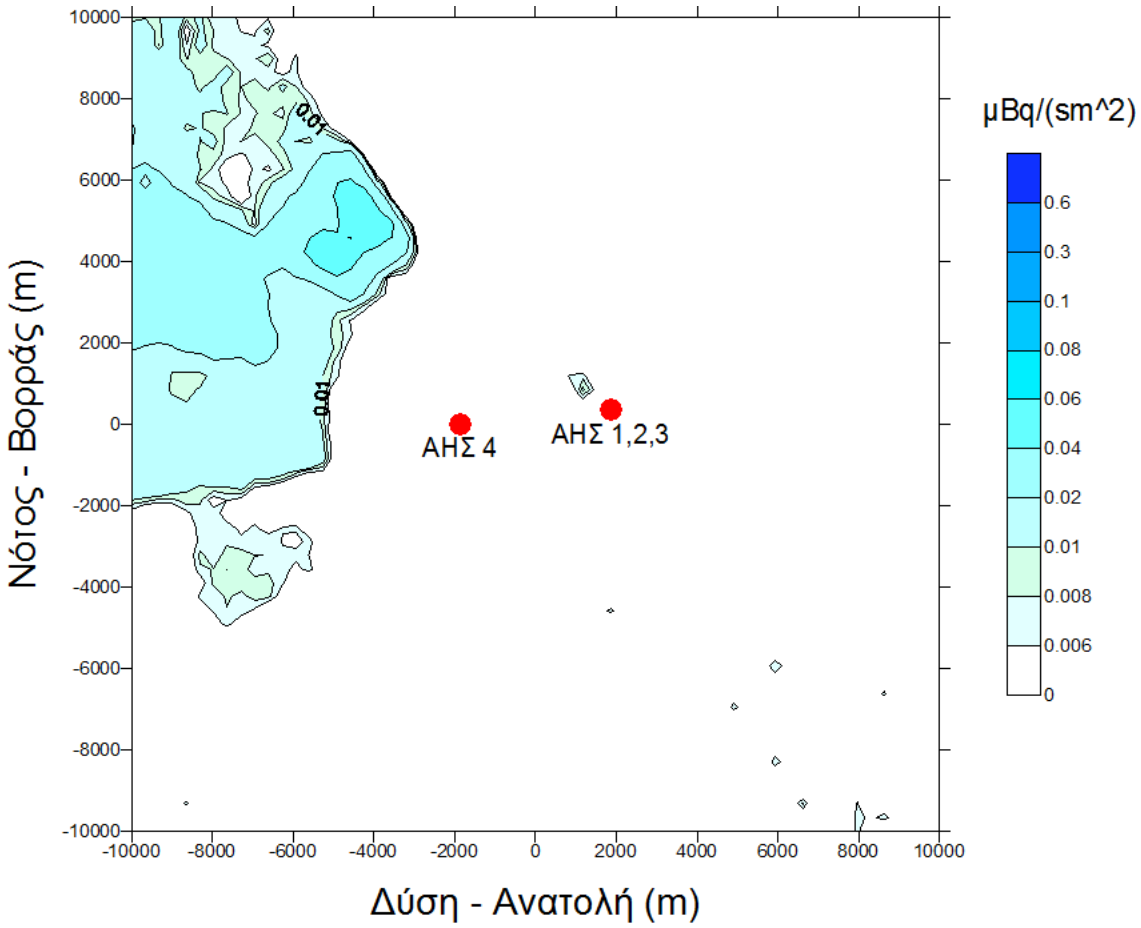


Σχήμα 5.8: Εκτέλεση 15 (V_d=0.005 $msec^{-1}$). Δισδιάστατο γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra στην ατμόσφαιρα στην επιφάνεια του εδάφους.

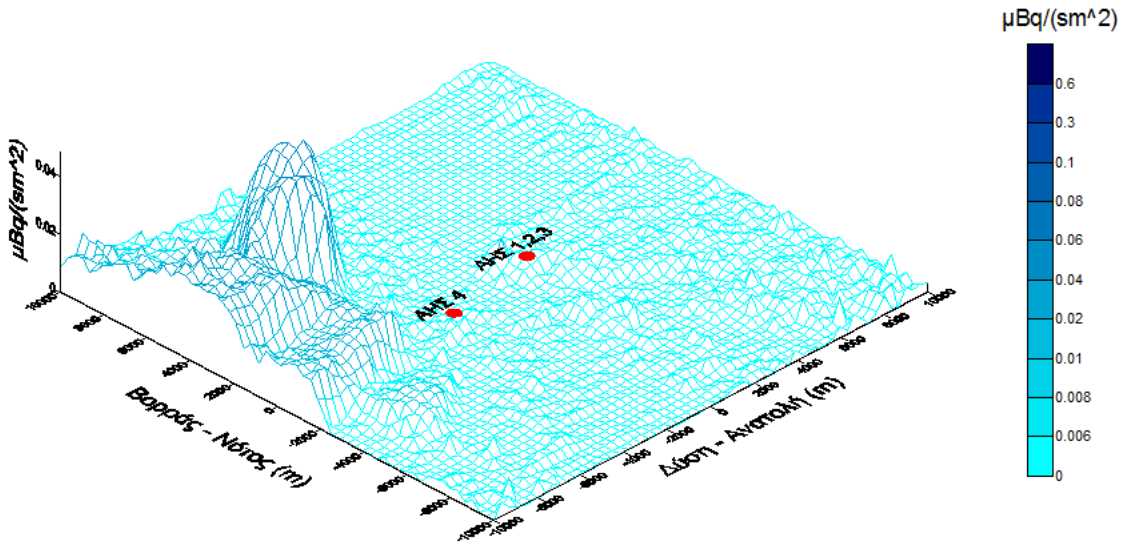


Σχήμα 5.9: Εκτέλεση 15 (V_d=0.005 $msec^{-1}$). Τρισδιάστατο γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra στην ατμόσφαιρα στην επιφάνεια του εδάφους.

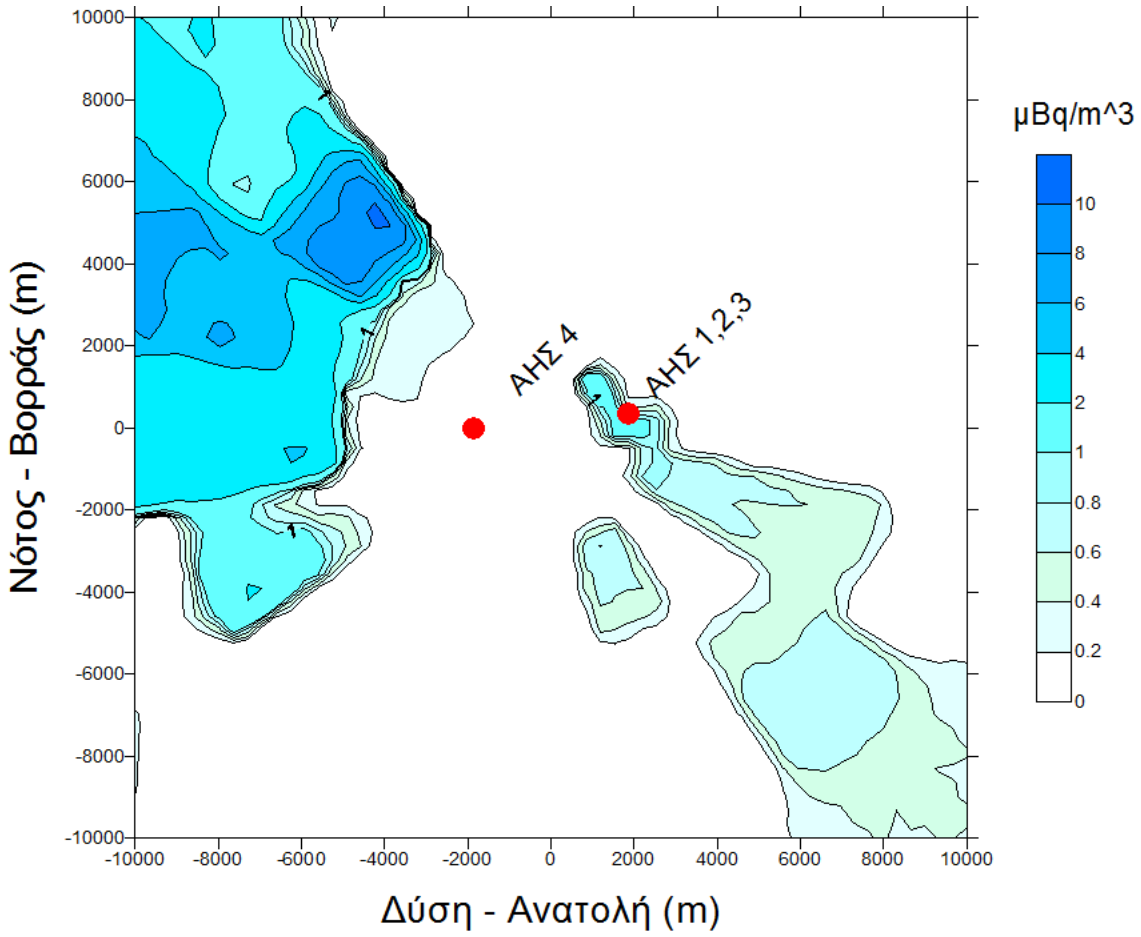
Σχήμα 5.10: Χάρτης της περιοχής της Μεγαλόπολης με διαστάσεις και προσανατολισμό ίδιους με το γράφημα 5.8. Προέλευση: Google Maps [69].



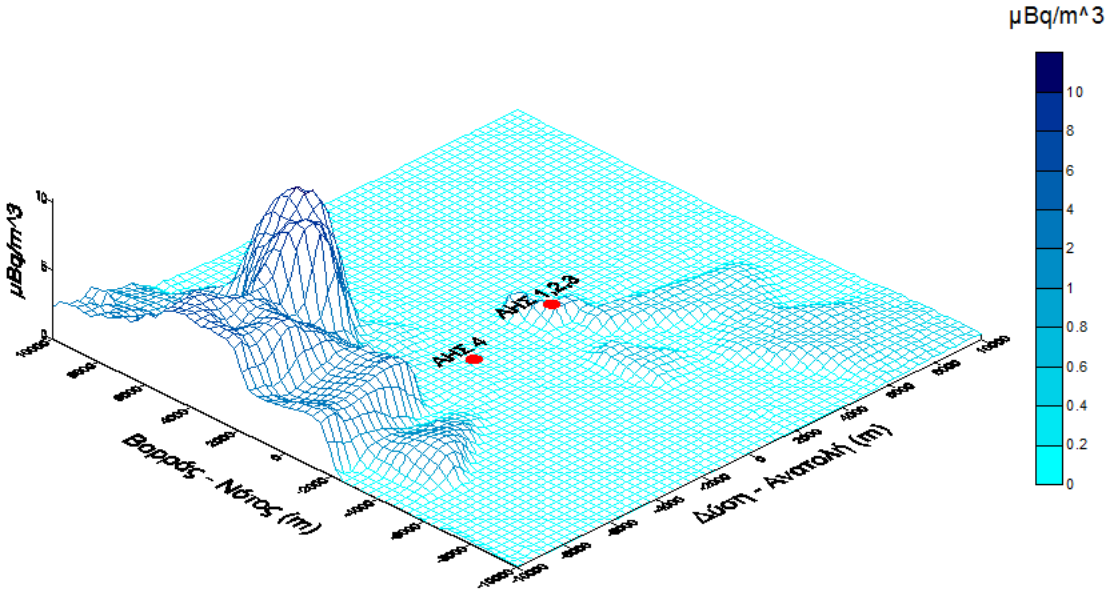
Σχήμα 5.11: Εκτέλεση 15 (V_d=0.005 $msec^{-1}$). Δισδιάστατο γράφημα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος.



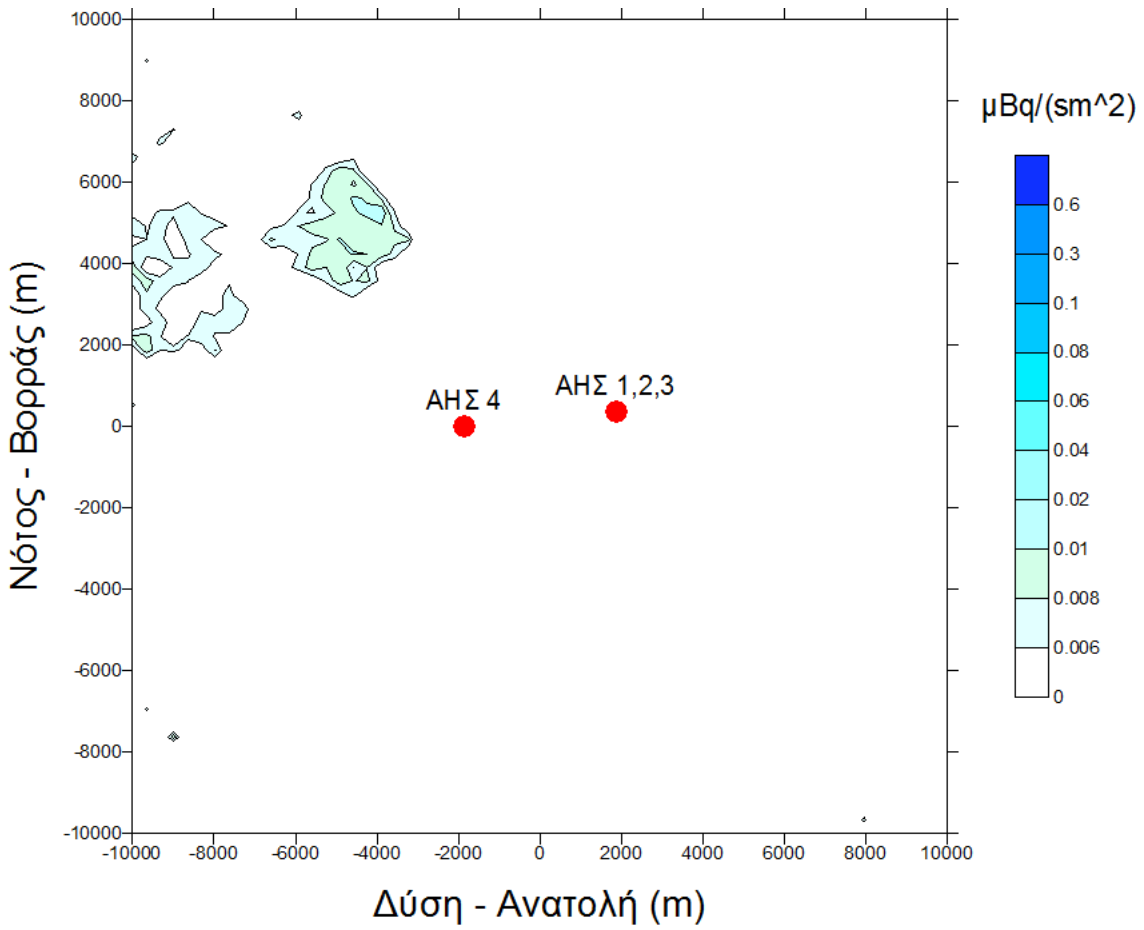
Σχήμα 5.12: Εκτέλεση 15 (V_d=0.005 $msec^{-1}$). Τρισδιάστατο γράφημα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος.



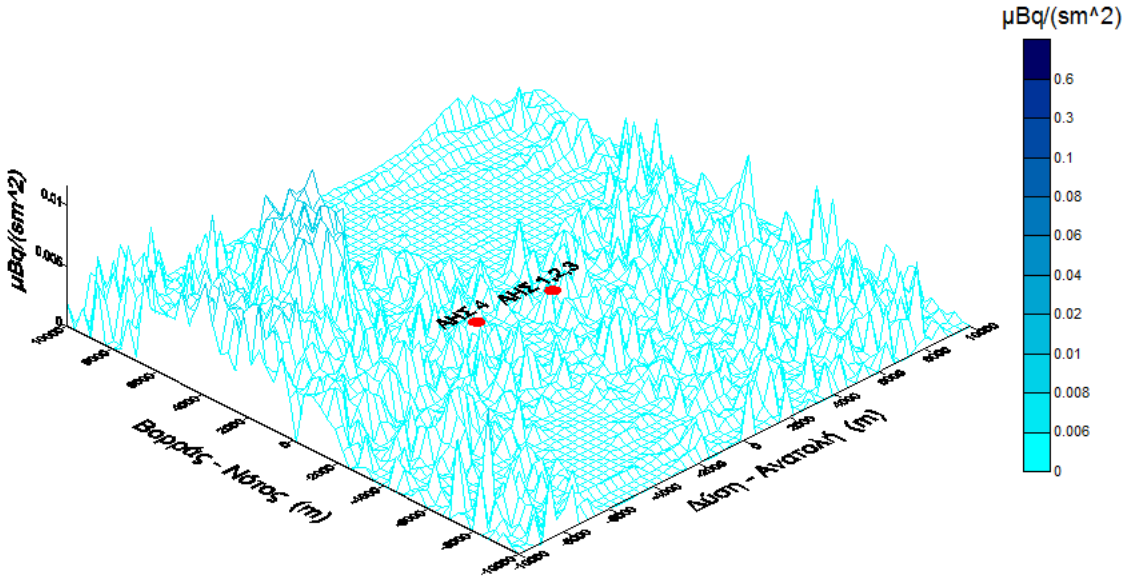
Σχήμα 5.13: Εκτέλεση 14 (V_d=0.001 $msec^{-1}$). Δισδιάστατο γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra στην ατμόσφαιρα στην επιφάνεια του εδάφους.



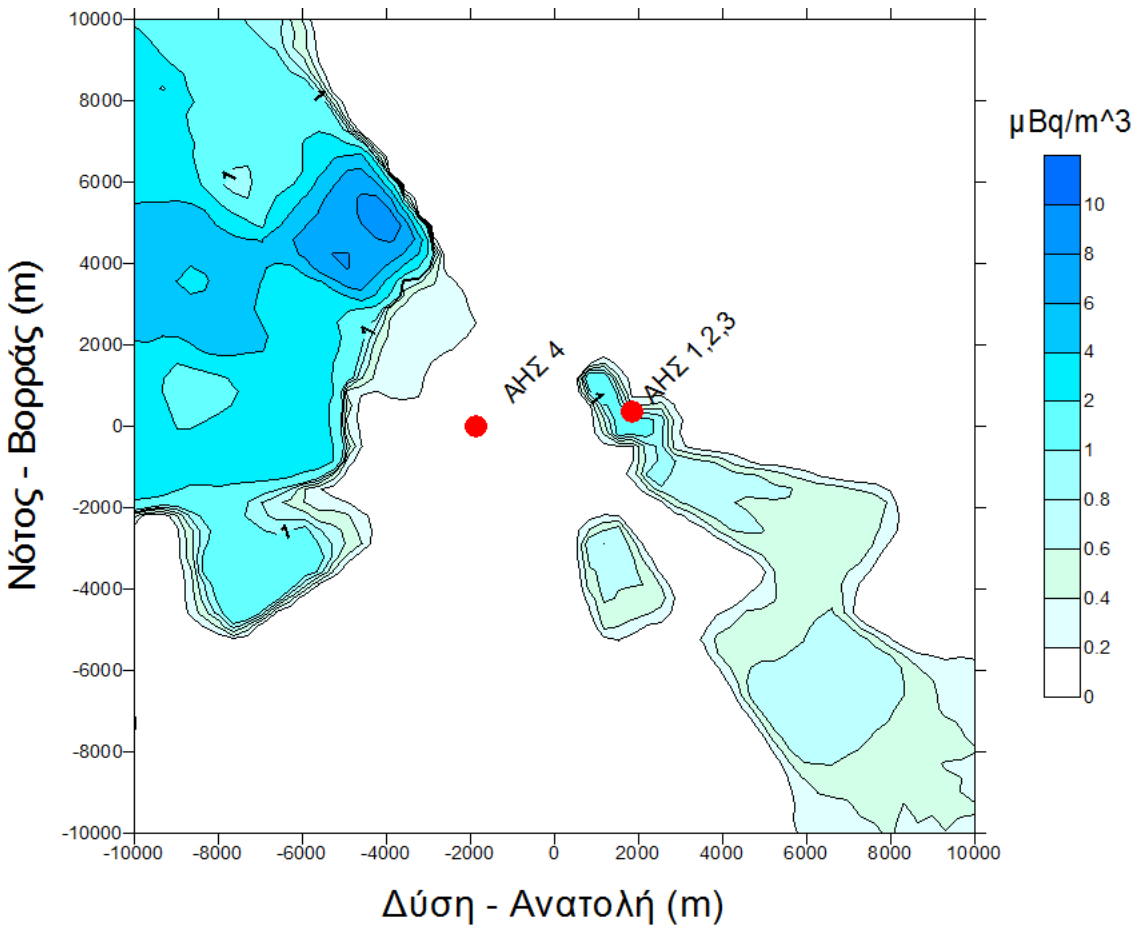
Σχήμα 5.14: Εκτέλεση 14 (V_d=0.001 $msec^{-1}$). Τρισδιάστατο γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra στην ατμόσφαιρα στην επιφάνεια του εδάφους.



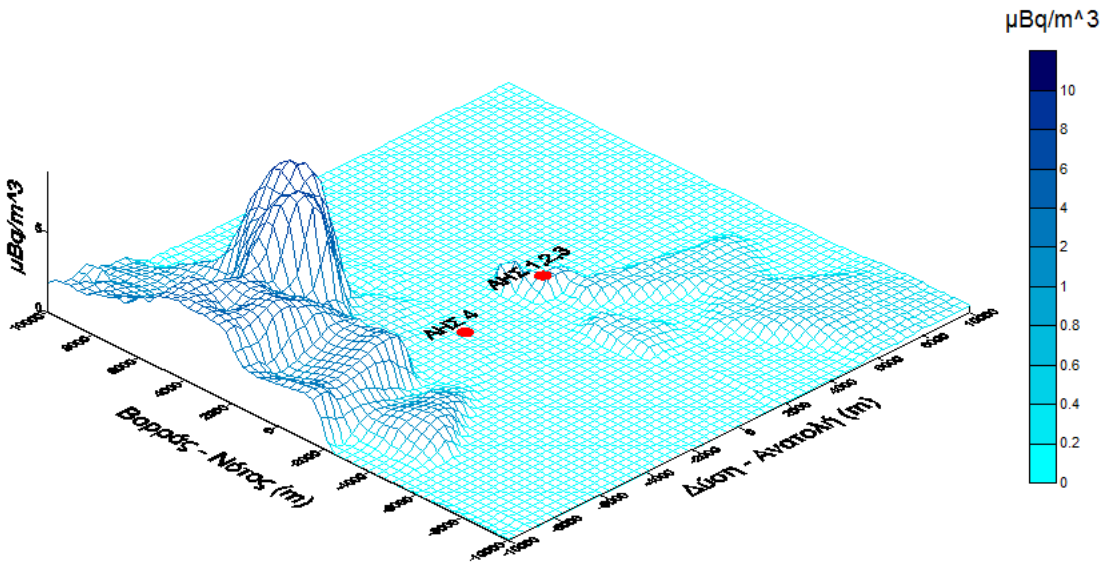
Σχήμα 5.15: Εκτέλεση 14 (V_d=0.001 $msec^{-1}$). Δισδιάστατο γράφημα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος.



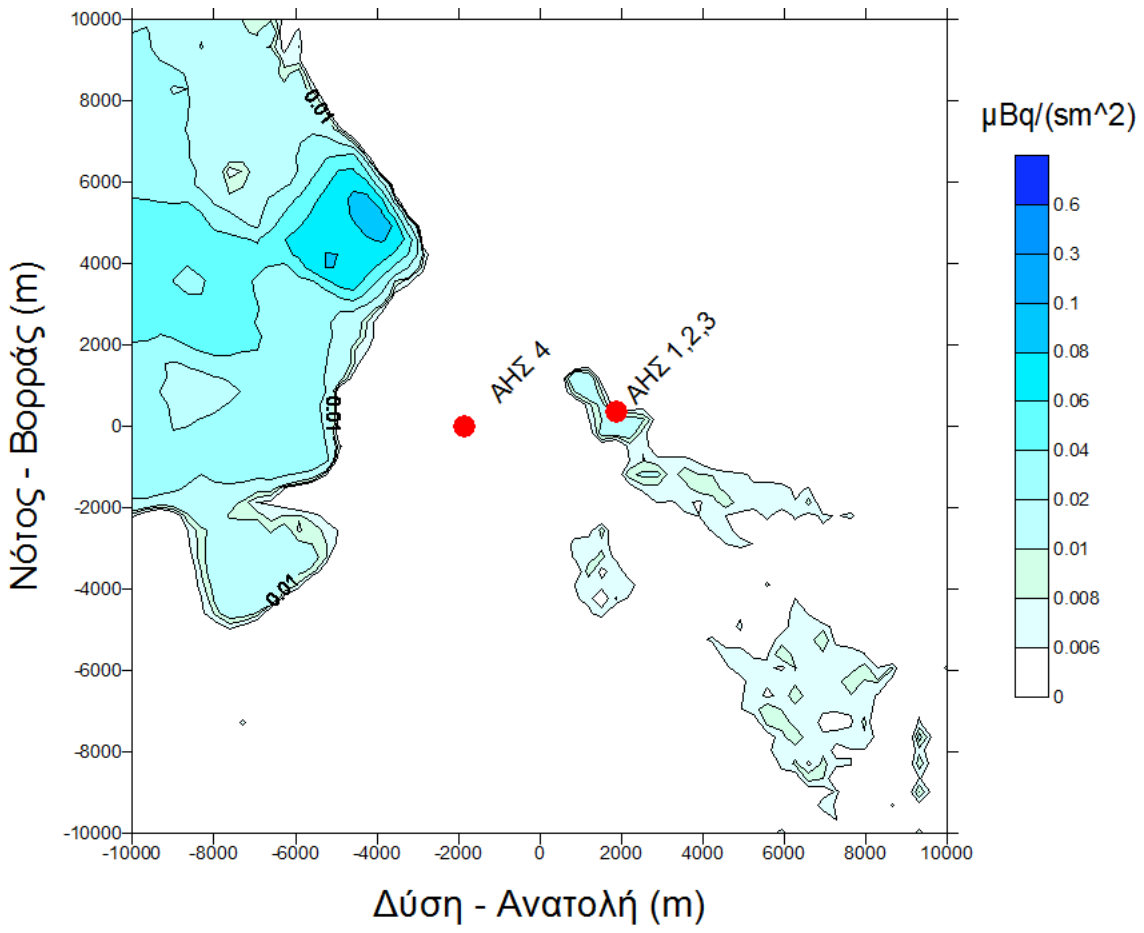
Σχήμα 5.16: Εκτέλεση 14 (V_d=0.001 $msec^{-1}$). Τρισδιάστατο γράφημα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος.



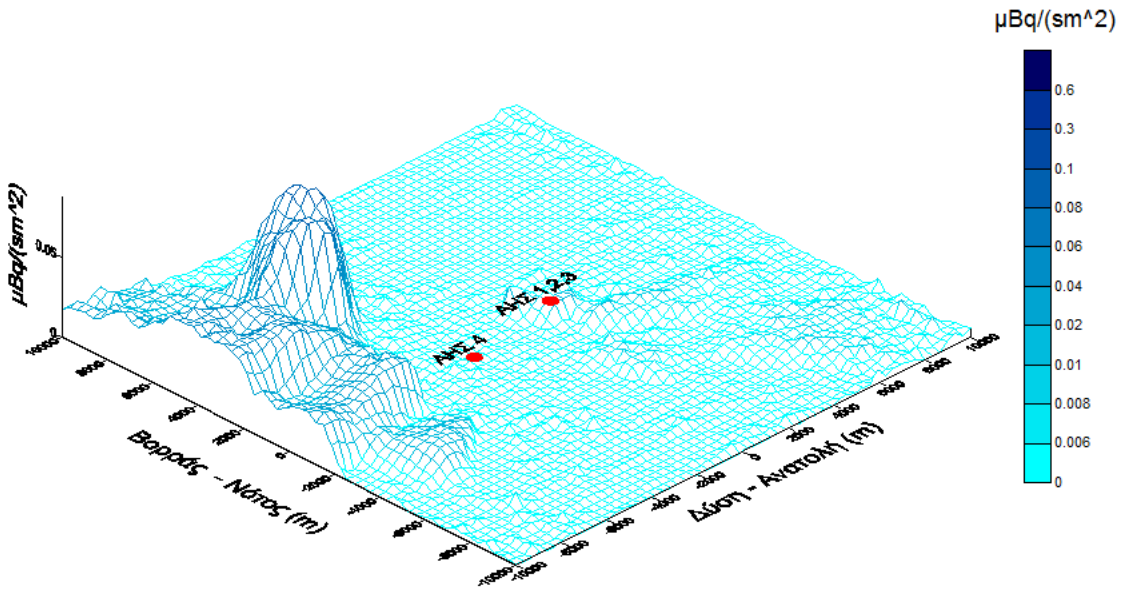
Σχήμα 5.17: Εκτέλεση 16 (V_d=0.01 $msec^{-1}$). Δισδιάστατο γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra στην ατμόσφαιρα στην επιφάνεια του εδάφους.



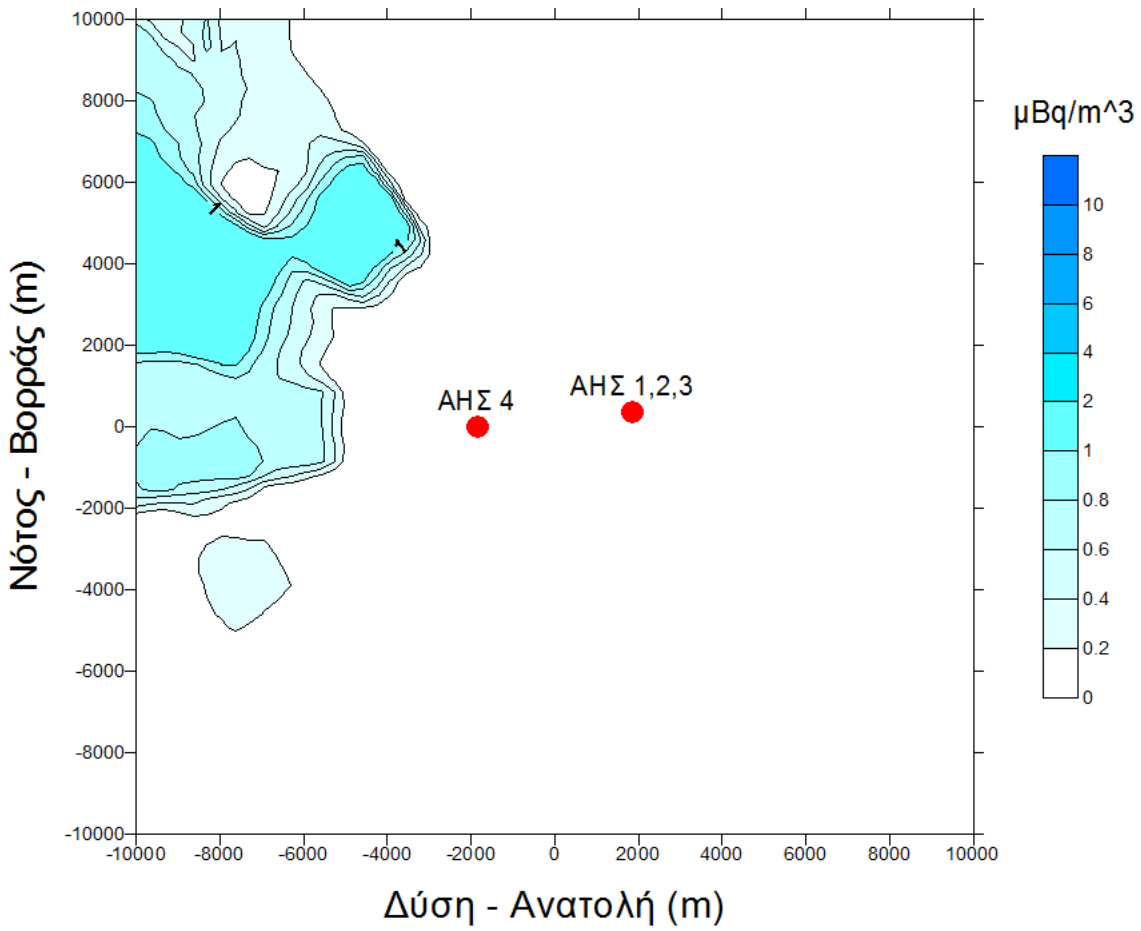
Σχήμα 5.18: Εκτέλεση 16 (V_d=0.01 $msec^{-1}$). Τρισδιάστατο γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra στην ατμόσφαιρα στην επιφάνεια του εδάφους.



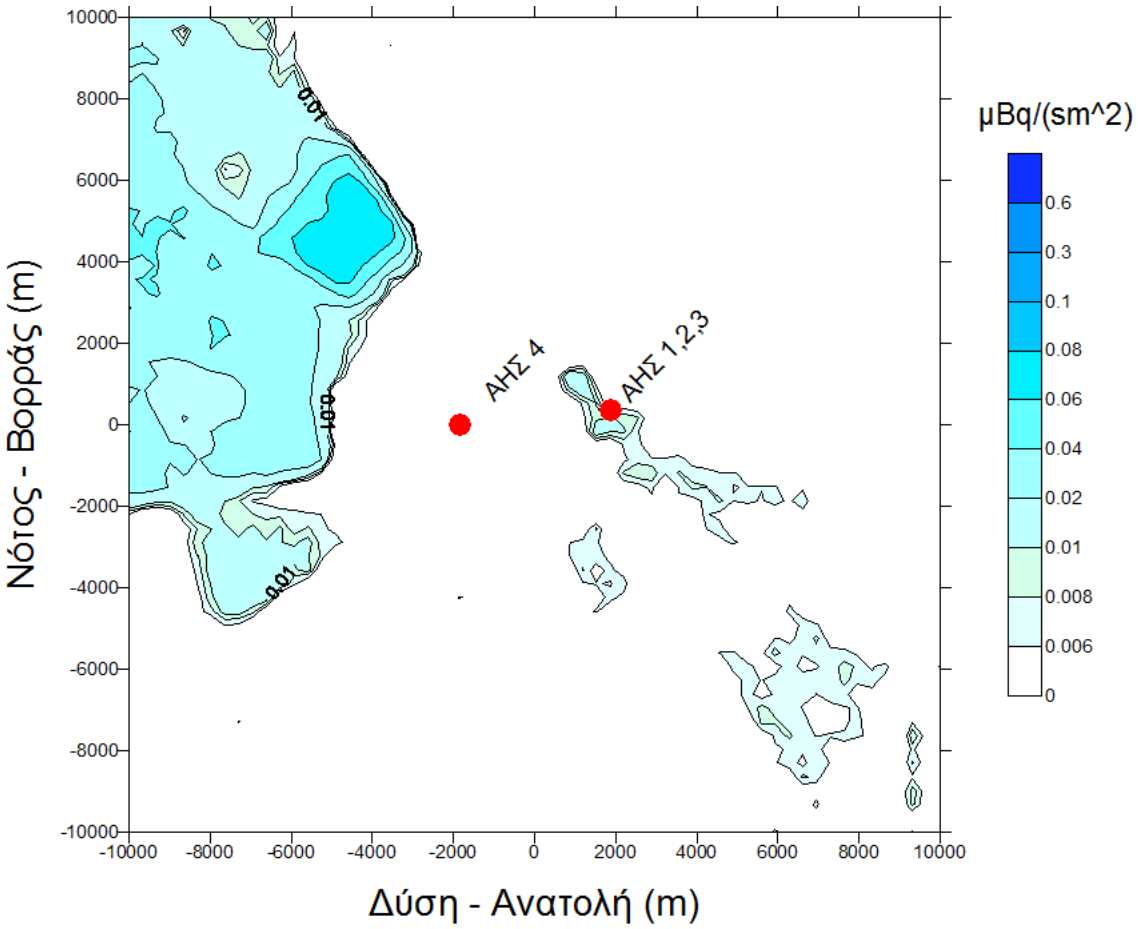
Σχήμα 5.19: Εκτέλεση 16 (V_d=0.01 $msec^{-1}$). Δισδιάστατο γράφημα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος.



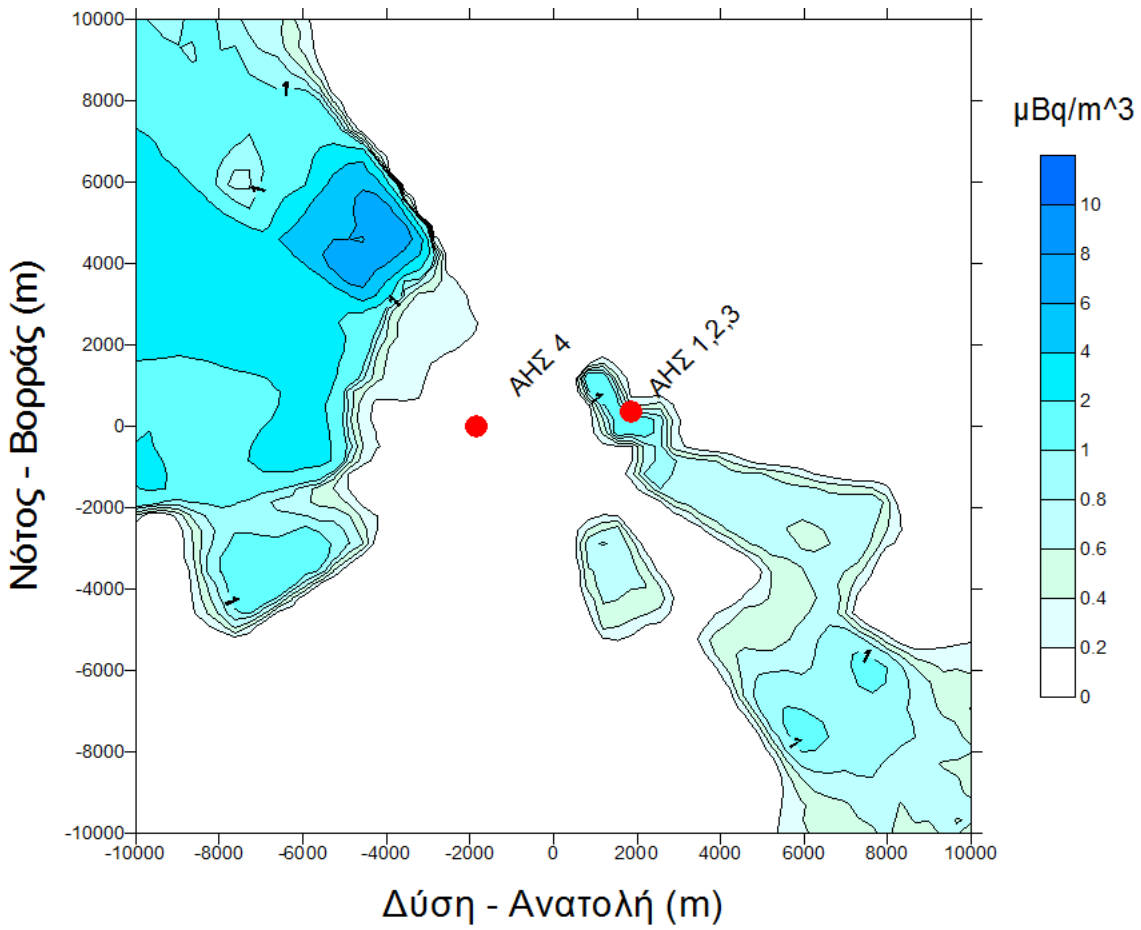
Σχήμα 5.20: Εκτέλεση 16 (V_d=0.01 $msec^{-1}$). Τρισδιάστατο γράφημα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος.



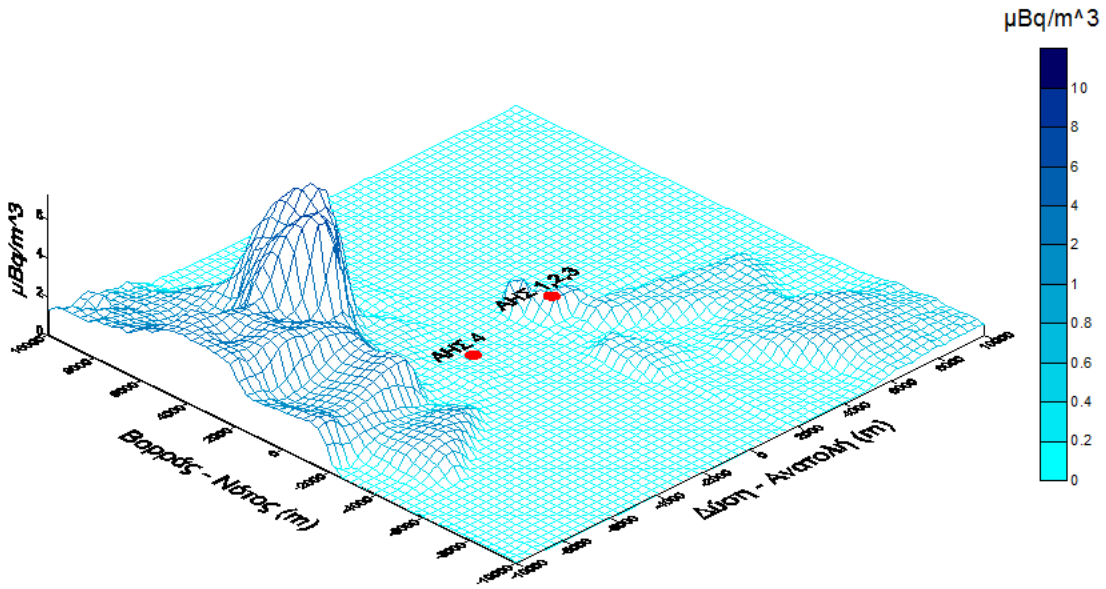
Σχήμα 5.21: Διάγραμμα διαφορών των συγκεντρώσεων ^{226}Ra μεταξύ των εκτελέσεων 14 (V_d=0.001 $msec^{-1}$) και 16 (V_d=0.01 $msec^{-1}$).



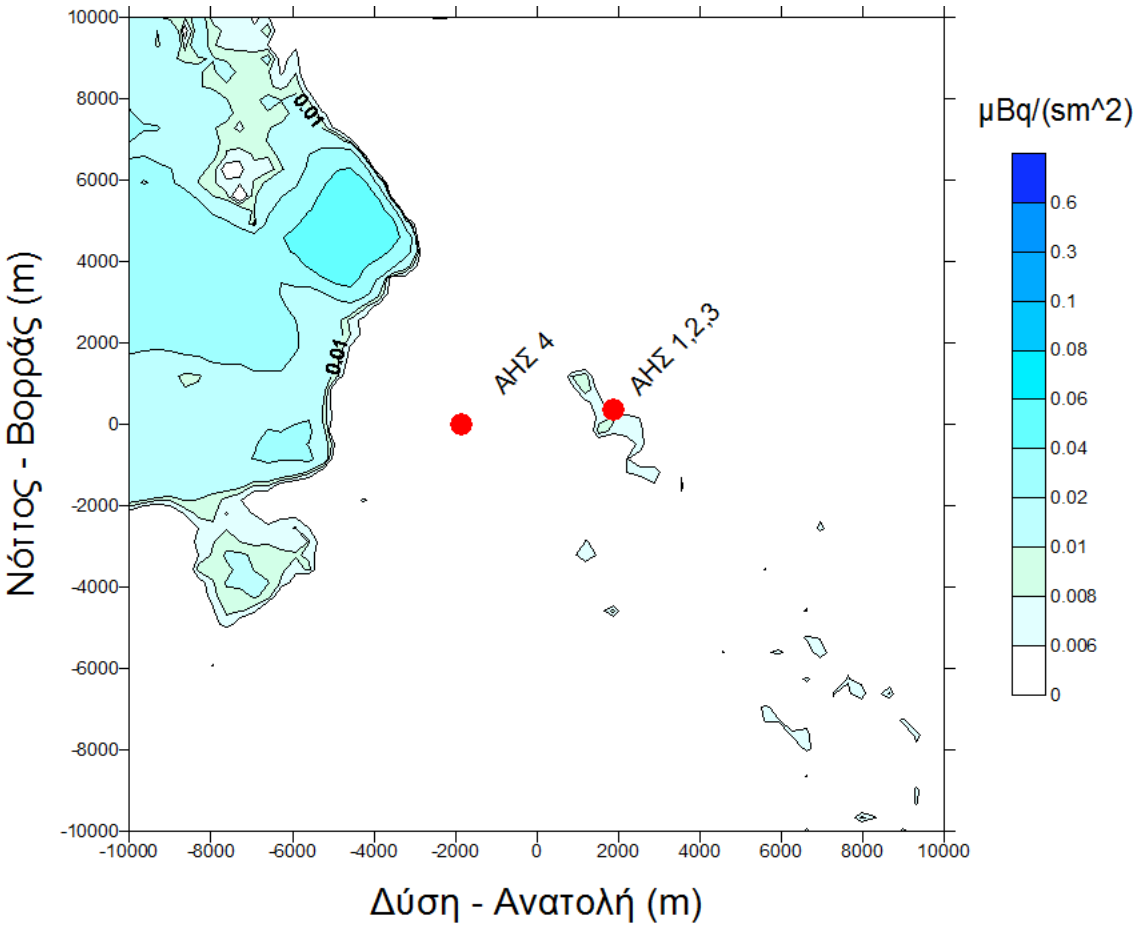
Σχήμα 5.22: Διάγραμμα διαφορών του ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra μεταξύ των εκτελέσεων 16 (V_d=0.01 msec^{-1}) και 14 (V_d=0.001 msec^{-1}).



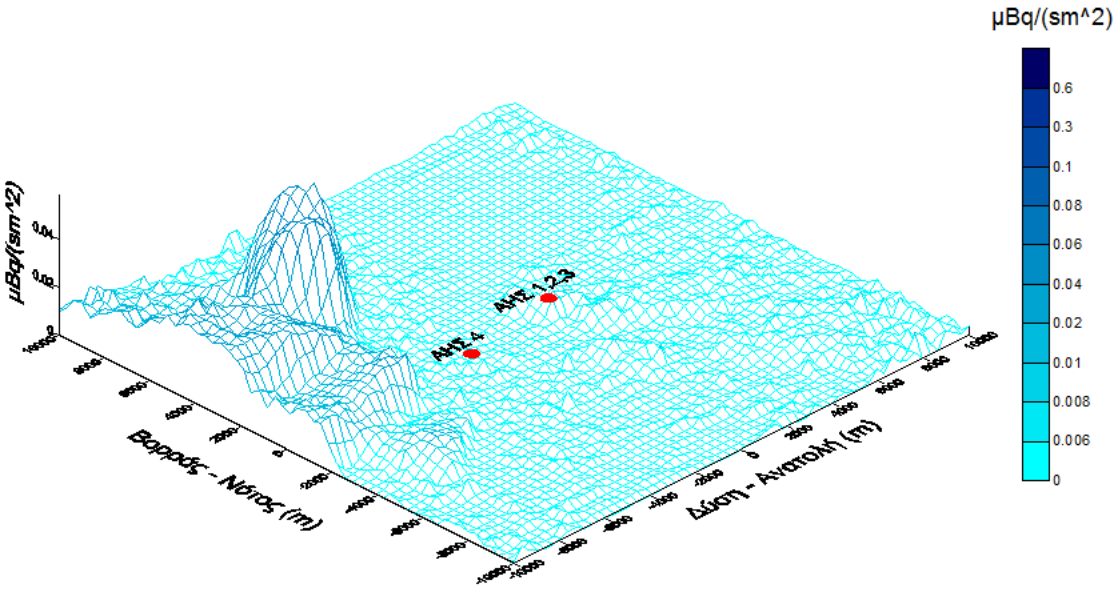
Σχήμα 5.23: Εκτέλεση 17 (d_A=8 μm, d_B=30 μm). Δισδιάστατο γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra στην ατμόσφαιρα στην επιφάνεια του εδάφους



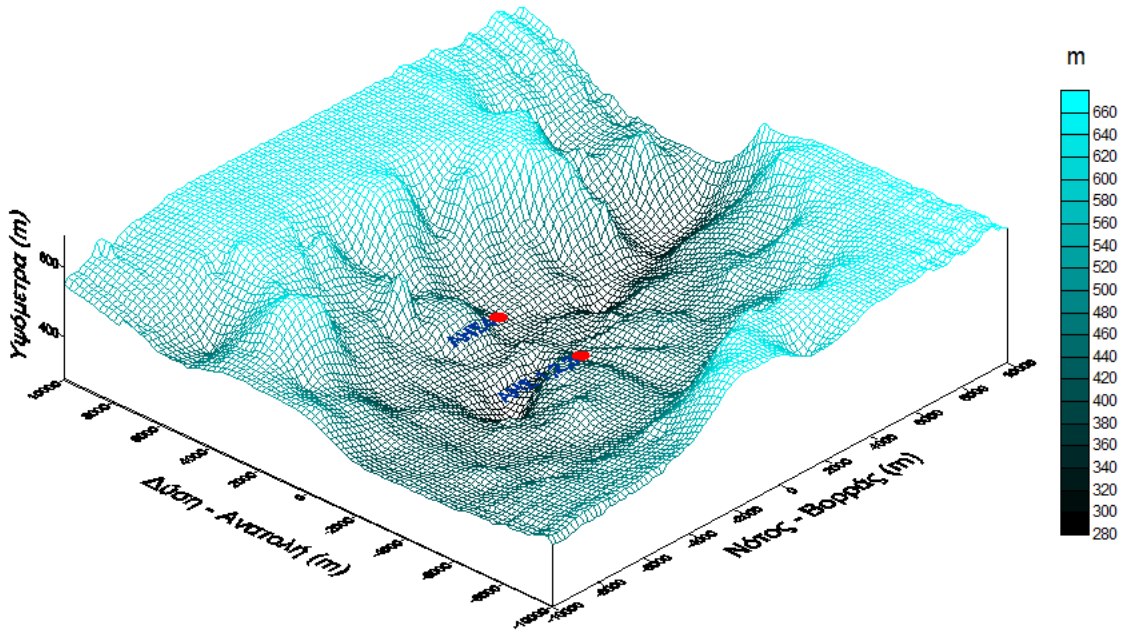
Σχήμα 5.24: Εκτέλεση 17 (d_A=8 μm, d_B=30 μm). Τρισδιάστατο γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra στην ατμόσφαιρα στην επιφάνεια του εδάφους



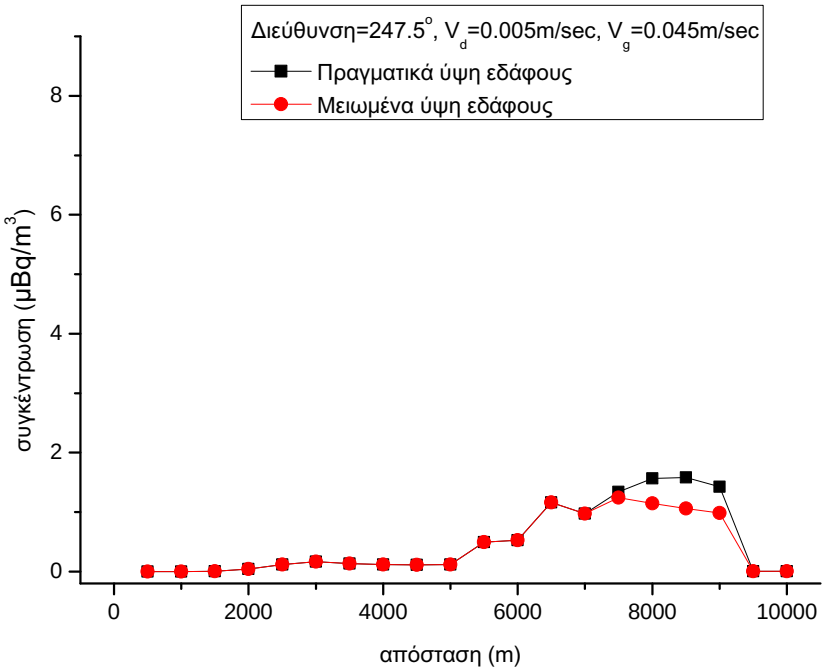
Σχήμα 5.25: Εκτέλεση 17 (d_A=8 μm, d_B=30 μm). Δισδιάστατο γράφημα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος.



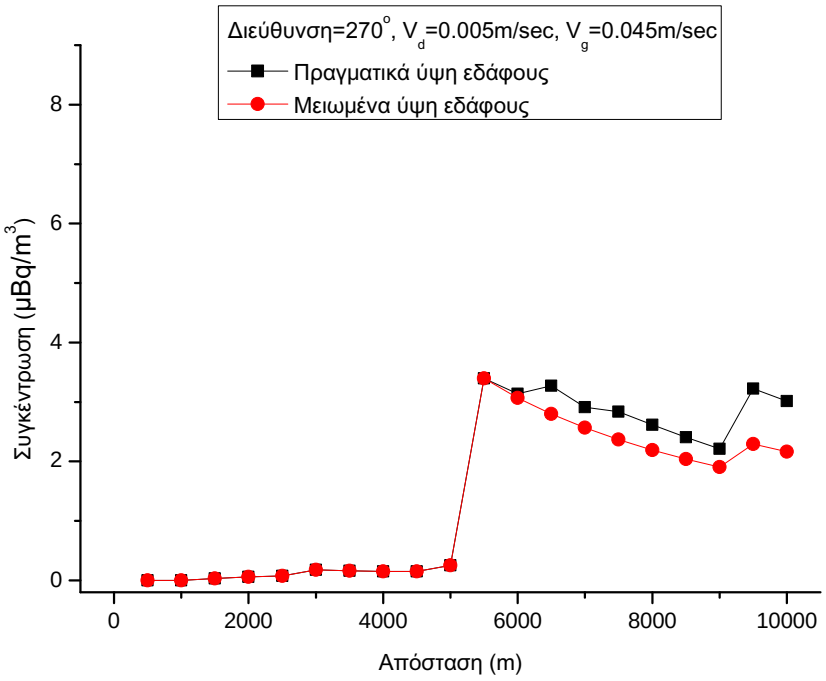
Σχήμα 5.26: Εκτέλεση 17 (d_A=8 μm, d_B=30 μm). Τρισδιάστατο γράφημα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος.



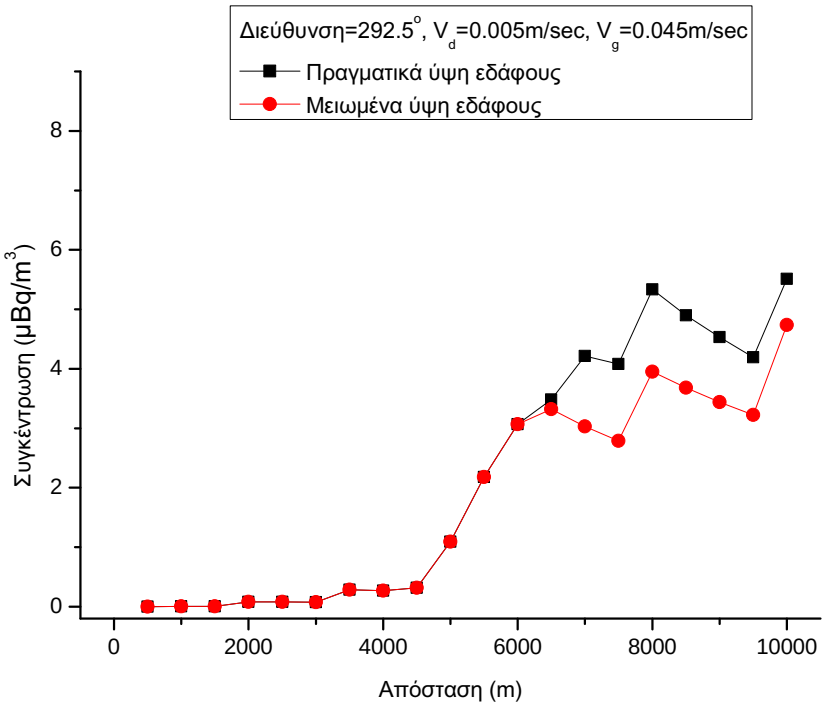
Σχήμα 5.27: Τρισδιάστατη απεικόνιση του αναγλύφου της περιοχής της Μεγαλόπολης με φίλτρο υψομέτρου τα $650\,\mathrm{m}$.



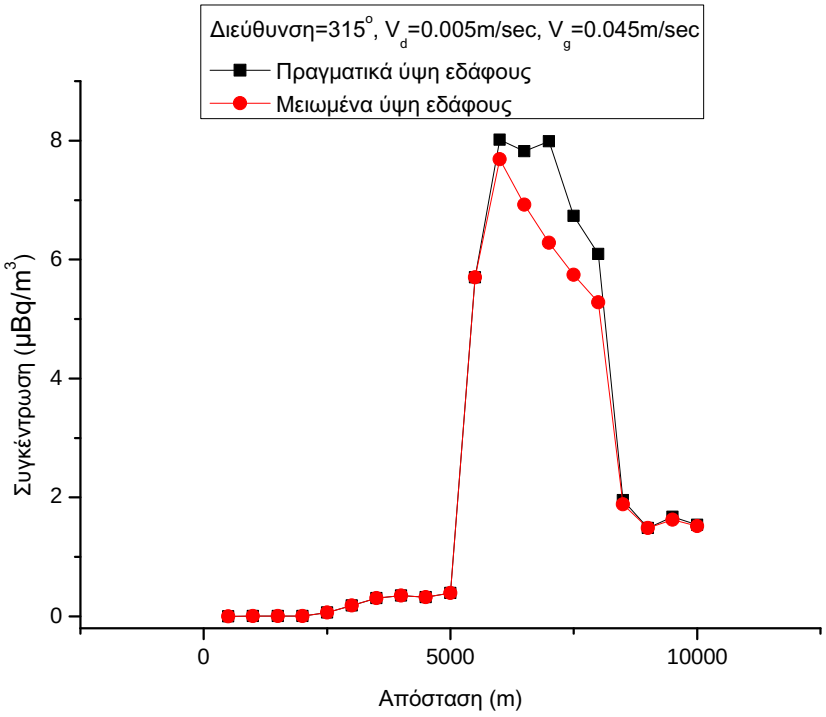
Σχήμα 5.28: Συγκριτικό γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra των εκτελέσεων 15 (Πραγματικά ύψη) και 18 (Μειωμένα ύψη, $\mathrm{h_{max}}$=$650\,\mathrm{m}$) στην διεύθυνση $247.5\,^{\circ}$



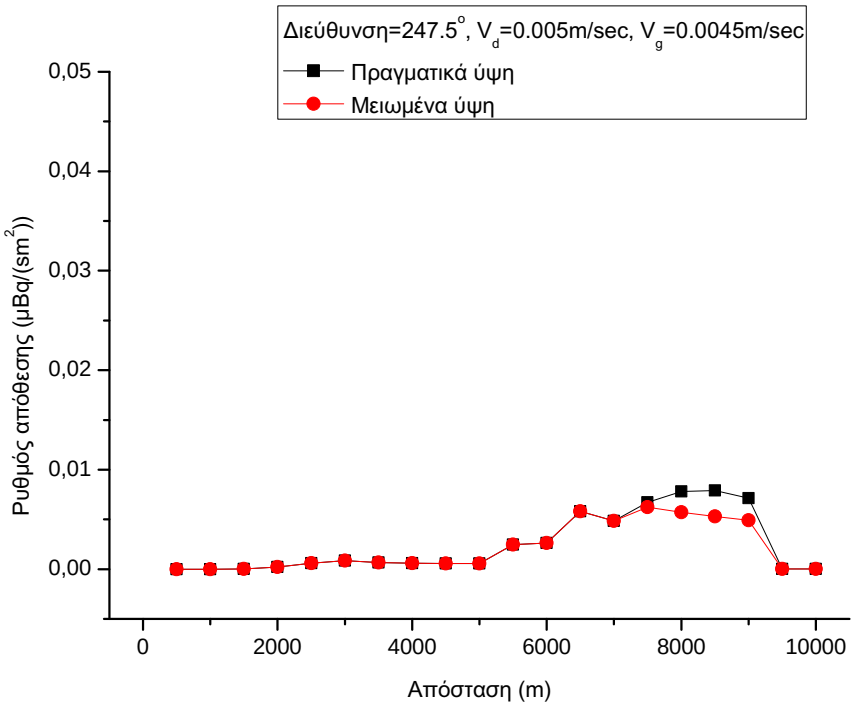
Σχήμα 5.29: Συγκριτικό γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra των εκτελέσεων 15 (Πραγματικά ύψη) και 18 (Μειωμένα ύψη, h_{max}=650 m) στην διεύθυνση 270 °



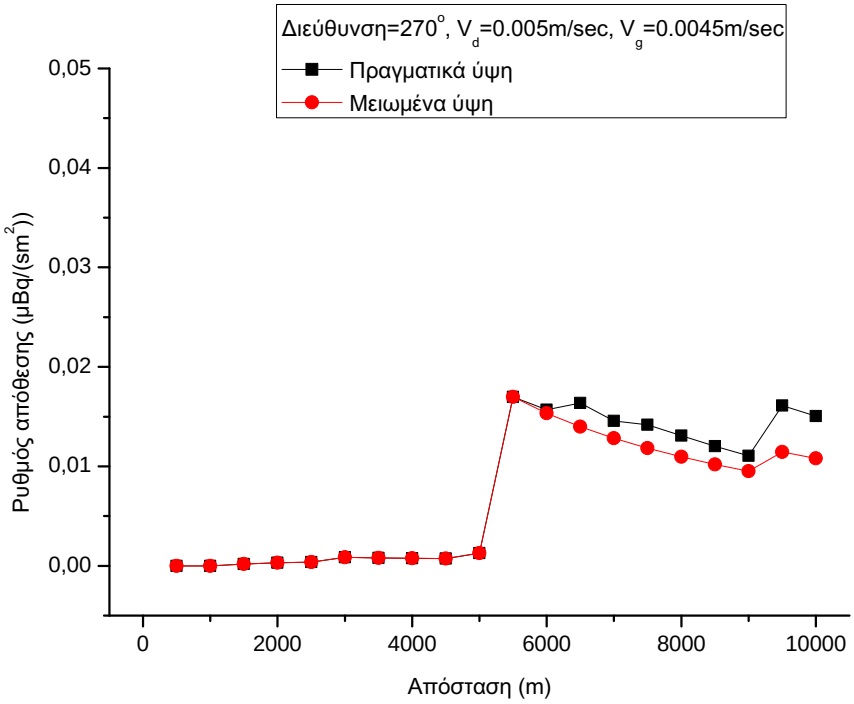
Σχήμα 5.30: Συγκριτικό γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra των εκτελέσεων 15 (Πραγματικά ύψη) και 18 (Μειωμένα ύψη, h_{max}=650 m) στην διεύθυνση 292.5 °



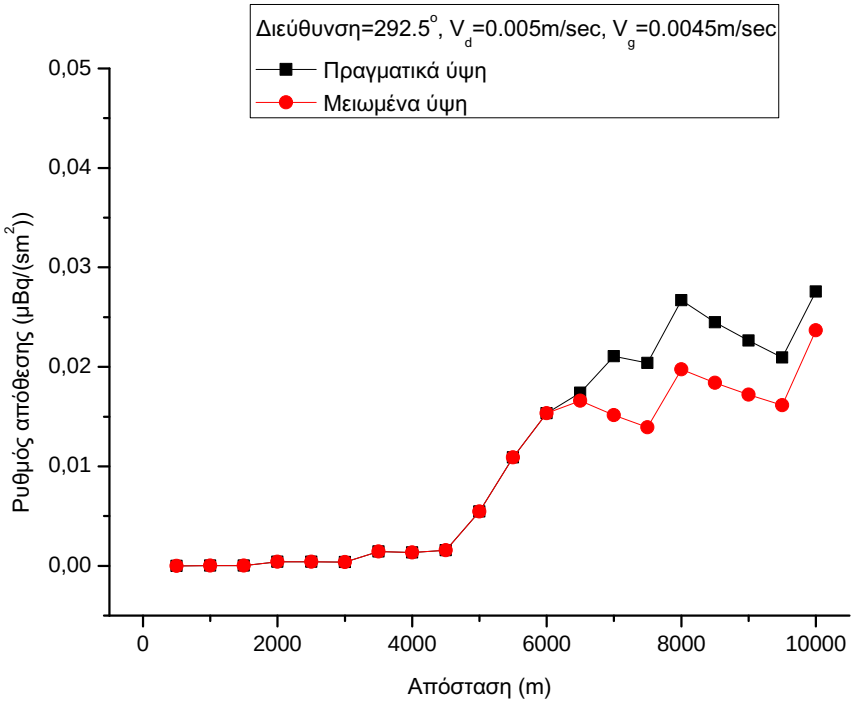
Σχήμα 5.31: Συγκριτικό γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra των εκτελέσεων 15 (Πραγματικά ύψη) και 18 (Μειωμένα ύψη, h_{max}=650 m) στην διεύθυνση 315 °



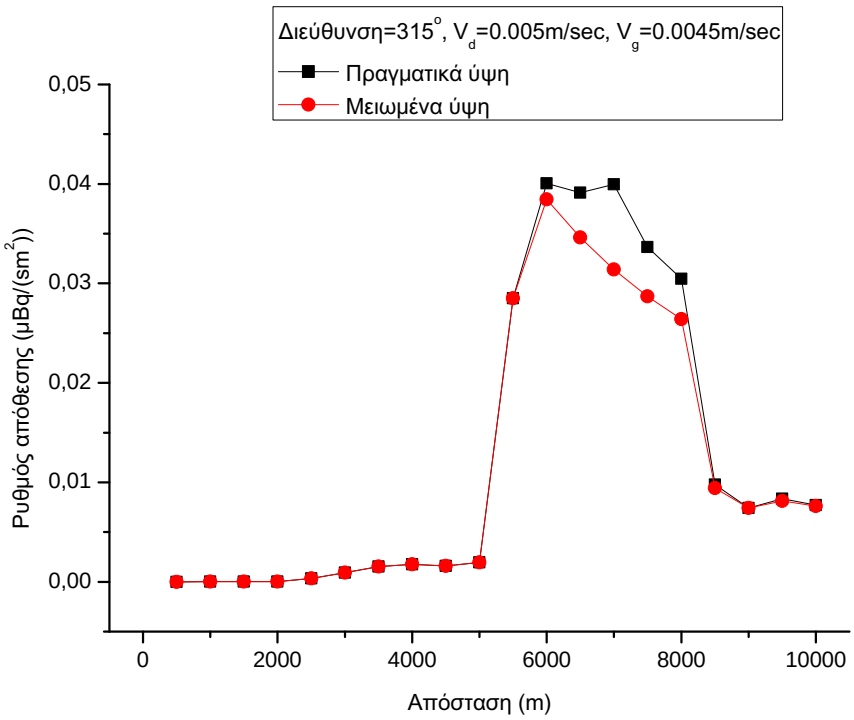
Σχήμα 5.32: Συγκριτικό γράφημα των υπολογιζόμενων ρυθμών απόθεσης ^{226}Ra των εκτελέσεων 15 (Πραγματικά ύψη) και 18 (Μειωμένα ύψη, h_{max}=650 m) στην διεύθυνση 247.5 °



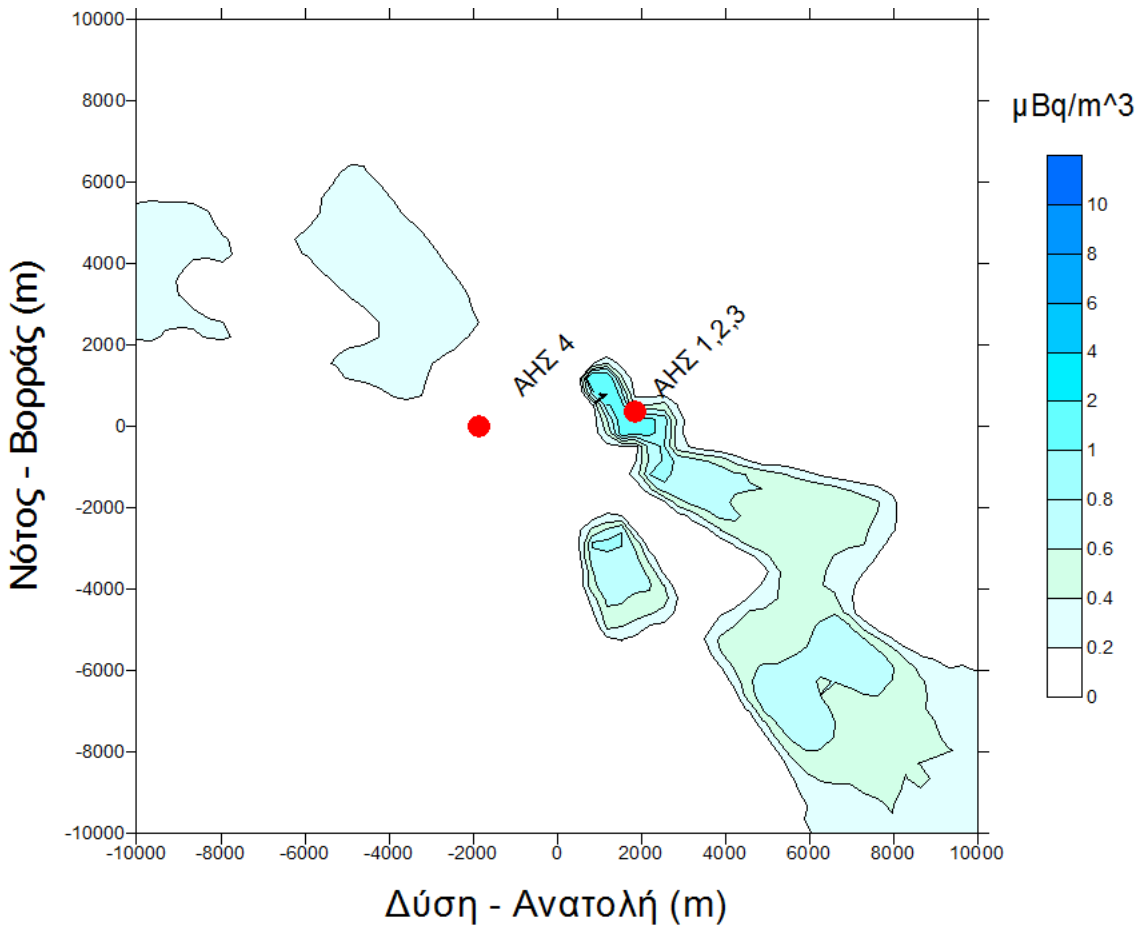
Σχήμα 5.33: Συγκριτικό γράφημα των υπολογιζόμενων ρυθμών απόθεσης ^{226}Ra των εκτελέσεων 15 (Πραγματικά ύψη) και 18 (Μειωμένα ύψη, h_{max}=650 m) στην διεύθυνση 270 °



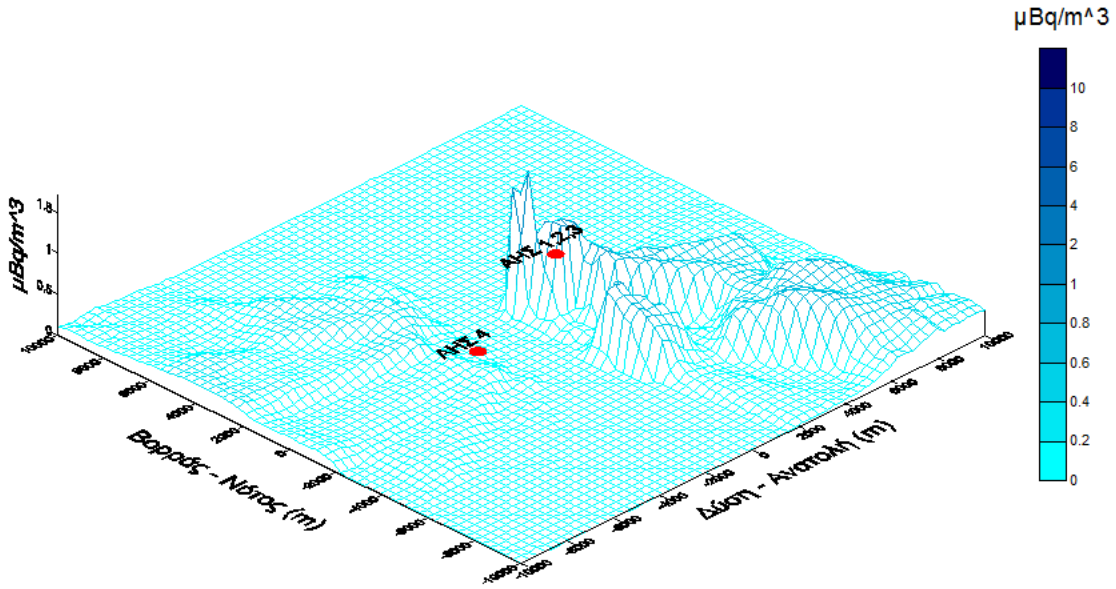
Σχήμα 5.34: Συγκριτικό γράφημα των υπολογιζόμενων ρυθμών απόθεσης ^{226}Ra των εκτελέσεων 15 (Πραγματικά ύψη) και 18 (Μειωμένα ύψη, h_{max}=650 m) στην διεύθυνση 292.5 °



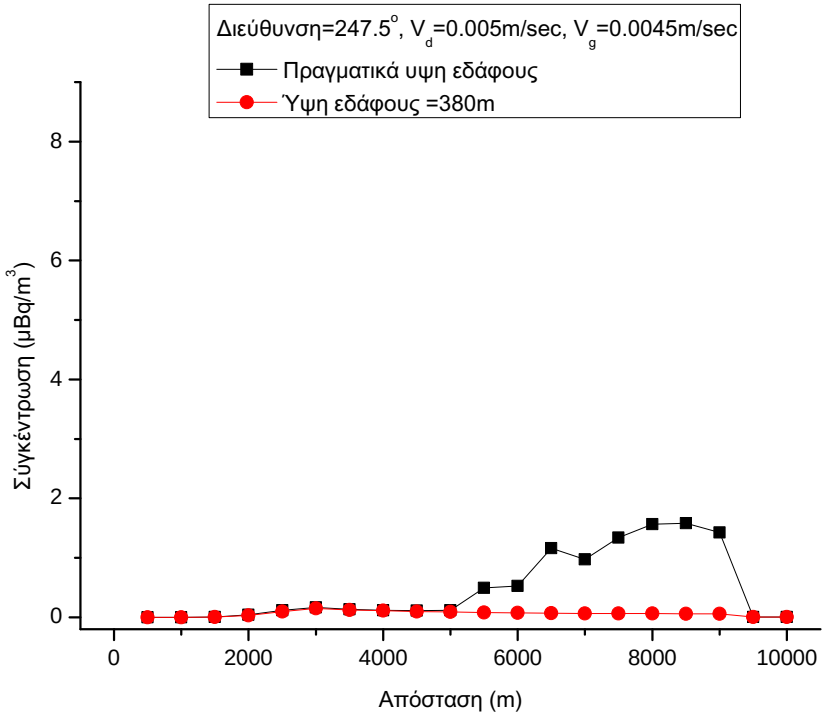
Σχήμα 5.35: Συγκριτικό γράφημα των υπολογιζόμενων ρυθμών απόθεσης ^{226}Ra των εκτελέσεων 15 (Πραγματικά ύψη) και 18 (Μειωμένα ύψη, h_{max}=650 m) στην διεύθυνση 315 °



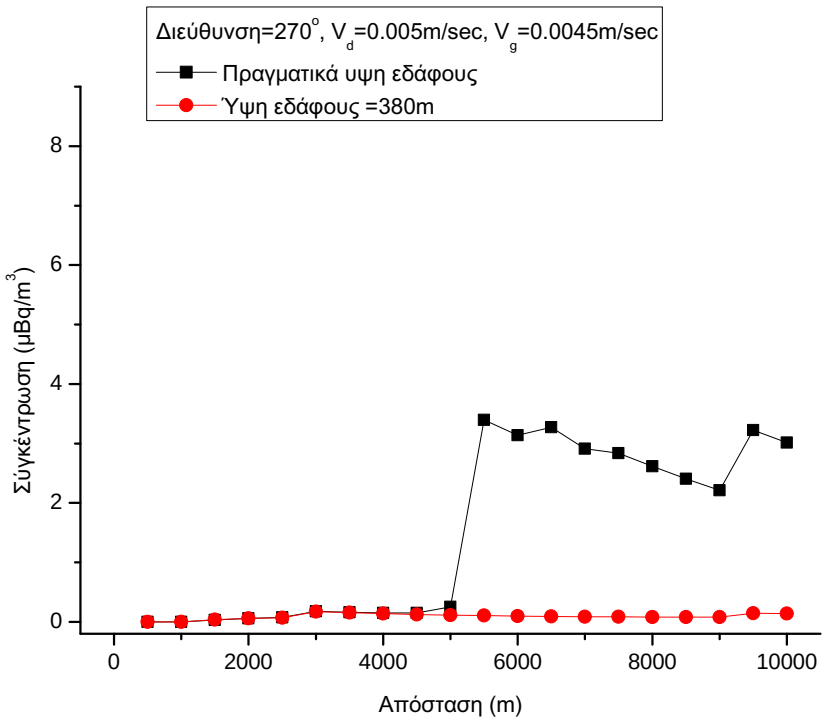
Σχήμα 5.36: Εκτέλεση 19 (Επίπεδο έδαφος, h=380 m). Δισδιάστατο γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra στην ατμόσφαιρα στην επιφάνεια του εδάφους



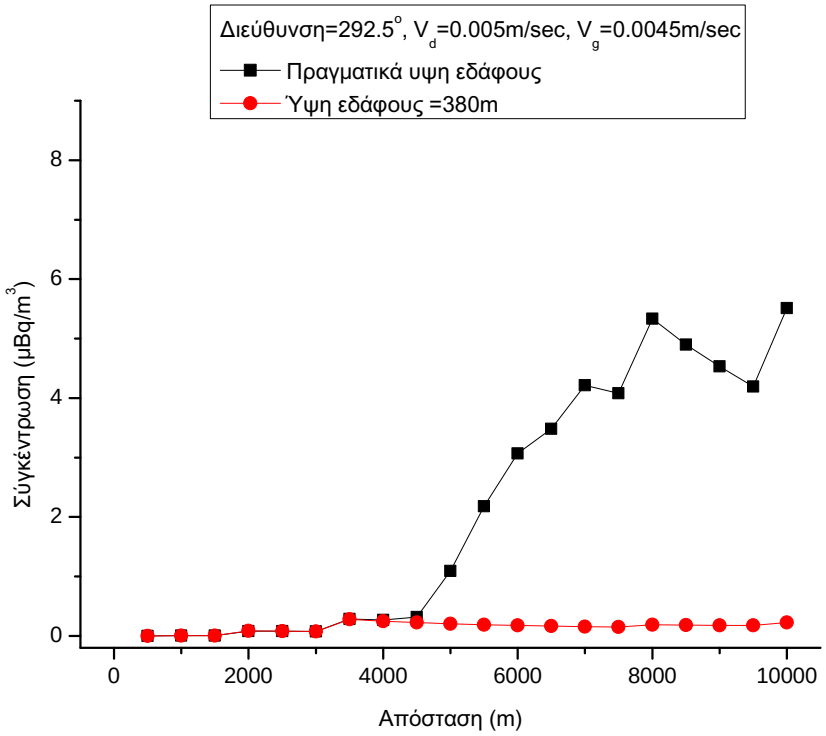
Σχήμα 5.37: Εκτέλεση 19 (Επίπεδο έδαφος, h=380 m). Τρισδιάστατο γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra στην ατμόσφαιρα στην επιφάνεια του εδάφους



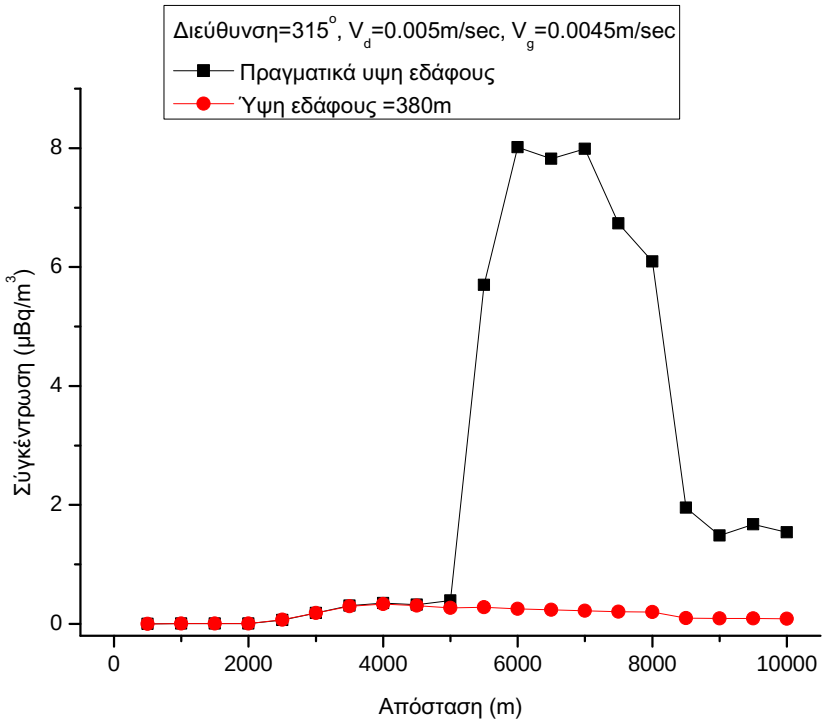
Σχήμα 5.38: Συγκριτικό γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra των εκτελέσεων 15 (Πραγματικά ύψη) και 19 (Επίπεδο έδαφος, h=380 m) στην διεύθυνση 247.5 °



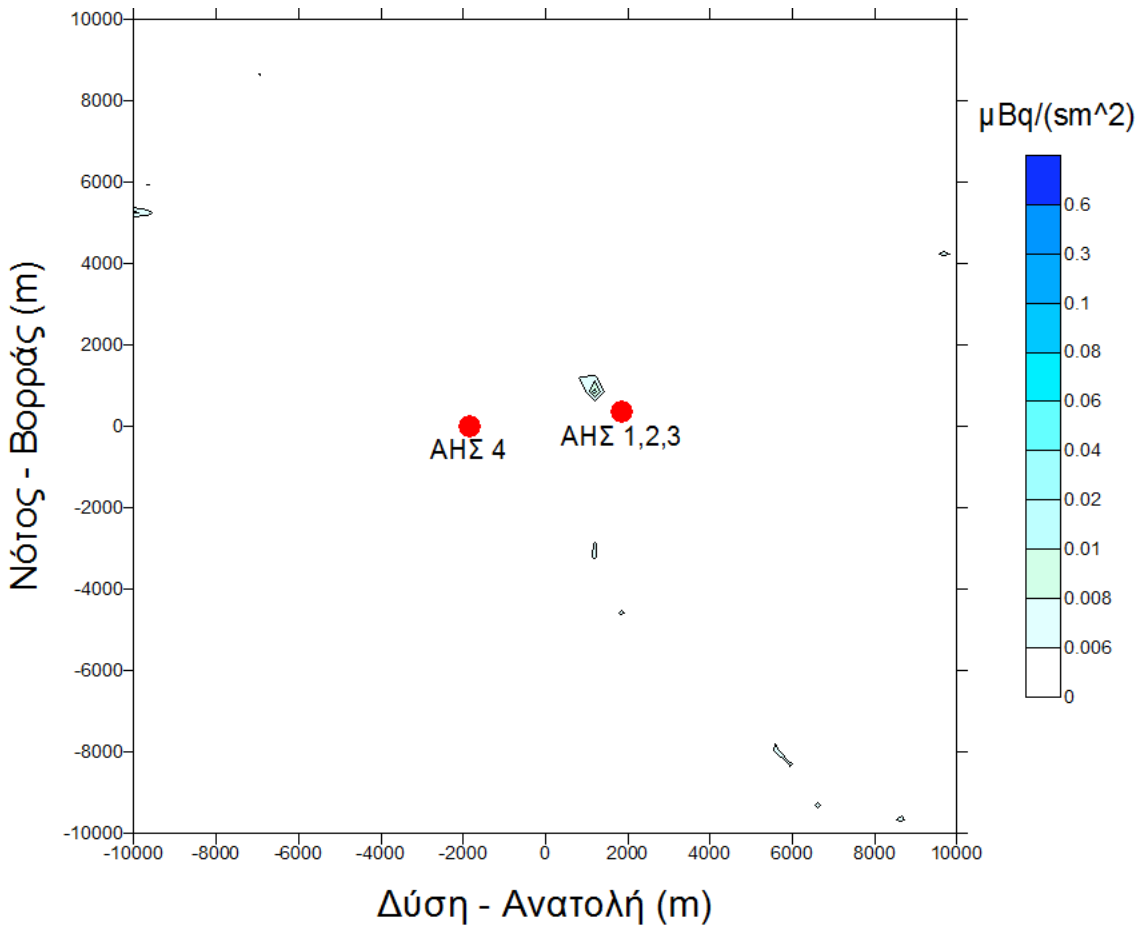
Σχήμα 5.39: Συγκριτικό γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra των εκτελέσεων 15 (Πραγματικά ύψη) και 19 (Επίπεδο έδαφος, h=380 m) στην διεύθυνση 270 °



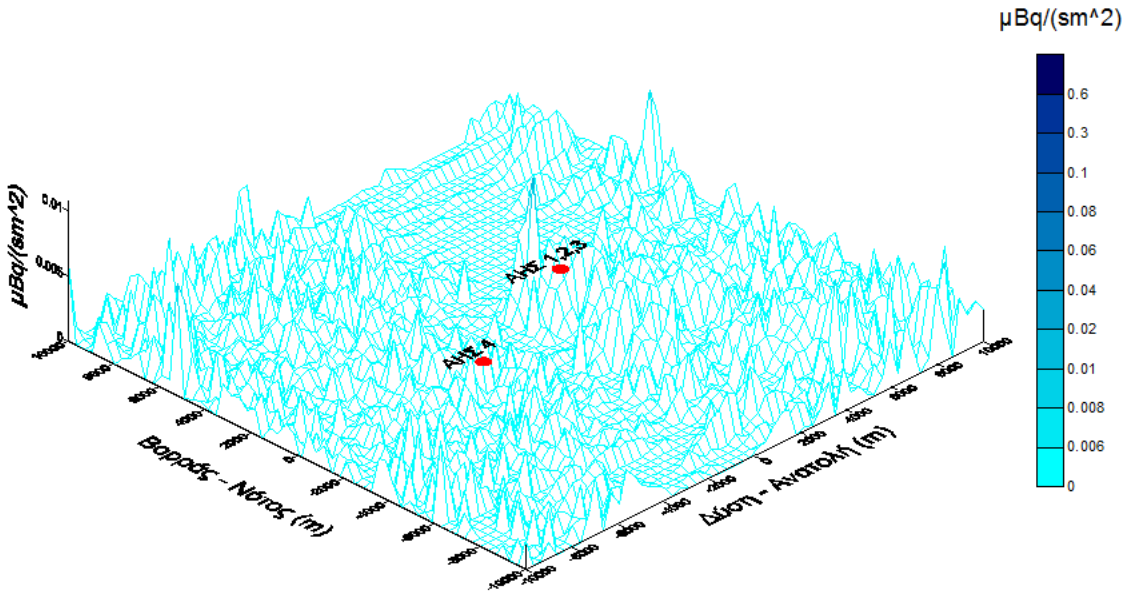
Σχήμα 5.40: Συγκριτικό γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra των εκτελέσεων 15 (Πραγματικά ύψη) και 19 (Επίπεδο έδαφος, h=380 m) στην διεύθυνση 292.5 °



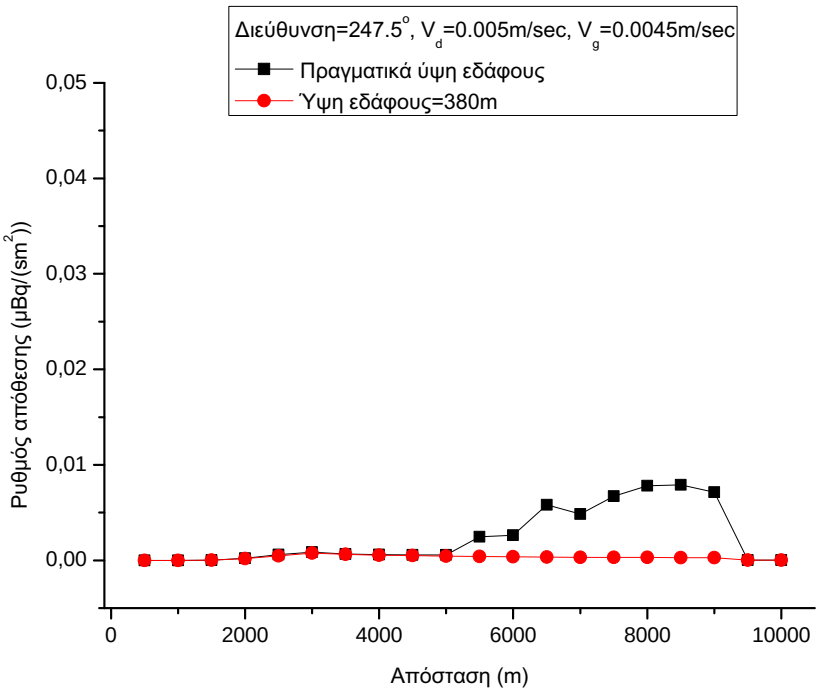
Σχήμα 5.41: Συγκριτικό γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra των εκτελέσεων 15 (Πραγματικά ύψη) και 19 (Επίπεδο έδαφος, h=380 m) στην διεύθυνση 315 °



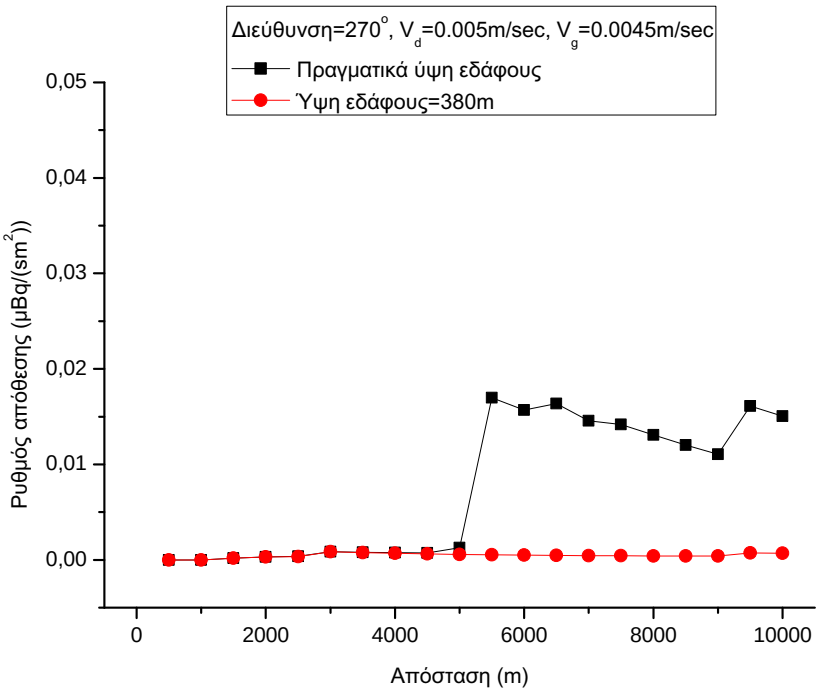
Σχήμα 5.42: Εκτέλεση 19 (Επίπεδο έδαφος, h=380 m). Δισδιάστατο γράφημα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος.



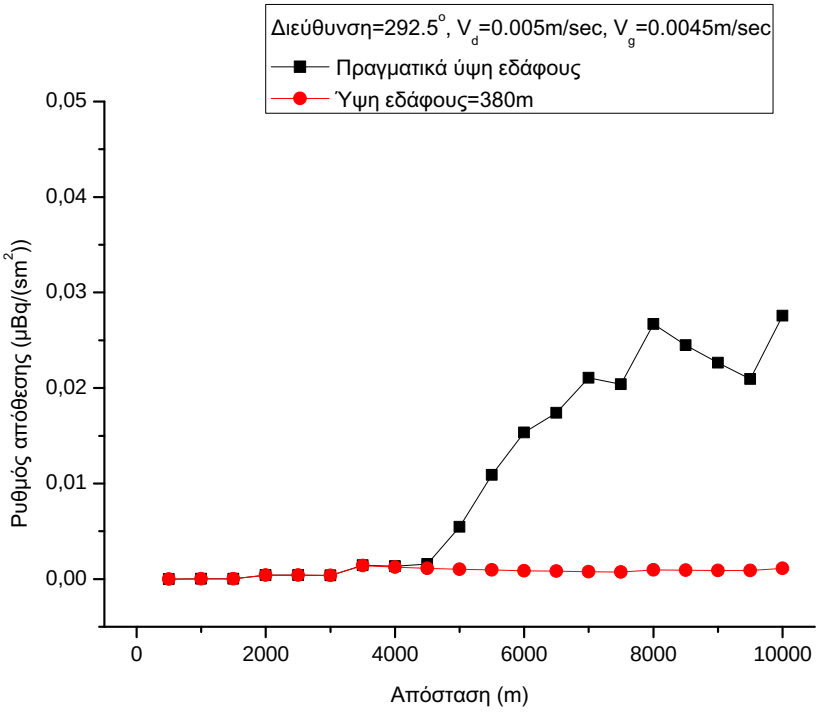
Σχήμα 5.43: Εκτέλεση 19 (Επίπεδο έδαφος, h=380 m). Τρισδιάστατο γράφημα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος.



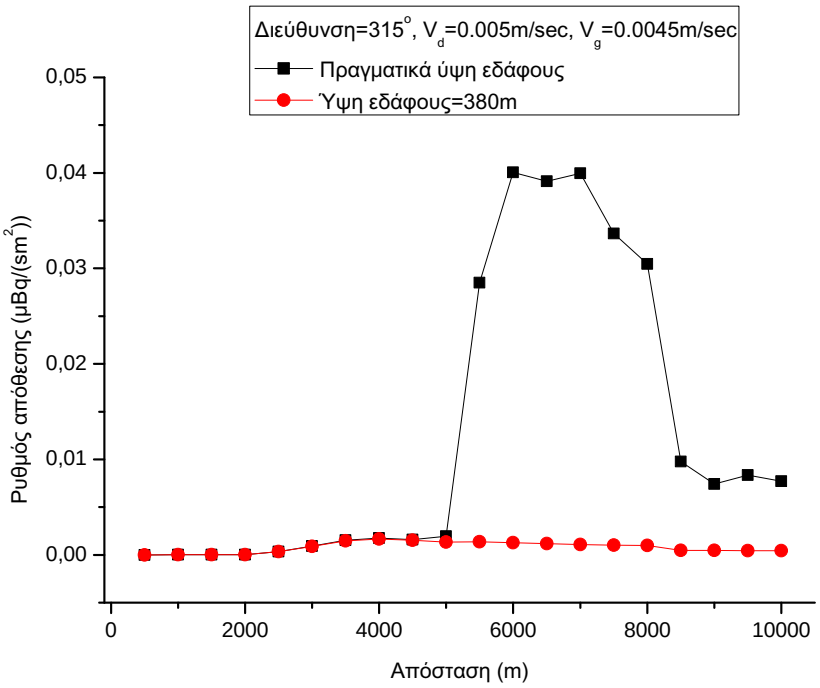
Σχήμα 5.44: Συγκριτικό γράφημα των υπολογιζόμενων ρυθμών απόθεσης ^{226}Ra των εκτελέσεων 15 (Πραγματικά ύψη) και 19 (Επίπεδο έδαφος, h=380 m) στην διεύθυνση 247.5 °



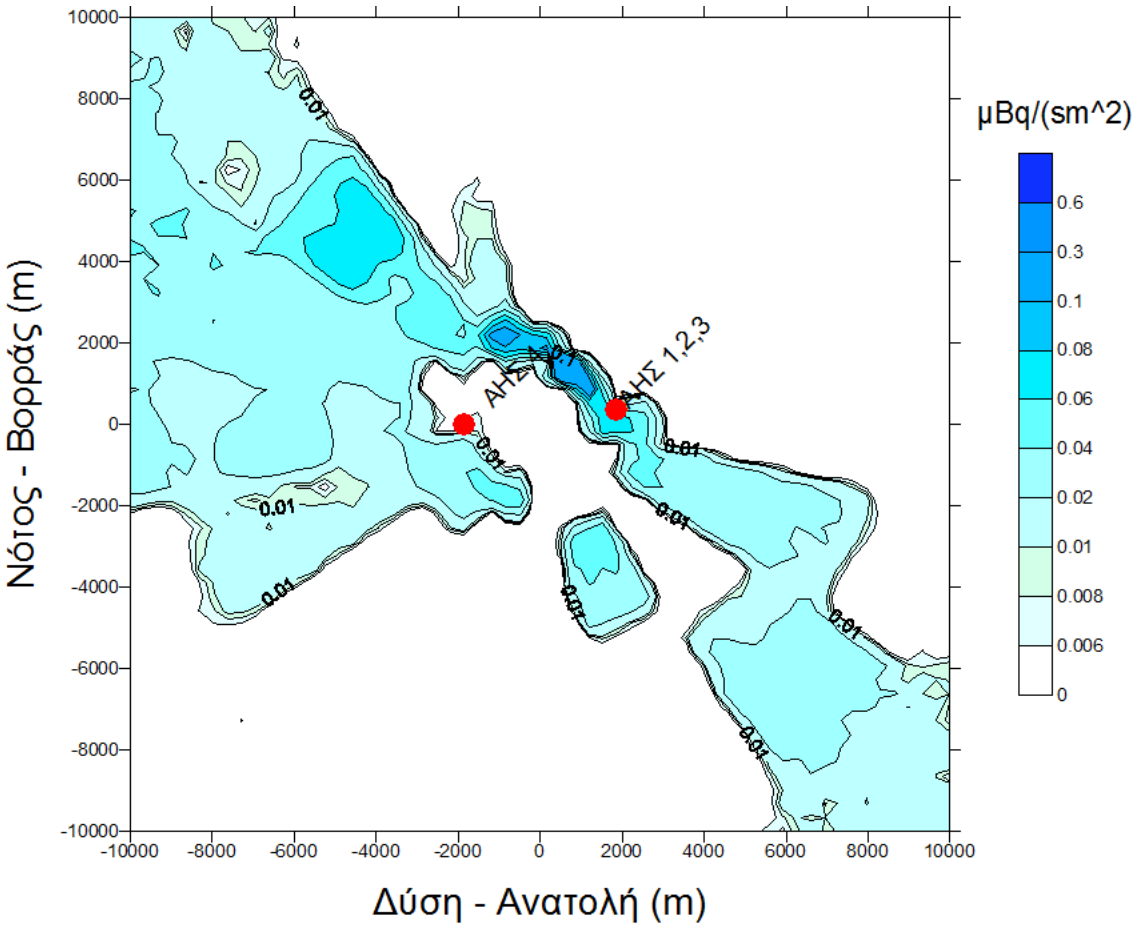
Σχήμα 5.45: Συγκριτικό γράφημα των υπολογιζόμενων ρυθμών απόθεσης ^{226}Ra των εκτελέσεων 15 (Πραγματικά ύψη) και 19 (Επίπεδο έδαφος, h=380 m) στην διεύθυνση 270 °



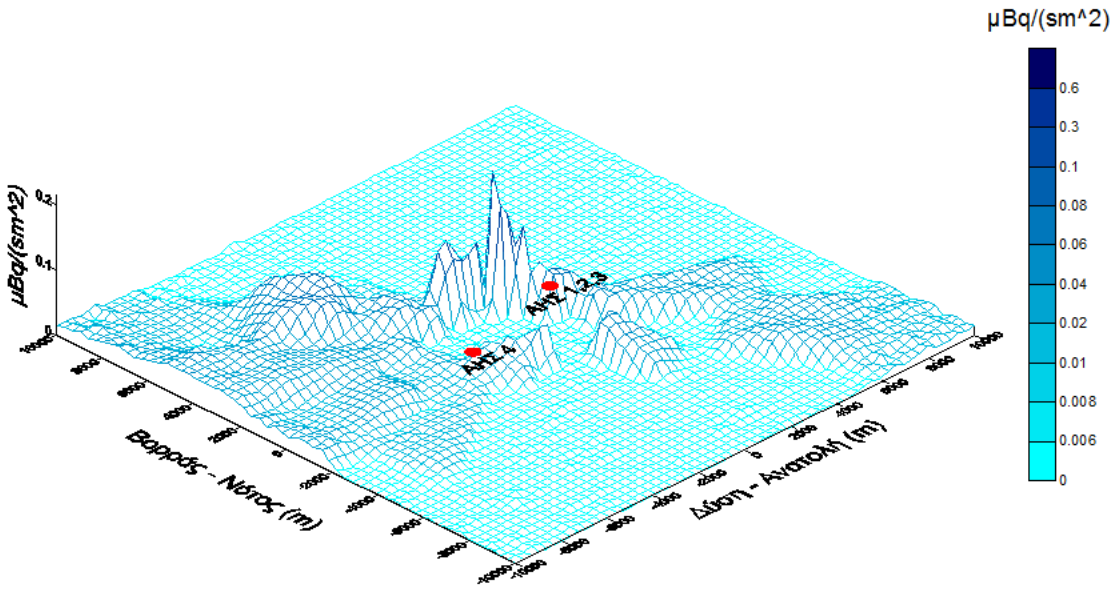
Σχήμα 5.46: Συγκριτικό γράφημα των υπολογιζόμενων ρυθμών απόθεσης ^{226}Ra των εκτελέσεων 15 (Πραγματικά ύψη) και 19 (Επίπεδο έδαφος, h=380 m) στην διεύθυνση 292.5 °



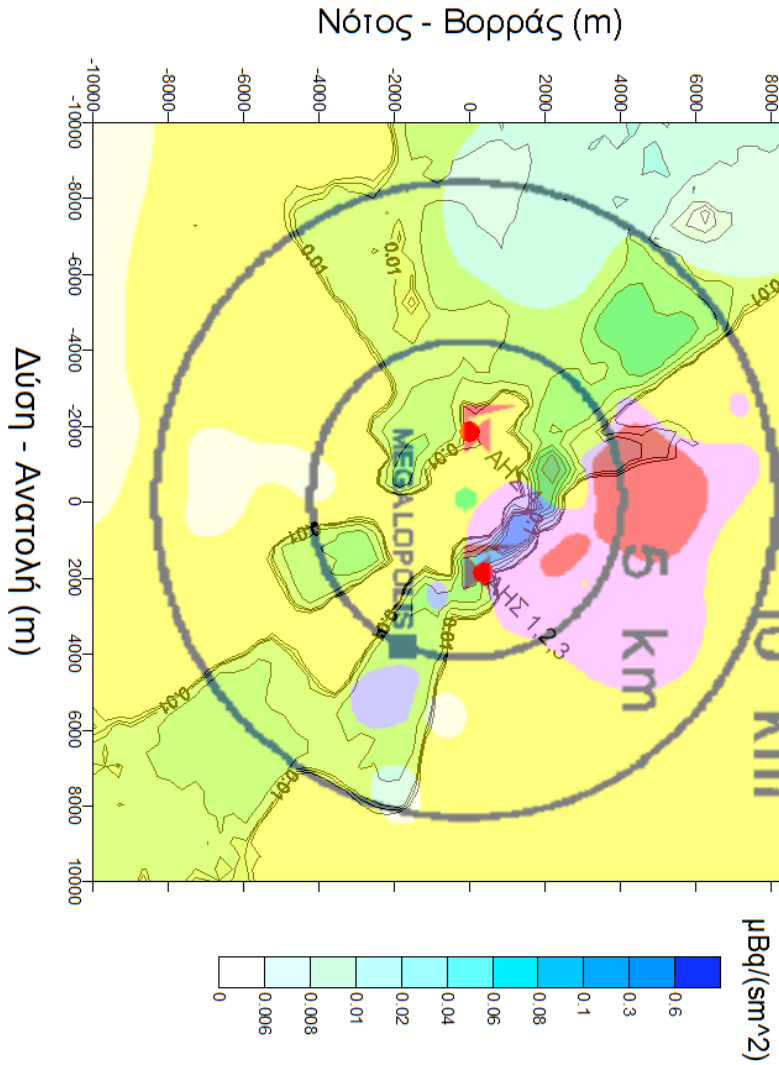
Σχήμα 5.47: Συγκριτικό γράφημα των υπολογιζόμενων ρυθμών απόθεσης ^{226}Ra των εκτελέσεων 15 (Πραγματικά ύψη) και 19 (Επίπεδο έδαφος, h=380 m) στην διεύθυνση 315 °



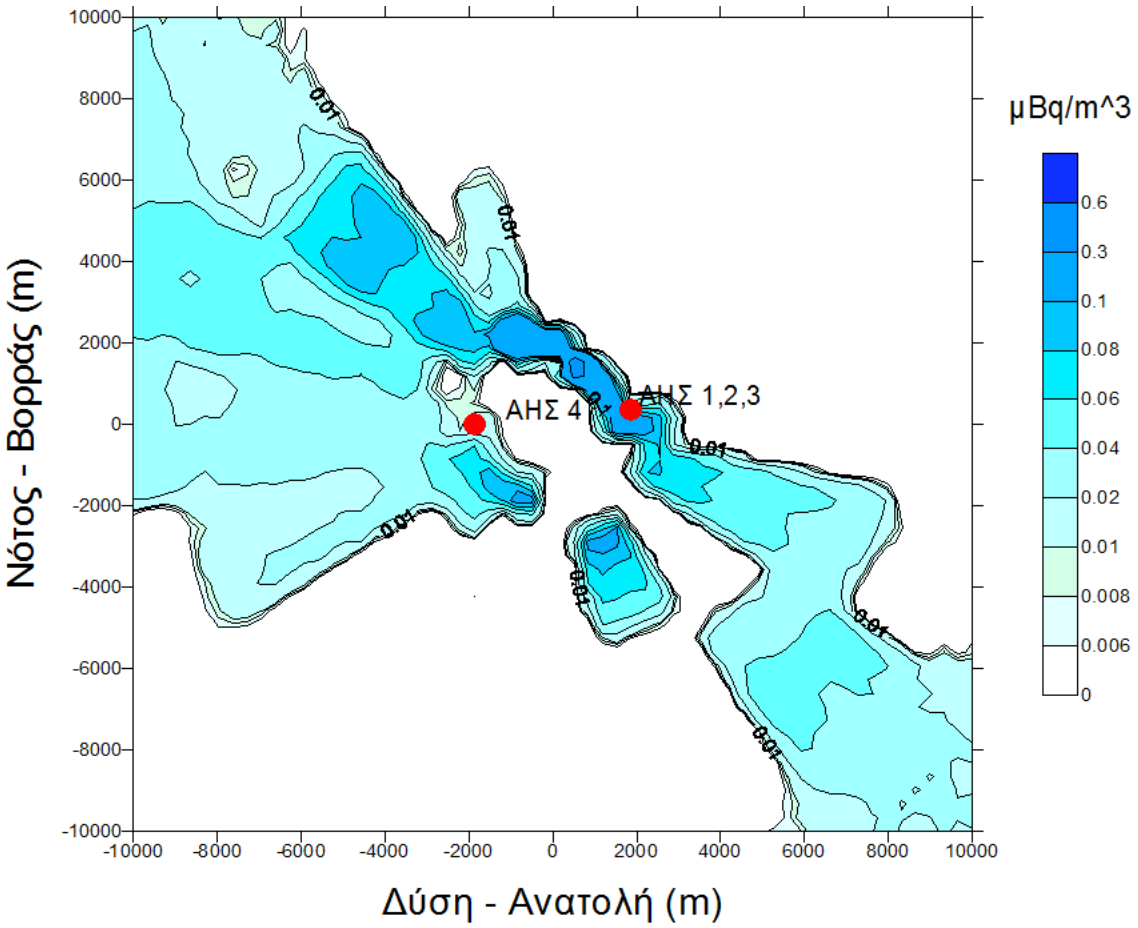
Σχήμα 5.48: Εκτέλεση 20 (Λ_p=$4 \times 10^{-4}\,\mathrm{sec}^{-1}$, F_p=0.15). Δισδιάστατο γράφημα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος.



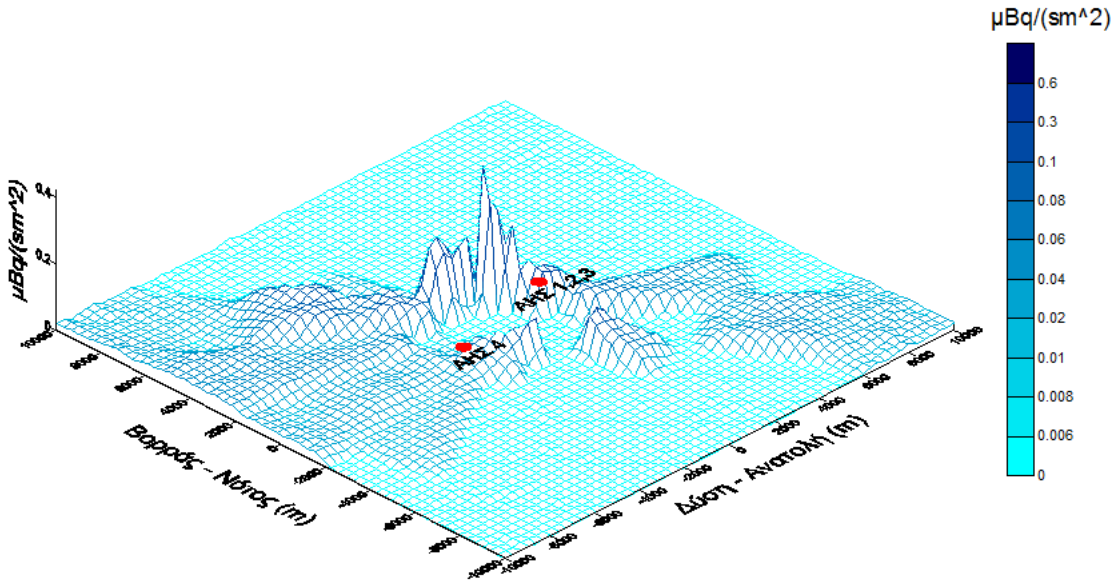
Σχήμα 5.49: Εκτέλεση 20 (Λ_p=$4 \times 10^{-4}\,\mathrm{sec}^{-1}$, F_p=0.15). Τρισδιάστατο γράφημα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος.



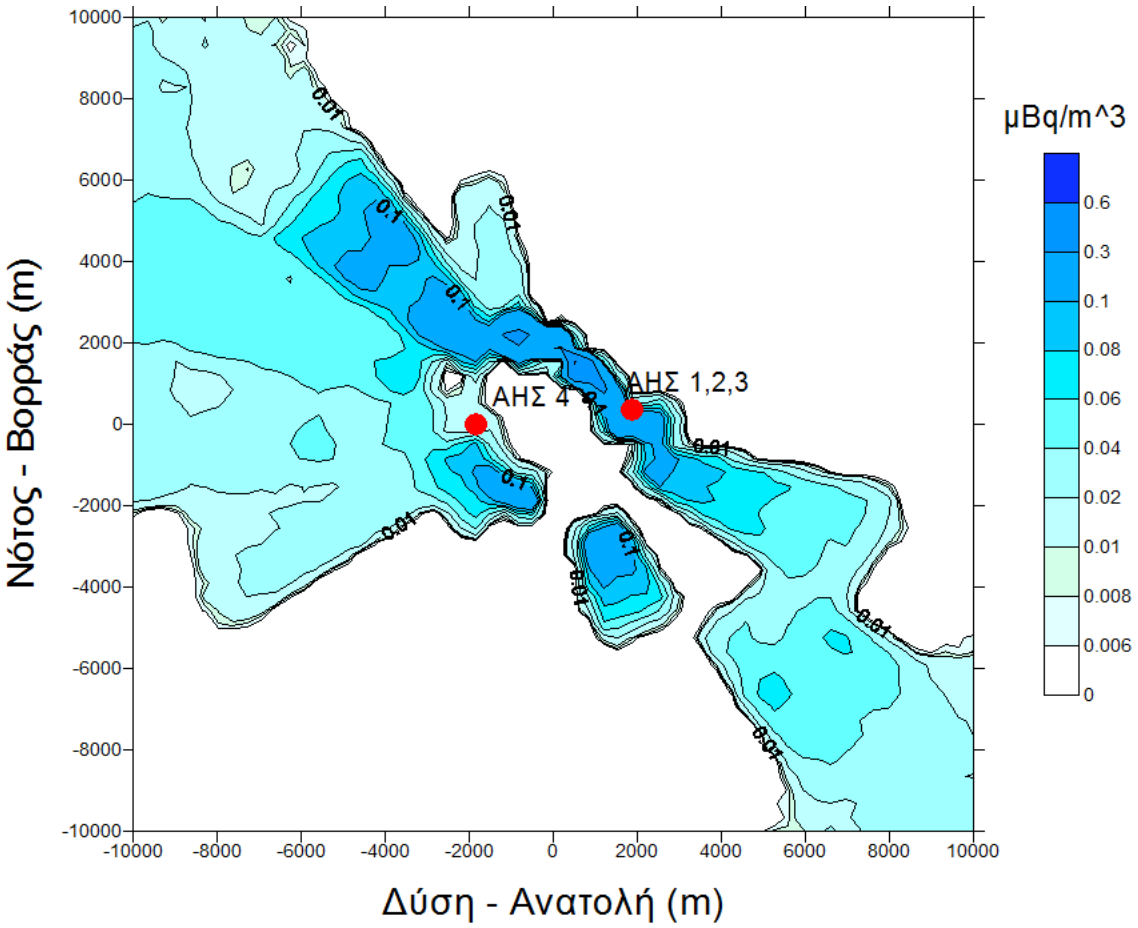
Σχήμα 5.50: Συγκριτικό διάγραμμα των σημείων υψηλών συγκεντρώσεων ^{226}Ra στο έδαφος, όπως προσδιορίστηκαν από τους Rouni et al. [157], με τα σημεία υψηλών ρυθμών απόθεσης ^{226}Ra, που υπολογίστηκαν από τον ORION-II στην εκτέλεση 20.



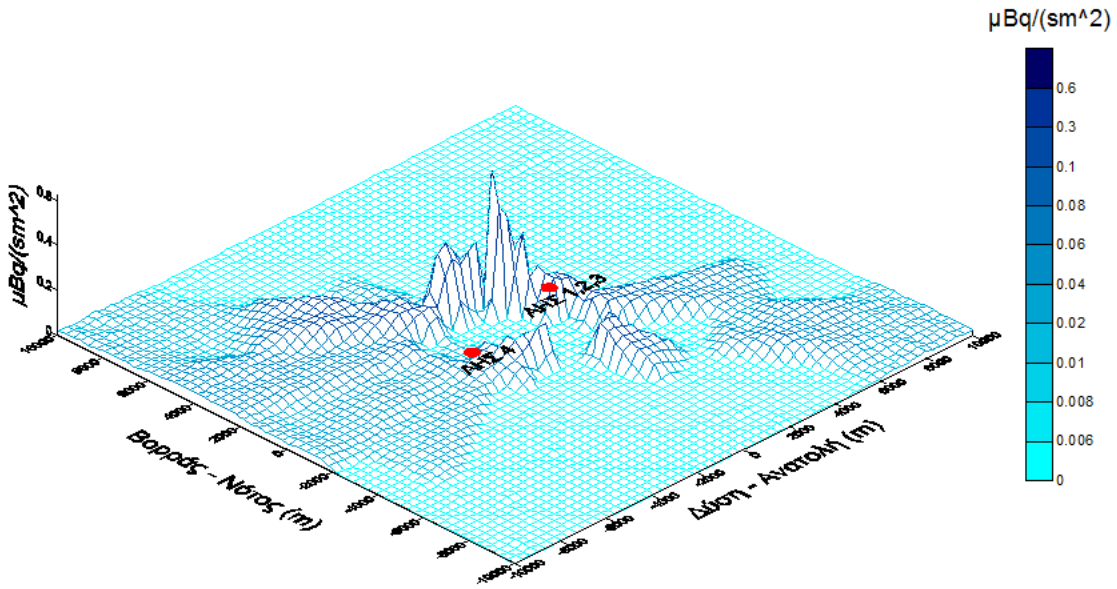
Σχήμα 5.51: Εκτέλεση 21 (Λ_p=$4 \times 10^{-4}\,\mathrm{sec}^{-1}$, F_p=0.30). Δισδιάστατο γράφημα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος.



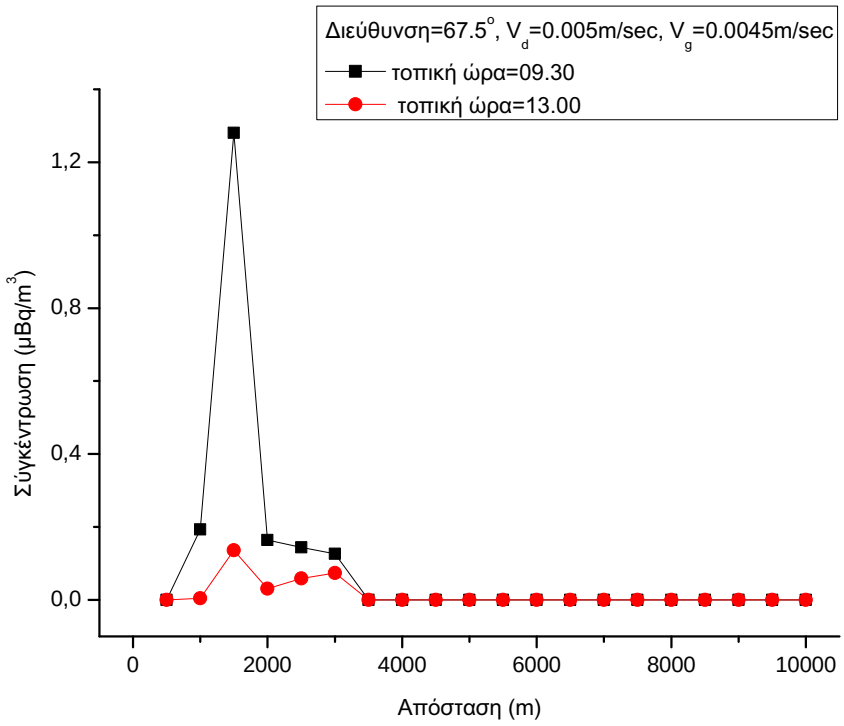
Σχήμα 5.52: Εκτέλεση 21 (Λ_p=$4 \times 10^{-4}\,\mathrm{sec}^{-1}$, F_p=0.30). Τρισδιάστατο γράφημα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος.



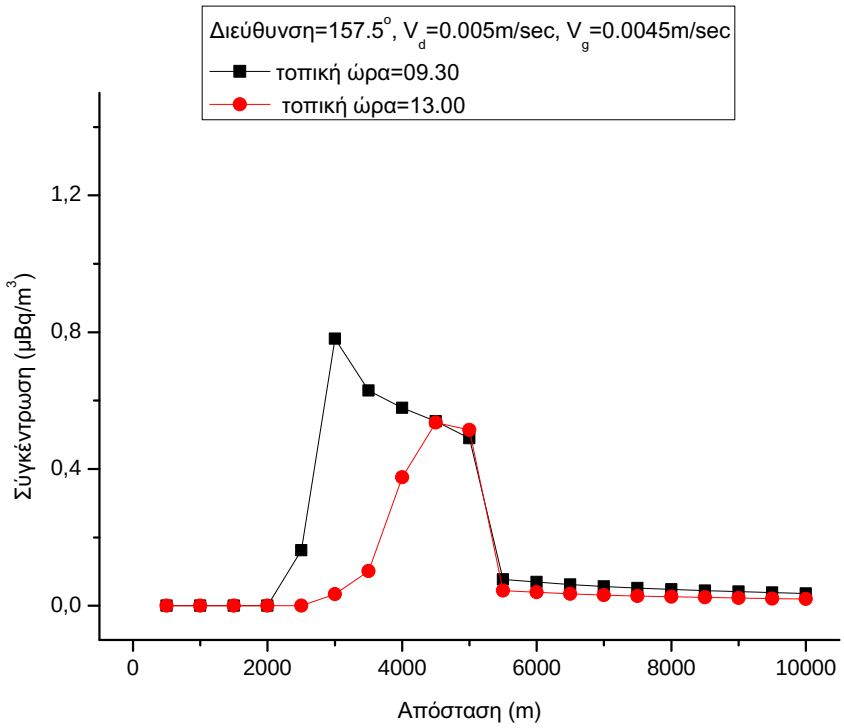
Σχήμα 5.53: Εκτέλεση 22 (Λ_p=6 $\times$ 10^{-4} $\sec^{-1}$, F_p=0.30). Δισδιάστατο γράφημα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος.



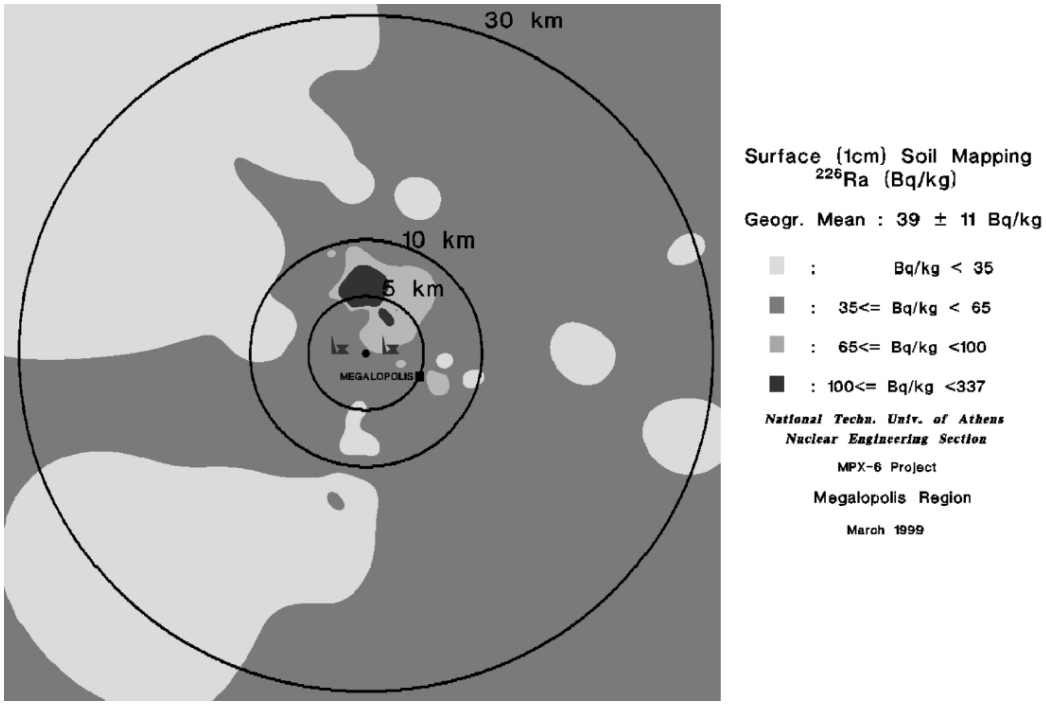
Σχήμα 5.54: Εκτέλεση 22 (Λ_p=6 $\times$ 10^{-4} $\sec^{-1}$, F_p=0.30). Τρισδιάστατο γράφημα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος.



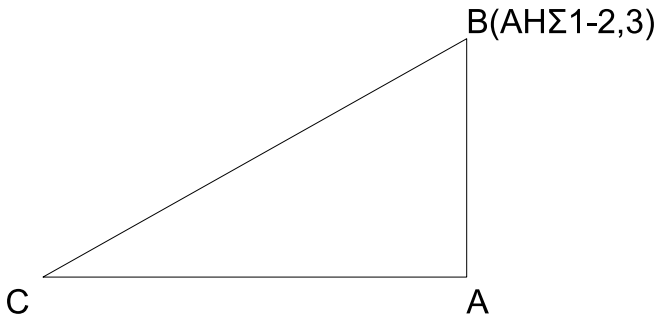
Σχήμα 5.55: Συγκριτικό γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra των εκτελέσεων 15 (Τοπική ώρα=09.00) και 23(Τοπική ώρα=13.00) στην διεύθυνση $67.5\,^{\circ}$



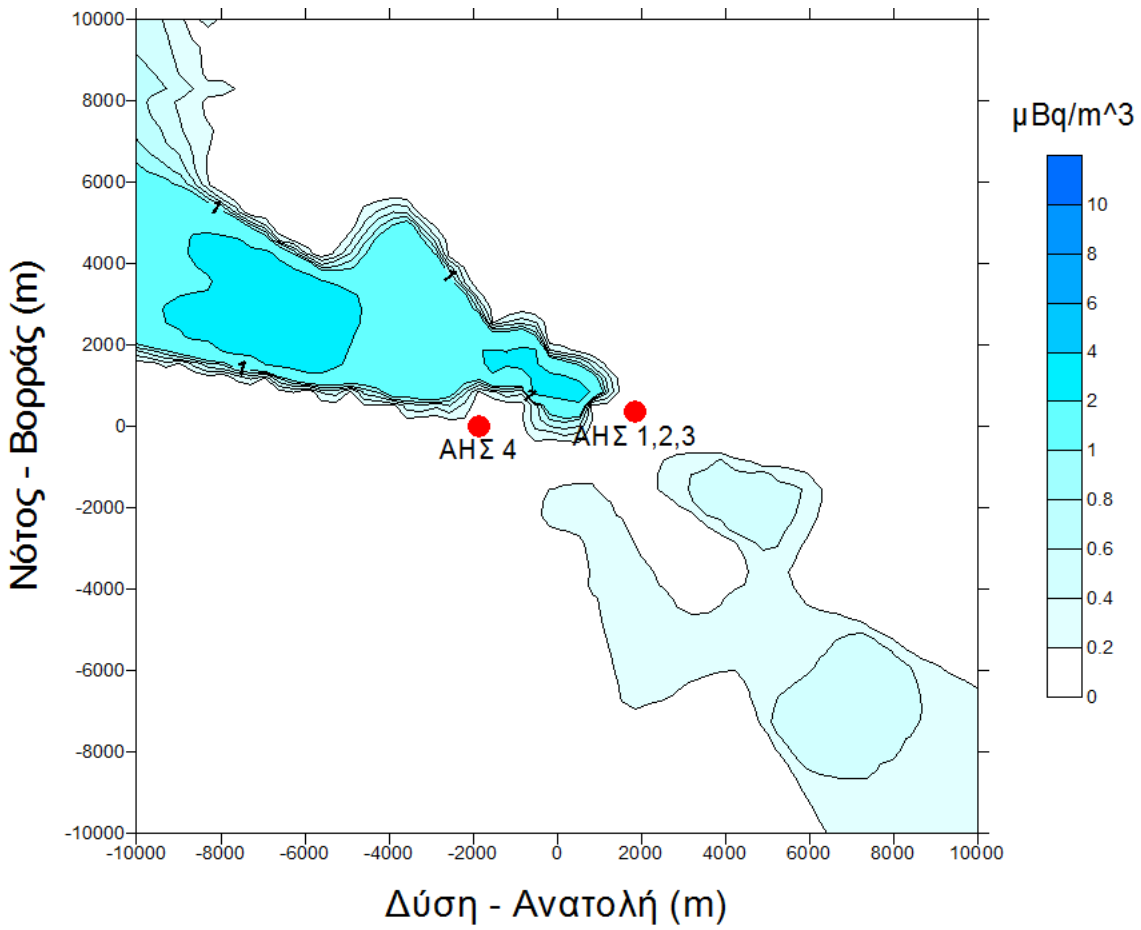
Σχήμα 5.56: Συγκριτικό γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra των εκτελέσεων 15 (Τοπική ώρα=09.00) και 23 (Τοπική ώρα=13.00) στην διεύθυνση $157.5\,^{\circ}$



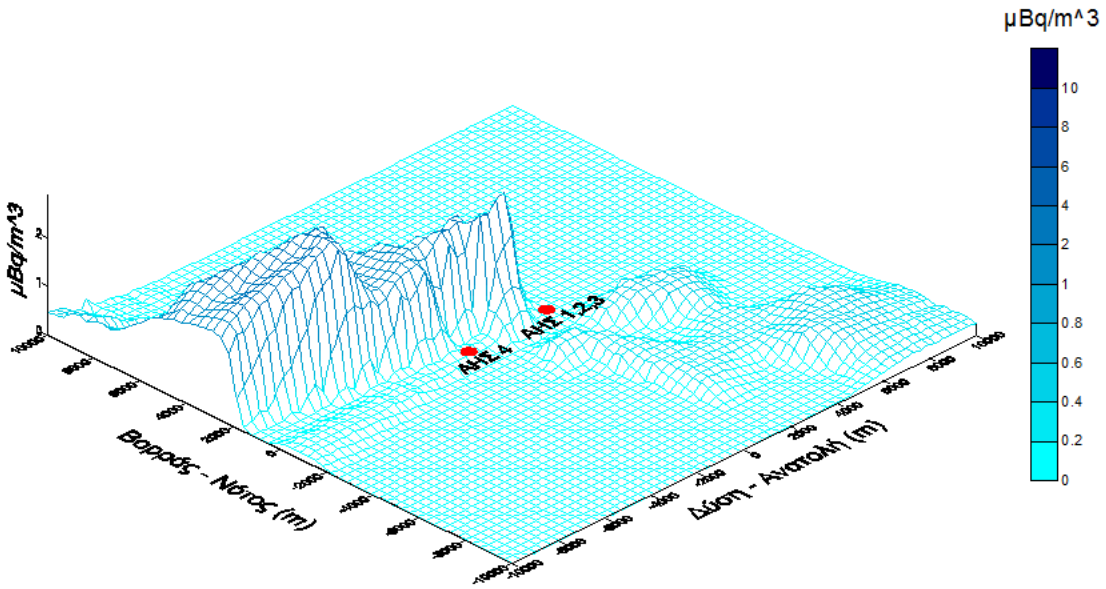
Σχήμα 5.57: Χαρτογράφηση των συγκεντρώσεων του ^{226}Ra στο επιφανειακό χώμα $1\,\mathrm{cm}$ στην περιοχή της Μεγαλόπολης σύμφωνα με τους Rouni et al. [157]



Σχήμα 5.58: Τρίγωνο θέσης του ΑΗΣ1-2,3 σε σχέση με το κέντρο υπολογισμού C

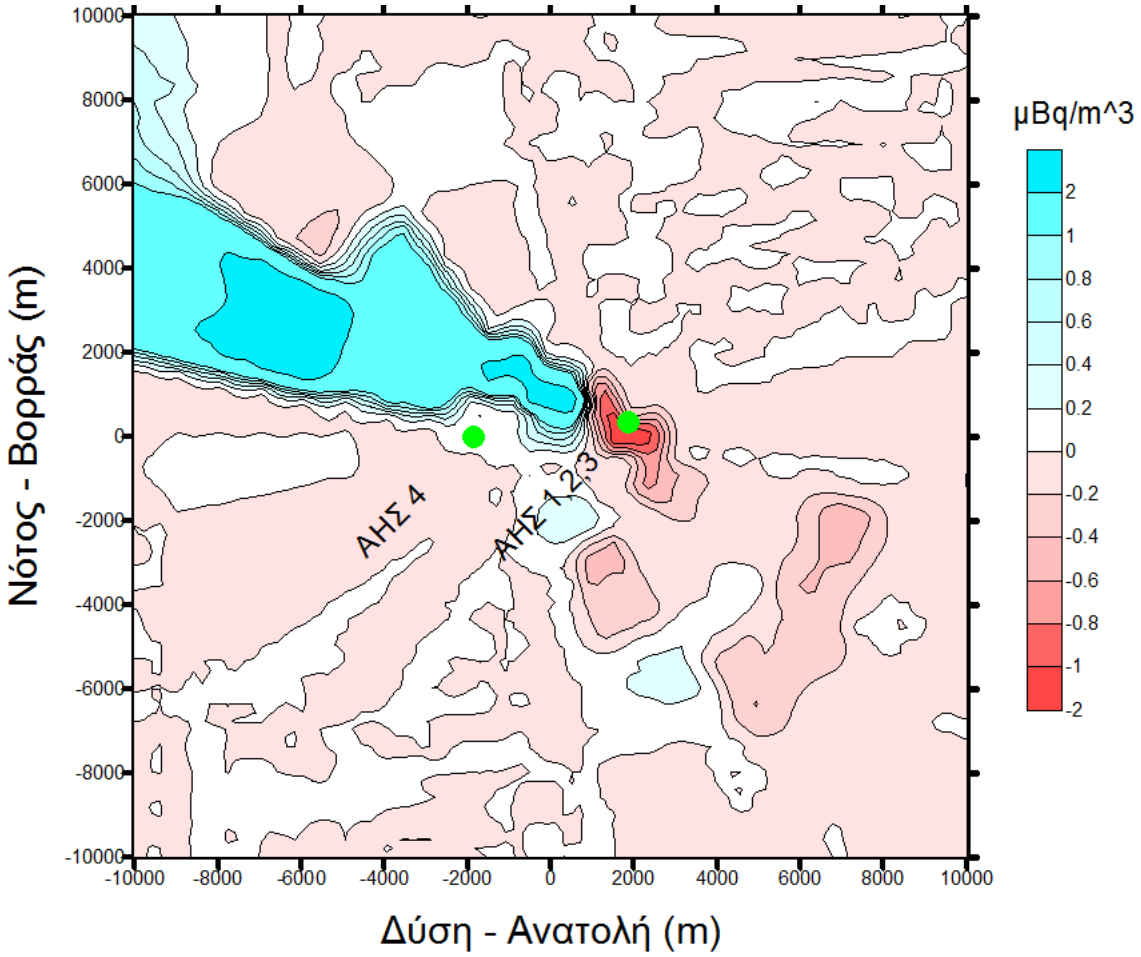


Σχήμα 5.59: Εκτέλεση του GENII με βάση το 1ο μετεωρολογικό σενάριο. Δισδιάστατο γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra

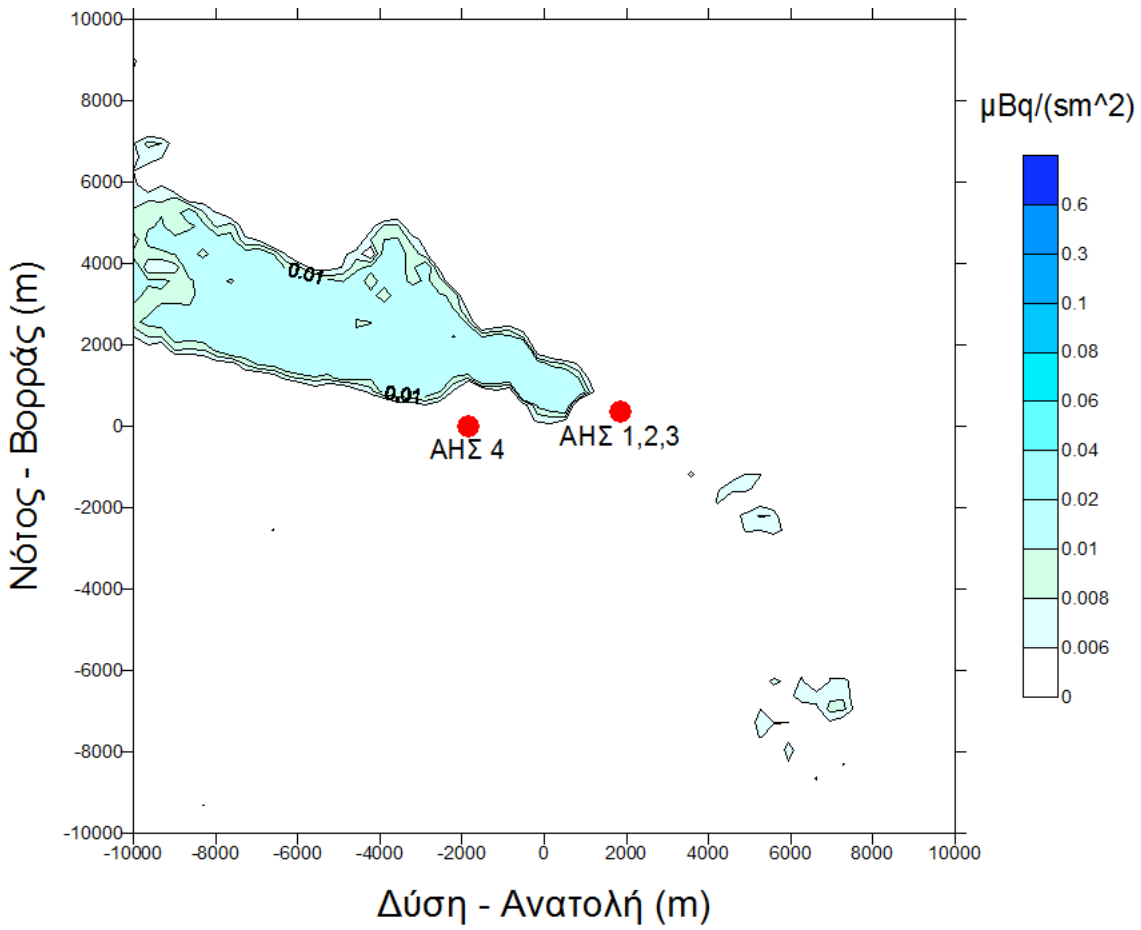


Σχήμα 5.60: Εκτέλεση του GENII με βάση το 1ο μετεωρολογικό σενάριο. Τρισδιάστατο γράφημα των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^{226}Ra

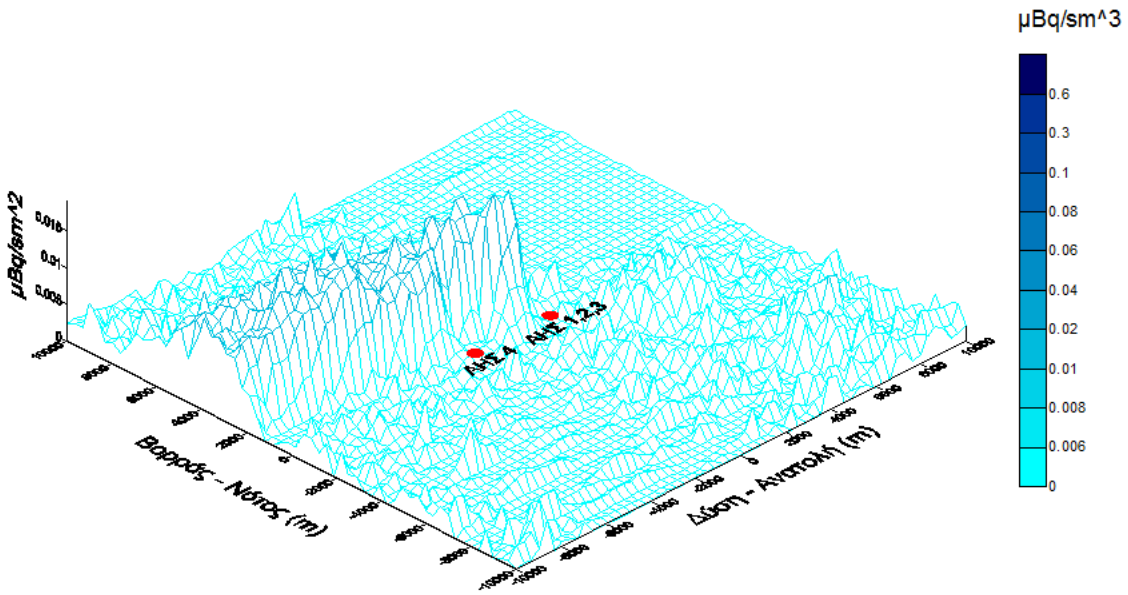
Σχήμα 5.61: Χάρτης της περιοχής της Μεγαλόπολης με διαστάσεις και προσανατολισμό ίδιους με το γράφημα 5.59. Προέλευση: Google Maps [69].



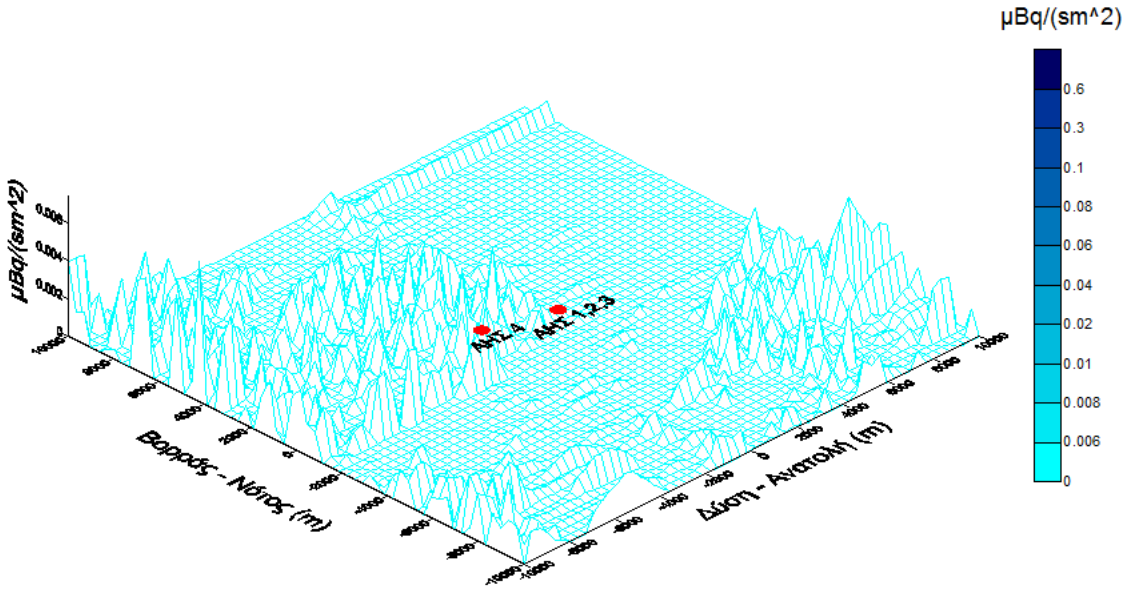
Σχήμα 5.62: Διάγραμμα διαφορών των συγκεντρώσεων ^{226}Ra μεταξύ των αποτελεσμάτων του GENII και του ORION-II



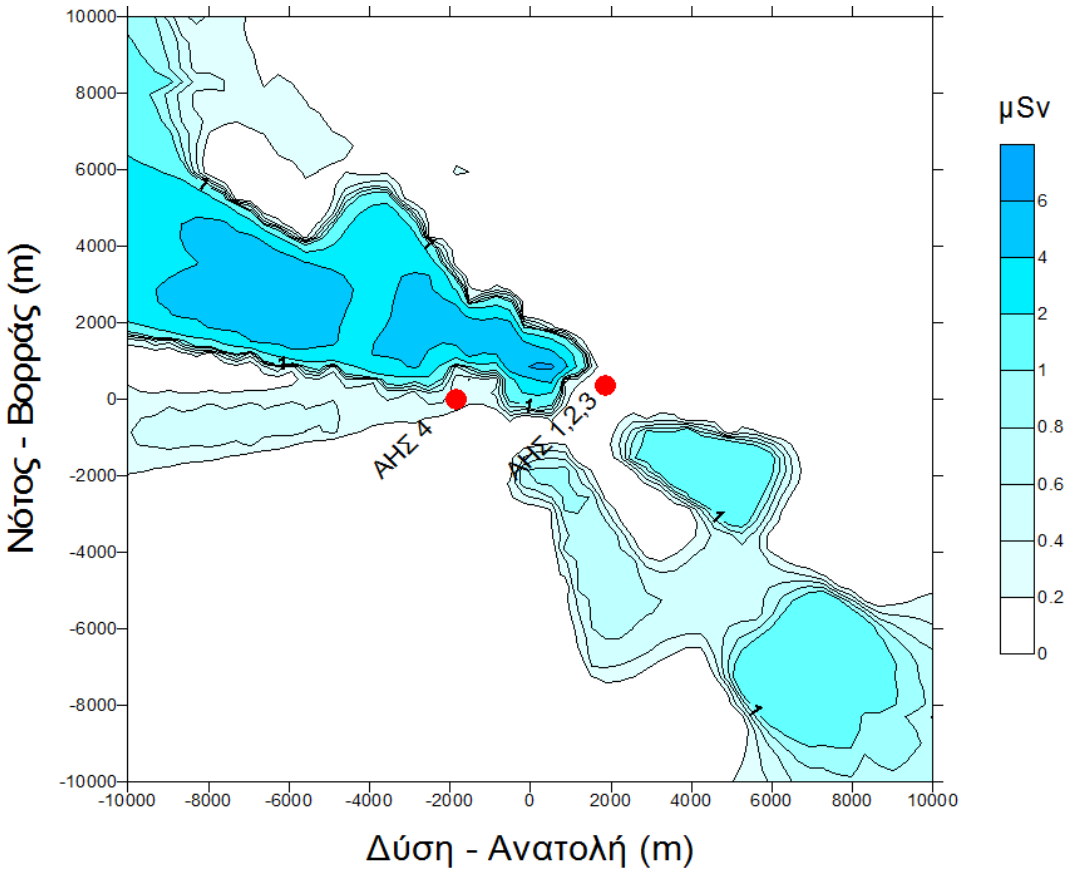
Σχήμα 5.63: Εκτέλεση του GENII με βάση το 1ο μετεωρολογικό σενάριο. Δισδιάστατο γράφημα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος



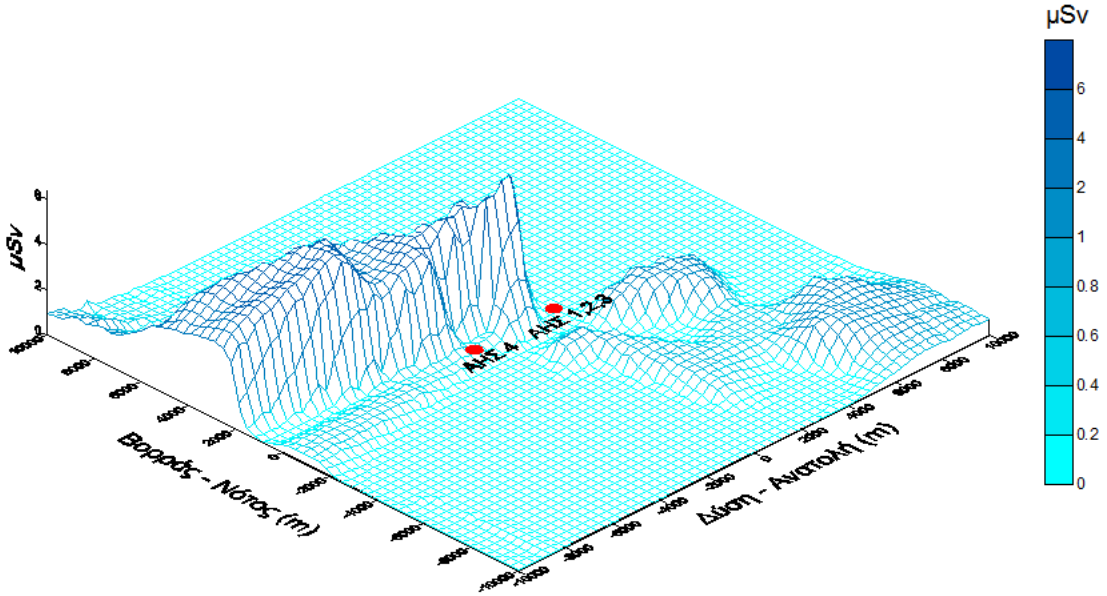
Σχήμα 5.64: Εκτέλεση του GENII με βάση το 1ο μετεωρολογικό σενάριο. Τρισδιάστατο γράφημα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης ^{226}Ra στο έδαφος



Σχήμα 5.65: Εκτέλεση του GENII με βάση το 1ο μετεωρολογικό σενάριο. Τρισδιάστατο γράφημα του υπολογιζόμενου ρυθμού απόθεσης ^{222}Rn στο έδαφος



Σχήμα 5.66: Εκτέλεση του GENII με βάση το 1ο μετεωρολογικό σενάριο. Δισδιάστατο γράφημα των υπολογιζόμενων ετήσιων ατομικών δόσεων λόγω των ισοτόπων ^{238}U, ^{234}Th, ^{226}Ra, ^{210}Pb, ^{210}Po, ^{210}Bi, ^{232}Th, ^{228}Th, ^{228}Ra, ^{224}Ra, ^{212}Pb και ^{40}K.



Σχήμα 5.67: Εκτέλεση του GENII με βάση το 1ο μετεωρολογικό σενάριο. Τρισδιάστατο γράφημα των υπολογιζόμενων ετήσιων ατομικών δόσεων λόγω των ισοτόπων ^{238}U, ^{234}Th, ^{226}Ra, ^{210}Pb, ^{210}Po, ^{210}Bi, ^{232}Th, ^{228}Th, ^{228}Ra, ^{224}Ra, ^{212}Pb και ^{40}K.

Κεφάλαιο 6

Ραδιοπεριβαλλοντική εφαρμογή στην περιοχή της Μεγαλόπολης

6.1 Εισαγωγή

Η περιοχή της Μεγαλόπολης παρουσιάζει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον από ραδιολογική πλευρά. Έτσι στο παρελθόν έχουν διεξαχθεί έρευνες τόσο από το ΕΠΤ-ΕΜΠ, όσο και από άλλους ερευνητές, ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση της λειτουργίας των ΑΗΣ Μεγαλόπολης στο περιβάλλον της περιοχής. Το ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει επανειλημμένα ασχοληθεί με τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων των σειρών του ^{238}U και ^{232}Th στην ιπτάμενη τέφρα των ΑΗΣ της περιοχής [97], [173]. Επίσης έχει πραγματοποιήσει μετρήσεις για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ^{226}Ra σε δείγματα επιφανειακού χώματος της περιοχής, έχει μετρήσει την συγκέντρωση του ^{222}Rn στο γηίνο αέριο σε διάφορες τοποθεσίες, ενώ έχει διεξάγει μετρήσεις του ρυθμού εκροής ^{222}Rn από το έδαφος σε διάφορες τοποθεσίες [157]. Έχει επίσης διεξάγει μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ρυθμού εκροής ^{222}Rn σε περιοχές, όπου γίνεται απόθεση ιπτάμενης τέφρας. Στις ίδιες περιοχές πραγματοποίησε μετρήσεις για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ^{222}Rn στο γήινο αέριο, καθώς και για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων του ^{226}Ra και του ^{232}Th στις υπόψη περιοχές [98]. Όσον αφορά άλλους ερευνητές οι Papaefthymiou et al. [140] μέτρησαν την συγκέντρωση του ^{238}U και του ^{232}Th σε μηνιαία δείγματα ολικής απόθεσης, που συνέλεξαν στην περιοχή για χρονικό διάστημα ενός έτους.

Στην παρούσα ΔΔ προκειμένου να ερευνηθεί όχι μόνο με την βοήθεια κωδίκων αλλά και πειραματικά η επίδραση των ΑΗΣ στην ατμόσφαιρα της περιοχής της Μεγαλόπολης αποφασίστηκε να συλλεχθούν δείγματα υγρής απόθεσης στην περιοχή και στην συνέχεια να ακολουθήσει ανάλυσή τους στις διατάξεις του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Έτσι συγκροτήθηκε ένας τύπος συσκευής δειγματοληψίας και έγινε προμήθεια ενός ακόμη. Ακολούθη-

σαν δύο περίοδοι δειγματοληψίας στην Μεγαλόπολη. Στην πρώτη περίοδο μάλιστα πραγματοποιήθηκε, για λόγους αναφοράς, και παράλληλη δειγματοληψία στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Τα δείγματα υποβλήθηκαν σε ραδιοχημική επεξεργασία και ακολούθησε ανάλυσή τους με τρεις διαφορετικές μεθόδους: γ-φασματοσκοπία, α-φασματοσκοπία και Ανάλυση Κινητικής Φωσφορισμού *(Kinetic Phosphorescence Analysis, KPA)* , προκειμένου να διαπιστωθεί η συγκέντρωση των κατά περίπτωση της μεθόδου περιεχομένων ραδιενεργών ιχνοστοιχείων στα δείγματα. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει σύντομη παρουσίαση των αρχών λειτουργίας των μετρητικών διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν. Ακολούθως θα παρουσιαστούν οι συσκευές δειγματοληψίας, οι τρόποι δειγματοληψίας, οι αναλύσεις, που πραγματοποιήθηκαν, καθώς και οι πειραματικές μεθοδολογίες, που αναπτύχθηκαν, προκειμένου να έρθουν διεξαχθούν οι παραπάνω αναλύσεις.

6.2 Σχεδιασμός και πραγματοποίηση δειγματοληψιών στην περιοχή της Μεγαλόπολης

Προκειμένου να ερευνηθεί και πειραματικά το φαινόμενο της διασποράς ραδιενεργών ισοτόπων στην περιοχή της Μεγαλόπολης αποφασίστηκε να γίνουν δειγματοληψίες υγρής απόθεσης στην περιοχή και στην συνέχεια να αναλυθούν τα δείγματα της βροχής, που συλλέχθηκαν, στις μετρητικές διατάξεις του εργαστηρίου. Έτσι έγινε προμήθεια των πιο κάτω εξαρτημάτων, ώστε να πραγματοποιηθούν οι δειγματοληψίες:

- Ένας δειγματολήπτης της εταιρείας Nilu ειδικά σχεδιασμένος και κατασκευασμένος για δειγματοληψίες απόθεσης με διάμετρο 20cm και ύψος 40cm (βλ. σχήμα 6.1). Από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως δειγματολήπτης Nilu.

- Τέσσερα δοχεία της εταιρίας Fisher Scientific κατασκευασμένα από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE) με διάμετρο 30cm και ύψος 38cm. Τα συγκεκριμένα δοχεία διαθέτουν άνοιγμα 6cm το οποίο κλείνει με βιδωτό καπάκι.

- Τέσσερις χοάνες εμπορίου με διάμετρο 23cm.

Στα δοχεία της εταιρείας Fisher στερεώθηκαν οι χοάνες με την βοήθεια ελαστικού παρεμβύσματος, ώστε να είναι δυνατή η δειγματοληψία βρόχινου νερού. Η τελική μορφή των δειγματοληπτών αυτών φαίνεται στο σχήμα 6.2 και από εδώ και στο εξής θα αναφέρονται ως δειγματολήπτες ΕΠΤ.

Στα πλαίσια αυτής της ΔΔ πραγματοποιήθηκαν τρεις δειγματοληψίες οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1. Οι δύο πρώτες δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν χρονικά παράλληλα: Η μία στην πόλη της Μεγαλόπολης στην ταράτσα ιδιωτικής διώροφης κατοικίας (βλ. σχήμα 6.4) και η δεύτερη στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

στην ταράτσα του κτιρίου Κ του ΕΠΤ-ΕΜΠ (βλ. σχήμα 6.3). Αυτό έγινε προκειμένου να είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ των συγκεντρώσεων, που μετρήθηκαν στην Μεγαλόπολη, σε σχέση με τις αντίστοιχες στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου στην Αθήνα, όπου δεν αναμένεται σοβαρή επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με ισότοπα της σειράς του ^{238}U και του ^{232}Th. Για την ολοκλήρωση της μελέτης στη Μεγαλόπολη ακολούθησε τρίτη δειγματοληψία στην περιοχή της Μεγαλόπολης σε τοποθεσία αρκετά κοντά στον ΑΗΣ1-2,3 στο επίπεδο του εδάφους, περίπου ένα χρόνο αργότερα (βλ. πίνακα 6.1 για τις γεωγραφικές συντεταγμένες κάθε τοποθεσίας).

6.3 Προεπεξεργασία των δειγμάτων βρόχινου νερού για ανάλυση με α-, γ-φασματοσκοπία και ΚΡΑ

Μετά το πέρας της δειγματοληψίας το κάθε δείγμα είχε όγκο από 6-8 λίτρα νερού περίπου. Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί ανίχνευση ραδιενεργών ιχνοστοιχείων από τα δείγματα ως είχαν, απομαστεύτηκαν $279.5\,\mathrm{gr}$ από την ποσότητα της δειγματοληψίας με αριθμό 3 (βλ. πίνακα 6.2) και συσκευάστηκαν σε τυποποιημένο πλαστικό δοχείο γεωμετρίας ¨2¨ [216]. Στην συνέχεια ακολούθησε γ-φασματοσκοπική ανάλυση του δείγματος με τον ανιχνευτή XtRa της εταιρείας Canberra, η οποία παρουσιάζεται στην παράγραφο 6.4.4. Επειδή τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης δεν ήταν ικανοποιητικά αποφασίστηκε να γίνει προσυγκέντρωση των δειγμάτων μέχρι τελικού όγκου $250\,\mathrm{mL}$, ώστε να είναι δυνατόν να τοποθετηθούν στους ανιχνευτές των γ-φασματοσκοπικών διατάξεων και να πραγματοποιηθούν οι σχετικές αναλύσεις. Για την διεξαγωγή αναλύσεων με α- φασματοσκοπία και ΚΡΑ λήφθηκε μικρή ποσότητα από τα τελικά δείγματα, όπως περιγράφεται στις παραγράφους 6.5.4 και 6.6.3. Η συμπύκνωση αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί με την βοήθεια δύο υδατόλουτρων, που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ: Ένα $45\,\mathrm{lt}$ εταιρείας κατασκευής *Memmert* τύπου *WB 45* και ένα μικρότερο $9\,\mathrm{lt}$ εταιρείας κατασκευής *Nuve* τύπου *nb9*. Χάρη στα υδατόλουτρα ήταν δυνατόν να επιτευχθεί σταθερή θερμοκρασία θέρμανσης των δειγμάτων.

Έτσι πραγματοποιήθηκε η θέρμανση των δειγμάτων στην θερμοκρασία των $80^{\circ}\mathrm{C}$ σύμφωνα και με τη βιβλιογραφία [140]. Επιλέγοντας αυτή την σχετικά χαμηλή θερμοκρασία θέρμανσης αποφεύχθηκε πιθανή απώλεια ισοτόπων από τα δείγματα προς την ατμόσφαιρα. Επίσης έτσι αποφεύχθηκε ο βρασμός του δείγματος, ο οποίος θα προκαλούσε την έντονη ανάδευσή του λόγω της δημιουργίας φυσαλίδων. Βέβαια επιλέγοντας αυτή την χαμηλή θερμοκρασία επιμηκύνθηκε πάρα πολύ ο χρόνος συμπύκνωσης, που έφθασε περίπου τις 100 ώρες ανάλογα και με τον όγκο του δείγματος. Σημειώνεται ότι ο μέγιστος ρυθμός εξάτμισης, που παρατηρήθηκε είναι περίπου $80\,\mathrm{mLhr}^{-1}$.

Η διαδικασία συμπύκνωσης, που ακολουθήθηκε, ήταν η ακόλουθη:

- Μέρος του δείγματος τοποθετείται σε πυράντοχο γυάλινο κυλινδρικό δοχείο $3.5\,\mathrm{L}$, το οποίο τοποθετείται με την σειρά του μέσα στο υδατόλουτρο *Memmert*. Το δοχείο εξάτμισης σταθεροποιείται μέσα στο υδατόλουτρο με κατάλληλη μεταλλική διάταξη, η οποία μπορεί να αντισταθμιζει τα ανωστικά φορτία, που δημιουργούνται, όταν η στάθμη του δείγματος είναι σε χαμηλά επίπεδα.

- Θερμαίνεται το δείγμα στους $80^\circ\mathrm{C}$. Όταν πέσει η στάθμη του δοχείου γίνεται συμπλήρωση εκ νέου με το δείγμα, που έχει παραμένει μέσα στον δειγματολήπτη.

- Ξεπλένεται ο δειγματολήπτης, αφού αδειάσει, με $500\,\mathrm{mL}$ απιονισμένου νερού ως εξής: Προστίθεται η ποσότητα του απιονισμένου νερού και γίνεται ανάδευση του δοχείου δυνατά και παρατεταμένα.

- Μεταφέρεται το περιεχόμενο στο δοχείο εξάτμισης.

- Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται με άλλα $500\,\mathrm{mL}$, μεταφέρεται εκ νέου το περιεχόμενο στο δοχείο εξάτμισης και ακολουθεί εξάτμιση. Προσέχουμε πάντα ώστε να μην εξατμιστεί πλήρως το περιεχόμενο του δοχείου και «στεγνώσει» το δείγμα.

- Πλένεται ο δειγματολήπτης με $500\,\mathrm{mL}$ διαλύματος HNO_3 5% και ακολουθεί αναδεύση του δυνατά και παρατεταμένα.

- Μετά το πέρας της ανάδευσης χρησιμοποιείται μια ελαστική σπάτουλα για να αφαιρεθούν τα στερεά υπολείμματα από τα τοιχώματα του δειγματολήπτη.

- Αδειάζεται το περιεχόμενο του δειγματολήπτη στο δοχείο εξάτμισης και επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία άλλη μια φορά.

- Τοποθετείται το υδατόλουτρο *Nuve NB9* μέσα στον απαγωγό και πραγματοποιείται εκεί η συμπύκνωση του δείγματος, που περιέχει πλέον νιτρικό οξύ (βλ. σχήμα 6.6), διότι δεν μπορεί να συνεχιστεί η εξάτμιση του στον «ανοιχτό αέρα». Το συγκεκριμένο υδατόλουτρο διαθέτει εκ κατασκευής καπάκι με τέσσερις οπές διαμέτρου $9.5\,\mathrm{cm}$. Το καπάκι μειώνει το ρυθμό εξάτμισης του νερού, που περιέχει το υδατόλουτρο. Για την συμπύκνωση χρησιμοποιείται πυράντοχο δοχείο εξάτμισης $800\,\mathrm{ml}$ υψηλής φόρμας (*Tall Form*), το οποίο ταιριάζει στις οπές του υδατόλουτρου και διαθέτει επίσης αρκετό ύψος, ώστε το δείγμα να βρίσκεται κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού του λουτρού.

- Μεταφέρονται σταδιακά ποσότητες δείγματος από το μεγάλο δοχείο θέρμανσης, που περιέχει όλη την ποσότητα του δείγματος, στο μικρό δοχείο, το οποίο βρίσκεται στο υδατόλουτρο Nuve.

- Πλένονται τα τοιχώματα του μεγάλου δοχείου με διάλυμα νιτρικού οξέος (HNO_3) 5% όταν αδειάσει πλήρως αυτό. Χρησιμοποιείται ελαστική σπάτουλα, ώστε να απομακρύνθεί κάθε στερεό υπόλλειμα, που πιθανόν έχει παραμείνει στα τοιχώματα του δοχείου.

- Μετά το τέλος αυτής της πλύσης αδειάζεται το περιεχόμενο στο μικρό δοχείο και συνεχίζεται η συμπύκνωση.

- Η εξάτμιση σταματά όταν το περιεχόμενο του μικρού δοχείου βρασμού πέσει κάτω από τα 100mL.

Μετά το πέρας της διαδικασίας συμπύκνωσης το δείγμα συσκευάζεται σε τυποποιημένα δοχείο. Για την συσκευασία χρησιμοποιείται τυποποιημένο πλαστικό δοχείο γεωμετρίας ¨2¨ (βλ. σχήμα 6.7) [216], το οποίο έχει καπάκι, που βιδώνει με σπείρωμα στο δοχείο. Το δοχείο συσκευασίας έχει εσωτερική διάμετρο βάσης $72\,\mathrm{mm}$, εσωτερική διάμετρο κορυφής $75\,\mathrm{mm}$ και ύψος $69\,\mathrm{mm}$. Σημειώνεται ότι η εξάτμιση του δείγματος σταματά όταν ο όγκος του γίνει μικρότερος από $100\,\mathrm{mL}$, ώστε να είναι δυνατόν να προστεθεί στο δοχείο γεωμετρίας ¨2¨ και η ποσότητα διαλύματος, η οποία προκύπτει από την πλύση του δοχείου βρασμού, όπως περιγράφεται στα επόμενα βήματα της διαδικασίας. Ακολούθως περιγράφεται η διαδικασία συσκευασίας του δείγματος.

- Ανοίγονται αρχικά στο καπάκι του δοχείου γεωμετρίας ¨2¨ με την βοήθεια τρυπανιού δύο οπές $4\,\mathrm{mm}$.

- Επαλείφεται το σπείρωμα του δοχείου με σιλικόνη ώστε να εξασφαλιστεί ότι το δοχείο γεωμετρίας ¨2¨ θα κλείσει στεγανά μετά την τοποθέτηση του καπακιού.

- Μεταφέρεται το περιεχόμενο του δοχείου εξάτμισης στο δοχείο γεωμετρίας ¨2¨ και μετά πλένονται τα τοιχώματα του δοχείου εξάτμισης με διάλυμα HNO_3 5% με την βοήθεια ελαστικής σπάτουλας, ώστε να απομακρύνθούν τοιχόν στερεά υπολοίματα από τα τοιχώματα.

- Μεταφέρεται το περιεχόμενο της πλύσης στο δοχείο γεωμετρίας ¨2¨.

- Βιδώνεται το καπάκι στο δοχείο και συμπληρώνεται το δείγμα με αποσταγμένο νερό δια μέσου των δύο οπών, που ανοίχτηκαν στο καπάκι, χρησιμοποιώντας μια πλαστική πιπέτα.

- Τέλος πληρώνονται οι 2 οπές στο καπάκι με σιλικόνη, ώστε να κλείσει στεγανά το δοχείο.

Στον πίνακα 6.2 παρουσιάζονται τα τελικά δείγματα με τις αντίστοιχες καθαρές μάζες τους καθώς και τους κωδικούς ταξινόμησης, που έλαβαν σύμφωνα με το σύστημα,

που διατηρεί το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Η παρουσίαση γίνεται με βάση τους αριθμούς δειγματοληψίας, που έχουμε στον πίνακα των δειγματοληψιών (πίνακας 6.1), οπότε είναι δυνατή η αντιστοίχηση. Σημειώνεται ότι πριν αρχίσει η χημική επεξεργασία του δείγματος R0049, προηγήθηκε πέρασμα μέσα από σήτα όλης της ποσότητας του νερού, που είχε συλλεχθεί, προκειμένου να κατακρατηθούν τα έντομα και τα φύλλα, που βρίσκονταν στο δείγμα. Η συγκεκριμένη πρακτική ακολουθήθηκε διότι το συγκεκριμένο δείγμα περιείχε πολλά ξένα υλικά, τα οποία θα αύξαναν το ίζημα του δείγματος μετά το πέρας της ραδιοχημικής επεξεργασίας.

6.4 Αναλύσεις των δειγμάτων βρόχινου νερού με την μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστούν οι γενικές αρχές της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, καθώς και οι αναλύσεις των δειγμάτων που πραγματοποιήθηκαν με βάση αυτή την μέθοδο. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις είχαν ποιοτικό χαρακτήρα, δηλαδή στόχευαν στην ανίχνευση ραδιενεργών ιχνοστοιχείων, με μεγάλη επισφάλεια ως προς τον υπολογισμό της συγκέντρωσής τους στο δείγμα. Αυτό συνέβει διότι τα δείγματα δεν ήταν ομογενή αλλά είχαν αρκετή ποσότητα ιζήματος, η παρουσία του οποίου εισάγει σφάλμα στα αποτελέσματα των αναλύσεων.

6.4.1 Γενικές αρχές της μεθόδου

Η γ-φασματοσκοπία είναι μια μη καταστροφική μέθοδος ανίχνευσης ραδιενεργών ισοτόπων, με την οποία μπορεί να γίνει ποιοτική όσο και ποσοτική ανάλυση. Οι μετρήσεις με την βοήθεια γ-φασματοσκοπικών διατάξεων στηρίζονται στην ανίχνευση και ταυτοποίηση των σωματιδίων-γ, που εκπέμπονται κατά την αποδιέγερση των πυρήνων μετά από την εκπομπή σωματιδίων-α ή -β. Τα σωματιδία-γ εκπέμπονται από τον θυγατρικό πυρήνα. Εντούτοις έχει επικρατήσει τα σωματίδια-γ να αναφέρονται στο μητρικό ισότοπο [43, σελ. 20].

Η ανίχνευση των γ-σωματιδίων πραγματοποιείται με την χρήση ανιχνευτών ημιαγωγών και βασίζεται στην δημιουργία ηλεκτρικού σήματος όταν αλληλεπιδρά το φωτόνιο με την μάζα του ανιχνευτή. Η περιγραφή του τρόπου δημιουργίας του ηλεκτρικού σήματος ξεφεύγει από τους σκοπούς του παρόντος και ο αναγνώστης μπορεί να αναζητήσει στο [103] σχετικές πληροφορίες. Το μέγεθος των ηλεκτρικών παλμών που παράγονται είναι ανάλογο με την ενέργεια του γ-σωματιδίου, που αλληλεπίδρασε με τον ανιχνευτή. Έτσι είναι δυνατόν να ανιχνεύσουμε ταυτόχρονα πολλά διαφορετικά ισότοπα, που ενδεχομένως βρίσκονται στο δείγμα.

6.4.1.1 Οι ανιχνευτές

Οι ανιχνευτές, που χρησιμοποιούνται σήμερα κατά κύριο λόγο, είναι κατασκευασμένοι από ημιαγωγούς υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe). Οι κυριότεροι τύποι ανιχνευτών ανάλογα με το σχήμα τους είναι:

- Επίπεδοι ανιχνευτές (*planar detectors*). Εδώ ο ανιχνευτής αποτελείται από μια επίπεδη σχετικά λεπτή πλάκα, συνήθως κυλινδρική. Η διάμετρος του κυλίνδρου δεν είναι περισσότερο από μερικά εκατοστά και έτσι ο συνολικός όγκος του ανιχνευτή κυμαίνεται από $10\text{-}30\,\mathrm{cm}^3$. Οι επαφές του ηλεκτρικού πεδίου, που εφαρμόζεται, βρίσκονται στις δύο επίπεδες επιφάνειες του ανιχνευτή. Ένας τέτοιος ανιχνευτής παρουσιάζεται στο σχήμα 6.8.

- Κυλινδρικοί ανιχνευτές (*coaxial detectors*). Αυτοί οι ανιχνευτές χρησιμοποιούνται όταν επιθυμούμε να έχουμε όγκο ανιχνευτή μεγαλύτερο από ό,τι στους επίπεδους. Επειδή το ύψος του κυλίνδρου μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο υπάρχει η δυνατότητα να κατασκευάζονται ανιχνευτές αρκετά μεγάλου μεγέθους. Διαθέτουν επίσης εσωτερική κυλινδρική οπή γύρω από τον άξονα συμμετρίας του κυλίνδρου. Μέσα στην εσωτερική κυλινδρική οπή τοποθετείται η πρώτη επαφή του ηλεκτρικού πεδίου, που εφαρμόζεται. Η δεύτερη επαφή τοποθετείται στην εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια του ανιχνευτή. Επίσης αρκετοί ανιχνευτές παράγονται με κλειστή την μία άκρη της οπής (*closed ended configuration*) και τότε η εξωτερική επαφή του κυκλώματος εκτείνεται και στην επίπεδη κυλινδρική επιφάνεια. Η διαμόρφωση κυλινδρικών ανιχνευτών παρουσιάζεται στο σχήμα 6.9.

Η λειτουργία των ανιχνευτών γερμανίου σε θερμοκρασία δωματίου είναι αδύνατη. Έτσι είναι απαραίτητο οι ανιχνευτές αυτοί να ψύχονται. Η συνήθης θερμοκρασία ψύξης του ανιχνευτή είναι οι $77\,\mathrm{K}$ και αυτό επιτυγχάνεται με την βοήθεια δοχείων dewar, τα οποία περιέχουν υγρό άζωτο, το οποίο ψύχει τους ανιχνευτές.

Ο ανιχνευτής βρίσκεται μέσα σε έναν θάλαμο κενού, ώστε να αποφεύγεται η μετάδοση θερμότητας από το περιβάλλον προς τον ανιχνευτή. Επίσης συνδέεται με τον κρυοστάτη, ο οποίος βυθίζεται μέσα στο δοχείο dewar και ψύχει έτσι τον ανιχνευτή. Ο κρυοστάτης μπορεί να προσαρμοστεί στο δοχείο dewar σε διάφορες κατευθύνσεις, ώστε να εξυπηρετούνται οι ανάγκες του χρήστη. Στο σχήμα 6.10 παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη δοχείου dewar - κρυοστάτη - ανιχνευτή.

Το απαραίτητο ηλεκτρονικό κύκλωμα για την λειτουργία ενός ανιχνευτή γερμανίου αποτελείται:

- Το τροφοδοτικό του ανιχνευτή

- Τον προενισχυτή
- Τον ενισχυτή
- Τον αναλογοψηφιακό μετατροπέα
- Την γεννήτρια παλμών
- Τον υπολογιστή, όπου γίνεται η συλλογή και η καταγραφή των δεδομένων

Μια τυπική διάταξη συστήματος γ-φασματοσκοπίας παρουσιάζεται στο σχήμα 6.11.

6.4.2 Η διάταξη γ-φασματοσκοπίας του ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Το ΕΠΤ-ΕΜΠ δραστηριοποιείται στον τομέα της γ-φασματοσκοπίας από τα τέλη της δεκαετίας του 70 και διαθέτει αυτή την στιγμή 5 ανιχνευτές υψηλής διακριτικής ικανότητας, ανάμεσα τους και ο XtRa (Extended Range) της εταιρείας Canberra, στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις των δειγμάτων βρόχινου νερού. Ο συγκεκριμένος ανιχνευτής έχει απόδοση 100%. Η διακριτική του ικανότητα είναι $2.1\,\mathrm{keV}$ στα $1.33\,\mathrm{MeV}$, ενώ είναι ίση με $1.20\,\mathrm{keV}$ στα $122\,\mathrm{keV}$. Λόγω του μεγάλου μεγέθους του είναι κατάλληλος για αναλύσεις πολύ χαμηλών επιπέδων ραδιενέργειας, ενώ διαθέτει στο περίβλημα του παράθυρο βηρυλλίου, που επιτρέπει και την ανάλυση φωτονίων πολύ χαμηλών ενεργειών.

Ο συγκεκριμένος ανιχνευτής έχει τροφοδοτικό 3160D της εταιρείας Canberra και ενισχυτή 2025 της ίδιας εταιρείας. Ο αναλογοψηφιακός μετατροπέας είναι τύπου 8701 της ίδιας εταιρείας καθώς και ο πολυκαναλικός αναλυτής, που είναι ο AIM550. Για λεπτομέρειες σχετικά με την λειτουργία των ανιχνευτών και τις βαθμονομήσεις τους μπορεί ο αναγνώστης να δει τα [216], [222].

6.4.3 Υπολογισμός κατώτερου ορίου ανίχνευσης των ισοτόπων ^{238}U, ^{210}Pb και ^{40}K στον ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Η ανίχνευση των ισοτόπων, που μας ενδιαφέρουν, πραγματοποιείται από τις ακόλουθες ενέργειες φωτονίων:

- ^{238}U, από τα φωτόνια του θυγατρικού του ^{234}Th στα $63.29\,\mathrm{keV}$.
- ^{210}Pb, από τα φωτόνια των $46.52\,\mathrm{keV}$
- ^{40}K, από τα φωτόνια των $1764.75\,\mathrm{keV}$.

Ακολούθως παρουσιάζουμε την μεθοδολογία υπολογισμού του κατώτερου ορίου ανίχνευσης (*Lower Limit of Detection*) σύμφωνα με τον Currie [38] για τον ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Το κατώτερο όριο ανίχνευσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$L_d = 2 \cdot 1.645\sigma = 3.29\sigma \tag{6.1}$$

Όπου:
σ: Η τυπική απόκλιση της τιμής του υποβάθρου (σε cps) για την φωτοκορυφή που μας ενδιαφέρει.
Η αντίστοιχη ενεργότητα θα δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$MDA = \frac{L_d}{yield \cdot eff} \tag{6.2}$$

Όπου:
$yield$: Το ποσοστό εκπομπής φωτονίων της συγκεκριμένης ενέργειας ανά διάσπαση. Οι τιμές του ανά ισότοπο για τον ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ δίνονται στον πίνακα 6.3.
eff: Ο βαθμός απόδοσης, δηλαδή ο αριθμός καταγραφόμενων (στον ανιχνευτή) φωτονίων της συγκεκριμένης ενέργειας προς το σύνολο των εκπεμπόμενων φωτονίων της συγκεκριμένης ενέργειας. Οι τιμές του ανά ισότοπο για τον ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ δίνονται στον πίνακα 6.3.

Με βάση τις εξισώσεις 6.1, 6.2 καθώς και την μέτρηση υποβάθρου που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ, υπολογίζεται το κατώτερο όριο ανίχνευσης για τα ισότοπα ^{238}U, ^{210}Pb, ^{40}K. Τα σχετικά μεγέθη παρουσιάζονται στον πίνακα 6.4.

Σημειώνεται ότι δεν υπολογίστηκε το κατώτερο όριο ανίχνευσης για το ισότοπο ^{226}Ra, διότι τα δοχεία συσκευασίας γεωμετρίας '2' δεν ήταν αεροστεγώς κλεισμένα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να διαφεύγει ποσότητα του παραγόμενου ραδονίου. Με δεδομένο ότι η ανίχνευση του ^{226}Ra πραγματοποιείται από τα θυγατρικά του ραδονίου ^{214}Pb και ^{214}Bi γίνεται κατανοητό ότι η υπόψη ανάλυση δεν γίνεται στην προκείμενη περίπτωση.

6.4.4 Ανάλυση δείγματος βρόχινου νερού χωρίς προεπεξεργασία με γ-φασματοσκοπική διάταξη

Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί ανίχνευση ραδιενεργών ιχνοστοιχείων χωρίς να γίνει επεξεργασία και προσυγκέντρωση των δειγμάτων απομαστεύτηκαν $279.5\,\mathrm{gr}$ από την ποσότητα της δειγματοληψίας με αριθμό 3 (βλ. πίνακα 6.2) και συσκευάστηκαν σε τυποποιημένο πλαστικό δοχείο γεωμετρίας ¨2¨ με

κωδικό R0041 [216]. Στην συνέχεια ακολούθησε γ-φασματοσκοπική ανάλυση του δείγματος με τον ανιχνευτή XtRa της εταιρείας Canberra. Ο χρόνος συλλογής του φάσματος ήταν 500×10^3 s. Τα στοιχεία αποθήκευσης για το εν λόγω φάσμα στην βάση δεδομένων του ΕΠΤ-ΕΜΠ περιλαμβάνονται στον πίνακα 6.5.

Οι συγκεντρώσεις των ισοτόπων ^{238}U και ^{40}K στο δείγμα R0041, που προέκυψαν από την ανάλυση του φάσματος παρουσιάζονται ακολούθως:

- ^{238}U: $0.54 \pm 0.03\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$
- ^{210}Pb: Ο ρυθμός καταμέτρησης ήταν κάτω από το υπόστρωμα
- ^{40}K: $0.44 \pm 0.02\,\mathrm{Bqkg}^{-1}$

Για να ελεγθεί εάν η τιμές των συγκεντρώσεων των ισοτόπων ^{238}U, ^{210}Pb και ^{40}K είναι πάνω από το υπόστρωμα πραγματοποιήθηκε στατιστικός έλεγχος u με βάση την ακόλουθη μεταβλητή [170]:

$$u = \frac{R_s - R_B}{\sqrt{(\sigma_s)^2 + (\sigma_B)^2}}$$

Όπου:
$\mathrm{R_s}, \sigma_\mathrm{s}$: Η ενεργότητα του ισοτόπου στο δείγμα και η τυπική απόκλιση της μέτρησης αντίστοιχα.
$\mathrm{R_B}, \sigma_\mathrm{B}$: Η ενεργότητα του ισοτόπου στο υπόστρωμα και η τυπική απόκλιση της μέτρησης αντίστοιχα.

Οι υποθέσεις, που ελέγθηκαν, είναι οι ακόλουθες:

$$H_o : R_s - R_b = 0$$
$$H_1 : R_s - R_b > 0$$

Εκλέχθηκε επίπεδο σημαντικότητας a=5% για το οποίο έχουμε $\mathrm{u_c}$=1.65. Οι τιμές για της μεταβλητής u για τα ισότοπα ^{238}U, ^{210}Pb και ^{40}K ήταν οι ακόλουθες:

- ^{238}U: u=-1.25
- ^{210}Pb: u=-1.90
- ^{40}K: u=12.38

Συγκρίνοντας τις παραπάνω τιμές με την $\mathrm{u_c}$ διαπιστώνουμε ότι δεν είναι δυνατή η ανίχνευση των ισοτόπων ^{238}U και ^{210}Pb. Αντίθετα η ενεργότητα του ^{40}K είναι υψηλότερη από αυτήν του υποστρώματος.

6.4.5 Αναλύσεις των δειγμάτων βρόχινου νερού μετά την προεπεξεργασία με γ-φασματοσκοπική διάταξη

Αφού συσκευάστηκαν τα δείγματα R0043, R0045, R0046, R0047, R0048 και R0049 σε γεωμετρία «2» σύμφωνα με την μεθοδολογία, που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 6.3, ακολούθησε τοποθέτησή τους στον ανιχνευτή XtRa και λήψη των αντίστοιχων φασμάτων. Ο χρόνος συλλογής του φάσματος ήταν 500×10^3 s για όλα τα δείγματα. Τα στοιχεία αποθήκευσης για τα εν λόγω φάσματα στην βάση δεδομένων του ΕΠΤ-ΕΜΠ παρουσιάζονται στον πίνακα 6.5.

Από τις αναλύσεις των φασμάτων διαπιστώθηκε ότι οι τιμές των διάφορων ισοτόπων των σειρών του ^{238}U και του ^{232}Th βρίσκονταν πολύ κοντά στις τιμές του υποβάθρου, που έχουν μετρηθεί τα προηγούμενα χρόνια στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Για να ελεγθεί εάν η τιμές των συγκεντρώσεων των ισοτόπων ^{238}U, ^{210}Pb και ^{40}K είναι πάνω από το υπόστρωμα πραγματοποιήθηκε στατιστικός έλεγχος u με βάση την μεταβλητή u [170]:

$$u = \frac{R_s - R_B}{\sqrt{(\sigma_s)^2 + (\sigma_B)^2}}$$

Όπου:

$\mathrm{R_s}, \sigma_\mathrm{s}$: Η ενεργότητα του ισοτόπου στο δείγμα και η τυπική απόκλιση της μέτρησης αντίστοιχα.

$\mathrm{R_B}, \sigma_\mathrm{B}$: Η ενεργότητα του ισοτόπου στο υπόστρωμα και η τυπική απόκλιση της μέτρησης αντίστοιχα.

Οι υποθέσεις, που ελέγθηκαν, είναι οι ακόλουθες:

$$H_o : R_s - R_b = 0$$
$$H_1 : R_s - R_b > 0$$

Εκλέχθηκε επίπεδο σημαντικότητας a=5% για το οποίο έχουμε $\mathrm{u_c}$=1.65. Στον πίνακα 6.6 παρουσίαζονται οι τιμές της μεταβλητής u για τα ισότοπα, στα οποία πραγματοποιήθηκε έλεγχος. Συγκρίνοντας τις τιμές με την $\mathrm{u_c}$ αυτές διαπιστώνουμε ότι μόνο στα δείγματα R0048 R0049 είναι δυνατή η ανίχνευση των ισοτόπων ^{238}U, ^{210}Pb. Αντίθετα το ^{40}K παρουσιάζει υψηλότερες συγκεντρώσεις και ανιχνεύεται στα δείγματα R0043, R0045, R0046, R0047, R0048 και R0049.

Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων, που πραγματοποιήθηκαν. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι πρόκειται για αρχικές ποιοτικές κυρίως ανιχνεύσεις των ραδιοϊσοτόπων και όχι για αναλύσεις ακρίβειας, για τους λόγους που έχουν ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 6.4. Στους πίνακες 6.7 και 6.8 παρουσιάζονται οι μετρούμενες συγκεντρώσεις των ισοτόπων ^{238}U, ^{210}Pb στα δείγμα-

τα R0048 και R0049. Σημειώνεται ότι παρέχονται οι συγκεντρώσεις τόσο στο τελικό δείγμα, το οποίο προέκυψε μετά την ραδιοχημική επεξεργασία, όσο και στο αρχικό δείγμα, όπως αυτό είχε συλλεχθεί στο πεδίο. Οι μετρούμενες συγκεντρώσεις του ^{40}K στα δείγματα R0043, R0045, R0046, R0047, R0048 και R0049 κυμαίνονται από 0.069-$1.08\,\mathrm{Bqkg^{-1}}$ και παρουσιάζονται στον πίνακα 6.9.

Στην βιβλιογραφία δεν απαντώνται μετρήσεις του ισοτόπου ^{40}K σε βρόχινο νερό. Αντίθετα είναι πολυάριθμες οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί για την ανίχνευση ιόντων $\mathrm{K^+}$ σε βρόχινο νερό παγκοσμίως. Ενδεικτικά αναφέρονται οι [107], [145]. Στον ελληνικό χώρο έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν μελέτες ανίχνευσης ιόντων $\mathrm{K^+}$ σε δείγματα βρόχινου νερού [149], [130], [162]. Με δεδομένο ότι τα ιόντα $\mathrm{K^+}$ βρίσκονται στην φύση σε σταθερή αναλογία με το ^{40}K μπορούμε να υπολογίσουμε την συγκέντρωση $\mathrm{R(Bqgr^{-1})}$ του τελευταίου με βάση την ακόλουθη εξίσωση [146]:

$$R = \frac{aN_A ln(2)}{m_{at}T_{1/2}}C \tag{6.3}$$

όπου:
$\mathrm{N_A}$=$6.022 \times 10^{23}\,\mathrm{mole^{-1}}$: Ο αριθμός του Avogadro
$\mathrm{m_{at}}$=$39.0983\,\mathrm{gmole^{-1}}$: Η ατομική μάζα του στοιχειακού K
a=0.0117%: Η αναλογία μεταξύ του στοιχειακού K και του ^{40}K
$\mathrm{T_{1/2}}$=$4.4 \times 10^{16}\,\mathrm{sec}$: Ο χρόνος ημιζωής του ^{40}K
C: Η συγκέντρωση του $\mathrm{K^+}$ ($\mathrm{gg^{-1}}$)

Σημειώνεται ότι για τις μετατροπές μονάδων που χρειάστηκε να πραγματοποιηθούν λήφθηκε ότι $1\,\mathrm{eq}\ \mathrm{K^+}$=$39.0983\,\mathrm{gr}\ \mathrm{K^+}$.

Οι Samara et al. [162] πραγματοποίησαν μετρήσεις ιόντων $\mathrm{K^+}$ σε δείγματα βρόχινου νερού στην περιοχή της Θεσσαλονίκης και η μέση συγκέντρωση του ^{40}K σύμφωνα με την εξίσωση 6.3 ήταν $1.48 \times 10^{-2}\,\mathrm{Bqkg^{-1}}$. Οι Melidis et al. [149] πραγματοποίησαν παρόμοιες μετρήσεις στην περιοχή της Ξάνθης και η μέση συγκέντρωση του ^{40}K σύμφωνα με την εξίσωση 6.3 ήταν $5.46 \times 10^{-2}\,\mathrm{Bqkg^{-1}}$. Στην περιοχή της Αθήνας η η μέση συγκέντρωση του ^{40}K σύμφωνα με την εξίσωση 6.3 ήταν $3.7 \times 10^{-2}\,\mathrm{Bqkg^{-1}}$ σύμφωνα με τις μετρήσεις, που διεξήγαγαν οι Nastos et al. [130]. Όλες αυτές οι μετρήσεις παρουσιάζονται και στον πίνακα 6.10. Συγκρίνοντας τις τιμές της βιβλιογραφίας με αυτές, που μετρήθηκαν στην περιοχή της Μεγαλόπολης στην παρούσα ΔΔ διαπιστώνουμε ότι οι τελευταίες είναι έως και 2 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες.

Όμως για να αποφανθούμε για τις συγκεντρώσεις των εν λόγω δειγμάτων δεν μπορούμε να στηριχτούμε μόνο σε αυτές τις μετρήσεις καθώς τα δείγματα αυτά δεν είναι ομογενή αλλά έχουν αρκετή ποσότητα ιζήματος, που βρίσκεται στην βάση των δοχείων. Η παρουσία του ιζήματος διαφοροποιεί την κατανομή της ραδιενέργειας στο δείγμα. Αυτό εισάγει σφάλματα στους υπολογισμούς της ραδιενέργειας, καθώς η βαθμονόμηση

απόδοσης αλλά και οι υπολογισμοί για τον συντελεστή διόρθωσης για αυτοαπορρόφηση του ανιχνευτή έχουν γίνει για ομογενή δείγματα. Προκειμένου να αποφανθούμε με μεγαλύτερη ακρίβεια για τα επίπεδα των συγκεντρώσεων συνεχίστηκε η έρευνα με μετρήσεις με την μέθοδο της α-φασματοσκοπίας.

6.5 Αναλύσεις των δειγμάτων με α-φασματοσκοπία

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστούν οι γενικές αρχές της α-φασματοσκοπικής ανάλυσης, καθώς και οι αναλύσεις των δειγμάτων που πραγματοποιήθηκαν με βάση αυτή την μέθοδο. Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για ισότοπα συγκεκριμένου στοιχείου και στην παρούσα ΔΔ έγινε εφαρμογή για το ουράνιο, για το οποίο έχει αναπτυχθεί κατάλληλη πειραματική μεθοδολογία στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Για τα υπόλοιπα ισότοπα που ανιχνεύτηκαν στην γ-φασματοσκοπική ανάλυση, όπως ο ^{210}Pb δεν πραγματοποιήθηκε α-φασματοσκοπική ανάλυση, διότι δεν υπήρχαν ανεπτυγμένες τέτοιες μέθοδοι στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

6.5.1 Γενικές αρχές α-φασματοσκοπίας

Η λειτουργία διατάξεων α-φασματοσκοπίας στηρίζεται στην ανίχνευση και καταγραφή των α-σωματιδίων, που εκπέμπονται από τα διασπώμενα ισότοπα. Τα α-σωματίδια αποτελούνται από 2 πρωτόνια και 2 νετρόνια. Ένα α-σωματίδιο είναι δηλαδή όμοιο με έναν πυρήνα ^{4}He. Τα α-σωματίδια λόγω της φύσης τους απορροφούνται πάρα πολύ εύκολα ακόμα και από τα μόρια του αέρα. Γι΄ αυτό τον λόγο το δείγμα καθώς και ο ανιχνευτής βρίσκονται σε κενό αέρος κατά την διάρκεια της μέτρησης [22]. Οι ανιχνευτές, που χρησιμοποιούνται είναι ανιχνευτές ημιαγωγών Si. Οι νεώτεροι από αυτούς ονομάζονται ουδετεροποιημένοι επίπεδοι ανιχνευτές πυριτίου (Passivated Implanted Planar Silicon, PIPS) [7, σελ. 158]. Από εδώ και στο εξής για λόγους συντομίας θα τους αναφέρουμε ως ανιχνευτές PIPS. Πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο κατασκευής τους μπορεί να αναζητηθούν στο [103] σελ. 364 κ.εξ.

Οι ανιχνευτές PIPS έχουν εσωτερική απόδοση σχεδόν 100%, δηλαδή καταγράφουν κάθε α-σωματίδιο, το οποίο θα προσκρούσει στην επιφάνεια ανίχνευσης. Οι πυρήνες όμως των ισοτόπων, όταν διασπόνται, εκπέμπουν α-σωματίδια προς κάθε κατεύθυνση. Έτσι μόνο ένα συγκεκριμένο ποσοστό των εκπεμπόμενων α-σωματιδίων καταγράφεται από τον ανιχνευτή. Ο αριθμός των καταγραφών εξαρτάται από την γεωμετρία του ανιχνευτή και την απόσταση του δείγματος από αυτόν. Η αποδοση(*efficiency*) ενός ανιχνευτή για σημειακή πηγή-δείγμα, η οποία βρίσκεται στον άξονα συμμετρίας του ανιχνευτή και σε απόσταση d, δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$E = \frac{A}{4\pi d^2}$$

όπου A το εμβαδόν της επιφάνειας του ανιχνευτή.

Με βάση την παραπάνω εξίσωση γίνεται κατανοητό ότι είναι σημαντικό η πηγή να βρίσκεται σε όσο το δυνατόν μικρή απόσταση από τον ανιχνευτή. Επίσης διαπιστώνεται ότι η σχέση μεταξύ της αποδοτικότητας του ανιχνευτή και της διαμέτρου της πηγής είναι αντιστρόφως ανάλογη. Όσο αυξάνει δηλαδή η διάμετρος της πηγής τόσο μειώνεται η αποδοτικότητα του ανιχνευτή. Επίσης έχει διαπιστωθεί ότι η διάμετρος της πηγής δεν πρέπει ποτέ να υπερβαίνει την διάμετρο του ανιχνευτή [7, σελ. 162]. Σημαντικό ρόλο επίσης στην ποιότητα των μετρήσεων παίζει και το πάχος της πηγής. Το πάχος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο, ώστε να μειώνεται το φαινόμενο της απορρόφησης των α-σωματιδίων από την μάζα της πηγής, και να φτάνουν αυτά στον ανιχνευτή για να καταγραφούν. Γι' αυτό έχει μεγάλη σημασία στην α-φασματοσκοπία η προετοιμασία της πηγής, όπως θα δούμε σε επόμενη παράγραφο.

6.5.2 Η διάταξη α-φασματοσκοπίας

Μια διάταξη α-φασματοσκοπίας συγκροτείται από τις εξής συνιστώσες (βλ. και σχήμα 6.12):

- Τον θάλαμο κενού (*vacuum chamber*) μέσα στον οποίο βρίσκεται ο ανιχνευτής των α-σωματιδίων και το δείγμα.
- Το τροφοδοτικό του ανιχνευτή (*detector bias supply*)
- Την γεννήτρια παλμών (*pulser*)
- Τον προ-ενισχυτή (*preamplifier*)
- Τον ενισχυτή (*amplifier*)
- Τον πολυκαναλικό αναλυτή (*multichannel analyzer MCA*)

Η αρχή λειτουργίας των ανιχνευτών ημιαγωγών βασίζεται στην δημιουργία φορτίου, όταν το α-σωματίδιο προσκρούσει και αλληλεπιδράσει με τον ανιχνευτή. Τα φορτίασήματα οδηγούνται στην συνέχεια στον προενισχυτή και στον ενισχυτή όπου ενισχύονται και στην συνέχεια οδεύουν στον πολυκαναλικό αναλυτή, όπου και καταχωρούνται σε κανάλια ανάλογα με την ενέργεια τους. Ο πολυκαναλικός αναλυτής συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου γίνεται η συλλογή και η επεξεργασία των δεδομένων.

Η χρήση διατάξεων α-φασματοσκοπίας παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Υψηλή ενεργειακή ευκρίνεια.

- Σχετικά καλή απόδοση.
- Χαμηλά υποστρώματα.
- Σχετικά μικρό κόστος απόκτησης της διάταξης.

Το βασικό της μειονέκτημα είναι οι μεγάλοι χρόνοι, που χρειάζονται για την προετοιμασία του δείγματος, καθώς είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν χημικοί διαχωρισμοί. Επίσης η όλη διαδικασία προετοιμασίας του δείγματος είναι αρκετά επίπονη και δύσκολη. Τονίζεται επίσης ότι η μέθοδος είναι καταστροφική για το αρχικό δείγμα.

6.5.3 Η προετοιμασία των δειγμάτων

Για να καταφέρουμε να μετρήσουμε επιτυχώς με μια α-φασματοσκοπική διάταξη θα πρέπει να μετατρέψουμε το αρχικό δείγμα μας σε μια κατάλληλη μορφή για τέτοιες μετρήσεις. Βασικός στόχος είναι να το παραγόμενο δείγμα, που από εδώ και στο εξής θα το ονομάζουμε πηγή, να έχει πολύ μικρό πάχος (σχεδόν φιλμ) και να είναι επίπεδο. Χημικοί διαχωρισμοί είναι συχνά απαραίτητοι ώστε να αφαιρέσουμε από το δείγμα μας άλλα ραδιοϊσότοπα , τα οποία θα αύξαναν το πάχος της πηγής και πιθανόν θα είχαν παρόμοιες ενέργειες εκπομπής με τα ισότοπα, που μας ενδιαφέρουν, οπότε και θα έκαναν δύσκολη έως αδύνατη την ανάλυση του φάσματος. Επίσης εκτός από τα άλλα ραδιοϊσότοπα που δεν ενδιαφέρουν, πρέπει να αφαιρέσουμε και το μεγαλύτερο τμήμα της μάζας του δείγματος, που αποτελείται από σταθερά στοιχεία. Η προετοιμασία του δείγματος μπορεί να διακριθεί στα τρία ακόλουθα στάδια:

1. **Αρχική επεξεργασία**. Αυτή περιλαμβάνει διάλυση του δείγματος εάν αυτό είναι σε στερεά μορφή ή είναι κάποιο φίλτρο με την βοήθεια χημικής επεξεργασίας συνήθως με οξέα. Στα υγρά δείγματα επίσης γίνεται προσθήκη οξέων ώστε να μην κατακρημνιστούν τα ισότοπα, που μας ενδιαφέρουν.

2. **Χημικοί διαχωρισμοί**. Σε αυτό το στάδιο γίνεται χημικός διαχωρισμός των διάφορων ισοτόπων, που βρίσκονται μέσα στο δείγμα και πιθανόν δεν επιθυμούμε να βρίσκονται στην πηγή μας. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι όπως η μέθοδος ανταλλαγής ιόντων (*Ion exchange*), η υγρή-υγρή εξαγωγή (*Liquid-liquid extraction*) και η μέθοδος συνκατακρήμνισης (*Coprecipitation*). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανταλλαγής ιόντων, η οποία και θα περιγραφεί παρακάτω επακριβώς. Για περισσότερα σχετικά με τις άλλες μεθόδους ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην βιβλιογραφία [22].

3. **Κατασκευή της πηγής**. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι αυτή της ηλεκτροαπόθεσης (*Electrodeposition*), η οποία και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ΔΔ. Για

περισσότερα σχετικά με τις άλλες μεθόδους ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στα [22, 7].

Επειδή κατά την προετοιμασία του δείγματος οι διαδικασίες δεν είναι ποσοτικές κάνουμε τα ακόλουθα, ώστε να καταφέρουμε να γνωρίζουμε την ποσότητα του ισοτόπου, που χάνεται στα διάφορα στάδια της επεξεργασίας: Έστω ότι το ισότοπο, που μας ενδιαφέρει είναι το ^{238}U. Προσθέτουμε λοιπόν μια γνωστή ποσότητα α-ραδιενεργού ^{232}U στο δείγμα, το οποίο ονομάζεται και ιχνηλάτης. Μετά το πέρας της επεξεργασίας πραγματοποιούμε την μέτρηση και μετράμε την ποσότητα του ιχνηλάτη (^{232}U), που έφθασε στην πηγή, όπως βέβαια και την ποσότητα του ^{238}U. Πλέον μπορούμε να υπολογίσουμε το ποσοστό της τελικής ποσότητας του ^{232}U προς την αρχική, που είχαμε προσθέσει. Το ποσοστό αυτό ονομάζεται και χημική απόδοση E_χ και υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$E_\chi = \frac{A}{R \cdot t \cdot E_\gamma} \tag{6.4}$$

Όπου:
A: Το εμβαδόν κάτω από την κορυφή στο φάσμα
t: Ο χρόνος, που διήρκεσε η λήψη του φάσματος
E_γ: Η απόδοση γεωμετρίας του ανιχνευτή, η οποία εξαρτάται από την απόσταση της πηγής από τον ανιχνευτή και για την διάταξη του ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι 0.1872, όπως έχει υπολογιστεί στο παρελθόν [222].

Με βάση αυτή την τιμή μπορούμε να αποφανθούμε και για την συγκέντρωση του ^{238}U στο αρχικό δείγμα, καθώς είναι γνωστό ότι όλα τα ισότοπα ενός στοιχείου παρουσιάζουν την ίδια χημική συμπεριφορά, οπότε και θα κατακρατάται στα διάφορα στάδια της επεξεργασίας ίση ποσότητα και για τα δύο ισότοπα.

6.5.4 Αναλύσεις των δειγμάτων βρόχινου νερού με α-φασματοσκοπική διατάξη

Αναλύθηκαν τα δειγμάτων R0043, R0046, R0048 και R0049. Τα αντιδείγματα R0045, R0047 δεν αναλύθηκαν λόγω δαπανηρής, επίπονης και χρονοβόρας διαδικασίας. Προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις α-φασματοσκοπίας ανοίχτηκαν εκ νέου τα δείγματα, τα οποία είχαν συσκευασθεί στα δοχεία $282\,\mathrm{cc}$ για τις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις, και αφαιρέθηκαν με την βοήθεια πιπέτας 50mL από κάθε δείγμα, τα οποία τοποθετήθηκαν σε ξεχωριστά πυρίμαχα γυάλινα ποτήρια. Πριν το άνοιγμα προηγήθηκε έντονη ανάδευση των δειγμάτων ώστε να διαλυθεί εκ νέου μέσα στο δείγμα το ίζημα, που είχε σχηματιστεί στον πυθμένα των δοχείων. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε χημικός διαχωρισμός του ^{238}U με βάση την μέθοδο ανταλλαγής ιόντων με την βοή-

θεια της ρητίνης AG1-X4 της εταιρείας Biorad. Η σχετική διάταξη φαίνεται στο σχήμα 6.13. Ακολούθησε η παραγωγή της πηγής-στόχου για κάθε δείγμα με την μέθοδο της ηλεκτροαπόθεσης με βάση την πειραματική μεθοδολογία, που έχει αναπτυχθεί από τον Hallstadius [70]. Η λεπτομερής περιγραφή της μεθόδου, που έχει αναπτυχθεί και ακολουθείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ παρουσιάζεται στο [222].

Μετά την κατασκευή της η πηγή κάθε δείγματος τοποθετείται στην μετρητική διάταξη της α-φασματοσκοπίας, που διαθέτει το ΕΠΤ, σε απόσταση $9\,\mathrm{mm}$ από τον ανιχνευτή. Η πίεση του θαλάμου ρυθμίζεται στα $4.5\,\mathrm{mmHg}$. Η μέτρηση διαρκεί $70\,000\,\mathrm{sec}$. Μετά την λήψη του φάσματος ακολούθησε η ανάλυσή του με τον κώδικα XAlpha, ο οποίος έχει αναπτυχθεί για αυτό τον σκοπό εξ' ολοκλήρου στο ΕΠΤ [222]. Στα πλαίσια αυτής της ΔΔ αναλύθηκαν τα δείγματα R0043, R0046, R0048 και R0049. Αναλυτικά στοιχεία σχετικά με τις πηγές που κατασκευάστηκαν και τα φάσματα που λήφθηκαν παραθέτονται στον πίνακα 6.11.

Η χημική απόδοση της μεθόδου στα δείγματα, που αναλύθηκαν κυμάνθηκε από 45-60.8%. Στον πίνακα 6.18 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές συγκέντρωσης ουρανίου στο υδάτινο περιβάλλον, στον πίνακα 6.19 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές συγκέντρωσης ουρανίου σε δείγματα βρόχινου νερού, ενώ στον πίνακα 6.20 παρουσιάζονται τα όρια ασφαλείας για την συγκέντρωση ουρανίου σε πόσιμο νερό. Έτσι υπάρχει δυνατότητα συγκρίσης των τιμών, που μετρήθηκαν στην Μεγαλόπολη με διάφορες τιμές και όρια της βιβλιογραφίας.

6.5.4.1 Δείγμα βροχής στην ταράτσα του κτιρίου ¨Κ¨ στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Πρόκειται για δείγμα, που συλλέχθηκε το διάστημα 14/02/2007-20/04/2007, και έχει κωδικό R0043. Φάσμα του δίσκου 57-25/07/08 παρουσιάζεται στο σχήμα 6.14 ενώ τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στον πίνακα 6.12. Η χημική απόδοση της ανάλυσης σύμφωνα με την εξίσωση 6.4 εκτιμάται ίση με 45% με βάση την ραδιενέργεια του ιχνηλάτη. Η συγκέντρωση του ^{238}U είναι ίση με $2.2 \pm 0.6\,\mathrm{mBqkgr}^{-1}$. Η συγκέντρωση του ^{234}U είναι ίση με $2.0{\pm}0.6\,\mathrm{mBqkg}^{-1}$.

Για να ελέγξουμε αν οι συγκεντρώσεις των δύο ισοτόπων του ουρανίου διαφέρουν στατιστικά μεταξύ τους πραγματοποιούμε στατιστικό έλεγχο u με βάση την ακόλουθη μεταβλητή:

$$u = \frac{R_2 - R_1}{\sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_1^2}} \tag{6.5}$$

όπου:

R_1: Η μέση τιμή της συγκέντρωσης του ^{238}U

σ_1: Η τυπική απόκλιση της συγκέντρωσης του ^{238}U

R_2: Η μέση τιμή της συγκέντρωσης του ^{234}U

σ_2: Η τυπική απόκλιση της συγκέντρωσης του ^{234}U

Οι υποθέσεις, που θα ελεγθούν, είναι οι ακόλουθες:

$$H_o : R_1 - R_2 = 0$$
$$H_1 : R_1 - R_2 \neq 0$$

Για αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης εκλέγεται επίπεδο σημαντικότητας a=5% και για αποδοχή της εναλλακτικής a=1%. Για a=5% το άνω όριο της κρίσιμης περιοχής είναι u_{pu}=1.96 και το κάτω u_{pd}=-1.96. Αντίστοιχα για a=1% το άνω όριο είναι u_{pa}=2.57 και το κάτω u_{pd}=-2.57. Η τιμή της μεταβλητής u είναι 0.24 οπότε γίνεται δεκτή η μηδενική υπόθεση και συμπεραίνεται ότι οι συγκεντρώσεις του ^{238}U και του ^{234}U στο δείγμα R0043 δεν διαφέρουν σημαντικά.

Δεν παρουσιάζονται συγκεντρώσεις του ^{235}U διότι οι κορυφές του έχουν πολύ λίγους παλμούς στο φάσμα και δεν σχηματίζονται. Έτσι δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί προσαρμογή προκειμένου να υπολογίσουμε τα σχετικά εμβαδά.

Εάν δεχτούμε ότι η πυκνότητα του νερού είναι ίση με $1\,\mathrm{kgL^{-1}}$ μπορούμε να πραγματοποιήσουμε συγκρίσεις σε σχέση με άλλες μετρήσεις ^{238}U σε βρόχινο νερό, που έχουν πραγματοποιηθεί ανά τον κόσμο (βλ. πίνακα 6.19), και βλέπουμε ότι η παρούσα μέτρηση είναι μεταξύ των χαμηλότερων. Όσον αφορά σε μετρήσεις ^{238}U στο υδάτινο περιβάλλον γενικά (βλ. πίνακα 6.18) και εδώ η συγκέντρωση του δείγματος είναι πολύ χαμηλά στο εύρος τιμών, που παραθέτονται. Το ίδιο ισχύει και για τα όρια ασφαλείας για πόσιμο νερό, τα οποία αναφέρονται στον πίνακα 6.20.

Όσον αφορά στις μηνιαίες αποθέσεις ^{234}U και ^{238}U, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί και βρίσκονται ίσες με $103\pm31\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$ και $113\pm31\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$ αντίστοιχα. Συγκρίνοντας την απόθεση του ^{238}U με το εύρος τιμών που μέτρησαν οι Papaefthymiou et al. [140] στην περιοχή της Μεγαλόπολης, το οποίο κυμαίνεται από $1000\text{-}25\,700\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$ (βλ. πίνακα 6.19), παρατηρούμε ότι είναι περίπου 100 φορές χαμηλότερη από την ελάχιστη τιμή που παραθέτουν οι Papaefthymiou et al..

6.5.4.2 Δείγμα βροχής στην πόλη της Μεγαλόπολης

Είναι δείγμα, το οποίο συλλέχθηκε στην ταράτσα διώροφης κατοικίας μέσα στην πόλη της Μεγαλόπολης το χρονικό διάστημα 15/02/2007-21/04/2007 και έλαβε τον κωδικό R0046. Φάσμα του δίσκου 53-24/04/08 παρουσιάζεται στο σχήμα 6.15. Αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται στον πίνακα 6.13. Η χημική απόδοση της ανάλυσης εκτιμάται στο 60.8% με βάση την ραδιενέργεια του ιχνηλάτη. Η συγκέντρωση του ^{234}U προσδιορίζεται σε $10\pm2\,\mathrm{mBqkgr^{-1}}$, όπως επίσης και η συγκέντρωση του ^{238}U. Βλέπουμε λοιπόν ότι το δείγμα R0046 έχει ίσες συγκεντρώσεις ^{234}U και ^{238}U. Για

το ^{235}U ισχύουν αυτά που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 6.5.4.1.

Η συγκέντρωση του ^{238}U σε αυτό το δείγμα σε σχέση με την συγκέντρωση ^{238}U στο R0043 είναι 4.55 φορές υψηλότερη, πράγμα που είναι μια πρώτη ένδειξη ό,τι η ατμόσφαιρα στην περιοχή της Μεγαλόπολης παρουσιάζει μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ^{238}U, από ότι αυτή της Αθήνας. Σε σύγκριση πάντως με τις τιμές των συγκεντρώσεων ^{238}U στο βρόχινο νερό, που βρέθηκαν στην βιβλιογραφία και παρουσιάζονται στον πίνακα 6.19, η συγκέντρωση του R0046 είναι σχετικά χαμηλή.

Η υπολογιζόμενη μηνιαία απόθεση ^{238}U, που προκύπτει με βάση την μετρούμενη συγκέντρωση του δείγματος R0046 είναι $679 \pm 135\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$. Η μέτρηση αυτή είναι χαμηλότερα από το εύρος τιμών, που παραθέτουν οι Papaefthymiou et al. [140] για μετρήσεις απόθεσης, που πραγματοποίησαν στην περιοχή της Μεγαλόπολης και κυμαίνεται από $1000\text{-}25\,700\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$ (βλ. πίνακα 6.19). Υπολογίζεται επίσης και η μηνιαία απόθεση ^{234}U, η οποία είναι ίση με $679{\pm}135\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$.

6.5.4.3 Δείγμα βροχής κοντά στους ΑΗΣ1-2,3

Πρόκειται για δείγμα, το οποίο συλλέχθηκε στην κοντά στους ΑΗΣ1-2,3 την περίοδο 26/01/2008-11/05/2008 και έλαβε τον κωδικό R0048. Φάσμα του δίσκου 58-30/10/08 φαίνεται στο σχήμα 6.16. και τα αποτελέσματα της ανάλυσης βρίσκονται στον πίνακα 6.13. Η χημική απόδοση της ανάλυσης εκτιμάται στο 56% με βάση την ραδιενέργεια του ιχνηλάτη. Η συγκέντρωση του ^{238}U στο δείγμα προσδιορίζεται σε $88 \pm 9\,\mathrm{mBqkgr^{-1}}$ και η συγκέντρωση του ^{234}U προσδιορίζεται σε $88 \pm 9\,\mathrm{mBqkgr^{-1}}$. Βλέπουμε δηλαδή ότι το συγκεκριμένο δείγμα παρουσιάζει ίσες συγκεντρώσεις στα ισότοπα ^{234}U και ^{238}U. Για το ^{235}U ισχύουν αυτά που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 6.5.4.1.

Η μηνιαία απόθεση ^{238}U προσδιορίζεται σε $4335 \pm 443\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$ ενώ του ισοτόπου ^{234}U προσδιορίζεται σε $4335{\pm}443\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$. Σε σχέση με το δείγμα R0046, που συλλέχθηκε μέσα στην πόλη της Μεγαλόπολης, βλέπουμε ότι οι τιμές της συγκέντρωσης καθώς και της μηνιαίας απόθεσης ^{238}U είναι αρκετά αυξημένες. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η δειγματοληψία του συγκεκριμένου δείγματος διήρκεσε 40 ημέρες περισσότερο ενώ πραγματοποιήθηκε σε κοντά στους ΑΗΣ1-2,3 και όχι στην πόλη της Μεγαλόπολης από ότι αυτή του δείγματος R0046. Οι υψηλότερες τιμές, που παρατηρούνται, ίσως να οφείλεται στο γεγονός ότι το σημείο δειγματοληψίας βρισκόταν αρκετά κοντά στους ΑΗΣ1-2,3. Πιθανόν εκεί η ατμόσφαιρα είναι επιβαρυμένη σε ουράνιο λόγω της διακίνησης της τέφρας καθώς και της επεξεργασίας και διακίνησης του λιγνίτη. Σε σχέση πάντως με το εύρος τιμών μηνιαίας απόθεσης που παρέχουν οι Papaefthymiou et al. [140] η παρούσα μέτρηση βρίσκεται αρκετά χαμηλά στο υπόψη εύρος, το οποίο κυμαίνεται από $1000\text{-}25\,700\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$ (βλ. πίνακα 6.19).

Συγκρίνοντας την συγκέντρωση ^{238}U στο υπόψη δείγμα με αυτήν του δείγματος

R0043, το οποίο συλλέχθηκε στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου διαπιστώνουμε ότι οι συγκέντρωση του R0048 είναι 40 φορές υψηλότερη. Σε σχέση με τις υπόλοιπες μετρήσεις ^{238}U στην βιβλιογραφία, που παρουσιάζονται στον πίνακα 6.19, η τιμή του υπόψη δείγματος είναι υψηλότερη από όλες με εξαίρεση τις τιμές, που παρουσιάζει ο Martin [123], οι οποίες κυμαίνονται από 0.5-$1270\,\mathrm{mBqL^{-1}}$. Σημειώνεται όμως ότι οι συγκεκριμένες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε περιοχή, η οποία βρισκόταν κοντά σε ορυχείο ουρανίου.

6.5.4.4 Δείγμα βροχής κοντά στους ΑΗΣ1-2,3

Πρόκειται για δείγμα, το οποίο συλλέχθηκε επίσης κοντά στους ΑΗΣ1-2,3 την περίοδο 26/01/2008-11/05/2008 και έλαβε τον κωδικό R0049. Φάσμα του δίσκου 59-04/11/08 παρουσιάζεται στο σχήμα 6.17. και τα αποτελέσματα της ανάλυσης βρίσκονται στον πίνακα 6.15. Η χημική απόδοση της ανάλυσης εκτιμάται στο 45% με βάση την ραδιενέργεια του ιχνηλάτη. Η συγκέντρωση του ^{238}U στο δείγμα προσδιορίζεται σε $90 \pm 14\,\mathrm{mBqkgr^{-1}}$ και η συγκέντρωση του ^{234}U προσδιορίζεται σε $91 \pm 14\,\mathrm{mBqkgr^{-1}}$. Ελέγχουμε έαν οι δύο τιμές διαφέρουν στατιστικά πραγματοποιώντας στατιστικό έλεγχο u σε επίπεδο σημαντικότητας a=5% με βάση την μεθοδολογία, η οποία παρουσιάστηκε στην παράγραφο 6.5.4.1. Η τιμή της μεταβλήτής u ισούται με u=0.05, πράγμα που σημαίνει ότι επιβεβαιώνεται η μηδενική υπόθεση ότι οι δύο τιμές δεν διαφέρουν σημαντικά. Συνεπώς μπορούμε να πούμε ότι το δείγμα παρουσιάζει όμοια ισοτοπική σύσταση για το ^{234}U και το ^{238}U. Για το ^{235}U ισχύουν αυτά που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 6.5.4.1. Υπολογίζονται επίσης η μηνιαία απόθεση ^{238}U, η οποία είναι $4817 \pm 741\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$ και η μηνιαία απόθεση ^{234}U, η οποία είναι $4764{\pm}741\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$.

Παρατηρούμε ότι οι τιμές των συγκεντρώσεων του ^{238}U στα δείγματα R0048 και R0049 είναι πολύ κοντά. Προκειμένου να αποφανθούμε για το εάν διαφέρουν στατιστικά μεταξύ τους πραγματοποιούμε στατιστικό έλεγχο u σε επίπεδο σημαντικότητας a=5% με βάση την μεθοδολογία, που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 6.5.4.1. Οι υποθέσεις, που θα ελεγθούν, είναι οι ακόλουθες:

$$H_o : R_1 - R_2 = 0$$
$$H_1 : R_1 - R_2 \neq 0$$

όπου:

R_1: Η συγκέντρωση του ^{238}U στο δείγμα R0048

R_2: Η συγκέντρωση του ^{238}U στο δείγμα R0049

Η τιμή της μεταβλητής u είναι u=0.12. Συνεπώς μπορούμε να πούμε ότι η ειδική ραδιενέργεια του δείγματος R0049 δεν διαφέρει σημαντικά από αυτή του R0048.

Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την σωστή λειτουργία της α-φασματοκοπικής διάταξης καθώς και της πειραματικής διαδικασίας διαχωρισμού του δείγματος. Όσον αφορά την σύγκριση των τιμών του δείγματος με τις υπόλοιπες μετρήσεις της βιβλιογραφίας ισχύουν αυτά, που αναφέρθηκαν και για το δείγμα R0048.

6.6 Αναλύσεις των δειγμάτων με την μέθοδο ανάλυσης κινητικής φωσφορισμού (ΚΡΑ)

6.6.1 Γενικές αρχές

Η μέθοδος ανάλυσης κινητικής φωσφορισμού (*Kinetic Phosphoresence Analysis*), η οποία θα αναφέρεται ως ΚΡΑ, είναι ενόργανη μέθοδος προσδιορισμού στοιχειακού U σε υγρά δείγματα. Δηλαδή δεν πραγματοποιείται ισοτοπική ανάλυση στο εξεταζόμενο δείγμα. Το τελευταίο προσβάλλεται από ακτίνα Laser, η οποία διεγείρει τα ιόντα του ουρανίου. Κατά την αποδιέγερσή τους εκπέμπουν ακτινοβολία στο ορατό φάσμα (φως), η οποία ανιχνεύεται και ποσοτικοποιείται από τις μετρητικές διατάξεις του οργάνου. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για μετρήσεις δειγμάτων χαμηλής συγκέντρωσης U με κατώτερο όριο ανίχνευσης της τάξης των $10\,\mathrm{ppt}$ [20], [19].

Μετά την απορρόφηση ενός φωτονίου, τα ιόντα U οδηγούνται σε διεγερμένες καταστάσεις. Η αποδιέγερσή τους μπορεί να γίνει με ή χωρίς εκπομπή φωτονίων (μοριακές ταλαντώσεις/συγκρούσεις). Ανάλογα με το είδος της μετάβασης από τη διεγερμένη κατάσταση στην κατάσταση ηρεμίας, η εκπομπή φωτονίων μπορεί να είναι:

- Άμεση ($10^{-10} - 10^{-7}$ s). Τότε το φαινόμενο ονομάζεται φθορισμός (*fluorescence*)
- Μετά την πάροδο σημαντικού χρονικού διαστήματος ($10^{-5} - 10^{0}$ s), οπότε το φαινόμενο ονομάζεται φωσφορισμός (*phosphorescence*)

Η μετρητική διάταξη ανιχνεύει και καταγράφει τα φωτόνια, που εκπέμπονται κατά το φαινόμενο του φωσφορισμού. Για τον φωσφορισμό γνωρίζουμε ότι η αποδιέγερση των ιόντων μετά την άμεση αποδιέγερση (φθορισμός) ακολουθεί εκθετικό νόμο:

$$lnU_t^* = lnU_o^* - (k_p + k_q)t$$

όπου:
U_i^*: το πλήθος των διεγερμένων ιόντων U τη χρονική στιγμή i=t ή 0.
k_p: σταθερά που αναφέρεται στην αποδιέγερση του μορίου λόγω φωσφορισμού.
k_q : σταθερά που αναφέρεται στους υπόλοιπους μηχανισμούς αποδιέγερσης του μορίου (θόρυβος).

Η ένταση του φωτός που εκπέμπεται κατά την αποδιέγερση του δείγματος που εξετάζεται είναι ανάλογη της συγκέντρωσης ιόντων U σε αυτό και ακολουθεί επίσης τον εκθετικό νόμο:

$$lnI_o = lnI_t + (k_p + k_q)t$$

όπου I_t η ένταση του φωτός τη χρονική στιγμή t.

Κατά τη μέτρηση λαμβάνονται ζεύγη τιμών (t,It) και με αναδρομή προκύπτει η αρχική ένταση I_o. Για να αποφανθούμε για την συγκέντρωση ουρανίου στο δείγμα μας χρησιμοποιούμε την εμπειρική σχέση, που προκύπτει από την εκάστοτε βαθμονόμηση της διάταξης με πρότυπα δείγματα. Βιβλιογραφία σχετική με τη μεθοδολογία διενέργειας των βαθμονομήσεων μπορεί να αναζητηθεί στο [43].

Προκειμένου να καταφέρουμε να έχουμε επιτυχή μέτρηση πρέπει να αποφευχθεί η αποδιέγερση των ιόντων ουρανίου με διαδικασίες ανταγωνιστικές προς το φωσφορισμό, όπως ο φθορισμός. Για να επιτευχθεί λοιπόν ο στόχος αυτός, πρέπει να συμπλοκοποιούνται τα ιόντα του ουρανίου με ειδικό διάλυμα, το οποίο ονομάζεται δεσμευτής *(complexant)*. Η εμπορική ονομασία του συγκεκριμένου διαλύματος είναι URAPLEX.

6.6.2 Η μετρητική διάταξη που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει την συγκεκριμένη μέθοδο, η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια ΔΔ [221], χρησιμοποιείται η μετρητική διάταξη KPA-11M της κατασκευάστριας εταιρείας Chemchek, η οποία είναι συνδεδεμένη απ' ευθείας σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα Windows XP (βλ. σχήμα 6.18). Ο έλεγχος της διάταξης και η λήψη των αποτελεσμάτων γίνεται με την βοήθεια εφαρμογής, που παρέχει η κατασκευάστρια εταιρεία. Το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει υποστήριξη για όλες τις απαραίτητες διαδικασίες όπως η βαθμονόμηση και η αφαίρεση υποστρώματος.

Στο σχήμα 6.19 μπορεί να δει κανείς το διάγραμμα των επί μέρους συνιστωσών της συσκευής. Εκεί υπάρχει ο ακόλουθος συμβολισμός:

- R: το φιαλίδιο με το δείγμα αναφοράς
- S: το φιαλίδιο με το δείγμα μέτρησης
- M: οι καθρέπτες
- L: οι φακοί
- F: τα φίλτρα υψηλής απόδοσης.

Το όργανο χρησιμοποιεί Laser αζώτου, για να παράγει μονοχρωματική υπεριώδη ακτινοβολία με μήκος κύματος 337nm. Η ακτίνα πριν προσπέσει στο δείγμα περνά

μέσα από διάλυμα Stylbene-420 (Exciton ©) σε μεθανόλη με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται το μήκος κύματός της στα 420nm, ώστε να έχουμε αποτελεσματικότερη διέγερση των ιόντων ουρανίου στο δείγμα [28]. Τα διεγερμένα ιόντα ουρανίου στην συνέχεια εκπέμπουν με φωσφορισμό φωτόνια στο ορατό φάσμα, τα οποία στην συνέχεια φιλτράρονται, ενισχύονται και τελικά καταγράφονται από την διάταξη. Για να διαρκέσει περισσότερο η εκπομπή των ιόντων του ουρανίου προσθέτουμε στο δείγμα ένα αντιδραστήριο βασισμένο σε φωσφορικά άλατα (Uraplex). Με την προσθήκη του τελευταίου ο χρόνος φωσφορισμού για το UO_2^{2+} φθάνει τις μερικές εκατοντάδες μsec [37].

Σχετικά με την ακτίνα Laser γνωρίζουμε ότι μπορεί να παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις εξαιτίας της μεταβολής της τάσης του δικτύου. Αυτές οι διακυμάνσεις μπορεί να προκαλούν διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα λόγω των πολύ μικρών συγκεντρώσεων που ανιχνεύει η διάταξη. Προκειμένου να εξαλειφθεί το συγκεκριμένο φαινόμενο χρησιμοποιείται το δείγμα αναφοράς ως εξής: Κατά την βαθμονόμηση μετράται ο φωσφορισμός του δείγματος αναφοράς, το οποίο διαθέτει γνωστή συγκέντρωση. Σε κάθε μέτρηση, που πραγματοποιείται, γίνεται και μέτρηση του δείγματος αναφοράς και υπολογίζεται ο λόγος της συγκέντρωσης της τρέχουσας μέτρησης προς την μέτρηση της βαθμονόμησης (*reference ratio*). Ακολούθως πολλαπλασιάζεται η συγκέντρωση του δείγματος μέτρησης με τον παραπάνω λόγο, ώστε να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της μεταβολής της ακτίνας laser.

Η διάταξη έχει τις ακόλουθες διαστάσεις: $13.6\,\mathrm{cm}$ x $48\,\mathrm{cm}$ x $53\,\mathrm{cm}$ ενώ το βάρος της είναι $16\,\mathrm{kg}$. Η ακτίνα Laser, η οποία προσπίπτει επάνω στο δείγμα, προκειμένου να διεγείρει τα ιόντα του ουρανίου, έχει διαστάσεις 3x$8\,\mathrm{mm}$.

Σχετικά τώρα με τις παραμέτρους λειτουργίας της διάταξης KPA-11M ισχύουν τα εξής: Τα όρια ανίχνευσης κυμαίνονται από 0.01-$50\,000\,\mathrm{ppb}(\mu\mathrm{gL}^{-1})$. Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν σε διάλυμα φυσικού ουρανίου με συγκεντρώσεις ^{238}U 10^{-4}-$60\,\mathrm{BqL}^{-1}$. Η ποσότητα του δείγματος, που χρειάζεται να τοποθετήσουμε στο φιαλίδιο είναι 1-$2\,\mathrm{mL}$ (καθώς και $1.5\,\mathrm{mL}$ URAPLEX) ενώ η διάρκεια μέτρησης κυμαίνεται από 1-$3\,\mathrm{min}$. Οι χρόνοι λήψεως μετρήσεων από την διάταξη κυμαίνονται από $1\,\mu\mathrm{s}$-$4\,\mathrm{ms}$, ενώ το πλήθος μετρήσεων ανά ανάλυση είναι από 1 έως 512. Οι μετρήσεις στους τέσσερις πρώτους χρόνους λήψεως μετρήσεων *(time gates)* δεν λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς, για να μην επηρεάζονται αυτοί από το φαινόμενο του φθορισμού (*luminscence*), που συμβαίνει σε αυτό το χρονικό διάστημα.

6.6.3 Αναλύσεις των δειγμάτων R0043, R0046, R0048, R0049

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστούν οι αναλύσεις των δειγμάτων R0043, R0046, R0048, R0049, που πραγματοποιήθηκαν με την διάταξη KPA, καθώς και η σχετική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την προετοιμασία των δειγμάτων. Όπως αναφέρ-

θηκε στην παράγραφο 6.6.1 η μέθοδος μετράει στοιχειακό ουράνιο. Προκειμένου να αποφανθούμε για τις συγκεντρώσεις του ^{238}U στα δείγματα, που αναλύθηκαν, δεχτήκαμε ότι δεν έχει διαταραχθεί η φυσική ισοτοπική σύσταση του ουρανίου και συνεπώς $1\,\mathrm{gr}$ U αντιστοιχεί σε $12\,400\,\mathrm{Bq}$ ^{238}U [2]. Αυτή η σχέση χρησιμοποιήθηκε σε όλους τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν.

Προκειμένου να μετρηθεί ένα δείγμα με την μέθοδο KPA είναι απαραίτητο να είναι διαυγές, ώστε να μην απορροφάται η ακτίνα από το δείγμα και επίσης να μην αποσβένεται ο φωσφορισμός από το υγρό περιβάλλον του διαλύματος. Στην περίπτωση που ένα δείγμα δεν είναι αρκετά διαυγές προτείνεται από την ASTM να ακολουθείται η ακόλουθη διαδικασία πριν αυτό μετρηθεί [4]:

1. Αφαιρείται με την βοήθεια μιας πιπέτας $5\,\mathrm{mL}$ από το δοχείο, που είναι συσκευασμένο το δείγμα, και τοποθετείται σε πυράντοχο γυάλινο δοχείο χωρητικότητας $25\,\mathrm{mL}$.

2. Προστίθεται $1\,\mathrm{mL}$ πυκνού $\mathrm{HNO_3}$ (67%) καθώς και μερικών σταγόνων $\mathrm{H_2O_2}$ στο πυράντοχο δοχείο των $25\,\mathrm{mL}$.

3. Ακολούθως αφυδατώνεται το δείγμα.

4. Λίγο πριν την πλήρη αφυδάτωση του δείγματος προστίθεται εκ νέου $1\,\mathrm{mL}$ πυκνό $\mathrm{HNO_3}$ (67%) και μερικές σταγόνες $\mathrm{H_2O_2}$ και ακολουθεί εκ νέου θέρμανση του δείγματος.

5. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου το δείγμα γίνει πλήρως διαυγές και αφυδατώνεται μέχρι ξηρού.

6. Στο στερεό υπόλειμμα, που απέμεινε, προστίθεται $1\,\mathrm{mL}$ $\mathrm{HNO_3}$ 4M και ακολουθεί ήπια θέρμανση, ώστε να επιτευχθεί διάλυση του στερεού υπολείμματος. Στην συνέχεια προστίθενται $4\,\mathrm{mL}$ αποσταγμένου νερού και ανακινείται το δείγμα ώστε να αναμιχθεί. Μέτα από όλα τα προηγούμενα μπορεί να γίνει η ανάλυση του δείγματος.

Στην πρώτη μέτρηση, που πραγματοποιήθηκε, δεν ακολουθήθηκε η παραπάνω διαδικασία και μετρήθηκε το δείγμα ως είχε. Λήφθηκε δηλαδή ποσότητα $1\,\mathrm{mL}$ από το τελικό δείγμα, που προέκυψε μετά την ραδιοχημική επεξεργασία (βλ. παράγραφο 6.3), και ακολούθησε μέτρησή του με την διάταξη. Το δείγμα που μετρήθηκε ήταν το R0046 και η συγκέντρωση του σε ^{238}U ήταν $3.0\pm0.2\,\mathrm{mBqkg^{-1}}$. Η συγκέντρωση του δείγματος, που προέκυψε από την α-φασματοσκοπική ανάλυση, ήταν $10\pm2\,\mathrm{mBqkg^{-1}}$. Λόγω της απόκλισης που παρατηρήθηκε αποφασίστηκε να γίνει νέα μέτρηση του δείγματος με

KPA, αφού πρώτα προηγηθεί επεξεργασία του με την μέθοδο ASTM[4], η οποία περιγράφηκε στις προηγούμενες γραμμές. Έτσι η συγκέντρωση του ^{238}U προέκυψε ίση με $8.0 \pm 0.9\,\mathrm{mBqkg^{-1}}$.

Βλέπουμε ότι η συγκέντρωση ^{238}U, που προέκυψε από την KPA, αφού προηγήθηκε επεξεργασία του δείγματος με την μέθοδο ASTM, βρίσκεται πολύ κοντά στην συγκέντρωση, που προέκυψε από την α-φασματοσκοπική ανάλυση. Έτσι διεξάχθηκε στατιστικός έλεγχος u προκειμένου να διαπιστωθεί εάν οι δύο τιμές διαφέρουν στατιστικά μεταξύ τους.

Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε με βάση την ακόλουθη μεταβλητή:

$$u = \frac{R_2 - R_1}{\sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_1^2}} \tag{6.6}$$

όπου:

R_1: Η μέση τιμή της συγκέντρωσης του ^{238}U όταν μετρήθηκε με α-φασματοσκοπική ανάλυση

σ_1: Η τυπική απόκλιση της συγκέντρωσης του ^{238}U όταν μετρήθηκε με α-φασματοσκοπική ανάλυση

R_2: Η μέση τιμή της συγκέντρωσης του ^{238}U όταν μετρήθηκε με KPA

σ_2: Η τυπική απόκλιση της συγκέντρωσης του ^{238}U όταν μετρήθηκε με KPA

Οι υποθέσεις, που ελέγθηκαν, είναι οι ακόλουθες:

$$H_o : R_1 - R_2 = 0$$
$$H_1 : R_1 - R_2 \neq 0$$

Για αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης εκλέχθηκε επίπεδο σημαντικότητας a=5% και για αποδοχή της εναλλακτικής a=1%. Για a=5% το άνω όριο της κρίσιμης περιοχής είναι u_{pu}=1.96 και το κάτω u_{pd}=-1.96. Αντίστοιχα για a=1% το άνω όριο είναι u_{pa}=2.57 και το κάτω u_{pd}=-2.57.

Η τιμή της u στο δείγμα R0046 ήταν u=1.22. Συνεπώς μπορούμε να πούμε ότι στο δείγμα R0046 οι μετρήσεις με α-φασματοσκοπική ανάλυση και KPA βρίσκονται σε συμφωνία.

Έτσι αποφασίστηκε να γίνει προεπεξεργασία και των υπόλοιπων 3 δειγμάτων με την μέθοδο ASTM πριν την ανάλυση τους με KPA. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρότι η παραπάνω μέθοδος εφαρμόστηκε επαναληπτικά 8 φορές στα δείγματα R0043, R0046 και 15 φορές στα R0048, R0049, τα δείγματα δεν έγιναν πλήρως διαυγή. Ειδικά τα R0048, R0049 λόγω των πολλών στερεών που περιείχαν έγιναν λιγότερο διαυγή από τα δύο πρώτα δείγματα παρότι η επαναληπτική διαδικασία εφαρμόστηκε περισσότερες φορές. Μάλιστα από την 10 επανάληψη και μετά δεν παρατηρήθηκε κάποια αλλαγή

στην διαύγεια τους.

Μετά την προεπεξεργασία ακολούθησε ανάλυση των δειγμάτων R0043, R0048 και R0049 αλλά τα αποτελέσματα διέφεραν σημαντικά από τα αντίστοιχα, που λήφθηκαν από την α-φασματοσκοπική ανάλυση. Προκειμένου να βεβαιωθούμε ότι η διάταξη της ΚΡΑ εργάζεται σωστά πραγματοποιήθηκε νέα μέτρηση του δείγματος R0049 με προσθήκη προτύπου (*standard addition*). Περισσότερα για την μεθοδολογία και τον τρόπο εφαρμογής της προσθήκης προτύπου μπορεί να δει ο αναγνώστης στο [221]. Το προς μέτρηση δείγμα είχε μάζα $6.55\,\mathrm{g}$ και σε αυτό προστέθηκαν $1.038\,\mathrm{g}$ πρότυπου διαλύματος ^{238}U συγκέντρωσης $30.0\pm0.8\,\mathrm{Bqkg^{-1}}$. Συνεπώς η ενεργότητα του προστιθέμενου προτύπου ήταν $31.1\pm0.7\,\mathrm{Bq}$. Η απόδοση της μεθόδου ήταν $54\pm9\%$ και η υπολογιζόμενη συγκέντρωση ^{238}U ήταν $20\pm3.9\,\mathrm{Bqkg^{-1}}$. Ομοίως η τιμή αυτή διέφερε από την αντίστοιχη, που λήφθηκε με α-φασματοσκοπική ανάλυση. Η αιτία για αυτό το φαινόμενο ήταν η ισχυρή απόσβεση του παραγόμενου φωσφορισμού από το μη διαυγές υγρό περιβάλλον του δείγματος, η οποία επιβεβαιώνεται και από τα προειδοποιητικά μηνύματα της συσκευής για χαμηλή διάρκεια ζωής φωσφορισμού (*Low phosphoresence mean lifetime*) και για χαμηλό πολλαπλό συντελεστή συσχέτησης (*Low multiple correlation coefficient*).

Με βάση τα παραπάνω και με δεδομένο ότι η ΚΡΑ έχει την δυνατότητα να πραγματοποιεί αναλύσεις σε πολύ χαμηλά επίπεδα συγκέντρωσης U, αποφασίστηκε να γίνει αραίωση των δειγμάτων πριν την μέτρηση. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίστηκε ότι τα μετρούμενα δείγματα θα είναι διαυγή. Έτσι $1\,\mathrm{mL}$ του κάθε δείγματος αραιώθηκε σε $9\,\mathrm{mL}$ $\mathrm{HNO_3}$ $0.8\,\mathrm{N}$ και ακολούθησε ανάλυση του αραιωμένου δείγματος με την ΚΡΑ. Σημειώνεται ότι η μέτρηση και στα τρία δείγματα (R0043, R0048, R0049) πραγματοποιήθηκε με προσθήκη προτύπου.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων ήταν πολύ ικανοποιητικά και παρουσιάζονται στον πίνακα 6.16. Τα αποτελέσματα αυτά είναι ανηγμένα στον αρχικό όγκο λαμβάνοντας υπόψη όλα τα βήματα συμπύκνωσης αραίωσης που πραγματοποιήθηκαν. Στον πίνακα 6.17 παρουσιάζεται η ειδική ραδιενέργεια των δειγμάτων, όπως μετρήθηκε με την ΚΡΑ, καθώς και οι αντίστοιχες τιμές, που προέκυψαν από τις α-φασματοσκοπικές αναλύσεις.

Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν διαφέρουν στατιστικά τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από την ΚΡΑ, σε σχέση με αυτά, που προέκυψαν από την α-φασματοσκοπική ανάλυση, πραγματοποιήθηκαν στατιστικοί έλεγχοι u με βάση την εξίσωση 6.6, που παρουσιάστηκε παραπάνω και για τα ίδια επίπεδα σημαντικότητας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 6.17 και συμπεραίνουμε ότι και για τα τέσσερα δείγματα οι τιμές δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους.

Βλέπουμε λοιπόν ότι αραιώνοντας τα δείγματα R0043, R0046, R0048 και R0049 και κάνοντας τα διαυγέστερα επιτυγχάνεται επιτυχής ανάλυσή τους με την ΚΡΑ.

6.7 Συμπεράσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις του βρόχινου ύδατος

Με βάση όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους μπορούμε να καταλήξουμε στα εξής συμπεράσματα σχετικά με τις μετρήσεις του βρόχινου ύδατος, στην Αθήνα και τη Μεγαλόπολη:

- Επιτεύχθηκε δειγματοληψία και προσυγκέντρωση των δειγμάτων
- Με την μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας επιτεύχθηκε ανίχνευση του ^{238}U, ^{210}Pb στα δείγματα R0048, R0049, που συλλέχθηκαν στην περιοχή της Μεγαλόπολης πλησίον των ΑΗΣ1-2,3. Στα δείγματα R0043, R0045,τα οποία συλλέχθηκαν στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, καθώς και στα δείγματα R0046, R0047, που συλλέχθηκαν στην πόλη της Μεγαλόπολης δεν ήταν δυνατή η ανίχνευση των παραπάνω ισοτόπων, προφανώς λόγω χαμηλότερης συγκέντρωσης των υπόψη ισοτόπων στο βρόχινο νερό. Αντίθετα το ^{40}K ανιχνεύθηκε σε όλα τα παραπάνω δείγματα.
- Επιτεύχθηκε εφαρμογή α-φασματοσκοπικών μεθόδων σε δείγματα βρόχινου νερού.
- Η α-φασματοσκοπική ανάλυση των δειγμάτων R0048, R0049, τα οποία συλλέχθηκαν κοντά στους ΑΗΣ1-2,3 και στο ίδιο χρονικό διάστημα, είχε επαναληψιμότητα.
- Η διαφορά που παρατηρήθηκε ανάμεσα στα αποτελέσματα των αναλύσεων με α- και γ-φασματοσκοπία στα δείγματα R0048, R0049 οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη ιζήματος στο δοχείο του δείγματος γ-φασματοσκοπίας. Το ίζημα διαφοροποιεί την κατανομή της ραδιενέργειας στο δείγμα. Αυτό εισάγει σφάλματα στους υπολογισμούς της ραδιενέργειας καθώς η βαθμονόμηση της απόδοσης και οι υπολογισμοί για τον συντελεστή διόρθωσης για αυτοαπορρόφηση έχουν γίνει για ομογενή δείγματα.
- Το ^{238}U και το ^{234}U ήταν σε ραδιενεργό ισορροπία στα δείγματα R0043, R0046, R0048 και R0049 σύμφωνα με την α-φασματοσκοπική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε.
- Η μέγιστη συγκέντρωση ^{238}U, που μετρήθηκε με α-φασματοσκοπική ανάλυση, στο νερό της βροχής στην περιοχή της Μεγαλόπολης ήταν $90\pm14\,\mathrm{mBqkg^{-1}}$. Το συγκεκριμένο δείγμα λήφθηκε σε σημείο πλησίον των ΑΗΣ1-2,3. Η ελάχιστη συγκέντρωση ήταν $10\pm2\,\mathrm{mBqkg^{-1}}$ και το σημείο δειγματοληψίας βρισκόταν μέσα

στην πόλη της Μεγαλόπολης. Συγκρίνοντας αυτές τις τιμές με μετρήσεις συγκέντρωσης ^{238}U σε βρόχινο νερό στην βιβλιογραφία, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 6.19, διαπιστώνουμε ότι είναι αρκετά υψηλές.

- Η μέγιστη υπολογιζόμενη απόθεση ^{238}U στην περιοχή της Μεγαλόπολης προερχόταν από το δείγμα R0049, το οποίο λήφθηκε κοντά στους ΑΗΣ1-2,3, και ήταν $4764 \pm 741\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$. Συγκρινόμενη με τις το εύρος τιμών, που παρέχουν οι Papaefthymiou et al. [140] για την περιοχή της Μεγαλόπολης, το οποίο κυμαίνεται από $1000\text{-}25\,700\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$, διαπιστώνουμε ότι η τιμή στην παρούσα δειγματοληψία είναι αρκετά χαμηλά.

- Η συγκέντρωση του ^{238}U στο δείγμα βρόχινου νερού, που συλλέχθηκε στην πόλη της Μεγαλόπολης, ήταν 4.55 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη συγκέντρωση στο δείγμα, που συλλέχθηκε στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Αντίστοιχα η συγκέντρωση του ^{238}U στο δείγμα βρόχινου νερού, που συλλέχθηκε στην Μεγαλόπολη πλησίον των ΑΗΣ1-2,3, ήταν 40.9 φορές μεγαλύτερη από την συγκέντρωση ^{238}U στο δείγμα, που συλλέχθηκε στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.

- Η ανάλυση των δειγμάτων R0043, R0046, R0048 και R0049 με την μέθοδο KPA έδωσε αποτελέσματα, που δεν διαφέρουν σημαντικά από τις τιμές, που προέκυψαν από την α-φασματοσκοπική ανάλυση. Σημειώνεται ότι στην ανάλυση με KPA θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της, όπως προκύπτουν από τα μηνύματα που παράγει η συσκευή μετά την ανάλυση [221].

- Η αραίωση μη διαυγών υγρών περιβαλλοντικών δειγμάτων έχει ευεργετική επίδραση στα παραγόμενα αποτελέσματα, που προκύπτουν από την ανάλυση αυτών των δειγμάτων με KPA.

6.8 Εφαρμογή του κώδικα ORION-II στην περιοχή της Μεγαλόπολης κατά την διάρκεια δειγματοληψίας

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζεται εκτέλεση του ORION-II, η οποία πραγματοποιήθηκε για το χρονικό διάστημα 15/02/07-21/04/07, στο οποίο έγινε δειγματοληψία βρόχινου νερού στην ταράτσα διώροφης κατοικίας μέσα στην πόλη της Μεγαλόπολης. Το σημείο αυτό βρισκόταν σε απόσταση $5152.9\,\mathrm{m}$ από το κέντρο υπολογισμού. Μετά την δειγματοληψία ακολούθησε ραδιοχημική ανάλυση και τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν στις παραγράφους 6.5.4.2 και 6.6.3.

6.8.1 Το μετεωρολογικό σενάριο

Ακολουθώντας την μεθοδολογία, που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 5.5.2 κατασκευάσαμε ένα μετεωρολογικό σενάριο για την περίοδο 15/02/07-21/04/07. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονταν από τις πηγές της βιβλιογραφίας [140], [220], που χρησιμοποιήσαμε και στην παράγραφο 5.5.2. Οι τιμές αυτού του σεναρίου φαίνονται στους πίνακες 6.22- 6.31.

Σχετικά με τα δεδομένα βροχόπτωσης, τα οποία χρειάζεται ο κώδικας εργαστήκαμε ως εξής: Επειδή δεν διαθέταμε δεδομένα βροχής για την περιοχή της Μεγαλόπολης για την εν λόγω περίοδο ανατρέξαμε στην διαδικτυακή βάση δεδομένων του Weather Underground [210], η οποία διέθετε μετρήσεις από τον σταθμό του αεροδρομίου της Τρίπολης. Από την βάση αυτή μπορούμε να βρούμε για κάθε ξεχωριστή μέρα το ύψος βροχόπτωσης. Στον πίνακα 6.32 παραθέτονται τα δεδομένα για το διάστημα 15/02/07-21/04/07. Δεχόμαστε ότι η βροχόπτωση διαρκεί τις 12 από τις 24 ώρες της ημέρας. Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε τον μηνιαίο ρυθμό βροχόπτωσης καθώς και το χρονικό διάστημα, που διήρκεσε το φαινόμενο. Οι μηνιαίες τιμές που υπολογίστηκαν για τον ρυθμό βροχόπτωσης R παρουσιάζονται ακολούθως:

- Φεβρουάριος: R=$1.46\,\mathrm{mmh}^{-1}$
- Μάρτιος: R=$9.38\,\mathrm{mmh}^{-1}$
- Απρίλιος: R=$3.33\,\mathrm{mmh}^{-1}$

Η μέση τιμή του ρυθμού βροχόπτωσης για τον εν λόγω διάστημα είναι R=$4.72\,\mathrm{mmh}^{-1}$. Από τον πίνακα που παρέχει ο Boubel et al. [18, σελ. 288] προσδιορίζουμε το Λ_{p}=$6 \times 10^{-4}\,\mathrm{sec}^{-1}$. Για αυτό τον προσδιορισμό η διάμετρος των σωματιδίων της τέφρας λήφθηκε ίση με $8\,\mu\mathrm{m}$ σύμφωνα με όσα αναλύθηκαν στην παράγραφο 5.2.3.

Το χρονικό διάστημα, που κράτησε η βροχόπτωση είναι 5.5 ημέρες. Με δεδομένο ότι το συνολικό χρονικό διάστημα για το οποίο πραγματοποιείται ο υπολογισμός είναι 65 ημέρες το ποσοστό του χρόνου, που διήρκεσε η βροχόπτωση είναι $\mathrm{F_p}$=0.084. Πλέον έχουμε στην διάθεση μας όλα τα απαραίτητα μετεωρολογικά δεδομένα για την εκτέλεση του κώδικα, τα οποία εισάγουμε στο αρχείο δεδομένων data.txt.

6.8.2 Υπολογισμός ρυθμού εκπομπής ραδιοϊσοτόπων από τις καμινάδες των ΑΗΣ

Το ισότοπο, που μας ενδιαφέρει στην παρούσα εκτέλεση είναι το ^{238}U, αφού γι' αυτό έχουμε πραγματοποιήσει τις μετρήσεις που αναφέρονται στο παρόν κεφάλαιο. Ο ρυθμός εκπομπής του από τις καμινάδες των ΑΗΣ Μεγαλόπολης έχει υπολογιστεί στην

παράγραφο 5.7.5.8 και αυτές οι τιμές, οι οποίες παρατίθενται στον πίνακα 6.33, θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εκτέλεση.

6.8.3 Πραγματοποίηση της εκτέλεσης και εξαγωγή αποτελεσμάτων

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εκτέλεση έγινε εισαγωγή όλων των παραπάνω δεδομένων στο αρχείο δεδομένων του κώδικα data24.txt. Σημειώνεται ότι το συγκεκριμένο αρχείο περιέχεται στο CD, το οποίο συνοδεύει την παρούσα ΔΔ στον φάκελο με ονομασία ektelesi24. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρήθηκαν ίδιες με αυτές της εκτέλεσης 15, που παρουσιάσαμε στην παράγραφο 5.6.2. Ακολούθησε εκτέλεση του ORION-II και παραγωγή των αποτελεσμάτων.

Οι γεωγραφικές συντεταγμένες του σημείου δειγματοληψίας βρόχινου νερού, το οποίο βρισκόταν μέσα στην πόλη της Μεγαλόπολης είναι: ϕ_δ=37.3970°, λ_δ=22.1403°. Προκειμένου να αντλήσουμε από το αρχείο αποτελεσμάτων του ORION-II τον υπολογιζόμενο ρυθμό απόθεσης για το παραπάνω σημείο είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την απόσταση R του σημείου από το κέντρο υπολογισμού, καθώς και την γωνία θ που σχηματίζει η εν λόγω ευθεία με τον διεύθυνση του βορρά. Με την βοήθεια του Google Earth βρίσκουμε ότι R=5152.9 m και θ=114.08°. Στο σχήμα 6.20 παρουσιάζεται σχετική δορυφορική φωτογραφία από το Google Earth, ο οποίος περιλαμβάνει το σημείο δειγματοληψίας, τους ΑΗΣ καθώς και το κέντρο υπολογισμού.

Η διεύθυνση υπολογισμού ESE του ORION-II έχει εύρος 101.25°-123.75°. Επομένως ο ρυθμός απόθεσης, που μας ενδιαφέρει αντιστοιχεί στο σημείο, που έχει R=5152.9 m και διεύθυνση ESE. Πραγματοποιούμε εκτέλεση του ORION-II και παράγεται το αρχείο αποτελεσμάτων results24.txt, το οποίο περιέχεται στο CD, που συνοδεύει την παρούσα ΔΔ στον φάκελο ektelesi24. Από τον εν λόγω αρχείο βλέπουμε ότι υπολογιζόμενος ρυθμός απόθεσης είναι W_c:

$$W_c = 125.5 \frac{mBq}{m^2 \cdot month}$$

Σύμφωνα με τις μετρήσεις α-φασματοσκοπικής ανάλυσης του βρόχινου ύδατος στην υπόψη θέση ο ρυθμός απόθεσης ^{238}U είχε εκτιμηθεί σε W_e=679±135 mBqm^{-2}month^{-1}, όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 6.5.4.2. Βλέπουμε λοιπόν ότι ότι οι υπολογιζόμενες τιμές από τον ORION-II συμφωνούν σε τάξη μεγέθους με τις πειραματικές. Είναι όμως περίπου 5 φορές χαμηλότερες. Αυτό πιθανόν συμβαίνει διότι τα μετεωρολογικά δεδομένα, που είχαμε στην διάθεση μας δεν ήταν τα αντιπροσωπευτικότερα για το εν λόγω χρονικό διάστημα: Η βροχόπτωση λήφθηκε εξ ανάγκης από τον μετεωρολογικό σταθμό της Τρίπολης και όχι από αυτόν της Μεγαλόπολης. Παρότι οι δύο τοποθεσίες

είναι κοντά δεν είναι βέβαιο ότι τα φαινόμενα βροχόπτωσης ήταν ίδια στο εν λόγω χρονικό διάστημα.

Προκειμένου να διερευνηθεί περαιτέρω εάν η διαφορά, που παρατηρήθηκε μεταξύ των πειραματικών τιμών, και αυτών που προέκυψαν από την εκτέλεση του ORION-II, οφείλεται στην βροχόπτωση, έγινε εκτέλεση του κώδικα με υποθετικές τιμές βροχόπτωσης πολύ μεγαλύτερες από τις παραπάνω, ώστε να αυξηθεί η εναπόθεση του ^{238}U. Έτσι επιλέχθηκε ως ποσοστό του χρόνου που διήρκεσε η βροχόπτωση $\mathrm{F_p}$=0.3. Ο ρυθμός βροχόπτωσης λήφθηκε ίσος με $5\,\mathrm{mmh}^{-1}$, αφού αυτή είναι η μέγιστη τιμή, που παρέχεται στον πίνακα του Boubel et al. [18, σελ. 288]. Για την παραπάνω τιμή προσδιορίστηκε το Λ_p=$6 \times 10^{-4}\,\mathrm{sec}^{-1}$.

Από την εκτέλεση του ORION-II διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους όμοιες με την προηγούμενη εκτέλεση προέκυψε ότι ο υπολογιζόμενος ρυθμός απόθεσης ήταν $\mathrm{W_c}$:

$$W_c = 340.3 \frac{mBq}{m^2 \cdot month}$$

Το αρχείο δεδομένων data26.txt και το αρχείο αποτελεσμάτων results26.txt περιέχονται στο CD, το οποίο συνοδεύει την παρούσα ΔΔ στον φάκελο ektelesi26.

Βλέπουμε από τα παραπάνω ότι παρότι αυξήθηκε σημαντικά η βροχόπτωση στην νέα εκτέλεση δεν κατέστη δυνατόν να προσεγγιστεί η τιμή εναπόθεσης ^{238}U, που προσδιορίστηκε πειραματικά. Συνεπώς η διαφοροποίηση, η οποία παρατηρήθηκε, δεν εξηγείται πλήρως από την πιθανή διαφορά μεταξύ των πραγματικών επιπέδων βροχόπτωσης, που σημειώθηκαν την υπόψη περίοδο στην περιοχή της Μεγαλόπολης, και αυτών που εισήχθησαν στον κώδικα για τις υπόψη εκτελέσεις.

Ένας λόγος που πιθανόν εξηγεί την διαφορά της τιμής, που προέκυψε από τις μετρήσεις και της υπολογιζόμενης τιμής από τον κώδικα είναι ότι το μετεωρολογικό σενάριο κατασκευάστηκε με μηνιαίες επικρατούσες τιμές διεύθυνσης και ταχύτητας ανέμου και όχι ωριαίες τιμές. Επίσης οι τιμές ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου, που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονταν από διαφορετική χρονική περίοδο από αυτή που έγινε η δειγματοληψία. Συνεπώς εκτέλεση του κώδικα με αντιπροσωπευτικότερα μετεωρολογικά δεδομένα πιθανόν θα οδηγούσε σε σύγκλιση πειραματικής και υπολογιζόμενης τιμής του ρυθμού απόθεσης ^{238}U.

Πίνακες Κεφαλαίου

α/α	*Ημερομηνία*	*Διάρκεια δειγ/ψίας (Ημέρες)*	*Τοποθεσία*	*Απόσταση από κέντρο υπολογισμού (km)*	ϕ	λ	*Δειγματολήπτης*
1	14/02/07-20/04/07	65	Αθήνα Πολ. Ζ	-	37.9782°	23.7849°	ΕΠΤ2
2	14/02/07-20/04/07	65	Αθήνα Πολ. Ζ	-	37.9782°	23.7849°	Nilu
3	15/02/07-21/04/07	65	Πόλη Μεγαλόπολης	3.67	37.3970°	22.1403°	ΕΠΤ1
4	15/02/07-21/04/07	65	Πόλη Μεγαλόπολης	3.67	37.3970°	22.1403°	ΕΠΤ3
5	26/01/08-11/05/08	106	Μεγαλόπολη-ΑΗΣ1-2,3	0.43	37.4205°	22.1113°	ΕΠΤ4
6	26/01/08-11/05/08	106	Μεγαλόπολη-ΑΗΣ1-2,3	0.43	37.4205°	22.1113°	ΕΠΤ5

Πίνακας 6.1: Δειγματοληψίες υγρής απόθεσης στην Μεγαλόπολη Αρκαδίας και στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

α/α	*Τοποθεσία*	ϕ	λ	*Δειγματολήπτες*	*Κωδικός δείγματος*	*Αρχική μάζα (kg)*	*Τελική μάζα (kg)*
1	Αθήνα Πολ. Ζ	37.9782°	23.7849°	ΕΠΤ2	R0043	4.63	0.301
2	Αθήνα Πολ. Ζ	37.9782°	23.7849°	Nilu	R0045	0.336	0.293
3	Πόλη Μεγαλόπολης	37.3970°	22.1403°	ΕΠΤ1	R0047	5.63	0.302
4	Πόλη Μεγαλόπολης	37.3970°	22.1403°	ΕΠΤ3	R0046	6.11	0.310
5	Μεγαλόπολη-ΑΗΣ1-2,3	37.4205°	22.1113°	ΕΠΤ4	R0048	6.29	0.303
6	Μεγαλόπολη-ΑΗΣ1-2,3	37.4205°	22.1113°	ΕΠΤ5	R0049	7.72	0.306

Πίνακας 6.2: Τα δείγματα μετά το πέρας της επεξεργασίας με τους αντίστοιχους κωδικούς και τα βάρη τους

	yield	*eff*
^{238}U	0.039	0.06339551
^{210}Pb	0.04	0.06468312
^{40}K	0.107	0.01340891

Πίνακας 6.3: Τιμές του yield και του eff για τον ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Κατώτ. όριο ανίχνευσης (Bq)		
^{238}U	^{210}Pb	^{40}K
0.58	0.51	0.56

Πίνακας 6.4: Κατώτερα όρια ανίχνευσης του ^{238}U, του ^{210}Pb και του ^{40}K, στην διάταξη γ-φασματοσκοπίας του ανιχνευτή XtRa για δείγμα συσκευασμένο σε δοχείο γεωμετρίας '2'

Θέση δειγματοληψίας	*Κωδικός δείγματος*	*Όνομα αρχείου*	*Σημείο αποθήκευσης*
Μεγαλόπολη-Πόλη	R0041	R0041A	14/5.15
Αθήνα Πολ. Ζωγράφου	R0043	R0043B	11/2.85
Αθήνα Πολ. Ζωγράφου	R0045	R0045A	11/2.87
Μεγαλόπολη-Πόλη	R0046	R0046A	11/2.94
Μεγαλόπολη-Πόλη	R0047	R0047A	11/2.95
Μεγαλόπολη ΑΗΣ1-2,3	R0048	R0048C	11/2.123
Μεγαλόπολη ΑΗΣ1-2,3	R0049	R0049A	11/2.120

Πίνακας 6.5: Στοιχεία καταχώρησης των φασμάτων των δειγμάτων Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου (R0043, R0045), πόλης Μεγαλόπολης R0041, R0046, R0047 και Μεγαλόπολης πλησίον των ΑΗΣ1-2,3 (R0048, R0049) στην βάση δεδομένων του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

		Η μεταβλητή u		
Θέση δειγματοληψίας	*Δείγμα*	^{238}U	^{210}Pb	^{40}K
Αθήνα Πολ. Ζωγράφου	R0043	-0.82	-1.60	11.78
Αθήνα Πολ. Ζωγράφου	R0045	-0.55	-0.55	14.09
Μεγαλόπολη-Πόλη	R0046	-1.11	0.37	14.21
Μεγαλόπολη-Πόλη	R0047	-1.77	0.47	15.20
Μεγαλόπολη ΑΗΣ1-2,3	R0048	2.01	7.55	26.32
Μεγαλόπολη ΑΗΣ1-2,3	R0049	2.39	8.48	23.27

Πίνακας 6.6: Τιμή της μεταβλητής u για τις συγκεντρώσεις των ισοτόπων ^{238}U, του ^{210}Pb, ^{40}K στα δείγματα R0043, R0045, R0046, R0047, R0048 και R0049

	Συγκ. τελ. δείγματος ($Bqkg^{-1}$)	*Συγκ. αρχ. δειγματος* ($Bqkg^{-1}$)
^{238}U	3.4±0.2	0.164±0.007
^{210}Pb	8.7±0.3	0.43±0.01

Πίνακας 6.7: Μετρούμενες συγκεντρώσεις ^{238}U, ^{210}Pb με γ-φασματοσκοπική ανάλυση στο δείγμα R0048, το οποίο λήφθηκε στην Μεγαλόπολη πλησίον των ΑΗΣ1-2,3.

	Συγκ. τελ. δείγματος ($Bqkg^{-1}$)	*Συγκ. αρχ. δειγματος* ($Bqkg^{-1}$)
^{238}U	3.7±0.2	0.147±0.006
^{210}Pb	9.6±0.3	0.38±0.01

Πίνακας 6.8: Μετρούμενες συγκεντρώσεις ^{238}U, ^{210}Pb με γ-φασματοσκοπική ανάλυση στο δείγμα R0049, το οποίο λήφθηκε στην Μεγαλόπολη πλησίον των ΑΗΣ1-2,3.

	Συγκεντρώσεις ^{40}K ($Bqkg^{-1}$)		
Θέση δειγματοληψίας	*Κωδικός δείγματος*	*Τελικό δείγμα*	*Αρχικό δείγμα*
Αθήνα Πολ. Ζωγράφου	R0043	1.06±0.05	0.069±0.003
Αθήνα Πολ. Ζωγράφου	R0045	1.24±0.06	1.08 ±0.05
Μεγαλόπολη-Πόλη	R0046	1.79±0.09	0.091±0.004
Μεγαλόπολη-Πόλη	R0047	2.09±0.09	0.112±0.005
Μεγαλόπολη ΑΗΣ1-2,3	R0048	10.3±0.3	0.50 ±0.01
Μεγαλόπολη ΑΗΣ1-2,3	R0049	7.9 ±0.3	0.31 ±0.01

Πίνακας 6.9: Μετρούμενες συγκεντρώσεις ^{40}K με γ-φασματοσκοπική ανάλυση στα δείγματα Πολυτεχνειούπολης(R0043, R0045), πόλης Μεγαλόπολης (R0046, R0047) και Μεγαλόπολης πλησίον των ΑΗΣ1-2,3 (R0048, R0049)

Ερευνητής	*Τοποθεσία*	K^+ (μeqL^{-1})	^{40}K ($Bqkg^{-1}$)
Melidis et al. [149]	Ξάνθη	45.1	5.46×10^{-2}
Nastos et al. [130]	Αθήνα	25.4	3.7×10^{-2}
Samara et al. [162]	Θεσσαλονίκη	12.2	1.48×10^{-2}

Πίνακας 6.10: Μετρούμενες συγκεντρώσεις K^+ και ^{40}K σε δείγματα βρόχινου νερού στον ελληνικό χώρο

Θέση δειγματοληψίας	*Κωδικός δείγματος*	*Αριθμός δίσκου*	*Ημερομηνία κατασκευής*	*Όνομα φάσματος*
Αθήνα Πολ. Ζωγράφου	R0043	57	25/07/2008	0809091
Μεγαλόπολη-Πόλη	R0046	53	24/04/2008	0805061
Μεγαλόπολη-ΑΗΣ1-2,3	R0048	58	30/10/2008	0811041
Μεγαλόπολη-ΑΗΣ1-2,3	R0049	59	04/11/2008	0811101

Πίνακας 6.11: Στοιχεία των δειγμάτων βρόχινου νερού και των φασμάτων που προέκυψαν ύστερα από α-φασματοσκοπική ανάλυση

Ισότοπο	*Ειδική ραδιενέργεια* $(mBqkg^{-1})$	*Χημική απόδοση* (%)	Μηνιαία απόθεση $(mBqm^{-2}month^{-1})$
^{234}U	2.0±0.6	45	103±31
^{238}U	2.2±0.6	45	113±31

Πίνακας 6.12: Αποτελέσματα ανάλυσης του φάσματος του δίσκου 57-25/07/08 που προέρχεται από το δείγμα βρόχινου νερού στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου (R0043)

Ισότοπο	*Ειδική ραδιενέργεια* $(mBqkg^{-1})$	*Χημική απόδοση* (%)	*Μηνιαία απόθεση* $(mBqm^{-2}month^{-1})$
^{234}U	10±2	57	679±135
^{238}U	10±2	57	679±135

Πίνακας 6.13: Αποτελέσματα ανάλυσης του φάσματος του δίσκου 53-24/04/08 που προέρχεται από το δείγμα βρόχινου νερού στην πόλη της Μεγαλόπολης (R0046)

Ισότοπο	*Ειδική ραδιενέργεια* $(mBqkg^{-1})$	*Χημική απόδοση* %	*Μηνιαία απόθεση* $(mBqm^{-2}month^{-1})$
^{234}U	88±9	56%	4335±443
^{238}U	88±9	56%	4335±443

Πίνακας 6.14: Αποτελέσματα ανάλυσης του φάσματος του δίσκου 58-30/10/08 που προέρχεται από το δείγμα βρόχινου νερού R0048 που λήφθηκε στην Μεγαλόπολη πλησίον των ΑΗΣ1-2,3

Ισότοπο	*Ειδική ραδιενέργεια* $(mBqkg^{-1})$	*Χημική απόδοση* (%)	*Μηνιαία απόθεση* $(mBqm^{-2}month^{-1})$
^{234}U	91±14	45	4817±741
^{238}U	90±14	45	4764±741

Πίνακας 6.15: Αποτελέσματα ανάλυσης του φάσματος του δίσκου 59-04/11/08 που προέρχεται από το δείγμα βρόχινου νερού R0049 που λήφθηκε στην Μεγαλόπολη πλησίον των ΑΗΣ1-2,3

Θέση δειγματοληψίας	*Δείγμα*	*Ειδική ραδιενέργεια* ^{238}U $(mBqkg^{-1})$	*μηνιαία απόθεση* ^{238}U $(mBqm^{-2}month^{-1})$
Αθήνα Πολ. Ζωγράφου	R0043	1.8±0.2	93±10
Μεγαλόπολη-Πόλη	R0046	8.0±0.9	543±61
Μεγαλόπολη ΑΗΣ1-2,3	R0048	103±15	5074±739
Μεγαλόπολη ΑΗΣ1-2,3	R0049	100±16	5293±847

Πίνακας 6.16: Ειδική ραδιενέργεια ^{238}U στο βρόχινο νερό στην περιοχή της Μεγαλόπολης και στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου και υπολογιζόμενες μηνιαίες αποθέσεις, όπως μετρήθηκαν με την μέθοδο KPA

Θέση δειγματοληψίας	*Δείγμα*	*Ειδική ραδιενέργεια* ^{238}U *α-φασματοσκοπία* $(mBqkg^{-1})$	*KPA* $(mBqkg^{-1})$	*τιμή u*
Αθήνα Πολ. Ζωγράφου	R0043	2.2±0.6	1.8±0.2	0.67
Μεγαλόπολη-Πόλη	R0046	10±2	8.0±0.9	1.22
Μεγαλόπολη ΑΗΣ1-2,3	R0048	88±9	103±15	1.00
Μεγαλόπολη ΑΗΣ1-2,3	R0049	90±14	100±15	0.51

Πίνακας 6.17: Αποτελέσματα μετρήσεων των δειγμάτων R0043, R0046, R0048, R0049 με α-φασματοσκοπική ανάλυση και KPA

Είδος	*Προέλευση*	*Συγκέντρωση ουρανίου* (μgL^{-1})	*Ειδική ραδιενέργεια* ^{238}U $(mBqL^{-1})$	*αναφορά*
Νερό ωκεανών		3.3	40	[44]
Νερό ποταμών		0.015-4	0.18-49	[138]
Πόσιμο νερό	Τιμή αναφοράς	0.081	1	[194]
	Ιταλία	0.017-6.4	0.206-78.5	[93]
Μεταλλικό νερό	Βραζιλία	<0.008-7.5	<0.1-93	[66]
	Ιταλία	0.014-7.2	0.17-89	[45]
	Πολωνία	0.031-0.12	0.38-1.48	[174]
	Ουγγαρία	<0.16-7.9	<2-98	[106]
	Ιαπωνία	0.0001-0.35	0.013-4.3	[172]
Θερμές πηγές	Αίγυπτος	2.8-7.3	35-90	[99]
	Τυνησία	0.09- 6.6	1.1-82.2	[109]
Γεωτρήσεις	Ελλάδα	0.03-49	0.4-600	[215]
	Φινλανδία	12-30	150-370	[204]
	Μεξικό	15-68	190-840	[205]
	Η.Π.Α.	1.3-81	16-1003	[101]

Πίνακας 6.18: Ενδεικτικές τιμές συγκεντρώσεων ουρανίου στο υδάτινο περιβάλλον

Προέλευση	*Συγκέντρωση ουρανίου* ($\mu g L^{-1}$)	*Ειδική ραδιενέργεια* ^{238}U ($mBqL^{-1}$)	μηνιαία απόθεση ($mBqm^{-2}month^{-1}$)	*αναφορά*
Ελλάδα	-	-	1000-25700	[140]
Γαλλία	0.0005-0.005	0.006-0.062		[25]
Η.Π.Α.	0.021-0.239	0.259-2.960	-	[108]
Η.Π.Α.	0.11	1.38	-	[94]
Αυστραλία	0.040-102.4	0.5-1270	-	[123]
Ισπανία	0.887-1.815	1.1-22.5	-	[121]
Καναδάς	0.250-0.6	3.1-7.44	297.6-781.2	[188]

Πίνακας 6.19: Ενδεικτικές τιμές συγκεντρώσεων ουρανίου σε βρόχινο νερό

	Συγκέντρωση ουρανίου ($\mu g L^{-1}$)	*Ειδική ραδιενέργεια* ^{238}U ($mBqL^{-1}$)	*αναφορά*
Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας	15	25	[209]
Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής	30	370	[199]
Καναδάς	20	250	[56]
Αυστραλία	20	250	[132]

Πίνακας 6.20: Όρια ασφαλείας για την συγκέντρωση του ουρανίου σε πόσιμο νερό

Τοποθεσία	*Ημερομηνίες δειγματοληψίας*	*Κωδικός δείγματος*	*γ-φασματοσκοπία* ^{238}U $(Bqkg^{-1})$	^{210}Pb $(Bqkg^{-1})$	^{40}K $(Bqkg^{-1})$	*α-φασματοσκοπία* ^{238}U $(Bqkg^{-1})$	*ΚΡΑ* ^{238}U $(Bqkg^{-1})$
Αθήνα Πολ. Ζωγράφου	14/02/07-20/04/07	R0043	μ-α	μ-α	0.069±0.003	2.2±0.6	1.8±0.2
Αθήνα Πολ. Ζωγράφου	14/02/07-20/04/07	R0045	μ-α	μ-α	1.08±0.05	-	-
Πόλη Μεγαλόπολης	15/02/07-21/04/07	R0047	μ-α	μ-α	0.091±0.004	-	-
Πόλη Μεγαλόπολης	15/02/07-21/04/07	R0046	μ-α	μ-α	0.112±0.005	10±2	8.0±0.9
Μεγαλόπολη, ΑΗΣ1-2,3	16/01/08-11/05/08	R0048	0.164±0.007	0.43±0.01	0.5±0.01	88±9	103±15
Μεγαλόπολη, ΑΗΣ1-2,3	16/01/08-11/05/08	R0049	0.147±0.006	0.38±0.01	0.31±0.01	90±14	100±16

μ-α: Μη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση

Πίνακας 6.21: Συγκεντρώσεις φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων σύμφωνα στα δείγματα βρόχινου νερού που συλλέχθηκαν στην περιοχή της Μεγαλόπολης, στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου και αναλύθηκαν με α- γ-φασματοσκοπία και ΚΡΑ

Ποσοστά χρόνου ανά διεύθυνση και ευστάθεια						
	A	B	C	D	E	F
NW	0	0.101	0.020	0.173	0.055	0.176
ESE	0	0	0	0	0	0
E	0	0.088	0	0.185	0.080	0.123
SE	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 6.22: Ποσοστά χρόνου ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

Ενεργό ύψος (m) πλουμίου ΑΗΣ 1-2						
	A	B	C	D	E	F
NW	1162.02	1162.02	1114.47	976.91	637.48	596.67
ESE	1369.39	1369.39	1306.93	845.39	650.13	605.56
E	1219.01	1219.01	1167.35	941.50	640.96	599.12
SE	1321.97	1321.97	1262.92	865.62	647.60	603.78

Πίνακας 6.23: Ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 1-2 (από την επιφάνεια της θάλασσας) ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

Ταχύτητα ανέμου (msec^{-1}) *ΑΗΣ 1-2*						
	A	B	C	D	E	F
NW	2.43	2.43	2.65	3.08	5.61	10.22
ESE	1.89	1.89	2.07	2.40	4.38	7.97
E	2.28	2.28	2.50	2.90	5.28	9.61
SE	1.97	1.97	2.16	2.51	4.57	8.31

Πίνακας 6.24: Ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 1-2 ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

Αντίστροφη ταχύτητα ανέμου (secm^{-1}) *ΑΗΣ 1-2*						
	A	B	C	D	E	F
NW	0.41	0.41	0.38	0.32	0.18	0.10
ESE	0.53	0.53	0.48	0.42	0.23	0.13
E	0.44	0.44	0.40	0.34	0.19	0.10
SE	0.51	0.51	0.46	0.40	0.22	0.12

Πίνακας 6.25: Αντίστροφη ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 1-2 ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

Ενεργό ύψος (m) πλουμίου ΑΗΣ 3						
	A	B	C	D	E	F
NW	1277.88	1277.88	1218.25	976.91	699.34	655.36
ESE	1502.73	1502.73	1424.43	845.39	712.17	664.14
E	1339.67	1339.67	1274.91	941.50	702.87	657.78
SE	1451.31	1451.31	1377.28	865.62	709.60	662.38

Πίνακας 6.26: Ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 3 (από την επιφάνεια της θάλασσας) ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

Ταχύτητα ανέμου (msec^{-1}) *στου ΑΗΣ 3*						
	A	B	C	D	E	F
NW	2.43	2.43	2.65	3.08	5.61	10.22
ESE	1.89	1.89	2.07	2.40	4.38	7.97
E	2.28	2.28	2.50	2.90	5.28	9.61
SE	1.97	1.97	2.16	2.51	4.57	8.31

Πίνακας 6.27: Ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 3 ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

Αντίστροφη ταχύτητα ανέμου (secm^{-1}) *στου ΑΗΣ 3*						
	A	B	C	D	E	F
NW	0.41	0.41	0.38	0.32	0.18	0.10
ESE	0.53	0.53	0.48	0.42	0.23	0.13
E	0.44	0.44	0.40	0.34	0.19	0.10
SE	0.51	0.51	0.46	0.40	0.22	0.12

Πίνακας 6.28: Αντίστροφη ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 3 ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

Ενεργό ύψος (m) πλουμίου ΑΗΣ 4						
	A	B	C	D	E	F
NW	1267.88	1267.88	1208.25	966.91	689.34	645.36
ESE	1492.73	1492.73	1414.43	835.39	702.17	654.14
E	1329.67	1329.67	1264.91	931.50	692.87	647.78
SE	1441.31	1441.31	1367.28	855.62	699.60	652.38

Πίνακας 6.29: Ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 4 (από την επιφάνεια της θάλασσας) ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

Ταχύτητα ανέμου (msec^{-1}) *στον ΑΗΣ 4*						
	A	B	C	D	E	F
NW	2.43	2.43	2.65	3.08	5.61	10.22
ESE	1.89	1.89	2.07	2.40	4.38	7.97
E	2.28	2.28	2.50	2.90	5.28	9.61
SE	1.97	1.97	2.16	2.51	4.57	8.31

Πίνακας 6.30: Ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 4 ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

Αντίστροφη ταχύτητα ανέμου (secm^{-1}) *στον ΑΗΣ 4*						
	A	B	C	D	E	F
NW	0.41	0.41	0.38	0.32	0.18	0.10
ESE	0.53	0.53	0.48	0.42	0.23	0.13
E	0.44	0.44	0.40	0.34	0.19	0.10
SE	0.51	0.51	0.46	0.40	0.22	0.12

Πίνακας 6.31: Αντίστροφη ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος πλουμίου ΑΗΣ 4 ανά διεύθυνση ανέμου και ευστάθεια

Μήνας	*Ύψος βροχόπτωσης (cm)*	*Ημέρες φαινομένου*
Φεβρουάριος	0.7	4
Μάρτιος	4.5	4
Απρίλιος	1.2	3

Πίνακας 6.32: Δεδομένα βροχόπτωσης για το διάστημα 15/02/07-21/04/07 όπως αντλήθηκαν από το Weather Underground [210]

	Ρυθμός Εκπομπής ^{238}U(Bqsec^{-1})
ΑΗΣ1-2	19.38
ΑΗΣ3	23.30
ΑΗΣ4	23.30

Πίνακας 6.33: Ρυθμός εκπομπής ^{238}U από τους ΑΗΣ1-2, ΑΗΣ3 και ΑΗΣ4

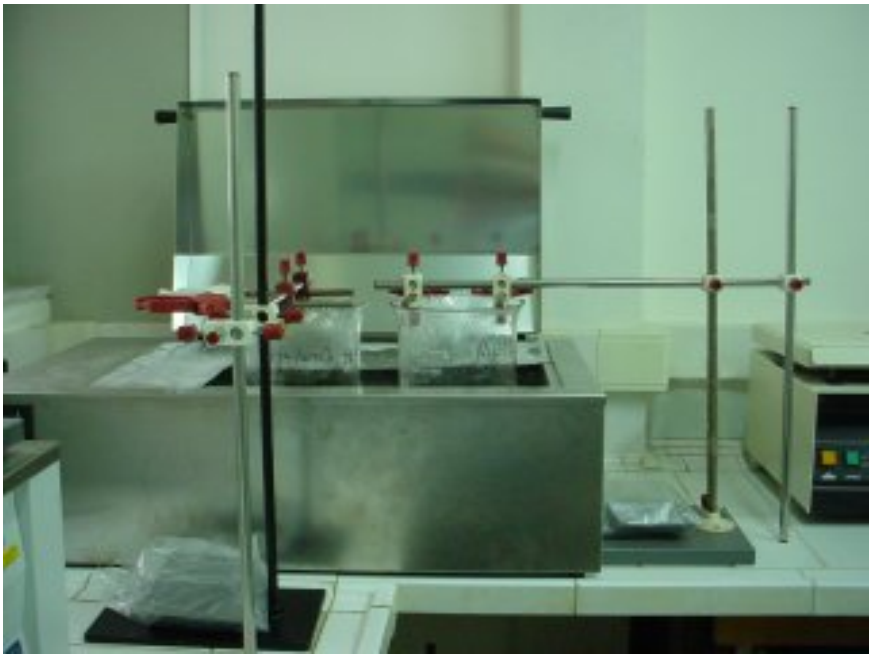
Σχήματα Κεφαλαίου

Σχήμα 6.1: Ο δειγματολήπτης εταιρείας κατασκευής Nilu.

Σχήμα 6.2: Ο δειγματολήπτης ΕΠΤ

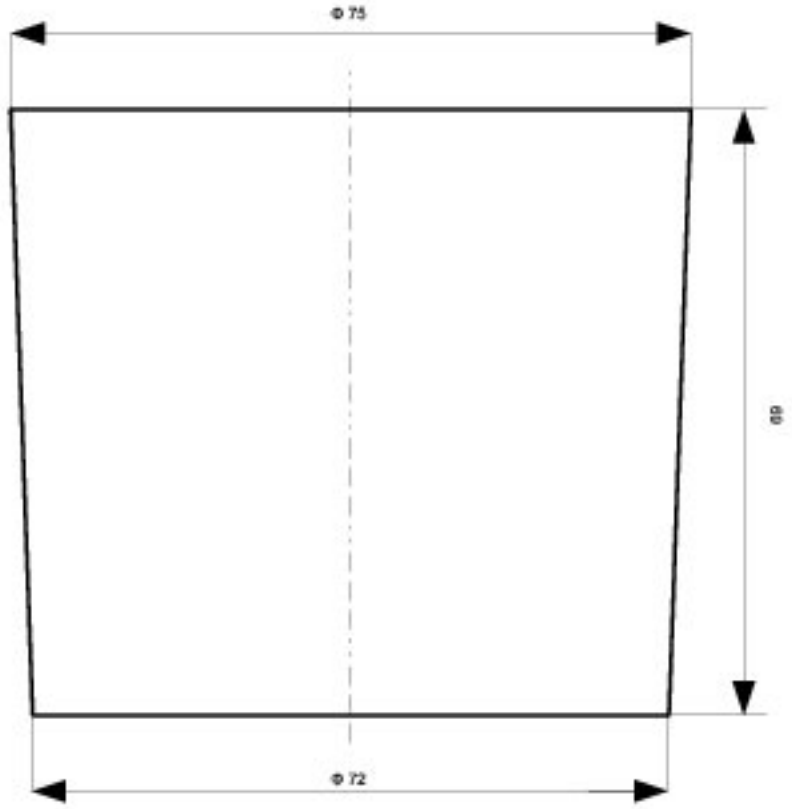
Σχήμα 6.3: Ο δειγματολήπτης ΕΠΤ2 στην οροφή του κτιρίου Κ του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Σχήμα 6.4: Η δειγματοληψία βρόχινου ύδατος στην ταράτσα διώροφης κατοικίας στην Μεγαλόπολη. Στο βάθος διακρίνονται οι ΑΗΣ1-2, 3 Μεγαλόπολης

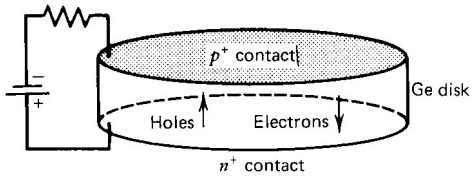


Σχήμα 6.5: Το υδατόλουτρο Memmert WB45 με τα δοχεία εξάτμισης και τις διατάξεις σταθεροποίησης.

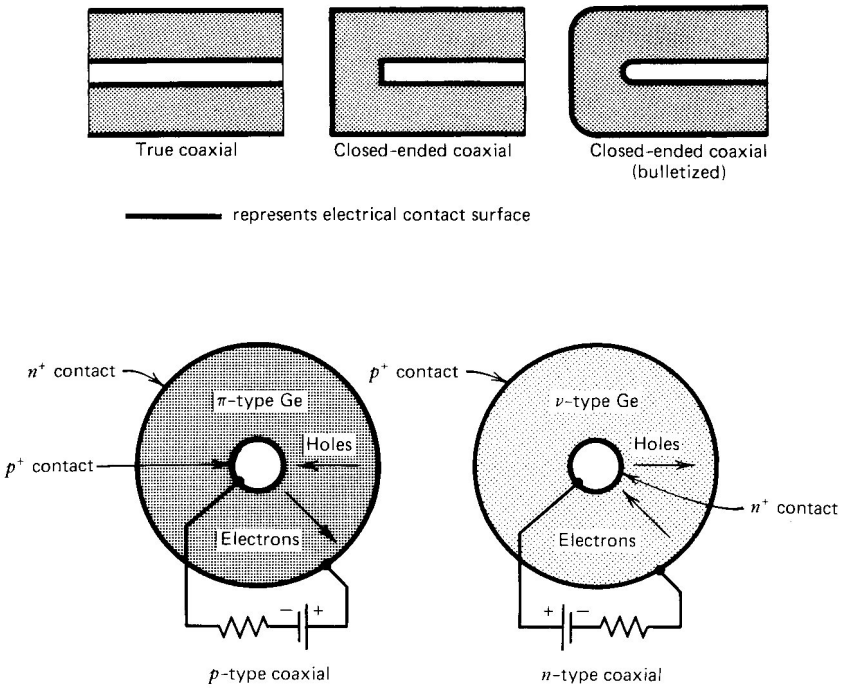
Σχήμα 6.6: Το υδατόλουτρο Nuve NB9 με το δοχείο εξάτμισης και την διάταξη σταθεροποίησης.



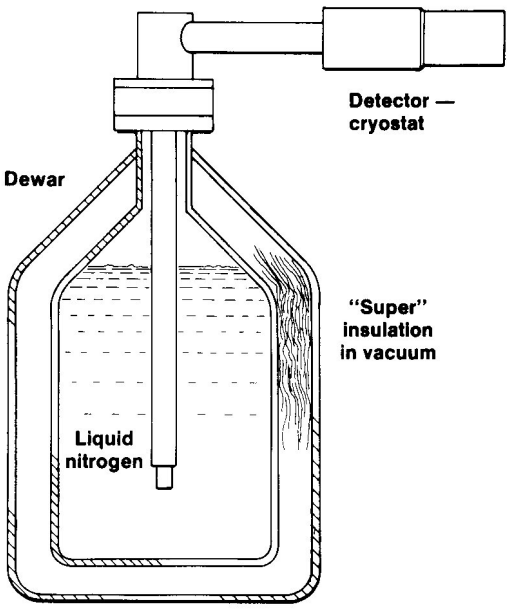
Σχήμα 6.7: Πλαστικό κυλινδρικό δοχείο όγκου $282\,\mathrm{mL}$, που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για την συσκευασία υγρών και στερεών δειγμάτων



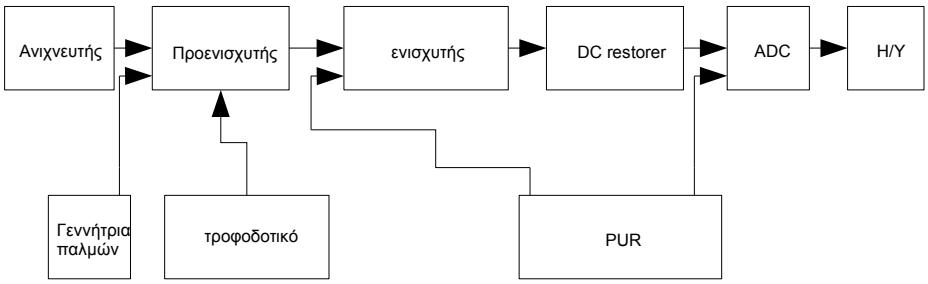
Σχήμα 6.8: Επίπεδος ανιχνευτής (*planar detector*) γερμανίου. Πηγή :[103]



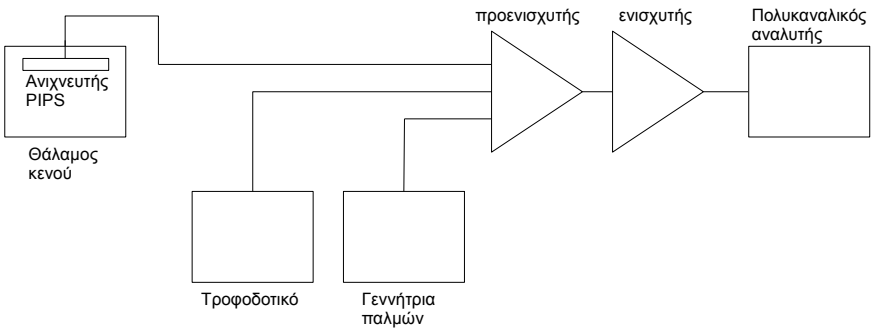
Σχήμα 6.9: Κυλινδρικός ανιχνευτής (*coaxial detector*) γερμανίου. Πηγή:[103]



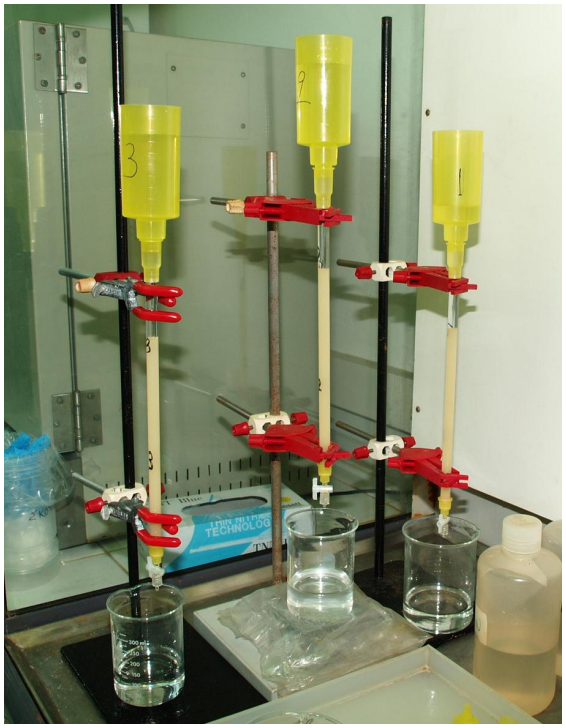
Σχήμα 6.10: Διάταξη δοχείου dewar - κρυοστάτη - ανιχνευτή. Πηγή:[103]



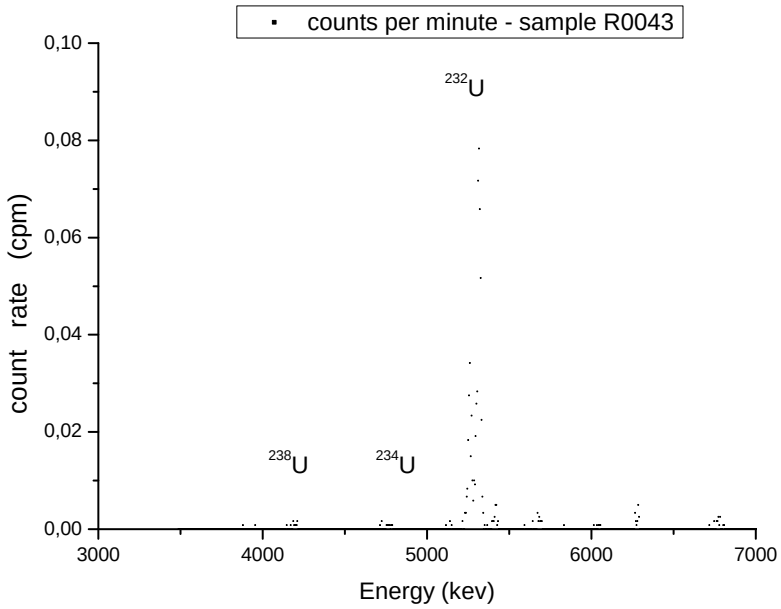
Σχήμα 6.11: Σχηματικό διάγραμμα διάταξης γ-φασματοσκοπίας



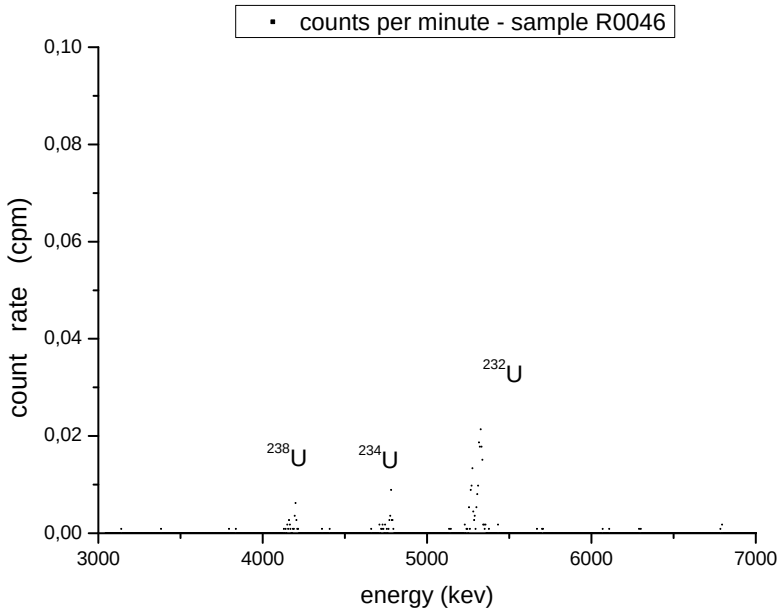
Σχήμα 6.12: Σχηματικό διάγραμμα διάταξης α-φασματοσκοπίας



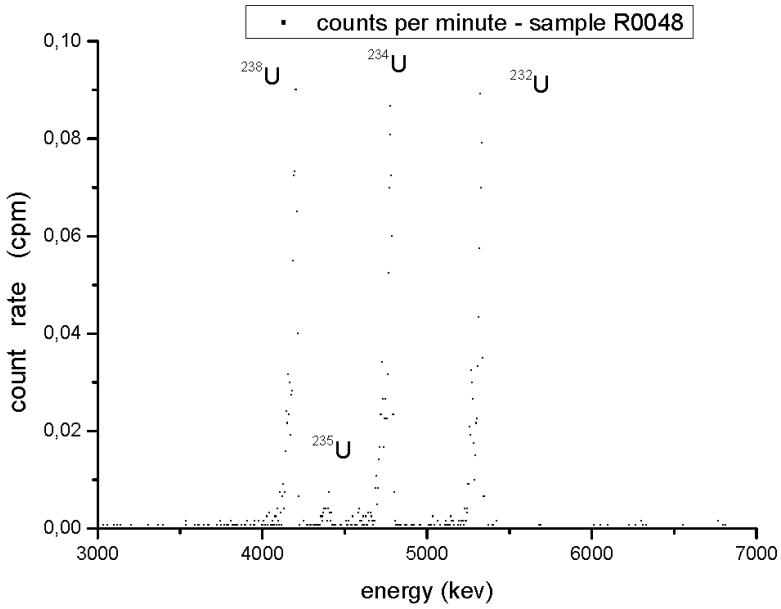
Σχήμα 6.13: Διάταξη χημικού διαχωρισμού με την μέθοδο ανταλλαγής ιόντων



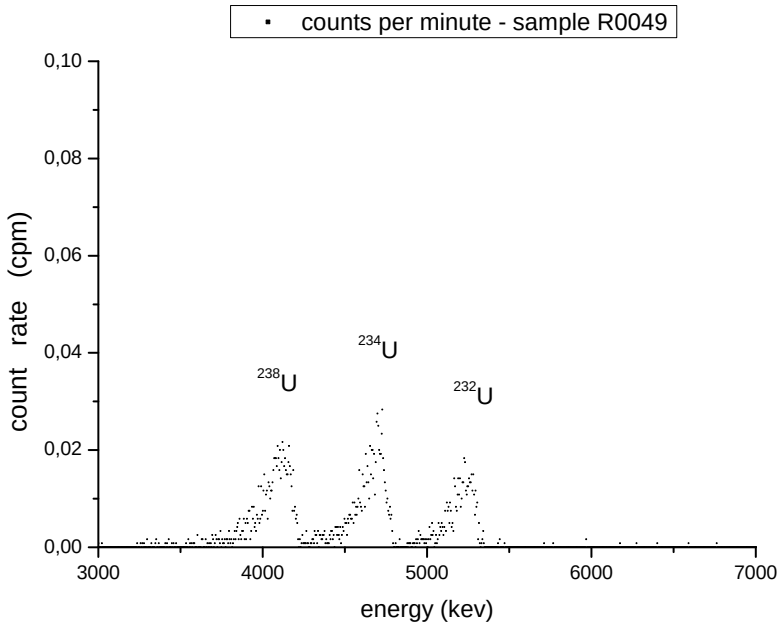
Σχήμα 6.14: α-φάσμα απόθεσης από το δείγμα βρόχινου νερού R0043 (Δίσκος 57-25/07/08)



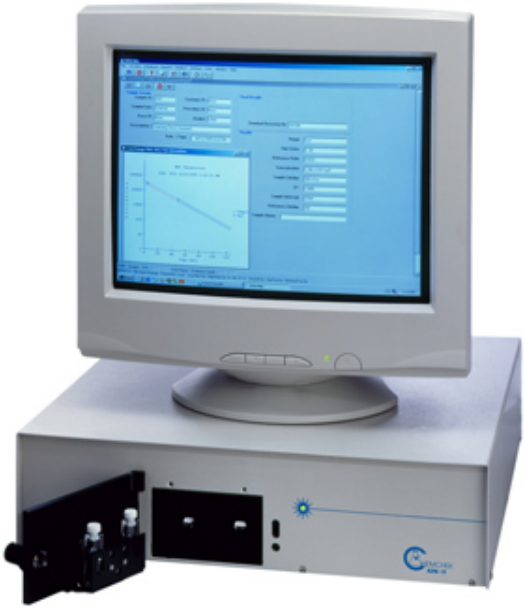
Σχήμα 6.15: α-φάσμα απόθεσης από το δείγμα βρόχινου νερού R0046 (Δίσκος 53-24/04/08)



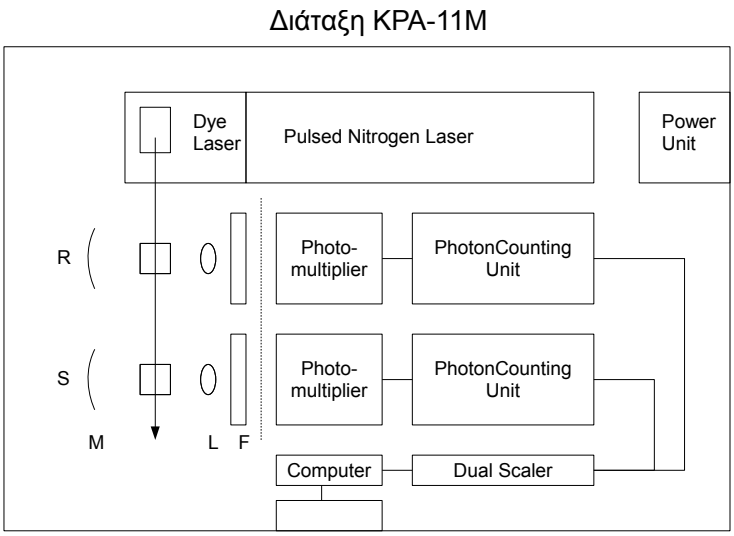
Σχήμα 6.16: α-φάσμα απόθεσης από το δείγμα βρόχινου νερού R0048 (Δίσκος 58-30/10/08)



Σχήμα 6.17: α-φάσμα απόθεσης από το δείγμα βρόχινου νερού R0049 (Δίσκος 59-04/11/08)



Σχήμα 6.18: Η μετρητική διάταξη KPA-11M της Chemcheck



Υπόμνημα:

R : Το φιαλίδιο με το δείγμα αναφοράς

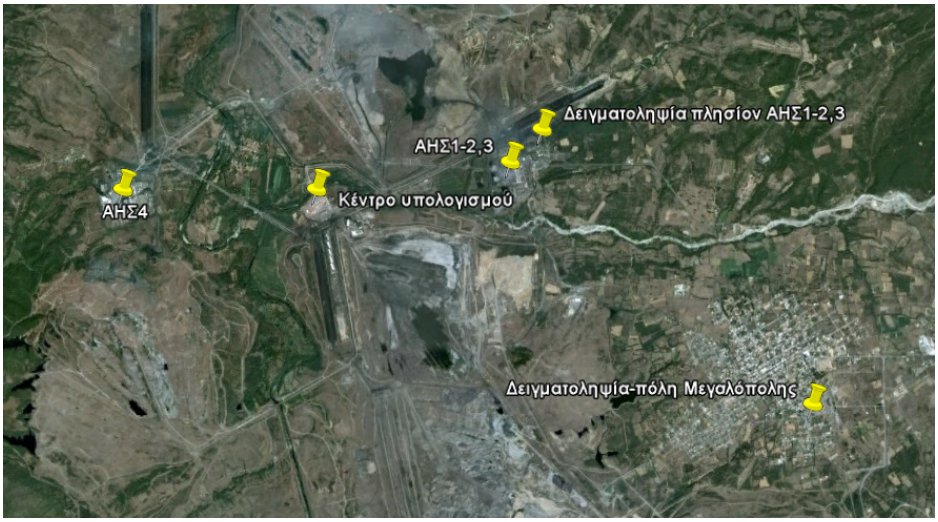
S : Το φιαλίδιο με το δείγμα μέτρησης

M : Οι καθρέπτες

L : Οι φακοί

F : Τα φίλτρα υψηλής απόδοσης

Σχήμα 6.19: Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης KPA-11M



Σχήμα 6.20: Δορυφορική φωτογραφία της περιοχής Μεγαλόπολης, η οποία περιλαμβάνει το σημείο δειγματοληψίας βρόχινου νερού στην πόλη της Μεγαλόπολης, το σημείο δειγματοληψίας κοντά στους ΑΗΣ1-2,3, τους ΑΗΣ1-2,3,4 και το κέντρο υπολογισμού

Κεφάλαιο 7

Εκροή ραδονίου και γήινου αερίου στην ατμόσφαιρα στην περιοχή της Μεγαλόπολης

7.1 Εισαγωγή

Ένας από τους ενδεχόμενους τρόπους ραδιολογικής επιβάρυνσης του περιβάλλοντος από την καύση λιγνίτη, είναι αυτός της εκροής ραδονίου από την ιπτάμενη τέφρα που διασπείρεται στο περιβάλλον. Τα φαινόμενα εκροής ραδονίου παρουσιάζουν σύνθετο χαρακτήρα, λόγω της δυναμικής εξέλιξής τους και της εξάρτησής τους από πλήθος μικροσκοπικών και μακροσκοπικών παραμέτρων. Για το λόγο αυτό η μελέτη τους προσεγγίζεται συνήθως με κατάλληλα πειράματα και προσομοιώσεις.

Το ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει διεξάγει έρευνες στο παρελθόν σε αυτή την κατεύθυνση στην περιοχή της Μεγαλόπολης: Η πρώτη έρευνα περιελάμβανε μετρήσεις εκροής ραδονίου από το έδαφος της περιοχής, μετρήσεις ραδονίου στο γήινο αέριο και μετρήσεις ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα. Οι παραπάνω μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε 25 διαφορετικά σημεία στην περιοχή της Μεγαλόπολης. Σύμφωνα με αυτή την έρευνα η συγκέντρωση του ραδονίου στο γήινο αέριο κυμαινόταν από $2\text{-}90\,\mathrm{kBqm^{-3}}$, ο ρυθμός εκροής ραδονίου από το έδαφος κυμαινόταν από $0\text{-}2166\,\mathrm{mBqm^{-2}s^{-1}}$ και η συγκέντρωση ραδονίου στον αέρα από $0\text{-}835\,\mathrm{Bqm^{-3}}$ [157] . Η δεύτερη έρευνα περιελάμβανε μετρήσεις εκροής ραδονίου, μετρήσεις ραδονίου στο γήινο αέριο και μετρήσεις ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα σε περιοχές, όπου γίνεται απόθεση της ιπτάμενης τέφρας. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν σε 6 διαφορετικά σημεία στην περιοχή των αποθέσεων. Η συγκέντρωση του ραδονίου στο γήινο αέριο κυμάνθηκε από $16\text{-}500\,\mathrm{kBqm^{-3}}$ και ο ρυθμός εκροής ραδονίου από $10\text{-}210\,\mathrm{mBqm^{-2}s^{-1}}$. Τέλος η συγκέντρωση ραδονίου στον αέρα κυμάνθηκε από $20\text{-}80\,\mathrm{Bqm^{-3}}$ [98]. Σημειώνεται ότι όλες οι μετρήσεις

του ραδονίου στον αέρα έγιναν σε απόσταση 20-50 cm από την επιφάνεια του εδάφους.

Στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου εξετάζεται η πιθανή ραδιολογική επιβάρυνση του περιβάλλοντος από την τέφρα, που έχει εναποτεθεί στην επιφάνεια του εδάφους στην γειτονιά των ΑΗΣ Μεγαλόπολης, εξαιτίας της εκπομπής της από τις καμινάδες των ΑΗΣ. Η πιθανή επιβάρυνση εκτιμήθηκε με την πραγματοποίηση μετρήσεων εκροής ραδονίου από δείγμα μεγάλου όγκου ιπτάμενης τέφρας, που παράχθηκε στους ΑΗΣ Μεγαλόπολης. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια ολοκληρωμένου οργάνου μέτρησης ραδονίου σε κατάλληλο αεροστεγή θάλαμο. Σημειώνεται ότι η μοντελοποίηση της διασποράς της ιπτάμενης τέφρας από τις καμινάδες των ΑΗΣ πραγματοποιήθηκε με κατάλληλα υπολογιστικά μοντέλα, όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 5.

Στο παρόν κεφάλαιο αρχικά γίνεται αναφορά στο ραδόνιο και στους βασικούς νόμους, που διέπουν τα φαινόμενα εκροής του από την ύλη. Πραγματοποιείται επίσης ανασκόπηση των μετρήσεων εκροής ραδονίου από το έδαφος και συγκέντρωσης ραδονίου στο γήινο αέριο, που πραγματοποίησε το ΕΠΤ-ΕΜΠ στην περιοχή της Μεγαλόπολης τα έτη 1997-1998. Στη συνέχεια περιγράφονται τα πειράματα, που πραγματοποιήθηκαν για την μέτρηση του ρυθμού εκροής ραδονίου από ιπτάμενες τέφρες. Για τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε δείγμα τέφρας μεγάλου όγκου από τους ΑΗΣ της Μεγαλόπολης, για την ανάλυση του οποίου αναπτύχθηκε εξειδικευμένη μεθοδολογία. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων εξετάστηκαν σε σχέση με παρελθούσες μετρήσεις του ΕΠΤ-ΕΜΠ στην περιοχή όσο και με την διεθνή βιβλιογραφία.

7.2 Το ραδόνιο

Το ραδόνιο Rn είναι ένα ευγενές αέριο, δύο α-ραδιενεργά ισότοπα του οποίου απαντώνται στη φύση:

- Το ^{222}Rn, με χρόνο ημιζωής 3.82 d, θυγατρικό του ^{226}Ra.
- Το ^{220}Rn, με χρόνο ημιζωής 55 s, θυγατρικό του ^{224}Ra.

Οι πατρικοί πυρήνες των ισοτόπων του ραδονίου περιέχονται στα πετρώματα και στο έδαφος, όπου διασπώνται συνεχώς, παράγοντας ραδόνιο. Μετά την δημιουργία τους, τα άτομα του ραδονίου είναι ελεύθερα να κινηθούν μέσα στο υλικό, καθώς το ραδόνιο ως ευγενές αέριο δεν συμμετέχει σε χημικούς δεσμούς. Συνέπεια του γεγονότος αυτού είναι το ραδόνιο να μετακινείται μέσα στο υλικό στο οποίο 'γεννήθηκε' (στο έδαφος για την περίπτωση μας), κυρίως με το μηχανισμό της μοριακής διάχυσης. Ο χρόνος ημιζωής των ισοτόπων του ραδονίου επαρκεί, ώστε σημαντική ποσότητά τους να μπορεί να μετακινηθεί προς την επιφάνεια του εδάφους και να εκρεύσει προς την ατμόσφαιρα.

Από την άποψη αυτή, η ραδιοβιολογική συμβολή του ^{220}Rn είναι πολύ μικρότερη εκείνης του ^{222}Rn λόγω του σύντομου χρόνου ημιζωής του. Για το λόγο αυτό, στα επόμενα θα μας απασχολήσει μόνο το ^{222}Rn, το οποίο θα αναφέρουμε απλά ως ραδόνιο.

Αντίστοιχα φαινόμενα εκροής ραδονίου παρατηρούνται και από οικοδοομικά υλικά, ιδιαίτερα όταν αυτά περιέχουν αυξημένες συγκεντρώσεις ραδίου. Οι υψηλές συγκεντρώσεις αυτές μπορεί να οφείλονται σε φυσικά αίτια, όπως συμβαίνει σε μεμονωμένες περιπτώσεις λόγω της τοπικής γεωλογίας. Υψηλές συγκεντρώσεις ραδίου προκαλούνται όμως και από τη χρήση ανθρωπογενών υλικών, όπως για παράδειγμα η ιπτάμενη τέφρα η οποία χρησιμοποιείται ως πρόσθετο κατά την παραγωγή τσιμέντου.

Μετά την εκροή του από το έδαφος, το ραδόνιο στην ατμόσφαιρα διασπάται συνεχώς στα θυγατρικά του. Τα θυγατρικά αυτα, τα οποία είναι όλα στερεά, κινούνται στην ατμόσφαιρα είτε ελεύθερα ως πυρήνες (*unattached*), αλλά και σχηματίζοντας συσσωματώσεις με άλλα αιωρούμενα σωματίδια (*attached*). Τόσο το ραδόνιο, όσο και τα αιωρούμενα στην ατμόσφαιρα θυγατρικά του, προκαλούν ραδιολογική επιβάρυνση στον άνθρωπο μέσω της απ' ευθείας εξωτερικής ακτινοβόλησης. Παράλληλα όμως, λόγω του μικρού μεγέθους των ατμοσφαιρικών αιωρημάτων, μπορούν να αποτεθούν στην αναπνευστική οδό των έμβιων όντων προκαλώντας εσωτερική ακτινοβόληση[133]. Η επιβάρυνση αυτή μπορεί να είναι σημαντική, καθώς όπως φαίνεται από το σχήμα 2.2, τα θυγατρικά του ραδονίου έχουν χρόνους ημιζωής μικρότερους από 30min. Έτσι εάν εισέλθουν μέσα στον πνεύμονα είναι δυνατόν να διασπαστούν σε ^{210}Pb πριν οι μηχανισμοί απομάκρυνσης του πνεύμονα τα αποβάλουν [133].

Από τις παρατηρήσεις αυτές είναι προφανές ότι ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του ραδονίου στην ατμόσφαιρα έχει ιδιαίτερη ραδιολογική σημασία. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί τόσο ενεργητικοί όσο και παθητικοί ανιχνευτές. Οι ενεργητικοί ανιχνευτές μπορεί να είναι στερεάς κατάστασης (*Solid state detectors*), ανιχνευτές θαλάμου ιονισμού (*Pulse ionization chambers*) ή ανιχνευτές θαλάμου σπινθιρισμού (*scintilation cell detectors*). Στους παθητικούς ανιχνευτές συγκαταλέγονται οι ανιχνευτές ιχνών (*etched track detectors*) και οι ανιχνευτές ενεργού άνθρακα (*carcoal canisters detectors*). Περισσότερα στοιχεία για τις τεχνικές ανίχνευσης του ραδονίου περιέχονται στη βιβλιογραφία ([47], [222], [230], [231]).

7.3 Το ραδόνιο στο υπέδαφος

7.3.1 Μεθοδολογίες μέτρησης

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, το ραδόνιο παράγεται συνεχώς από τους πυρήνες του ραδίου που βρίσκονται στο υπέδαφος. Οι παραγόμενοι πυρήνες του ραδονίου μπορούν να εγκαταλείψουν τη μάζα του υλικού μέσα στο οποίο παράγονται και να

εισέλθουν στο γήινο αέριο, το οποίο μεταφέρεται και διαχέεται δια μέσου των πόρων του υπεδάφους. Η συγκέντρωση και η συμπεριφορά του ραδονίου στο γήινο αέριο παίζει καθοριστικό ρόλο για την εκροή του από την επιφάνεια του εδάφους προς την ατμόσφαιρα.

Προκειμένου να αποφανθούμε για την συγκέντρωση του ραδονίου στο γήινο αέριο, έχουν αναπτυχθεί κατάλληλες ενεργητικές τεχνικές δειγματοληψίας. Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ εφαρμόζονται δύο παραπλήσιες τεχνικές, με την βοήθεια των οποίων μπορεί να πραγματοποιηθεί η εν λόγω μέτρηση. Οι δύο αυτές τεχνικές βασίζονται στην δημιουργία μιας κυλινδρικής οπή στο έδαφος, μέσα στην οποία τοποθετείται ένας λεπτός σωλήνα δειγματοληψίας. Μέσω του σωλήνα, με την βοήθεια κατάλληλης αντλίας, το γήινο αέριο οδηγείται σε ενεργητικό όργανο μέτρησης όπου προσδιορίζεται η συγκέντρωση του ραδονίου. Το βάθος της δειγματοληψίας μπορεί να κυμαίνεται από μερικές δεκάδες εκατοστά έως μερικά μέτρα ανάλογα με τον σκοπό της μέτρησης. Λεπτομερής περιγραφή της μεθόδου, όπως εφαρμόζεται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, υπάρχει στην βιβλιογραφία [222].

7.3.2 Μετρήσεις ραδονίου στο γήινο αέριο στην περιοχή της Μεγαλόπολης από το ΕΠΤ-ΕΜΠ

Το ΕΠΤ-ΕΜΠ πραγματοποίησε στο παρελθόν μετρήσεις ραδονίου στο γήινο αέριο στην περιοχή της Μεγαλόπολης σε βάθος $80\,\mathrm{cm}$ από την επιφάνεια, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 7.1. Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν και για την παραγωγή σχετικού χάρτη στο [157]. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ολοκληρωμένος ανιχνευτής στερεάς κατάστασης SARAD RM2000 συνδεδεμένος με κατάλληλο δειγματολήπτη γήινου αερίου της εταιρείας SARAD. Επίσης το ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει πραγματοποιήσει μετρήσεις ραδονίου στο γήινο αέριο στην περιοχή του Λαυρίου Αττικής και το εύρος των μετρούμενων τιμών κυμάνθηκε από 0.2-$2.8\,\mathrm{kBqm^{-3}}$ [157].

Ακολούθως παρουσιάζονται στον πίνακα 7.2 μετρήσεις ραδονίου στο γήινο αέριο, που βρέθηκαν στην βιβλιογραφία. Οι τιμές αυτές έχουν μεγάλο εύρος και ορισμένες από αυτές είναι σχετικά υψηλότερες από αυτές που μετρήθηκαν στην Μεγαλόπολη. Το μεγάλο εύρος των μετρήσεων οφείλεται κυρίως στην διαφορετική σύνθεση του εδάφους αλλά και στις διαφορετικές μεθόδους που εφαρμόστηκαν.

7.4 Εκροή ραδονίου από το έδαφος

7.4.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα το ραδόνιο, το οποίο παράγεται μέσα στο έδαφος από τους διασπώμενους πυρήνες ραδίου, εκρέει μετά από κάποιο χρονικό διάστημα στην ατμόσφαιρα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται *εκροή ραδονίου* και εξαρτάται από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες όπως η σύνθεση, η δομή και η υγρασία του εδάφους [184], τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας και άλλα.

Ως *ρυθμός εκροής ραδονίου* για ένα υλικό ή για μια επιφάνεια ορίζεται η ενεργότητα ραδονίου, που απελευθερώνεται προς την ατμόσφαιρα ανά μονάδα χρόνου. Ο ρυθμός αυτός μπορεί να αναφέρεται ανά μονάδα επιφάνειας ή ανά μονάδα μάζας. Επειδή ο ρυθμός εκροής εξαρτάται από την συγκέντρωση του ραδονίου στον περιβάλλοντα χώρο έχει νόημα να αναφέρεται μόνο ο *ρυθμός ελεύθερης εκροής (free exhalation rate)*, ο οποίος αντιστοιχεί στην περίπτωση μηδενικής συγκέντρωσης ραδονίου στον περιβάλλοντα χώρο.

7.4.2 Μέθοδοι μέτρησης του ρυθμού εκροής

Οι μέθοδοι μέτρησης του ρυθμού εκροής μπορούν να διακριθούν σε δύο γενικές κατηγορίες: τις μεθόδους ανοικτού θαλάμου και τις μεθόδους κλειστού θαλάμου. Οι μέθοδοι ανοικτού θαλάμου βασίζονται στην συνεχή απομάκρυνση του παραγόμενου ραδονίου από ρεύμα αερίου και δεν θα μας απασχολήσουν στα επόμενα. Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις μεθόδους ανοικτού θαλάμου ο ενδιαφερόμενος μπορεί να ανατρέξει στη βιβλιογραφία [147]. Στις μεθόδους κλειστού θαλάμου το ραδόνιο συλλέγεται στο εσωτερικό κατάλληλου στεγανού θαλάμου, ο αέρας του οποίου παρακολουθείται με κατάλληλο όργανο [163]. Η πλήρης λύση αυτού του προβλήματος απαιτεί την εφαρμογή της εξίσωσης διάχυσης. Υπό κατάλληλες προϋποθέσεις προκύπτει ότι η συγκέντρωση του ραδονίου $\mathrm{C(t)}$ σε συνάρτηση με τον χρόνο στο εσωτερικό του κλειστού θαλάμου δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση [222]:

$$C(t) = \frac{R}{V\lambda'} + (C_o - \frac{R}{V\lambda'})exp(-\lambda' t) \tag{7.1}$$

όπου:

$\mathrm{C_o}$ ($\mathrm{Bqm^{-3}}$): Η συγκέντρωση του ραδονίου κατά την έναρξη της μέτρησης στο εσωτερικό του θαλάμου.

R ($\mathrm{Bqs^{-1}}$): Ο ο ρυθμός εκροής ραδονίου στον θάλαμο.

V (m): Ο όγκος του θαλάμου.

t (s): Ο χρόνος που διαρκεί η μέτρηση.

λ' ($\mathrm{s^{-1}}$): Σταθερά, η οποία περιλαμβάνει την σταθερά διάσπασης του ραδονίου, την

σταθερά του ρυθμού διαρροής του θαλάμου και τα φαινόμενα ανάστροφης διάχυσης. Για περισσότερα σχετικά με το πώς προκύπτει η παραπάνω εξίσωση ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στη βιβλιογραφία [222].

Ο προσδιορισμός του ρυθμού εκροής μπορεί να γίνει είτε με συνεχή μέτρηση της συγκέντρωσης μέσα στον αεροστεγή θάλαμο, οπότε γίνεται προσαρμογή ελαχίστων τετραγώνων στην καμπύλη, είτε με μέτρηση της τελικής συγκέντρωσης ισορροπίας, η οποία δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$C(t) = \frac{R}{V\lambda'} \tag{7.2}$$

Για την πραγματοποίηση μετρήσεων μικρής διάρκειας, η εκθετική καμπύλη παραγωγής του ραδονίου μπορεί να προσεγγιστεί από την απλούστερη

$$C(t) = C_o + \frac{R}{V}t \tag{7.3}$$

οπότε ο ρυθμός εκροής προκύπτει από γραμμική προσαρμογή.

Ένα άλλο πολύ χρήσιμο μέγεθος, που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της εκροής του ραδονίου από ένα υλικό, είναι το εκρεόμενο κλάσμα, το οποίο ορίζεται ως το κλάσμα της ενεργότητας ^{222}Rn, που εκρέεται από το υλικό, προς την ενεργότητα του ^{222}Rn, που παράγεται στο εσωτερικό του υλικού από το ^{226}Ra, το οποίο περιέχει [231]. Αν E ο ρυθμός εκροής ανά μονάδα μάζας και C η ενεργότητα του ^{226}Ra ανά μονάδα μάζας, το εκρεόμενο κλάσμα f δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$f = \frac{E}{\lambda_{Rn} \cdot C} \tag{7.4}$$

Όπου λ_{Rn}=$7.65 \times 10^{-3}\,\mathrm{h}^{-1}$ η σταθερά διάσπασης του ραδονίου. Προϋπόθεση για την εφαρμογή της εν λόγω εξίσωσης είναι το ότι το πάχος του δείγματος είναι μικρό συγκρινόμενο με το φαινόμενο μήκος διάχυσης στο υλικό.

Ο ρυθμός εκροής ραδονίου από το έδαφος μπορεί να μετρηθεί με διάφορους τρόπους. Ακολούθως θα περιγράψουμε με συντομία την διάταξη, που έχει αναπτυχθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Αρχικά τοποθετείται στην επιφάνεια του εδάφους κυλινδρικό μεταλλικό δοχείο όγκου $0.045\,\mathrm{m}^3$. Η στεγανότητα της διεπαφής του δοχείου συγκέντρωσης με το έδαφος εξασφαλίζεται με χρήση υγρής μαρμαρόσκονης. Το δοχείο συγκέντρωσης συνδέεται με εύκαμπτους σωλήνες με ολοκληρωμένο όργανο μέτρησης συγκέντρωσης ραδονίου με τέτοιο τρόπο, ώστε να σχηματίζεται κλειστό κύκλωμα μεταξύ του δοχείου συγκέντρωσης και του οργάνου μέτρησης, ενώ η κυκλοφορία του αέρα στο κύκλωμα πραγματοποιείται μέσω της εσωτερικής αντλίας του οργάνου.

7.4.3 Μετρήσεις εκροής ραδονίου στην περιοχή της Μεγαλόπολης από το ΕΠΤ-ΕΜΠ

Το ΕΠΤ-ΕΜΠ πραγματοποίησε στο παρελθόν μετρήσεις εκροής ραδονίου από το έδαφος στην περιοχή της Μεγαλόπολης, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 7.3 και χρησιμοποιήθηκαν επίσης για την κατασκευή σχετικών χαρτών στο [157]. Σημειώνεται ότι το σφάλμα είναι της τάξης μεγέθους της κάθε μέτρησης. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ολοκληρωμένος ανιχνευτής στερεάς κατάστασης SARAD RM2000 συνδεδεμένος με κατάλληλο μεταλλικό δοχείο. Περισσότερες λεπτομέρειες μπορούν να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία [97].

Οι τιμές που μετρήθηκαν στην περιοχή της Μεγαλόπολης είναι αρκετά υψηλές σε σύγκριση με άλλες μετρήσεις εκροής ραδονίου από το έδαφος, που βρέθηκαν στην βιβλιογραφία και παρατίθενται στον πίνακα 7.4.

7.5 Πειράματα, που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της ΔΔ

7.5.1 Γενικά

Όπως είναι γνωστό η καύση του λιγνίτη προκαλεί στο περιβάλλον επιβάρυνση λόγω της εκπομπής ιπτάμενης τέφρας. Από την τελευταία εκρέει το ραδόνιο, το οποίο είναι μεγάλης ραδιοβιολογικής σημασίας. Από τις μετρήσεις, που πραγματοποίησε το ΕΠΤ-ΕΜΠ στο παρελθόν στην λεκάνη της Μεγαλόπολης διαπιστώθηκε ότι υπάρχει σημαντική εκροή ραδονίου από το έδαφος στην υπόψη περιοχή [157]. Προκειμένου να διακριβωθεί η συνεισφορά της εκπεμπόμενης τέφρας, που εναποτίθεται στο έδαφος, στην εκροή ραδονίου πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσης ΔΔ μετρήσεις σε θάλαμο του ρυθμού εκροής ραδονίου από ιπτάμενη τέφρα, η οποία είχε παραχθεί στον ΑΗΣ Α΄ Μεγαλόπολης, όπως αναλυτικά παρουσιάζεται στην παράγραφο 7.5.4. Σημειώνεται ότι με τον όρο ΑΗΣ Α΄ Μεγαλόπολης αναφέρονται οι σταθμοί ΑΗΣ1-2,3.

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ο ανιχνευτής AlphaGuard PQ2000 Pro της εταιρείας Genitron, ο οποίος είναι ένας ενεργητικός ολοκληρωμένος ανιχνευτής ραδονίου και η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στον θάλαμο ιονισμού (Για περισσότερα βλ. [222] και [231]). Προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι παραπάνω μετρήσεις έγινε αρχικά βαθμονόμηση του οργάνου, η οποία περιγράφεται στην παράγραφο 7.5.2.

7.5.2 Βαθμονόμηση ανιχνευτή AlphaGuard

7.5.2.1 Διάταξη βαθμονόμησης

Για την βαθμονόμηση του ανιχνευτή χρησιμοποιήθηκε ο θάλαμος ραδονίου MRH (Mini Radon House), που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Ο θάλαμος έχει διαστάσεις 1.2m(μήκος), 1m(πλάτος) και 1.55m(ύψος), ενώ ο όγκος του είναι 1.86m^3. Είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο ατσάλι και είναι εφοδιασμένος με διατάξεις καταγραφής και ελέγχου των περιβαλλοντικών συνθηκών.

Για την πραγματοποίηση της βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκε η πιστοποιημένη πηγή CMI, που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Είναι τύπου RF-200, έχει συνολική ενεργότητα $274.4\,\mathrm{kBq}$ και είναι εγκατεστημένη εκτός του θαλάμου. Διαθέτει κατάλληλη θωράκιση και η κυκλοφορία μεταξύ της πηγής και του θαλάμου εξασφαλίζεται με κατάλληλο κύκλωμα και αντλία αέρα. Η συνδεσμολογία της διάταξης βαθμονόμησης παρουσιάζεται στο σχήμα 7.1. Για την πραγματοποίηση της βαθμονόμησης ο ανιχνευτής τοποθετείται στο εσωτερικό του θαλάμου, ο οποίος στην συνέχεια κλείνει ερμητικά.

7.5.2.2 Πείραμα βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση του ανιχνευτή πραγματοποιήθηκε το διάστημα 17 - 24 Φεβρουαρίου 2009. Για την εκτέλεση της βαθμονόμησης ακολουθήσαμε τα παρακάτω βήματα:

1. Τοποθετήθηκε ο ανιχνευτής στο εσωτερικό του θαλάμου και ρυθμίστηκε ο κύκλος ολοκλήρωσης στην 1hr.

2. Σφραγίστηκε ο θάλαμος στις 17 16.00 Φεβρουαρίου 2009.

3. Καθαρίστηκε η πηγή CMI από τις 17 15:55 Φεβρουαρίου 2009 έως 17 17:00 Φεβρουαρίου 2009.

4. Στις 17 17:20 Φεβρουαρίου 2009 και ενώ η ανάπτυξη του ραδονίου συνεχιζόταν ξεκίνησε η κυκλοφορία μεταξύ της πηγής και του θαλάμου.

5. Η κυκλοφορία τερματίστηκε στις 17 18:00 Φεβρουαρίου 2009.

6. Στις 24 17:05 Φεβρουαρίου 2009 ξεκίνησε ο καθαρισμός του θαλάμου με ατμοσφαιρικό αέρα.

7. Ο θάλαμος άνοιξε στις 24 17:55 Φεβρουαρίου 2009.

Μετά το πέρας του πειράματος ο ανιχνευτής AlphaGuard συνδέθηκε με Η/Υ για την ανάγνωση των δεδομένων. Οι μετρήσεις, που καταγράφηκαν στο διάστημα 17 17:20 Φεβρουαρίου - 24 17:00 Φεβρουαρίου 2009, παρουσιάζονται στο σχήμα 7.2. Στην συνέχεια έγινε προσαρμογή των πειραματικών σημείων σε εκθετική καμπύλη της

μορφής:

$$A(t) = A_o \cdot exp(-t/b)$$

με A_o=1.234±0.008 $\mathrm{kBqm^{-3}}$, b=132±1hr και συντελεστή πολλαπλής συσχέτισης R^2=0.985.
Γνωρίζουμε επίσης ότι:

$$\frac{1}{b} = \frac{ln2}{T_{1/2}}$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι υπολογιζόμενος από την προσαρμογή χρόνος ημιζωής του ραδονίου είναι $\mathrm{T_{1/2}}$=3.81±0.03 d, ενώ η φυσική τιμή είναι 3.8 d. Από αυτό το αποτέλεσμα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο θάλαμος δεν παρουσιάζει μετρήσιμη διαρροή.

Από την προσαρμογή προκύπτει ότι η αρχική ραδιενέργεια στο θάλαμο είναι $\mathrm{A_o}$=1.234 ±0.008 $\mathrm{kBqm^{-3}}$. Η συνολική ραδιενέργεια, η οποία αναπτύχθηκε στον θάλαμο, στο διάστημα από την λήξη του καθαρισμού έως την λήξη της κυκλοφορίας υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση και είναι:

$$R = R_o(1 - exp(-\lambda t)) = 2.066kBq$$

Ο όγκος του θαλάμου είναι V=1.86 $\mathrm{m^3}$. Συνεπώς η συγκέντρωση στο εσωτερικό του θαλάμου θα είναι:

$$A_\theta = \frac{R}{V} = 1.11kBq/m^{-3}$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι η συγκέντρωση $\mathrm{A_o}$, που μετράται από το όργανο, διαφέρει από την αναμενόμενη A_θ. Έτσι υπολογίζουμε τον συντελεστή διόρθωσης, τον οποίο θα εφαρμόζουμε σε όλες τις μετρήσεις, που θα ακολουθήσουν:

$$\alpha = \frac{A_\theta}{A_o} = 0.90 \pm 0.05$$

Το σφάλμα του συντελεστή διόρθωσης υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\left(\frac{\sigma_\alpha}{\alpha}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_{A_o}}{A_o}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{A_\theta}}{A_\theta}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2 = 0.00273$$

όπου:
$\frac{\sigma_V}{V}$=5% όπως εκτιμάται.
$\frac{\sigma_{A_\theta}}{A_\theta}$=1.5% όπως δίνεται από το πιστοποιητικό της πηγής στο παράρτημα Ε΄.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα προκύπτει ότι η πραγματική συγκέντρωση, που αναπτύσσεται στον θάλαμό με την μέθοδο αυτή είναι το 90% της συγκέντρωσης, που μετράται από το όργανο. Αυτό είναι συμβατό με προηγούμενες βαθμονομήσεις του

ανιχνευτή στην ίδια διάταξη του ΕΠΤ-ΕΜΠ με τον ίδιο τρόπο [224].

7.5.3 Δειγματοληψία ιπτάμενης τέφρας από τον ΑΗΣ Α΄ Μεγαλόπολης και μετρήσεις φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων στην εν λόγω τέφρα με την μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας

Η ιπτάμενη τέφρα συλλέχθηκε στις 29/01/2009 από το σημείο διάθεσης του ΑΗΣ Α΄ της Μεγαλόπολης από το προσωπικό του σταθμού. Στάλθηκε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ σε πέντε διαφορετικά πλαστικά δοχεία, τα οποία αριθμήθηκαν από το 1 έως το 5. Γι΄ αυτό αποφασίστηκε να συσκευαστούν πέντε διαφορετικά δείγματα. Η αντιστοίχηση δοχείου δείγματος φαίνεται στον πίνακα 7.5. Η συσκευασία των δειγμάτων έγινε σε τυποποιημένα πλαστικά δοχεία, τα οποία περιγράφτηκαν στην παράγραφο 6.3. Μετά την συσκευασία τα δοχεία επαλείφθηκαν με βερνίκι, ώστε να επιτευχθεί αεροστεγή σφράγιση τους και να ελαχιστοποιηθεί η διαφυγή του παραγόμενου ραδονίου. Οι μάζες των δειγμάτων μετά την συσκευασία παρουσιάζονται στον πίνακα 7.5.

Προκειμένου να επιτευχθεί ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ του ^{226}Ra και του ^{222}Rn τα δείγματα αποθηκεύτηκαν για χρονικό διάστημα ενός μήνα. Στην συνέχεια εισήχθησαν στον ανιχνευτή γερμανίου-λιθίου (GeLi), που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ και μετρήθηκαν για $70\,000\,\mathrm{sec}$ το καθένα. Η ανάλυση των φασμάτων έγινε με τον κώδικα SPUNAL, ο οποίος έχει αναπτυχθεί εξ ολοκλήρου στο ΕΠΤ-ΕΜΠ [216]. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 7.6. Παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις ^{226}Ra είναι αρκετά μικρότερες από αυτές, που έχουν μετρηθεί από το ΕΠΤ-ΕΜΠ στην τέφρα των ΑΗΣ Μεγαλόπολης στο παρελθόν, και κυμαίνονταν περί τα $900\,\mathrm{BqKg^{-1}}$ [97], [173]. Σημειώνεται επίσης ότι στις εκτελέσεις του ORION-II και του GENII η τιμή της συγκέντρωσης του ^{226}Ra λήφθηκε ίση με $904\,\mathrm{Bqkg^{-1}}$ σύμφωνα με την πολύ διεξοδική έρευνα, που διεξήγαγε το ΕΠΤ-ΕΜΠ στην ιπτάμενη τέφρα του ΑΗΣ4 [97].

Λόγω των διαφορών, που παρουσιάζουν οι μετρούμενες συγκεντρώσεις ^{226}Ra, για τον υπολογισμό της σταθμισμένης μέσης τιμής θα εργαστούμε σύμφωνα με την μεθοδολογία των Gilmore and Hemingway [63]. Εάν $\mathrm{C_1, \ldots, C_n}$ είναι οι τιμές των μετρήσεων και $\sigma_1, \ldots, \sigma_\mathrm{n}$ οι αντίστοιχες αβεβαιότητες, ο σταθμισμένος μέσος $< \mathrm{C} >$ δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$< C >= \frac{\sum_{i=1}^{n} W_i C_i}{\sum_{i=1}^{n} W_i} \tag{7.5}$$

όπου:

$$W_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \tag{7.6}$$

Η εσωτερική αβεβαιότητα σ_{int} δίνεται από την εξίσωση:

$$\sigma_{int} = \left(\sum_{i=1}^{n} W_i \right)^{-1/2} \tag{7.7}$$

ενώ η εξωτερική είναι:

$$\sigma_{ext} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} (C_i - < C >)^2 W_i}{\sum_{i=1}^{n} W_i} \right)^{-1/2} \tag{7.8}$$

Από την εσωτερική και την εξωτερική αβεβαιότητα επιλέγουμε κάθε φορά την μεγαλύτερη τιμή. Με βάση αυτή την μεθοδολογία προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές για τις συγκεντρώσεις των ισοτόπων ^{226}Ra, ^{232}Th και ^{40}K:

- ^{226}Ra: C_{Ra226}=515±15 $\mathrm{Bqkg^{-1}}$
- ^{232}Th: C_{Th232}=49±1 $\mathrm{Bqkg^{-1}}$
- ^{40}K: C_{K40}=466±16 $\mathrm{Bqkg^{-1}}$

7.5.4 Μέτρηση ρυθμού εκροής ραδονίου από την ιπτάμενη τέφρα του σταθμού ΑΗΣ Α΄ Μεγαλόπολης

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγική παράγραφο του κεφαλαίου αυτό το πείραμα πραγματοποιήθηκε προκειμένου να προσομοιώσουμε το φαινόμενο της εκροής ραδονίου από την ιπτάμενη τέφρα, που έχει εναποτεθεί στην περιοχή της Μεγαλόπολης εξαιτίας των εκπομπών της από τις καμινάδες των ΑΗΣ Μεγαλόπολης. Γι΄ αυτό τον σκοπό αποφασίστηκε να τοποθετηθεί ποσότητα τέφρας, που προέρχεται από τον ΑΗΣ Α΄, σε πάχος $\sim 1\,\mathrm{cm}$ μέσα σε πλαστικές ορθογωνικές λεκάνες, ώστε να προκύψει μια μεγάλη επιφάνεια με τέφρα, που θα προσομοιάζει έδαφος, στο οποίο έχει εναποτεθεί τέφρα που διαφεύγει από τους ΑΗΣ Μεγαλόπολης. Οι λεκάνες με την τέφρα εισήχθηκαν στην συνέχεια μέσα στον θάλαμο του ραδονίου, ώστε να πραγματοποιηθεί η μέτρηση. Σε αυτή την παράγραφο θα περιγραφεί η πειραματική διαδικασία, η οποία είναι σύμφωνη με την μεθοδολογία, που ακολουθείται για τέτοιες μετρήσεις στο ΕΠΤ-ΕΜΠ [148].Εδώ δίνονται επίσης και τα αποτελέσματα, που προέκυψαν.

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 7.5.3 η τέφρα ιπτάμενη τέφρα αποστάλθηκε ΕΠΤ-ΕΜΠ σε πέντε διαφορετικά πλαστικά δοχεία, τα οποία αριθμήθηκαν από το 1 έως το 5. Για να γίνει η τοποθέτηση της τέφρας μέσα στον θάλαμο αποφασίστηκε να γίνει προμήθεια δέκα πλαστικών λεκανών, μέσα στις οποίες τοποθετήθηκε η ιπτάμενη τέφρα. Οι πλαστικές λεκάνες ήταν ορθογώνιου σχήματος με διαστάσεις 0.46x$0.32\,\mathrm{m}$. Το ύψος των λεκανών ήταν $0.18\,\mathrm{m}$. Η τοποθέτηση της τέφρας μέσα στις λεκάνες έγινε ακολουθώντας την εξής διαδικασία: Οι λεκάνες αριθμήθηκαν από το 1 έως το 10 και στην λεκάνη με αριθμό 1 τοποθετήθηκε τέφρα, που προερχόταν από το δοχείο 1. Στην

λεκάνη 2 τέφρα από το δοχείο 2 κοκ. Στις λεκάνες με αριθμούς 6-10 τοποθετήθηκε τέφρα από τα δοχεία 1-5 αντίστοιχα. Σε κάθε λεκάνη τοποθετήθηκαν $3.044\,\mathrm{kg}$ τέφρας και αυτή η μάζα αντιστοιχούσε σε ύψος υλικού μέσα στην λεκάνη περίπου $1\,\mathrm{cm}$. Η συνολική μάζα τέφρας, που περιείχαν οι λεκάνες ήταν $30.44\,\mathrm{kg}$. Με δεδομένο ότι στο πραγματικό έδαφος στην γειτονιά των ΑΗΣ δεν παρατηρούνται τέτοια πάχη τέφρας, παρά μόνον στις αποθέσεις τέφρας και στα σημεία που γίνεται διακίνηση, συμπεραίνεται ότι το πείραμα, όπως σχεδιάστηκε για πάχος τέφρας $1\,\mathrm{cm}$ καλύπτει το χειρότερο σενάριο εκροής. Αφού ολοκληρώθηκε η πλήρωση των λεκανών έγινε τοποθέτησή τους μέσα στον θάλαμο ραδονίου με τον τρόπο, που φαίνεται στο σχήμα 7.3.

Μέσα στον θάλαμο τοποθετήθηκε και ο ανιχνευτής Alphaguard και στην συνέχεια ο θάλαμος έκλεισε ερμητικά για χρονικό διάστημα 10 ημερών (13-23/03/2009). Οι ρυθμίσεις του ανιχνευτή ήταν οι ακόλουθες [65]:

- Λειτουργία χωρίς την χρήση αντλίας
- Κύκλος ολοκλήρωσης ανιχνευτή διάρκειας $1\,\mathrm{hr}$ σε ρύθμιση Diffusion mode.

Μετά το πέρας των 10 ημερών ανοίχθηκε ο θάλαμος εκ νέου και διαβάστηκαν με την βοήθεια Η/Υ και σχετικού λογισμικού τα δεδομένα, που είχε καταγράψει ο ανιχνευτής, τα οποία βρίσκονται στο αρχείο 090323A1.txt στο CD που συνοδεύει την παρούσα ΔΔ. Οι συγκεντρώσεις, που ανιχνεύτηκαν δεν ήταν ιδιαίτερα υψηλές και η τελική συγκέντρωση στην διάρκεια του πειράματος ήταν $95\pm16\,\mathrm{Bqm^{-3}}$. Η εξέλιξη της συγκέντρωσης του ραδονίου στο θάλαμο και η αντίστοιχη καμπύλη προσαρμογής παρουσιάζονται στο σχήμα 7.4.

Προκειμένου να χαράξουμε την καμπύλη προσαρμογής στα πειραματικά σημεία χρησιμοποιήσαμε την εξίσωση 7.1, η οποία υπενθυμίζεται ότι είναι η:

$$C(t) = \frac{R}{V\lambda'} + (C_o - \frac{R}{V\lambda'})exp(-\lambda' t)$$

Από την προσαρμογή προκύπτει ότι:
C_o=$42\pm1\,\mathrm{Bqm^{-3}}$
R=$2.4\pm0.2\,\mathrm{Bqh^{-1}}$
λ'=$0.017\pm0.03\,\mathrm{h^{-1}}$

Από την προσαρμογή βλέπουμε ότι η σταθερά απομείωσης είναι μεγαλύτερη από την σταθερά διάσπασης του ραδονίου (λ= $7.56\times10^{-3}\,\mathrm{h^{-1}}$). Αυτό δεν μπορεί να οφείλεται σε διαρροή ραδονίου από τον θάλαμο, δεδομένου ότι ο σχετικός έλεγχος, που πραγματοποιήθηκε στο πείραμα βαθμονόμησης, το οποίο περιγράφτηκε στην παράγραφο 7.5.2.2 ήταν αρνητικός. Η αυξημένη τιμή της σταθεράς απομείωσης οφείλεται επομένως σε προσρόφηση από κάποιο υλικό του θαλάμου, όπως οι πλαστικές λεκά-

νες μέσα στις οποίες τοποθετήθηκε η τέφρα, ή ακόμα και στην λεγόμενη ανάστροφη διάχυση (*back difussion*) προς την ίδια την τέφρα . Το φαινόμενο αυτό αναμένεται σε τέτοιες μεθόδους εκτίμησης του ρυθμού εκροής ραδονίου από χύδην υλικά [181].

Υπολογίζουμε τον ρυθμό εκροής ραδονίου Ε ανά kg τέφρας και ανά sec από την ακόλουθη εξίσωση:

$$E = \frac{RV\alpha}{m} = 22 \pm 4\mu Bqkg^{-1}s^{-1}$$

Όπου:
m=30.44 kg η συνολική μάζα της τέφρας, που τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του θαλάμου.
a=0.90±0.05 ο συντελεστής διόρθωσης, που προέκυψε από την βαθμονόμηση, όπως περιγράψαμε στην παράγραφο 7.5.2.2.
V=1.86±0.09 m^3 ο όγκος του θαλάμου.
Το σφάλμα του ρυθμού εκροής υπολογίστηκε από τον ακόλουθο τύπο:

$$\left(\frac{\sigma_E}{E}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\alpha}{\alpha}\right)^2$$

Ως σφάλμα μάζας θεωρήθηκε το σφάλμα ανάγνωσης του ζυγού, με τον οποίο μετρήθηκε η μάζα της τέφρας Δm=0.01 lb. Συνεπώς σ_i=0.005 lb. Με δεδομένο ότι πραγματοποιήθηκαν n=10 διαδοχικές όμοιες ζυγίσεις με m=6.7 lb το σφάλμα της μάζας θα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\sigma_m}{m} = \frac{\sqrt{\sigma_1^2 + \ldots + \sigma_1 0^2}}{m} = 0.00024$$

Αντίστοιχες μετρήσεις έχουν πραγματοποιήσει οι Karangelos et al. [97] με εύρος τιμών 12-117 $\mu\mathrm{Bqkg}^{-1}\mathrm{s}^{-1}$ και ο Πέππας [231] με εύρος τιμών 26.4-38 $\mu\mathrm{Bqkg}^{-1}\mathrm{s}^{-1}$. Βλέπουμε λοιπόν ότι η παρούσα μέτρηση βρίσκεται λίγο χαμηλότερα από την μικρότερη του Πέππα (17%) ενώ είναι μέσα στο εύρος τμών, που έχουν μετρήσει οι Karangelos et al. [97]. Στον πίνακα 7.7 παρατίθενται οι παραπάνω τιμές καθώς και οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις ^{226}Ra, σύμφωνα με τις οποίες υπολογίστηκαν τα παραπάνω εκρεόμενα κλάσματα.

Λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό εμβαδόν της ελεύθερης επιφάνειας των λεκανών S=1.449 m^2 υπολογίζεται ο ρυθμός εκροής ανά μονάδα επιφάνειας, ο οποίος είναι ίσος με $\mathrm{E_s}$=460±84 $\mu\mathrm{Bqs}^{-1}\mathrm{m}^{-2}$.

Διαπιστώνουμε ότι με πάχος τέφρας 1 cm ο ρυθμός εκροής, που μετρήθηκε είναι πολύ μικρός σε σχέση με τις τιμές που μετρήθηκαν στο παρελθόν από το ΕΠΤ-ΕΜΠ στην περιοχή της Μεγαλόπολης και κυμαίνονται από 7-2166 $\mu\mathrm{Bqs}^{-1}\mathrm{m}^{-2}$ (βλ. παράγραφο 7.4.3). Με δεδομένο ότι στο πραγματικό έδαφος στην γειτονιά των ΑΗΣ δεν

παρατηρούνται τέτοια πάχη τέφρας, παρά μόνον στις αποθέσεις τέφρας και στα σημεία που γίνεται διακίνηση, συμπεραίνεται ότι η εναπόθεση τέφρας στο έδαφος, η οποία διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ Μεγαλόπολης, δεν μπορεί να ερμηνεύσει τις υψηλές τιμές ρυθμού εκροής ραδονίου από το έδαφος, όπως αυτές μετρήθηκαν στο παρελθόν από το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Ακόμη και εάν όλη η περιοχή της Μεγαλόπολης καλυφθεί με στρώμα $1\,\mathrm{cm}$ ιπτάμενης τέφρας η εκροή του ραδονίου από αυτή θα είναι αρκετά μικρότερη από την εκροή ραδονίου από το έδαφος της περιοχής, όπως αυτή μετρήθηκε το διάστημα 1997-1998. Επιβεβαιώνεται δηλαδή το συμπέρασμα προηγούμενης μελέτης του ΕΠΤ-ΕΜΠ, ότι οι παρατηρούμενοι ρυθμοί εκροής ραδονίου από το έδαφος οφείλονται στο ^{226}Ra, το οποίο βρίσκεται στο υπέδαφος της περιοχής [157].

Ακολούθως υπολογίζουμε το εκρεόμενο κλάσμα σύμφωνα με την εξίσωση 7.4 και τις τιμές συγκέντρωσης ^{226}Ra, που υπολογίστηκαν στην παράγραφο 7.5.3. Για τον υπολογισμό του εκρεόμενου κλάσματος μπορούμε να χρησιμοποιούμε την εξίσωση 7.4, αφού η τέφρα στα δείγματα έχει πολύ μικρό πάχος. Το εκρεόμενο κλάσμα προκύπτει f=$2.0\pm0.4\,\%$. Ο Πέππας [231] σε ιπτάμενη τέφρα προερχόμενη από τους ΑΗΣ Μεγαλόπολης προχώρησε σε αντίστοιχους υπολογισμούς και οι τιμές του εκρεόμενου κλάσματος κυμαίνονται από 1.65 έως 2.4%. Οι Kalkwarf et al. [46] δίνουν τιμές από 0.7-8.5% για σχετική έρευνα που πραγματοποίησαν στις Η.Π.Α. Οι Barton and Ziemer [13] παρέχουν τιμές εκρεόμενου κλάσματος από 0.48-4.13% Τιμές για το εκρεόμενο κλάσμα δίνει και ο Maraziotis [120] και του εύρος τους κυμαίνεται από 0.121-9.8%. Βλέπουμε λοιπόν ότι η τιμή που εκτιμήσαμε βρίσκεται μέσα στο παραπάνω εύρος τιμών.

7.6 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε αρχικά ανασκόπηση των μετρήσεων ραδονίου στο γήινο αέριο στην περιοχή της Μεγαλόπολης, που πραγματοποιήθηκαν τα έτη 1997-1998 από το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Συγκρίνοντας αυτές τις μετρήσεις με αντίστοιχες τιμές της βιβλιογραφίας διαπιστώθηκε ότι αρκετές φορές είναι χαμηλότερες. Συγκεκριμένα οι μετρήσεις του ΕΠΤ-ΕΜΠ το διάστημα 1997-1998 κυμαίνονται από 6-$90\,\mathrm{kBqm^{-3}}$ ενώ οι τιμές που ανευρέθηκαν στην βιβλιογραφία έχουν εύρος από 1-$1295\,\mathrm{kBqm^{-3}}$. Ακολούθησε ανασκόπηση των μετρήσεων εκροής ραδονίου από το έδαφος της περιοχής της Μεγαλόπολης, που πραγματοποιήθηκαν επίσης τα έτη 1997-1998 από το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Οι μετρήσεις αυτές κυμαίνονται από 7-$2166\,\mathrm{kBqm^{-2}s^{-1}}$ και στο σχήμα 7.5, παρουσιάζεται δισδιάστατο γράφημα, που προέκυψε από τις παραπάνω μετρήσεις. Οι αντίστοιχες τιμές που ανευρέθηκαν στην βιβλιογραφία είχαν εύρος από 0.004-$72.3\,\mathrm{kBqm^{-3}s^{-1}}$. Με βάση τα προηγούμενα συμπεραίνεται ότι οι μετρήσεις του ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι υψηλότερες σε σχέση με αυτές, που παρατίθενται στην βιβλιογραφία.

Στις μετρήσεις του ΕΠΤ-ΕΜΠ, το διάστημα 1997-1998, διαπιστώθηκαν υψηλές τιμές εκροής ραδονίου από το έδαφος, που φθάνουν τα $2166\,\mathrm{mBqm^{-2}s^{-1}}$ (βλ. παράγραφο 7.4.3) σε περιοχές βορειοδυτικά της πόλης της Μεγαλόπολης, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.5. Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν αυτοί οι υψηλοί ρυθμοί εκροής ραδονίου, οφείλονται στην τέφρα, που εκπέμπεται από τους ΑΗΣ της περιοχής και εναποτίθεται στην συνέχεια στο έδαφος, πραγματοποιήθηκε πείραμα μέτρησης του ρυθμού εκροής ραδονίου σε κλειστό θάλαμο ως εξής: Αρχικά λήφθηκε ιπτάμενη τέφρα από τον ΑΗΣ Α΄. Ακολούθως μεγάλη ποσότητα αυτής της τέφρας της τάξης των 30 κιλών τοποθετήθηκε σε πάχος $1\,\mathrm{cm}$ στο εσωτερικό θαλάμου ραδονίου και μετρήθηκε ο ρυθμός εκροής ραδονίου από αυτήν την τέφρα. Ο ρυθμός εκροής ραδονίου, που μετρήθηκε, βρέθηκε ίσος με $460\pm84\,\mu\mathrm{Bqs^{-1}m^{-2}}$. Συγκρινόμενος με τις αντίστοιχες τιμές, που έχουν μετρηθεί από το ΕΠΤ-ΕΜΠ στο παρελθόν στο έδαφος της περιοχής της Μεγαλόπολης και έχουν εύρος από 7-$2166\,\mathrm{kBqm^{-2}s^{-1}}$, διαπιστώνεται ότι είναι αρκετά χαμηλός. Συνεπώς οι υψηλές τιμές εκροής ραδονίου από το έδαφος δεν οφείλονται στην εναπόθεση σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας, που εκπέμπονται από τις καμινάδες των ΑΗΣ.

Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η λειτουργία των ΑΗΣ της περιοχής της Μεγαλόπολης δεν ερμηνεύει τις υψηλές τιμές του ρυθμού εκροής ραδονίου από το έδαφος της περιοχής της Μεγαλόπολης. Αυτό έρχεται σε συμφωνία με το συμπέρασμα, που προέκυψε μετά τις εκτελέσεις του ORION-II, ότι οι υψηλές συγκεντρώσεις ^{226}Ra στο χώμα της περιοχής της Μεγαλόπολης δεν οφείλονται σε εναπόθεση διασπειρόμενης τέφρας από τους σταθμούς αλλά μάλλον στο φυσικά περιεχόμενο ^{226}Ra στο έδαφος, όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 5.6.8.

Πίνακες Κεφαλαίου

Κωδικός θέσης	*Τοποθεσία*	ϕ	λ	*Ημερομηνία*	*Συγκέντρωση* ($kBqm^{-3}$)
12	Άνω Καρυές	37.437°	21.999°	21/09/98	5.7± 0.8
12	Άνω Καρυές	37.432°	22.002°	27/09/97	21 ± 4
8	Βάγγου	37.431°	22.156°	29/09/97	81 ± 8
8	Βάγγου	37.431°	22.156°	22/09/98	5.5± 0.6
5	Ζώνη	37.455°	22.118°	26/09/97	25 ± 2
5	Ζώνη	37.461°	22.121°	19/09/98	6 ± 0.4
16	Ίσαρης	37.368°	22.015°	28/09/97	40 ± 2
16	Ίσαρης	37.368°	22.015°	21/09/98	3.9± 1
6	Καρβουνάρι	37.469°	22.082°	26/09/97	36 ± 2
6	Καρβουνάρι	37.470°	22.081°	19/09/98	9.4± 1
17	Καρύταινα	37.485°	22.056°	28/09/97	37 ± 3
18	Καστανοχώρι	37.416°	22.021°	22/09/97	26 ± 2
2	Καστανοχώρι	37.418°	22.021°	21/09/98	7.3± 0.7
11	Λυκόσουρα	37.399°	22.051°	27/09/97	29 ± 4
11	Λυκόσουρα	37.397°	22.051°	21/09/98	6.9± 0.7
13	Μακρύσι	37.414°	22.166°	28/09/97	38 ± 3
13	Μακρύσι	37.412°	22.166°	22/09/98	1.6± 0.2
7	Μαυριά	37.457°	22.065°	26/09/97	33 ± 4
7	Μαυριά	37.458°	22.065°	19/09/98	15 ± 2
20	Μεγαλόπολη	37.398°	22.141°	29/09/97	48 ± 3
20	Μεγαλόπολη	37.398°	22.142°	20/09/98	49 ± 3
22	Παναγιά Κ.	37.474°	22.076°	22/09/98	2.6± 0.1
15	Παραδείσια	37.355°	22.085°	28/09/97	31 ± 2
15	Παραδείσια	37.339°	22.086°	20/09/98	6.8± 0.3
3	Πλάκα Νέα	37.429°	22.118°	22/09/98	12 ± 1
14	Ρούτσι	37.369°	22.171°	28/09/97	57 ± 3
14	Ρούτσι	37.369°	22.171°	20/09/98	12 ± 0.4
4	Σούλου	37.448°	22.109°	26/09/97	33 ± 2
4	Σούλου	37.449°	22.111°	19/09/98	6 ± 0.4
19	Σύρνα	37.506°	22.111°	29/09/97	38 ± 2
10	Χωρέμι	37.376°	22.088°	27/09/97	90 ± 7
10	Χωρέμι	37.389°	22.089°	21/09/98	3.9± 0.3
9	Ψαθί	37.391°	22.119°	27/09/97	78 ± 78
9	Ψαθί	37.391°	22.119°	20/09/98	11 ± 1
21	Ψαθί-ορυχείο	37.393°	22.099°	20/09/98	13 ± 1

Πίνακας 7.1: Μετρήσεις ραδονίου στο γήινο αέριο στην περιοχή της Μεγαλόπολης, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν τα έτη 1997-1998 από το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Πηγή: [223]

Ερευνητής	*Χώρα*	*Συγκέντρωση* (kBqm^{-3})
Chen et al. [31]	Καναδάς	12.2 - 28.5
Chen et al. [29]	Καναδάς	6-116
Fu et al. [59]	Ταϊβάν	4.3-27.2
Golias et al. [67]	Τσεχία	7-1295
Neznal et al. [134]	Τσεχία	117.6-260
Prasad et al. [150]	Ινδία	1.1-31.8
Richon et al. [154]	Ελλάδα	4-9.5

Πίνακας 7.2: Μετρήσεις ραδονίου στο γήινο αέριο στην βιβλιογραφία

Κωδικός θέσης	*Τοποθεσία*	ϕ	λ	*Ημερομηνία*	*Εκροή ραδονίου* ($mBqm^{-2}s^{-1}$)
12	Άνω Καρυές	37.437°	21.999°	21/09/98	16±9
8	Βάγγου	37.431°	22.156°	29/09/97	23±14
8	Βάγγου	37.431°	22.156°	22/09/98	9±3
16	Ίσαρης	37.368°	22.015°	28/09/97	51±28
16	Ίσαρης	37.368°	22.015°	21/09/98	46±14
6	Καρβουνάρι	37.470°	22.081°	19/09/98	1200±231
2	Καστανοχώρι	37.416°	22.021°	29/09/97	27±18
11	Λυκόσουρα	37.397°	22.051°	21/09/97	16±5
13	Μακρύσι	37.414°	22.166°	28/09/97	28±2
7	Μαυριά	37.458°	22.065°	19/09/98	67±23
20	Μεγαλόπολη	37.398°	22.141°	29/09/97	16±3
20	Μεγαλόπολη	37.398°	22.142°	20/09/98	28±26
22	Παναγιά Κ.	37.474°	22.076°	22/09/98	32±17
15	Παραδείσια	37.355°	22.085°	28/09/97	38±2
15	Παραδείσια	37.339°	22.086°	20/09/98	69±21
14	Ρούτσι	37.369°	22.171°	28/09/97	128±49
14	Ρούτσι	37.369°	22.171°	20/09/98	19±8
4	Σούλου	37.449°	22.111°	19/09/98	190±36
19	Σύρνα	37.506°	22.111°	29/09/97	48±13
10	Χωρέμι	37.376°	22.088°	27/09/97	58±20
10	Χωρέμι	37.389°	22.089°	21/09/98	29±6
9	Ψαθί	37.391°	22.119°	27/09/97	85±27
9	Ψαθί	37.391°	22.119°	20/09/98	11±5

Πίνακας 7.3: Μετρήσεις εκροής ραδονίου από το έδαφος στην περιοχή της Μεγαλόπολης, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν τα έτη 1997-1998 από το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Πηγή: [223]

Ερευνητής	*Χώρα*	*Εκροή ραδονίου* ($mBqm^{-2}s^{-1}$)
Ielsch et al. [85]	Γαλλία	20.3-72.3
Levin et al. [111]	Ρωσσία	0.92-2.2
Chauhan et al. [27]	Ινδία	0.084-0.41
Saegusa et al. [159]	Ιαπωνία	3-160
Martino et al. [122]	Ιταλία	0.2-3.2
Faheem et al. [54]	Πακιστάν	0.03-0.19
Baykara et al. [15]	Τουρκία	0.004-0.11

Πίνακας 7.4: Μετρήσεις εκροής ραδονίου από το έδαφος

α/α δοχείου	*Κωδικός δείγματος*	*Μάζα δείγματος* (gr)
1	PM003AZ1	274.2
2	PM003AZ2	288.7
3	PM003AZ3	263.1
4	PM003AZ4	273.4
5	PM003AZ5	286.2

Πίνακας 7.5: Κωδικοποίηση δειγμάτων τέφρας ΑΗΣ Μεγαλόπολης Α΄ και αντίστοιχες μάζες τους

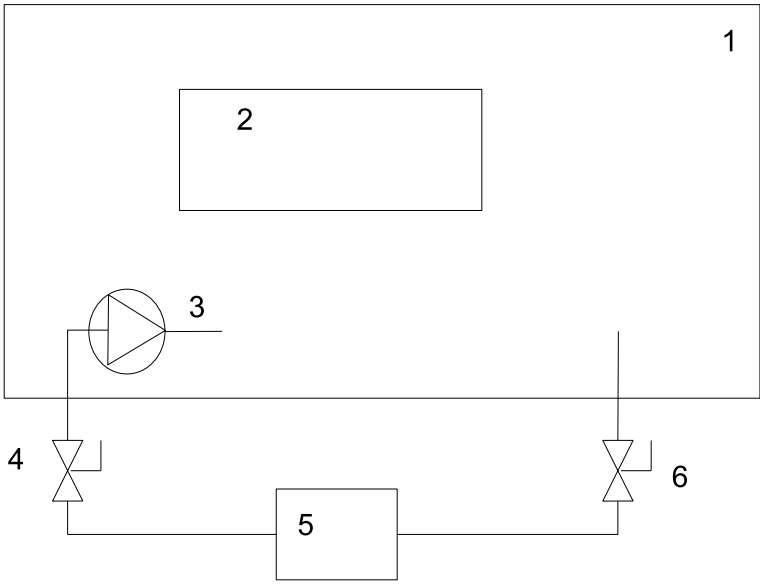
	Συγκεντρώσεις δειγμάτων ($Bqkg^{-1}$)		
Κωδικός δείγματος	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
PM003AZ1	512±3	47±1	488±10
PM003AZ2	516±2	49±1	453±9
PM003AZ3	532±2	49±9	473±8
PM003AZ4	505±2	49±1	462±10
PM003AZ5	510±2	49±1	458±8
μ.τ.	515±15	49±1	466±16

Πίνακας 7.6: Συγκεντρώσεις ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K στην τέφρα του ΑΗΣ Μεγαλόπολης Α΄

Ερευνητής	*Συγκέντρωση* ^{226}Ra ($Bqkg^{-1}$)	*Ρυθμός εκροής* ($Bqkg^{-1}s^{-1}$)
Παρούσα ΔΔ	515±15	22±4
Πέππας [231]	903-1054	26.4-38
Karangelos et al. [97]	763-1176	12-117

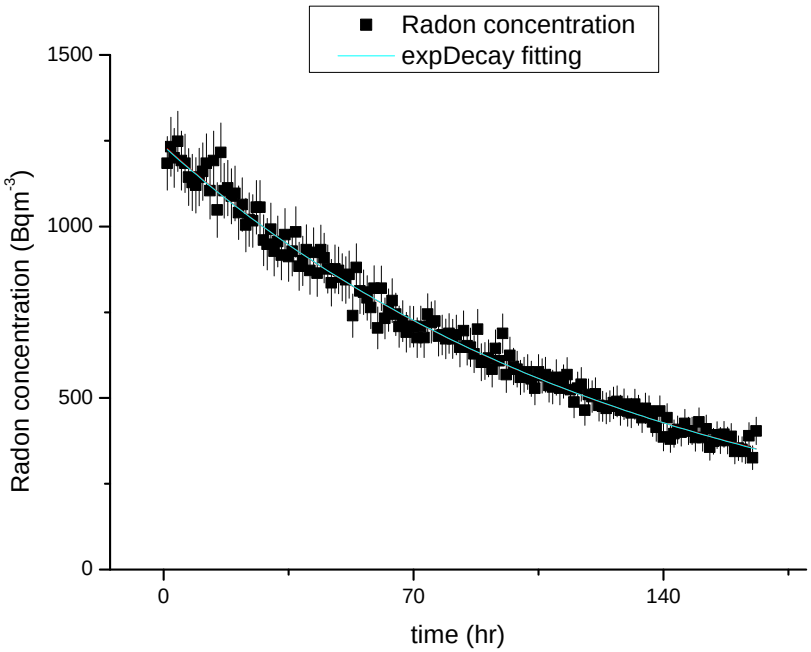
Πίνακας 7.7: Συγκεντρώσεις ^{226}Ra στην ιπτάμενη τέφρα και αντίστοιχοι ρυθμοί εκροής ραδονίου, όπως έχουν προσδιοριστεί σε παλαιότερες έρευνες του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Σχήματα Κεφαλαίου



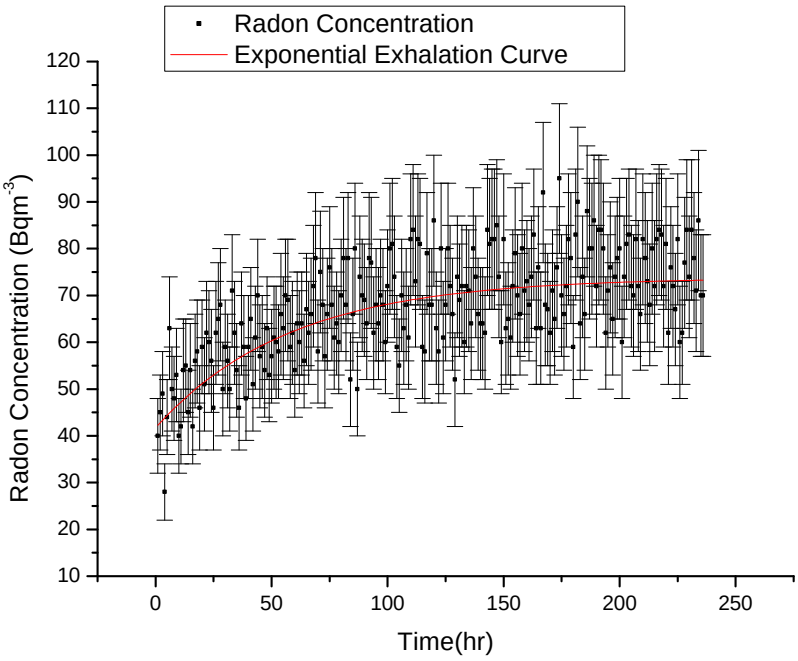
1. Θάλαμος ραδονίου MRH
2. Ανιχνευτής AlphaGuard
3. Αντλία θαλάμου
4. Σφαιρική βαλβίδα
5. Πηγή ραδονίου CMI

Σχήμα 7.1: Σχηματικό διάγραμμα βαθμονόμησης ανιχνευτή AlphaGuard

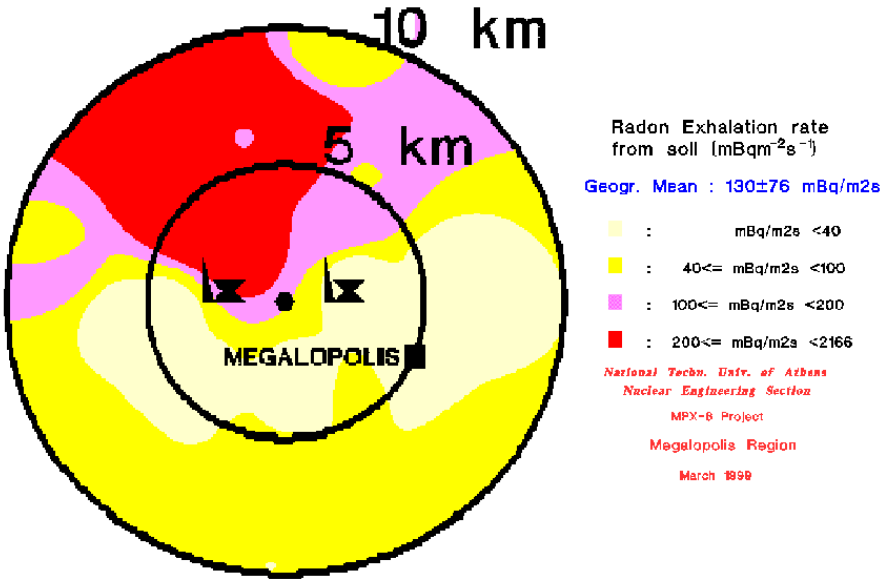


Σχήμα 7.2: Καμπύλη βαθμονόμησης ανιχνευτή AlphaGuard

Σχήμα 7.3: Τρόπος τοποθέτησης των λεκανών της τέφρας μέσα στον θάλαμο ραδονίου MRH



Σχήμα 7.4: Μέτρηση εκροής ραδονίου από τέφρα του ΑΗΣ Α΄ Μεγαλόπολης



Σχήμα 7.5: Δισδιάστατο γράφημα του ρυθμού εκροής ραδονίου από το έδαφος της περιοχής Μεγαλόπολης σύμφωνα με τις μετρήσεις του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Κεφάλαιο 8

Αποτελέσματα - Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται μια σύνοψη της ΔΔ. Στην παράγραφο 8.1 παρουσιάζονται η πορεία εκπόνησης αυτής της ΔΔ καθώς και τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτήν. Στην παράγραφο 8.2 συνοψίζονται τα σημεία πρωτοτυπίας της ΔΔ και στην παράγραφο 8.3 παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντική επέκταση της έρευνας, που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της ΔΔ.

8.1 Συνοπτική παρουσίαση της ΔΔ

Κύριος σκοπός αυτής της ΔΔ ήταν η διερεύνηση της επίδρασης της λειτουργίας των ΑΗΣ στην περιοχή της Μεγαλόπολης Αρκαδίας από ραδιολογική άποψη. Γι' αυτό το σκοπό έγινε υπολογιστική μελέτη της διασποράς ισοτόπων φυσικής ραδιενέργειας, που διαφεύγουν με την ιπτάμενη τέφρα από τις καμινάδες των ΑΗΣ, με την βοήθεια κωδίκων υπολογισμού ατμοσφαιρικής διασποράς ραδιενεργών ρύπων. Επίσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των υπό έρευνα ραδιενεργών ισοτόπων σε δείγματα βρόχινου νερού της περιοχής και σε δείγματα ιπτάμενης τέφρας, η οποία παράχθηκε στους ΑΗΣ Μεγαλόπολης.

Προηγήθηκε εκτεταμένη βιβλιογραφική έρευνα των φαινομένων, που διέπουν τη διαδικασία εμπλουτισμού της τέφρας στα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα των σειρών του ^{238}U, του ^{232}Th καθώς και του ^{40}K, το οποίο είναι φυσικό ραδιενεργό ισότοπο του καλίου. Ακολούθησε βιβλιογραφική έρευνα όσον αφορά τα φαινόμενα, που καθορίζουν την διασπορά της τέφρας στην ατμόσφαιρα, ώστε να επιλεγούν οι πλέον κατάλληλοι διαθέσιμοι κώδικες υπολογισμού για την εφαρμογή τους στους ΑΗΣ Μεγαλόπολης.

Η πρώτη επιλογή ήταν ο κώδικας ORION-II, ο οποίος διατίθεται σε μορφή πηγαίου κώδικα και λαμβάνει υπόψη του τις περισσότερες παραμέτρους του φαινομένου, που θέλαμε να μελετήσουμε. Ο ORION-II εγκαταστάθηκε στα υπολογιστικά συστήματα του ΕΠΤ-ΕΜΠ αρχικά σε λειτουργικό σύστημα UNIX και στην συνέχεια σε προσωπικό Η/Υ με λειτουργικό σύστημα Windows XP. Κατά την διάρκεια μελέτης των επί μέρους δυνα-

τοτήτων του κώδικα βρέθηκε ένα σφάλμα στην υπορουτίνα υπολογισμού του παράγοντα ξηρής εναπόθεσης και ένα σφάλμα στην υπορουτίνα υπολογισμού της ανύψωσης του πλουμίου. Αυτά τα σφάλματα διορθώθηκαν και η επιτυχία των διορθώσεων ελέγχθηκε με βηματική εκτέλεση του κώδικα και παράλληλο εξωτερικό υπολογισμό των σχετικών εξισώσεων. Ακολούθησαν δοκιμαστικές εκτελέσεις και συγκρίσεις οι οποίες ήταν όλες επιτυχημένες.

Οι κώδικες υπολογισμού μεγάλης χρονικής διάρκειας όπως ο ORION-II δέχονται μετεωρολογικά δεδομένα, τα οποία βρίσκονται σε επεξεργασμένη μορφή και όχι στην πρωτογενή που τα παράγουν οι μετεωρολογικοί σταθμοί. Για αυτό το σκοπό αναπτύχθηκε στα πλαίσια της ΔΔ σε γλώσσα FORTRAN-77 ο μετεωρολογικός προεπεξεργαστής *metprep*, διότι δεν υπήρχε διαθέσιμο κατάλληλο λογισμικό. Αναπτύχθηκε επίσης ο προεπεξεργαστής γεωγραφικών δεδομένων *geocalc*, ο οποίος είναι βοηθητικό εργαλείο στην διαδικασία εύρεσης των υψομέτρων του εδάφους στα σημεία υπολογισμού της συγκέντρωσης των ραδιοϊσοτόπων. Συντάχθηκαν επίσης και αρκετά μικρότερα προγράμματα απαραίτητα για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, που παράγει ο κώδικας. Η συγγραφή όλων των παραπάνω προγραμμάτων πραγματοποιήθηκε σε γλώσσα FORTRAN-77.

Ο δεύτερος κώδικας, που επιλέχθηκε για χρήση ήταν ο GENII, ο οποίος διαθέτει γραφικό περιβάλλον εργασίας και οι εξισώσεις του είναι κατάλληλες για ισότοπα, που ανήκουν σε ραδιενεργές αλυσίδες. Σε αντίθεση με τον ORION-II είναι λογισμικό κλειστού κώδικα και μπορεί να εγκατασταθεί μόνο σε λειτουργικό σύστημα Windows XP. Και για αυτό τον κώδικα αναπτύχθηκαν σε FORTRAN-77 προγράμματα απαραίτητα για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Λόγω της δυσκολίας, που υπήρχε στην πρόσβαση σε μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής αποφασίστηκε να κατασκευαστούν μετεωρολογικά σενάρια με βάση ήδη δημοσιευμένα μετεωρολογικά στοιχεία και να πραγματοποιηθούν παραμετρικές εκτελέσεις των κωδίκων. Ακολούθησε εφαρμογή των κωδίκων για την περιοχή της Μεγαλόπολης και οι μέγιστες υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις ^{226}Ra στην ατμόσφαιρα στο επίπεδο του εδάφους ήταν της τάξης του $\mu\mathrm{Bqm}^{-3}$ και ήταν μέσα στο εύρος τιμών, που ανευρέθηκαν σε παρόμοιες μελέτες στην βιβλιογραφία. Όσον αφορά στις υψηλές συγκεντρώσεις ^{226}Ra στο χώμα, που έχουν μετρηθεί στο παρελθόν στην περιοχή [157], διαπιστώθηκε ότι δεν οφείλονται στην απόθεση ιπτάμενης τέφρας, που εκπέμπεται από τις καμινάδες των ΑΗΣ της περιοχής, αλλά μάλλον στο φυσικά περιεχόμενο ^{226}Ra στο έδαφος.

Πραγματοποιήθηκαν επίσης δοσιμετρικοί υπολογισμοί σχετικά με την επιβάρυνση, που προκύπτει λόγω της διασποράς ιπτάμενης τέφρας από τους ΑΗΣ Μεγαλόπολης, και η μέγιστη ετήσια ατομική ενεργή δόση στο λεκανοπέδιο της Μεγαλόπολης υπολογίστηκε σε $6.4\,\mu\mathrm{Sv}$ και το σημείο μεγίστου βρισκόταν σε απόσταση $1\,\mathrm{km}$ από το κέντρο υπολογισμού και σε γωνία 22.5° από την διεύθυνση του βορρά δεξιόστροφα. Η μέ-

γιστη επιτρεπόμενη ετήσια ατομική ενεργή δόση εξαιτίας μιας δραστηριότητας, όπου εμπλέκονται ραδιενεργές πηγές είναι $1\,\mathrm{mSv}$ σύμφωνα με την ΙΑΕΑ [86]. Έτσι συμπεραίνουμε ότι η μέγιστη ετήσια ατομική ενεργή δόση, που οφείλεται στη διαφυγή ιπτάμενης τέφρας από τους ΑΗΣ στην περιοχή της Μεγαλόπολης είναι τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερη από το όριο της ΙΑΕΑ. Επίσης η μέγιστη ετήσια ατομική ενεργή δόση που υπολογίστηκε σε αυτή την ΔΔ είναι 7.7 φορές μικρότερη από την μέση ενεργή δόση που προκύπτει λόγω ακτινοβόλησης από τα φυσικά ραδιοϊσότοπα, που περιέχονται στο έδαφος στον ελληνικό χώρο [5]. Είναι επίσης μια τάξη μεγέθους μικρότερη από την μέση ετήσια ενεργή δόση λόγω εναπόθεσης στο ελληνικό έδαφος τεχνητών ραδιοϊσοτόπων από το ατύχημα του Chernobyl ένα έτος μετά το ατύχημα [6]. Ακόμη είναι περίπου 370 φορές μικρότερη από την δόση που λαμβάνει ο μέσος άνθρωπος από όλες τις φυσικές πηγές ακτινοβόλησης σύμφωνα με τον UNSCEAR [194].

Η ετήσια ατομική ενεργή δόση που υπολογίστηκε για έναν κάτοικο της πόλης της Μεγαλόπολης ήταν $1.5\,\mu\mathrm{Sv}$. Η τιμή αυτή είναι μικρότερη από την μέγιστη ετήσια ατομική ενεργή δόση στο λεκανοπέδιο της Μεγαλόπολης, που υπολογίστηκε σε αυτή την ΔΔ και είχε τιμή $6.4\,\mu\mathrm{Sv}$. Η ετήσια ατομική ενεργή δόση, που υπολογίστηκε για έναν κάτοικο της πόλης της Μεγαλόπολης είναι τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερη από το όριο της ΙΑΕΑ, το οποίο είναι $1\,\mathrm{mSv}$ [86]. Επίσης είναι 33 φορές μικρότερη από την μέση ενεργή δόση που προκύπτει λόγω ακτινοβόλησης από τα φυσικά ραδιοϊσότοπα, που περιέχονται στο έδαφος στον ελληνικό χώρο [5]. Είναι επίσης 45 φορές μικρότερη από την μέση ετήσια ενεργή δόση λόγω εναπόθεσης στο ελληνικό έδαφος τεχνητών ραδιοϊσοτόπων από το ατύχημα του Chernobyl ένα έτος μετά το ατύχημα [6]. Τέλος είναι 1600 φορές μικρότερη από την δόση που λαμβάνει ο μέσος άνθρωπος από όλες τις φυσικές πηγές ακτινοβόλησης σύμφωνα με τον UNSCEAR [194].

Προκειμένου να ερευνηθεί και πειραματικά η επίδραση των ΑΗΣ στην ατμόσφαιρα της περιοχής της Μεγαλόπολης αποφασίστηκε να συλλεχθούν δείγματα υγρής απόθεσης στην περιοχή και στην συνέχεια να ακολουθήσει ανάλυση τους στις διατάξεις του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Έτσι συγκροτήθηκε ένας τύπος συσκευής δειγματοληψίας και έγινε προμήθεια ενός ακόμη. Ακολούθησαν δύο περίοδοι δειγματοληψίας στην περιοχή της Μεγαλόπολης. Η πρώτη πραγματοποιήθηκε μέσα στην πόλη της Μεγαλόπολης και η δεύτερη πλησίον των ΑΗΣ1-2,3. Η διάρκεια δειγματοληψίας ήταν μεγαλύτερη των δύο μηνών. Στην πρώτη περίοδο μάλιστα πραγματοποιήθηκε για λόγους σύγκρισης και παράλληλη δειγματοληψία στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Λόγω του μεγάλου όγκου, που είχαν τα δείγματα βρόχινου ύδατος, χρειάστηκε να πραγματοποιηθεί μείωση του όγκου τους με θέρμανση και παράλληλη ραδιοχημική επεξεργασία. Η όλη διαδικασία ήταν εξαιρετικά χρονοβόρα καθώς η θέρμανση έγινε σε θερμοκρασίες χαμηλότερες του σημείου βρασμού ώστε να αποφευχθεί τυχόν διαφυγή των ισοτόπων.

Ακολούθησε ανάλυση των δειγμάτων με α-, γ-φασματοσκοπία καθώς και με την

συσκευή ανάλυσης κινητικής φωσφορισμού KPA-11, που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Η ελάχιστη μετρούμενη συγκέντρωση ^{238}U στο βρόχινο νερό βρέθηκε σε δείγμα που λήφθηκε μέσα στην πόλη της Μεγαλόπολης, και προσδιορίστηκε σε $10\pm2\,\mathrm{mBqkg^{-1}}$. Η μέγιστη παρατηρούμενη συγκέντρωση ^{238}U βρέθηκε σε δείγμα, που λήφθηκε πλησίον των ΑΗΣ1-2,3, και προσδιορίστηκε σε $90\pm14\,\mathrm{mBqkg^{-1}}$. Στην μέτρηση, που πραγματοποιήθηκε στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, η συγκέντρωση ήταν $2.2\pm0.6\,\mathrm{mBqkg^{-1}}$, δηλαδή 4.5 φορές μικρότερη από την συγκέντρωση, η οποία μετρήθηκε στην πόλη της Μεγαλόπολης και 40.9 φορές μικρότερη από την συγκέντρωση, η οποία μετρήθηκε κοντά στους ΑΗΣ1-2,3. Υπολογίστηκαν επίσης και οι μηνιαίες αποθέσεις ^{238}U: Στην πόλη της Μεγαλόπολης ήταν $679\pm135\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$ ενώ κοντά στους ΑΗΣ η μέγιστη ήταν $4764\pm741\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$. Στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου ήταν $113\pm31\,\mathrm{mBqm^{-2}month^{-1}}$.

Επίσης διερευνήθηκε η πιθανή επιβάρυνση του περιβάλλοντος από την εκροή ραδονίου από τη διασπειρόμενη τέφρα στην περιοχή της Μεγαλόπολης, που έχει εναποτεθεί στην επιφάνεια του εδάφους. Έτσι συλλέχθηκε ιπτάμενη τέφρα από τον ΑΗΣ Α΄ Μεγαλόπολης και στην συνέχεια τοποθετήθηκε σε κατάλληλες λεκάνες σε πάχος $1\,\mathrm{cm}$ στον αεροστεγή θάλαμο ραδονίου, που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Με αυτό τον τρόπο επιχειρήθηκε να προσομοιωθεί το φαινόμενο της εκροής ραδονίου από τη ιπτάμενη τέφρα, που έχει εναποτεθεί στο έδαφος της περιοχής της Μεγαλόπολης. Η τέφρα παρέμεινε για χρονικό διάστημα μίας εβδομάδας στο εσωτερικό του θαλάμου και πραγματοποιήθηκε μέτρηση του ρυθμού εκροής με την βοήθεια ενεργητικού ανιχνευτή ραδονίου AlphaGuard της εταιρείας Genitron. Να σημειωθεί ότι πριν την διενέργεια του πειράματος είχε προηγηθεί βαθμονόμηση του οργάνου με την βοήθεια πηγής ραδονίου. Ο ρυθμός εκροής που μετρήθηκε βρέθηκε ίσος με $460\pm84\,\mu\mathrm{Bqs^{-1}m^{-2}}$ και το εκρεόμενο κλάσμα $2.0\pm0.4\,\%$. Αυτός ο ρυθμός εκροής είναι σχετικά χαμηλός σε σχέση με τις τιμές, που έχουν μετρηθεί στο παρελθόν από το ΕΠΤ-ΕΜΠ στην περιοχή της Μεγαλόπολης. Ομοίως και η μετρούμενη τιμή του εκρεόμενου κλάσματος είναι σχετικά χαμηλά στο εύρος τιμών που ανευρέθηκε στην βιβλιογραφία [13], [46], [120]. Συνεπώς οι υψηλές τιμές εκροής ραδονίου από το έδαφος δεν οφείλονται στην εναπόθεση σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας, που εκπέμπονται από τις καμινάδες των ΑΗΣ.

Συμπερασματικά μπορούν να αναφερθούν τα ακόλουθα όσον αφορά την ραδιολογική επιβάρυνση της περιοχής της Μεγαλόπολης από την λειτουργία των ΑΗΣ :

- **Υπολογιστική διερεύνηση :** Οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις ^{226}Ra στον ατμοσφαιρικό αέρα στην επιφάνεια του εδάφους ήταν μέσα στο εύρος τιμών που ανευρέθηκαν σε παρόμοιες μελέτες στην βιβλιογραφία. Οι υπολογιζόμενες αποθέσεις ^{226}Ra στο έδαφος της περιοχής δεν δικαιολογούν τις υψηλές συγκεντρώσεις ^{226}Ra στο χώμα της περιοχής όπως μετρήθηκαν από τους Rouni et al. [157]. Συνεπώς συμπεραίνεται ότι οι υψηλές συγκεντρώσεις ^{226}Ra στο χώμα της περιοχής δεν

οφείλονται σε εναπόθεση διασπειρόμενης τέφρας από τους ΑΗΣ, αλλά μάλλον στο φυσικά περιεχόμενο ^{226}Ra στο έδαφος. Η μέγιστη υπολογιζόμενη ετήσια ατομική ενεργή δόση ήταν 7.7 φορές μικρότερη από την μέση ενεργή δόση που προκύπτει λόγω ακτινοβόλησης από τα φυσικά ραδιοϊσότοπα, που περιέχονται στο έδαφος στον ελληνικό χώρο [5]. Ήταν επίσης μια τάξη μεγέθους μικρότερη από την μέση ετήσια ενεργή δόση λόγω εναπόθεσης στο έδαφος τεχνητών ραδιοϊσοτόπων από το ατύχημα του Chernobyl ένα έτος μετά το ατύχημα [6]. Ακόμη ήταν περίπου 370 φορές μικρότερη από την δόση που λαμβάνει ο μέσος άνθρωπος από όλες τις φυσικές πηγές ακτινοβόλησης σύμφωνα με τον UNSCEAR [194]. Τέλος ήταν τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερη από το όριο της IAEA για δραστηριότητες στις οποίες εμπλέκονται ραδιενεργές πηγές [86].

- **Πειραματική διερεύνηση:** Οι συγκεντρώσεις ^{238}U στο βρόχινο νερό της περιοχής της Μεγαλόπολης ήταν 4.5-41.4 φορές μεγαλύτερες από την αντίστοιχη μέτρηση, που πραγματοποιήθηκε στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Αυτές οι αυξημένες συγκεντρώσεις μπορούν να αποδοθούν στην λειτουργία των ΑΗΣ της περιοχής καθώς τα επίπεδα του ^{238}U στο βρόχινο νερό στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου θεωρείται ότι οφείλονται σε φυσική ραδιενέργεια. Όσον αφορά στις υψηλές τιμές ρυθμού εκροής ραδονίου, που έχουν παρατηρηθεί στην περιοχή της Μεγαλόπολης, συμπεραίνεται ότι δεν οφείλονται στην ιπτάμενη τέφρα, που διαφεύγει από τις καμινάδες των ΑΗΣ και εναποτίθεται στο έδαφος της περιοχής.

8.2 Σημεία πρωτοτυπίας της ΔΔ

Τα κυριότερα σημεία πρωτοτυπίας αυτής της ΔΔ είναι:

- Η εγκατάσταση του ORION-II σε προσωπικό Η/Υ σε λειτουργικό σύστημα Windows XP. Σημειώνεται ότι ο συγκεκριμένος κώδικας είχε αναπτυχθεί αρχικά για χρήση σε συστήματα IBM 370, 308x και 43xx.

- Η ανάλυση και άρση δύο σφαλμάτων στον πηγαίο κώδικα του ORION-II.

- Η ανάπτυξη του μετεωρολογικού προεπεξεργαστή *metprep* για την επεξεργασία των μετεωρολογικών δεδομένων, που χρησιμοποιούνται από τον ORION-II. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα περιλαμβάνει και εξισώσεις για τον υπολογισμό της ανύψωσης θερμών πλουμίων, που δεν διαθέτει ο ORION-II. Έτσι έγινε δυνατή η χρήση του ORION-II σε υπολογισμούς διασποράς ρύπων από ΑΗΣ καθώς ο συγκεκριμένος κώδικας προοριζόταν αρχικά για μελέτη διασποράς ρύπων από εγκαταστάσεις επεξεργασίας πυρηνικών καυσίμων.

- Η ανάπτυξη του γεωγραφικού προεπεξεργαστή *geocalc* για την επεξεργασία των γεωγραφικών δεδομένων, που χρησιμοποιούνται από τον ORION-II.
- Η πραγματοποίηση μελέτης της διασποράς ραδιενεργών ισοτόπων από τις καμινάδες των ΑΗΣ Μεγαλόπολης καθώς και η πραγματοποίηση αντίστοιχων δοσιμετρικών υπολογισμών.
- Η πραγματοποίηση δειγματοληψίων υγρής απόθεσης στην περιοχή της Μεγαλόπολης, η επεξεργασία και η επιτυχημένη συγκριτική ανάλυση των δειγμάτων με α-φασματοσκοπία και την συσκευή ανάλυσης κινητικής φωσφορισμού KPA-11.
- Η πραγματοποίηση μέτρησης του ρυθμού εκροής ραδονίου από δείγμα τέφρας μεγάλου όγκου, που βρισκόταν στο εσωτερικό του θαλάμου ραδονίου σε πάχος $1\,\mathrm{cm}$.

8.3 Μελλοντικές προοπτικές έρευνας

Οι εργασίες, που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της ΔΔ μπορούν να αποτελέσουν σημείο έναρξης μελλοντικών ερευνών. Θέματα, τα οποία εξετάστηκαν στην παρούσα ΔΔ σε επίπεδο διερεύνησης, μπορούν πλέον να εφαρμοσθούν σε μεγαλύτερο βάθος. Στην συνέχεια θα γίνει μια συνοπτική παρουσίαση τους.

8.3.1 Κώδικες υπολογισμού διασποράς

Η χρήση των κωδίκων ORION-II και GENII ανέδειξε την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα σχετικά με φυσικές ιδιότητες των σωματιδίων της τέφρας καθώς και με τις συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων στα σωματίδια της τέφρας, που διαφεύγουν από τις καμινάδες των ΑΗΣ Μεγαλόπολης. Έτσι θα πρέπει να πραγματοποιηθούν δειγματοληψίες τέφρας μέσα στις καμινάδες των ΑΗΣ και στην συνέχεια να γίνουν οι ακόλουθες αναλύσεις:

- Προσδιορισμός της κοκκομετρίας των σωματιδίων της τέφρας.
- Προσδιορισμός της πυκνότητας των σωματιδίων της τέφρας.
- Προσδιορισμός της συγκέντρωσης των ραδιοϊσοτόπων ενδιαφέροντος στα σωματίδια της τέφρας.

Έχοντας προσδιορίσει τα παραπάνω μεγέθη θα εισάγονται πλέον στους κώδικες δεδομένα πολύ πιο ακριβή με προφανείς συνακόλουθες συνέπειες στα αποτελέσματα.

Με βάση την συγκεντρωμένη μέχρι σήμερα εμπειρία από την εργασία με τους κώδικες ατμοσφαιρικής διασποράς προτείνεται να πραγματοποιηθούν εκτελέσεις των κωδίκων με λεπτομερέστερα μετεωρολογικά δεδομένα από αυτά, που ήταν διαθέσιμα

στην παρούσα ΔΔ. Μια πρόσφορη λύση θα ήταν η συλλογή ωριαίων καταγραφών των μετεωρολογικών συνθηκών της περιοχής για χρονικό διάστημα τουλάχιστον ενός έτους και στην συνέχεια η επεξεργασία τους με το πρόγραμμα metprep. Αυτή η διαδικασία θα βελτιώσει κατά πολύ την ποιότητα των παραγόμενων αποτελεσμάτων από τους κώδικες ORION-II και GENII.

Το πρόγραμμα *metprep*, το οποίο συντάχθηκε στα πλαίσια της ΔΔ, σχεδιάστηκε εξ αρχής ώστε να είναι μελλοντικά επεκτάσιμο και να προσαρμόζεται στις κατά περίπτωση ανάγκες. Η μελλοντική εργασία επάνω στο πρόγραμμα θα μπορούσε να ακολουθήσει διάφορες κατευθύνσεις επεκτείνοντας τις σημερινές ικανότητες και προσθέτοντας νέες. Ενδεικτικά αναφέρονται:

- Βελτίωση του προγράμματος *metprep*, ώστε να είναι δυνατόν να προσδιορίζει την ατμοσφαιρική ευστάθεια και με άλλες μεθοδολογίες εκτός από την σ_{A}. Έτσι θα είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί και με άλλα μετεωρολογικά δεδομένα, όπως το ύψος της νέφωσης ή η τυπική απόκλιση της κάθετης διεύθυνσης του ανέμου.

- Ανάπτυξη παραθυρικού περιβάλλοντος για το *metprep*, ώστε να είναι ευκολότερη η χρήση του και να είναι φιλικότερο προς τον χρήστη.

- Βελτίωση της υπορουτίνας calcdate, ώστε να λαμβάνει υπόψη της με μεγαλύτερη ακρίβεια το φαινόμενο των δίσεκτων ετών.

Για το πρόγραμμα *geoCalc* επίσης προτείνεται η ανάπτυξη παραθυρικού περιβάλλοντος, η οποία θα βελτιώσει την χρηστικότητα του συγκεκριμένου προγράμματος.

8.3.2 Πειραματική διερεύνηση

Από την έρευνα, που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της ΔΔ, προέκυψε η ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση της ραδιολογικής επίπτωσης των ΑΗΣ Μεγαλόπολης στην περιοχή. Έτσι δειγματοληψίες υγρής απόθεσης σε περισσότερες τοποθεσίες και για διαφορετικά διαστήματα του έτους θα βελτιώσουν την εικόνα ως προς την ραδιολογική επιβάρυνση της περιοχής. Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει η πραγματοποίηση δειγματοληψιών αποκλειστικά ξηρής απόθεσης τους καλοκαιρινούς μήνες, όπου οι βροχοπτώσεις απουσιάζουν ή είναι εξαιρετικά μειωμένες. Με αυτό τον τρόπο θα διαπιστωθεί ή συμβολή της ξηρής απόθεσης στο φαινόμενο.

Για τις δειγματοληψίες ξηρής απόθεσης θα είναι χρήσιμη η ανάπτυξη ενός δειγματολήπτη, ο οποίος θα διατηρεί την στάθμη νερού στο εσωτερικό του, που είναι απαραίτητη για την συγκράτηση των σωματιδίων της ξηρής απόθεσης, με την βοήθεια συστήματος αυτομάτου ελέγχου. Έτσι θα είναι δυνατή η δειγματοληψία χωρίς να χρειάζεται συχνή επιτήρηση.

Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η ανάπτυξη και κατασκευή ενός δειγματολήπτη, ο οποίος θα έχει την δυνατότητα να κάνει δειγματοληψία ξηρής και υγρής απόθεσης ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες. Έτσι θα είναι δυνατή η πλήρης παρακολούθηση του φαινομένου για ολόκληρο το διάστημα της δειγματοληψίας.

Όσον αφορά στην επεξεργασία των δειγμάτων βροχής σημαντικό θα είναι να αναπτυχθούν νέες τεχνικές, προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος εξάτμισης των δειγμάτων, ο οποίος μέχρι αυτή την στιγμή είναι αρκετά μεγάλος. Με αυτό τον τρόπο θα είναι δυνατή η άμεση εξαγωγή αποτελεσμάτων και η επεξεργασία πολλών δειγμάτων σε πολύ μικρότερο χρόνο. Για αυτό τον σκοπό θα μπορούσε να γίνει προμήθεια γυάλινων λεκανών μεγάλης ελεύθερης επιφάνειας, ώστε να αυξηθεί η ρυθμός εξάτμισης. Θα πρέπει επίσης να συγκροτηθεί και αντίστοιχη ιδιοκατασκευή για την συγκράτηση αυτών των λεκανών μέσα στα υδατόλουτρα.

Επίσης προτείνεται η ανάπτυξη τεχνικών τόσο κατά την δειγματοληψία όσο και κατά την επεξεργασία των δειγμάτων, που θα οδηγούν σε δείγματα με μειωμένη ποσότητα ιζήματος. Έτσι συνίσταται αρχικά η τοποθέτηση αραιού πλέγματος στις χοάνες δειγματοληψίας, το οποίο θα μπορεί να συγκρατεί τα έντομα καθώς και τα φύλλα των δέντρων και των φυτών. Εάν το συγκεκριμένο μέτρο δεν έχει τα αναμενόμενα αποτελέσματα προτείνεται το φιλτράρισμα του δείγματος μετά την δειγματοληψία με κατάλληλα πλέγματα και φίλτρα και η διερεύνηση της επίπτωσης της συγκεκριμένης τεχνικής στα παραγόμενα αποτελέσματα. Έχοντας διαυγέστερα δείγματα θα απλοποιηθεί πολύ η διαδικασία προετοιμασίας του δείγματος για μέτρηση με την ΚΡΑ και θα μειωθεί πολύ ο χρόνος για την λήψη των αποτελεσμάτων. Επίσης θα αυξηθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, που λαμβάνονται με γ-φασματοσκοπική ανάλυση. Τέλος θα μειωθεί ο χρόνος, που χρειάζεται για τον ραδιοχημικό διαχωρισμό των ισοτόπων πριν την α-φασματοσκοπική ανάλυση, αφού δείγματα τα οποία είχαν ίζημα καθυστερούσαν να περάσουν μέσα από τις κολώνες διαχωρισμού.

Όσον αφορά στην α-φασματοσκοπική ανάλυση προτείνεται η ανάπτυξη νέων μεθόδων, οι οποίες θα είναι κατάλληλες για την ανίχνευση ισοτόπων της σειράς του Th και ιδιαίτερα του ^{232}Th. Επίσης προτείνεται η ανάπτυξη μεθόδων για την ανίχνευση των ισοτόπων ^{210}Pb και ^{210}Po, τα οποία είναι γνωστά για την σημαντική τους ραδιοβιολογική επίπτωση. Σημειώνεται ότι τέτοιες μέθοδοι δεν υπήρχαν μέχρι τώρα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Σύμφωνα με την γ-φασματοσκοπική ανάλυση τα συγκεκριμένα ισότοπα υπήρχαν στα δείγματα, που εξετάστηκαν. Με την ανάπτυξη αυτών των μεθόδων θα είναι δυνατή η ποσοτική ανίχνευση τους και η αποκόμιση πληρέστερης εικόνας για την ραδιολογική σύσταση των δειγμάτων και την επίπτωση της λειτουργίας των ΑΗΣ στην περιοχή.

Παράρτημα Α΄

Αρχείο εντολών σύνδεσης των μεταγλωττισμένων υπορουτινών του ORION-II

Α΄.1 Το αρχείο makefile

```
orion: orion.o orion1.o orion2.o orion3.o orion4_.o orion5_.o
     f77 -o orion orion.o orion1.o orion2.o orion3.o orion4_.o orion5_.o

orion.o:  orion.f
     f77 -nocp -c orion.f

orion1.o:  orion1.f
     f77 -nocp -c orion1.f

orion2.o:  orion2.f
     f77 -nocp -c orion2.f

orion3.o:  orion3.f
     f77 -nocp -c orion3.f

orion4_.o:  orion4_.f
     f77 -nocp -c orion4_.f

orion5_.o:  orion5_.f
     f77 -nocp -c orion5_.f
```

Παράρτημα Β΄

Πηγαίοι κώδικες προγραμμάτων, που γράφτηκαν στα πλαίσια της ΔΔ

Β΄.1 Ο μετεωρολογικός προεπεξεργαστής *metprep*

Β΄.1.1 Κύρια ρουτίνα

```
      program metprep
c  This program calculates the stability class
c  for each wind direction and each stability
c  class(matrix 16*6). It also calculates the wind
c  frequency, the mixing height, the effective
c  plume height and the wind velocity at the
c  effective plume height for each wind direction
c  and each stability class. It reads the meteorological
c  data from the datmet.txt file, the data for the
c  source from the datconstr.txt and the sunrise and
c  sunset hours form the sunrise.txt
c  and sunset.txt files. It writes the results on
c  several files:
c  wind frequency:      percentage.txt
c  wind velocity :      velocity.txt
c  effective height:    efheight.txt
c  mixing height:       mixfin.txt
c (in the file mheight.txt it writes all the calculated
c  mixing heights and the correxponging hours)
c  wind velocity at stack height: stackvelo.txt
c  wind rose:           windrose.txt
c  surface temperature: temperat.txt
c  ---------Copyright N. Papadopoulos 2006------------
c  ---------------------------------------------------
c  variables:
```

```
c  iday: number of the day
c  imonth: number of month
c  ihour:  hour of the day
c  windvel: wind velocity (m/sec)
c  winddir: wind direction (degrees)
c  stddir: standard deviation of the wind direction
c  temp: temperature (celsius). It must be transformed
c  to Kelvin
c  usum(16,6): matrix of the sum of the wind velocity
c              for each stability category and wind
c              direction.
c  tsum(16,6): matrix of the sum of the ground
c              temperature for each stability category
c              and wind direction.
c  hsum(16,6): matrix of the sum of the mixing height
c              for each stability category and wind
c              direction.
c  countm(16,6): counter for each point of the matrices
c              usum, tsum
c  ufin(16,6): matrix of the mean wind velocity for each
c              stability category and wind direction
c              ufin(i,j) = usum(i,j)/countm(i,j).
c  tfin(16,6): matrix of the mean ground temperature for
c              each stability category and wind direction.
c  hfin(16,6): matrix of the mean mixing height for each
c              stability category and wind direction.
c  freq(16,6): wind frequency for each stability category
c              and wind direction
c  hef(16,6):  matrix of the effective plume height for
c              each stability catetegory and wind direction.
c  uef(6,16):  wind velocity at the effective plume height.
c  arws(6,16): reciprocal wind velocity at the effective
c              plume height.
c  rose(16):   wind frequency of each wind direction.
c  wrsum(16):  sum of wind velocities for each direction
c  cwr(16)  :  number of registrated wind velocities for
c              each direction
c  wr(16)   :  average wind speed for each dorection.
c  risetim(365): time of sunrise for each of the 365 days.
c  settim(365): time of sunset for each of the 365 days.
c  srise: time of sunrise (h)
c  sset: time of sunset (h)
c  zz: roughness height (m)
c  z: anemometer height (m)
c  Z0:source ground height(m)
c  inum: number of the source
```

```
c  Ts:stack gas exit temperature
c  Vs:stack gas exit velocity
c  gamatrix(6): potential temperature gradient (C/m) for
c               each stability class
c  gamma=gamatrix(stabf): potential temperature gradient
c                         for the stbf stability class.
c  don :index for day or night (day=1, night=0)
c  harx: initial mixing height (m)
c  hmix: calculated mixing height (m) with the daymix or
c        nocmix subroutines
c  hef: effective height of the plume calculated by plrise
c       subroutine.
c  tot: counter for the number of loops of reading data and
c       stability estimation (last line goto 10).
c  prevdir: this variable saves the current wind direction
c           value for use when the next wind velocity
c           value<1m/sec. When this
c           happens it substitutes the current wind
c           direction value with the prevdir value.
c  icalm:it counts the number of calm periods (u<1m/sec).
c  calm: 'real' variable for icalm
c  rtot: 'real' variable for tot
c  calmper:percentage of calm periods
c  ------------------------------------------------------------


      integer stab, stabf, don, cwr(16), tot
      real srise, sset
      dimension risetim(365), settim(365), gamatrix(6)
      real usum(16,6), tsum(16,6), hsum(16,6), countm(16,6), arws(16,6)
      real ufin(16,6), tfin(16,6), hfin(16,6), hef(16,6), uef(16,6)
real wrsum(16), wr(16)
      real freq(16,6), rose(16)
      data ((usum(i,j), j=1,6), i=1,16) / 96*0/
      !set zero as initial
      data ((tsum(i,j), j=1,6), i=1,16) / 96*0/
      !value at all elements
      data ((hsum(i,j), j=1,6), i=1,16) / 96*0/
      !of the matrices
      data ((countm(i,j), j=1,6), i=1,16) / 96*0/
      data ((freq(i,j), j=1,6), i=1,16) / 96*0/
      data (rose(i), i=1,16) / 16*0/
      data gamatrix / 0, 0, 0, 0.001, 0.020, 0.035 /
      t = 0
      gamma = 0.02
      !initialization of gamma with the value of E stab class
```

```
tot=0  !initialisation of the tot counter
icalm = 0
!initialisation of the icalm counter. It counts the
!number of calms

c ------------------
      open (1, file = 'datmet.txt')
      open (2, file = 'velocity.txt')
      open (10, file = 'percentage.txt')
      open (7, file = 'temperat.txt')
      open (8, file = 'windrose.txt')
      open (20, file = 'sunrise.txt')
      open (30, file = 'sunset.txt')
      open (40, file = 'mheight.txt')
      open (50, file = 'mixfin.txt')
open (60, file = 'efheight.txt')
      open (70, file = 'stackVelo.txt')
      open (80, file = 'testvel.txt')
      ! file for computations test
      open (90, file = 'boyancy.txt')
      open (100, file = 'downwash.txt')
      open (110, file = 'parameter.txt')
open (120, file = 'datconstr.txt')
c
c ----------- read the sunrise and sunset times
c
      read (20,*) (risetim(i), i=1,365)
      read (30,*) (settim(i), i=1,365)
c
c ----------- read the 'datconstr.txt' file
c
      read (120, 5400) Z0, inum
      !Z0:ground height, inum:source number.
read (120, 5500) zz, z
!zz:roughness height, z:anemometer height.
read (120, 5500) Hs, Ds
!Hs:stack height, Ds:stack diameter.
read (120, 5500) Vs, Ts
!Vs:gas exit velocity, Ts:stack gas exit
!temperature.
c
c --------- write title in the mheight.txt file
c
      write (40,*) 'MIXING HEIGHT FOR EACH HOUR OF CALCULATION'
write (40,5900)
```

```
c
c --------- calculation of sunrise and sunset times in
c           accordance with the EPA rules
c
      do 5 j=1,365
      risetim(j) = risetim(j) + 1
      settim(j) = settim(j) - 1
5     continue

c
c --------- read the file datmet. It contains the
c           meteorological  information
c
10    read (1, 3000, end=4000) iday, imonth, ihour, windvel, winddir,
     1                                          stddir, temp
3000  format (i2, i2, 6x, i2, 4x, f4.1, 2x, f5.1, 2x, f4.1, 2x, f6.3)
c
c
c ---------- treatment of calms with the rules of EPA
c
      if (windvel .lt. 1 .and. tot .eq. 0) then
    !if the first registration on the datmet.txt(tot=0) has
  !windvel<1m/sec then it doesn't change the winddir value.
  !However, it sets stddir=3 and icalm=1 (first calm period)
    windvel = 1
  stddir  = 3
  prevdir = winddir
  !It sets the current winddir value to
  !prevdir for use if the next windvel<1m/sec.
  icalm = 1
      else if (windvel .lt. 1 .and. tot .ne. 0) then
  windvel = 1
  winddir = prevdir
  !it substitutes the current winddir value
  !with the winddir value of previus registration.
  stddir  = 3
  !it substitutes the current stddir value with
  !stddir=3 (calm, no winds).
  icalm = icalm+1
  !counter for the number of calm periods.
else
  prevdir=winddir
  !when u>1m/sec it saves the winddir value
  !for use if the next registration has u<1m/sec.
endif
c
```

```
c --------- calculation of ambient temperature in Kelvin
c
      temp=temp+273.15
c
c --------- calculation of sunrise and sunset time
c

      call calcdate (iday, imonth, risetim, settim, sset, srise, iret)
      if (iret .eq. -7) then
        write (*,*) 'wrong value for the variable iday'
        write (*,*) 'iday=', iday
        write (*,*) 'imonth=', imonth
        write (*,*) 'ihour=', ihour
        write (*,*) 'windvel=', windvel
        write (*,*) 'winddir=', winddir
        write (*,*) 'stddir=', stddir
        stop
      endif
c
c ------------determination day or night
c

      if (ihour .le. srise) then
      ! 0=nighttime, 1=daytime
           don = 0
      else if (ihour .eq. aint(srise)+1 .and.
     1           srise-aint(srise) .gt. 0.301) then
      !srise-aint(srise)=minutes
!of srise. Here we check if
      !the decimal part of srise time
      !is bigger than 0.30.
      !If yes its night. If no
!its day. For the reasons of
      !.gt. 0.301 see blue dossier, 04/01/06
      !page 2.
           don = 0
      else if (ihour .gt. srise .and. ihour .le. sset) then
           don = 1
      else if (ihour .eq. aint(sset)+1 .and.
     1            sset-aint(sset) .gt. 0.301) then
!sset-aint(srise)=minutes of
!of sset. Here we check if
!the decimal part of sset time
      !is bigger than 0.30. If yes
!its day.If no its night. For the reasons
!of .gt. 0.301 see blue dossier, 04/01/06
```

```
!page 2 and 04/10/06 page 1.
           don = 1
      else if (ihour .gt. sset .and. ihour .le. 24) then
           don = 0
      else if (ihour .gt. 24) then
           write (*,*) 'the ihour is invalid (ihour>24)'
           write (*,*) 'ihour=', ihour
           write (*,*) 'iday=', iday
           write (*,*) 'imonth=', imonth
           write (*,*) 'windvel=', windvel
           write (*,*) 'winddir=', winddir
           stop
      endif


c
c ---------- initial estimate of stability class
c
      if (stddir .ge. 22.5) then
         stab = 1
      else if (stddir .ge. 17.5 .and. stddir .lt. 22.5) then
         stab = 2
      else if (stddir .ge. 12.5 .and. stddir .lt. 17.5) then
         stab = 3
      else if (stddir .ge. 7.5  .and. stddir .lt. 12.5) then
         stab = 4
      else if (stddir .ge. 3.8  .and. stddir .lt. 7.5)  then
         stab = 5
      else if (stddir .lt. 3.8) then
         stab = 6
      endif

c
c ----------- final estimate of stability class
c
      if (don .eq. 1) then     ! estimations for daytime
         if (stab .eq. 1 .and. windvel .lt. 3) then
               stabf = 1
         else if (stab .eq. 1 .and. windvel .ge. 3 .and.
     1                         windvel .lt. 4)   then
               stabf = 2
         else if (stab .eq. 1 .and. windvel .ge. 4 .and.
     1                            windvel .lt. 6)   then
               stabf = 3
         else if (stab .eq. 1 .and. windvel .ge. 6) then
               stabf = 4
```

```
         else if (stab .eq. 2 .and. windvel .lt. 4) then
               stabf = 2
         else if (stab .eq. 2 .and. windvel .ge. 4 .and.
     1                            windvel .lt. 6)    then
               stabf = 3
         else if (stab .eq. 2 .and. windvel .ge. 6) then
               stabf = 4
         else if (stab .eq. 3 .and. windvel .lt. 6) then
               stabf = 3
         else if (stab .eq. 3 .and. windvel .ge. 6) then
               stabf = 4
         else if (stab .eq. 4 .or. stab .eq. 5 .or. stab .eq. 6)
     1                                                   then
               stabf = 4
         endif
c
c ---------- estimations for nighttime
c
       else if (stab .eq. 1 .and. windvel .lt. 2.9) then
              stabf = 6
       else if (stab .eq. 1 .and. windvel .ge. 2.9 .and.
     1                      windvel .lt. 3.6)   then
              stabf = 5
       else if (stab .eq. 1 .and. windvel .ge. 3.6) then
              stabf = 4
       else if (stab .eq. 2 .and. windvel .lt. 2.4) then
              stabf = 6
       else if (stab .eq. 2 .and. windvel .ge. 2.4 .and.
     1                      windvel .lt. 3)    then
              stabf = 5
       else if (stab .eq. 2 .and. windvel .ge. 3.0) then
              stabf = 4
       else if (stab .eq. 3 .and. windvel .lt. 2.4) then
              stabf = 5
       else if (stab .eq. 3 .and. windvel .ge. 2.4) then
              stabf = 4
       else if (stab .eq. 4) then
              stabf = 4
       else if (stab .eq. 5 .and. windvel .lt. 5.0) then
              stabf = 5
       else if (stab .eq. 5 .and. windvel .ge. 5.0) then
              stabf = 4
       else if (stab .eq. 6 .and. windvel .lt. 3.0) then
              stabf = 6
       else if (stab .eq. 6 .and. windvel .ge. 3.0 .and.
     1                     windvel .lt. 5.0) then
```

```
              stabf = 5
       else
              stabf = 4
       end if

c
c ----------- registration of the wind direction values in the
c corresponding interval
c
      if (winddir .gt. 11.25 .and. winddir .le. 33.75) then
          idir = 1
      else if (winddir .gt. 33.75 .and. winddir .le. 56.25) then
          idir = 2
      else if (winddir .gt. 56.25 .and. winddir .le. 78.75) then
          idir = 3
      else if (winddir .gt. 78.75 .and. winddir .le. 101.25) then
          idir = 4
      else if (winddir .gt. 101.25 .and. winddir .le. 123.75) then
          idir = 5
      else if (winddir .gt. 123.75 .and. winddir .le. 146.25) then
          idir = 6
      else if (winddir .gt. 146.25 .and. winddir .le. 168.75) then
          idir = 7
      else if (winddir .gt. 168.75 .and. winddir .le. 191.25) then
          idir = 8
      else if (winddir .gt. 191.25 .and. winddir .le. 213.75) then
          idir = 9
      else if (winddir .gt. 213.75 .and. winddir .le. 236.25) then
          idir = 10
      else if (winddir .gt. 236.25 .and. winddir .le. 258.75) then
          idir = 11
      else if (winddir .gt. 258.75 .and. winddir .le .281.25) then
          idir = 12
      else if (winddir .gt. 281.25 .and. winddir .le. 303.75) then
          idir = 13
      else if (winddir .gt. 303.75 .and. winddir .le. 326.25) then
          idir = 14
      else if (winddir .gt. 326.25 .and. winddir .le. 348.75) then
          idir = 15
      else if ((winddir .gt. 348.75 .and. winddir .le. 360)
     1 .or. winddir  .le. 11.25)  then
          idir = 16
      else if (winddir .gt. 360) then
          write (*,*) 'wrong value for wind direction'
          write (*,*) 'winddir=', winddir
          stop
```

```
      endif

c
c ------------ estimation of the initial potential
c              temperature gradient
c
c the estimation is done in early morning
c conditions(srise-3 hours) when the ihour>=srise-3
c and ihour-1<=srise-3 (ihour<=srise-2) namely
c srise-3=<ihour=<srise-2.See blue dossier
c (code development) 13/03/06
c p.1-2 and 02/10/06 p. 1,5.
        if (ihour .ge. srise-3 .and. ihour-1 .le. srise-3) then
         gamma = gamatrix(stabf)
  endif

c
c ------------ select the appropriate routine for the
c              mixing height calculation
c
      if (stabf .le. 3) then
        call daymix(ihour, windvel, temp, zz, z, harx, stabf, gamma,
     1    hmix)
      else
        call nocmix (windvel, zz, z, stabf, hmix)
      endif
      harx = hmix
      !harx: initial value for the calculation of the
      !daytime mixing height(solution of the
    !differential equation with Runge-Kutta method)
    !the first calculation for mixing height is done
  !(and must be done) in nighttime conditions.
    !Then the routine calculates the daytime
!mixing height. For the calculation
    !of daytime mixing height must exist
!a initial value (harx) of mixing height.
!see blue dossier (code development) 13/03/06 p. 3

c
c ------------ write the calculated mixing height in
c              the file mheight(40)
c
      write (40,6000) ihour, hmix

c
c ------------ registration of the values of the wind
```

```
c              velocity and temperature on the
c              corresponding matrices
c
      usum(idir, stabf) = usum(idir, stabf) + windvel
      tsum(idir, stabf) = tsum(idir, stabf) + temp
      hsum(idir, stabf) = hsum(idir, stabf) + hmix
wrsum(idir) = wrsum(idir) + windvel
      countm(idir, stabf) = countm(idir, stabf) + 1
      tot = tot + 1 ! counter
cwr(idir) = cwr(idir) + 1     ! counter for windrose

      goto 10 ! go to read the next meteorological values

c
c ------------ calculation of the mean values of wind
c              velocity and ground temperature
c
4000  continue
      do 4200 i=1,16
       do 4100 j=1,6
         if (countm(i,j) .eq. 0) then
               !this if else command prevent
               ufin(i,j) = 0
               !the production of nan and inf
               tfin(i,j) = 0  !numbers.
               hfin(i,j) = 0
         else
              ufin(i,j) = usum(i,j)/countm(i,j)
              tfin(i,j) = tsum(i,j)/countm(i,j)
              hfin(i,j) = hsum(i,j)/countm(i,j)
              freq(i,j) = countm(i,j)/tot
              rose(i) = rose(i) + freq(i,j)
         endif

4100   continue
4200  continue

c
c ----------- calculation of mean wind speed for each
c             wind direction (wind rose)
c
      do 4250 l=1,16
   if (cwr(l) .eq. 0) then
   !this if-else command prevent the
   !production of nan and inf numbers
        wr(l) = 0
```

```
   else
        wr(l) = wrsum(l)/cwr(l)
   endif
4250  continue

c
c ----------- call the plrise subroutine
c
      call plrise (zz, z, Hs, Ds, Vs, Ts, ufin, tfin, hef)

c
c ----------- calculation of wind profile
c
      do 4400 i=1,16
  do 4300 j=1,6
    if (hef(i,j) .eq. 0) then
    !don't calculate uwf(i,j) arws(i,j)
      uef(i,j) = 0
      arws(i,j) =0
else   ! normal calculations
      Z2=hef(i,j)
      if (Z2 .gt. 200.) then   !for h>200 u=u(200)
        Z2 =200.
      endif
      call pcalc (zz, z, Z2, j, p)
      uef(i,j)=ufin(i,j)*(Z2/z)**p
      arws(i,j)=1/uef(i,j)
    endif
4300    continue
4400  continue
c
c ----------- comparison of effective height with
c             mixing height
c for fstab=1,2,3
c
      do 4700 i=1,16
  do 4600 j=1,3
    if (hef(i,j) .gt. hfin(i,j)) then
        hef(i,j)=hfin(i,j)
    else
        continue
    endif
4600    continue
4700  continue
      ! add the ground height to the effective plume height
    ! do not add if effective plume height=0
```

```
      do 4900 i=1,16
  do 4800 j=1,6
    if (hef(i,j) .eq. 0) then
        continue
    else
        hef(i,j) = hef(i,j) + Z0
    endif
4800    continue
4900  continue
c
c ------------ calculation of the percentage of calms
c
      calm=icalm
      !substitution of icalm with a 'real' variable
rtot=tot
    !substitution of tot with a 'real' variable
      calmper=(calm/rtot)*100

c
c ------------ write the wind speed in the velocity.txt file
c
write (2,*) 'SURFACE WIND SPEED FOR EACH DIRECTION AND EACH STABIL
1ITY CLASS'
write (2,5700)
      write (2, 5600) (inum, i,(ufin(i,j), j=1,6), i=1,16)
      write (2,*)
write (2,*)
write (2,*)
write (2,*) 'WIND VELOCITY ON THE EFFECTIVE HEIGHT OF THE PLUME'
write (2,5700)
write (2, 5600) (inum, i, (uef(i,j), j=1,6), i=1,16)
      write (2,*)
write (2,*)
write (2,*)
write (2,*) 'RECIPROCAL WIND VELOCITY ON THE EFFECTIVE HEIGHT OF
1THE PLUME'
write (2,5700)
write (2, 5600) (inum, i, (arws(i,j), j=1,6), i=1,16)
write (2,*)
write (2,*)
write (2,6100) calmper
c
c ---------- write the wind frequency in the
c            percentage.txt file
c
      write (10,*) "WIND FREQUENCY FOR EACH DIRECTION AND EACH STABILITY
```

```
     1CLASS"
write (10,5700)
write (10, 5600) (inum, i, (freq(i,j), j=1,6), i=1,16)
c
c ----------- write the mean temperature in the
c             temperat.txt file
c
write (7,*) 'MEAN TEMPERATURE FOR EACH WIND DIRECTION AND EACH STA
     1BILITY CLASS'
write (7,5700)
      write (7, 5600) (inum, i, (tfin(i,j), j=1,6), i=1,16)
c
c ----------- write the mixing height in the mixfin.txt file
c
write (50,*) 'AVERAGE MIXING HEIGHT FOR EACH WIND DIRECTION AND EA
1CH STABILITY CLASS'
write (50,5700)
      write (50,5600) (inum, i, (hfin(i,j), j=1,6), i=1,16)
c
c ----------- write the wind rose values in
c             the windrose.txt file
c
write (8, 5800)
      write (8, 5200) (rose(i), wr(i), i=1,16)

c
c ----------- write the "real" effective plume height on the
c ----------- efheight.txt file
c
      write (60,*)
write (60,*)
write (60,6200) Z0
write (60,5700)
write (60,5600) (inum, i, (hef(i,j), j=1,6), i=1,16)

5200  format (x, f7.3,2x, f7.3)
5400 format (x, f7.3, x, i2)
5500 format (x, f7.3, x, f7.3)
5600  format (x, i1,x, i2, 5x, 6f10.3 )
5700  format (19x, 'A', 9x, 'B', 9x, 'C', 9x, 'D', 9x, 'E', 9x, 'F')
5800  format ('wind freq',2x, 'wind speed')
5900  format (x, 'hour',4x, 'mix height')
6000  format (i3, 6x, f8.3)
6100  format ('percentage of calms(%)=', f6.2)
6200  format ('EFFECTIVE PLUME HEIGHT AFTER THE CORRECTION FOR MIXING HE
     1IGHT AND THE ADDITION' / 'OF Z0=', f6.2,'m. (HEIGHT OF THE BASE OF
```

```
     2THE STACK)')
      end
```

Β΄.1.2 Υπορουτίνες daymix, rk4, derivs και nocmix

```
      subroutine daymix (ihour, windvel, temp, zz, z, harx,
     1                              stabf, gamma, y)
c     This subroutine calculates the mixing height
c     in unstable conditions. The formulas are based
c     on S. Nath, R.Patil, A simple model to determine
c     in situ mixing height from surface  measurements,
c     Environmental Fluid mechanics 3, 195-219, 2003.
c     For the solution of the differential equation it
c     uses the Rounge-Kutta no.4 Method and the appropriate
c     routines of the book 'Numerical Recipes'
c     (subroutine rk4).
c     k: number of iterations
c     h: step of the iterations
c     z: anemometer height (m)
c     zz: roughness height (m)
c     temp:surface temperature (K)
c     ihour: initial value of time(hour)
c     t: initial value of time (seconds)
c     tf: final value of time (seconds)
c     lamda: Monin-Obukhov Lenght (m)
c     ustar: friction velocity u* (m/sec)
c     hzero : heat flux
c     harx: initial mixing height
c     y: final(calculated) mixing height
c     gamma:potential temperature gradient
c     A:coefficient in the differential equation
c     B:coefficient in the differential equation
c     -------------------------------------------------------
      dimension alpha(6), beta(6), y(1), yout(1), dydx(1)
      integer n, k, stabf
      real lamda, windvel
      real t, tf
      external derivs
      data alpha / -0.0875, -0.03849, - 0.00807, 0, 0.00807, 0.03849 /
      data beta / -0.1029, -0.1714, -0.3049, 0, -0.3049, -0.1714 /
      n = 1
      k = 3600
      y(1) = harx

      t = ihour*3600
```

```
      ! conversion of the ihour variable in seconds
      tf = t+3600      ! t final after an hour

c
c     calculation of the meteorological parameters
c
      lamda = 1/(alpha(stabf)*(zz**beta(stabf)))
      x = (1-16*z/lamda)**0.25
      delta = (1+x**2)/2
      zita = ((1+x)/2)**2
      psi = alog(delta*zita) - 2*atan(x) + 1.570796 ! pi/2 = 1.570796
      ustar = 0.4 * windvel/ (alog(z/zz) - psi)
      hzero = -(ustar**3)*temp/(0.4*9.81*lamda)
      A = 1.4*hzero/gamma
      B = (ustar**3)*temp/(9.81*gamma)

c
c     solution of the differential equation
c
      h = (tf-t)/k
      ! calculation of the step of the iteration
      do 20 i=1, k
      dydx(1) = A/y(1) + B/(y(1))**2
      !initial calculation of dydx
      !because the rk4 subroutine
!doesn't make initial calculation
!of dydx
      call rk4 (y, dydx, n, t, h, A, B, yout,  derivs)
      y(1) = yout(1)
      t = t+h
20    continue
      return
      end

      SUBROUTINE rk4(y,dydx,n,x,h, A, B, yout,derivs)
c     see the book 'Numerical Recipes'
      INTEGER n,NMAX
      REAL h,x,dydx(n),y(n),yout(n)
      EXTERNAL derivs
      PARAMETER (NMAX=50)
      INTEGER i
      REAL h6,hh,xh,dym(NMAX),dyt(NMAX),yt(NMAX)
      hh=h*0.5
      h6=h/6.
      xh=x+hh
      do 11 i=1,n
```

```
        yt(i)=y(i)+hh*dydx(i)
        !calculation of the value of y, which is
        !going to be applied in derivs equation
!for the calculation of the y'
!(K2 in the theory).
11    continue
      call derivs(xh,yt, A, B, dyt)      ! dyt = K2
      do 12 i=1,n
        yt(i)=y(i)+hh*dyt(i)
12    continue
      call derivs(xh,yt, A, B, dym)      ! dym = K3
      do 13 i=1,n
        yt(i)=y(i)+h*dym(i)
        dym(i)=dyt(i)+dym(i)
        !the change of the variable is made for
      !convinience reasons in the calculations.
13    continue
      call derivs(x+h,yt, A, B, dyt)     ! dyt = K4
      do 14 i=1,n
        yout(i)=y(i)+h6*(dydx(i)+dyt(i)+2.*dym(i))

14    continue
      return
      END


      subroutine derivs (x, y, A, B, dydx)
c     this subroutine include the mixing
c     height differential equation
      real x, y(*), dydx(*)
      dydx(1) = A/y(1) + B/(y(1))**2
      x=x
      !our differential equation doesn't have a x value
      return
      end


      subroutine nocmix (windvel, zz, z, stabf, hmix)
c     This subroutine calculate the nixing height
c     during neutral and stable conditions. The formulas
c     are based on S. Nath, R.Patil,
c     A simple model to determine in situ mixing height
c     from surface measurements, Environmental Fluid
c     Mechanics 3, 195-219, 2003.
c     alpha(6): matrix for the calculation of
c     Monin-Obukhov Lenght.
```

```
c     beta(6): matrix for the calculation of
c     Monin-Obukhov Lenght.
c     lamda: Monin-Obukhov Lenght (m).
c     zz:roughness height (m)
c     z:anemometer height (m)
c     stabf: number of stability class
c     ustar: friction velocity (m/sec)
c     windvel: wind surface velocity (m/sec)
c     hmix: mixing height (m)
      dimension alpha(6), beta(6)
      integer stabf
      real lamda
      data alpha / -0.0875, -0.03849, - 0.00807, 0, 0.00807, 0.03849 /
      data beta / -0.1029, -0.1714, -0.3049, 0, -0.3049, -0.1714 /

c
c     neutral conditions
c
      if (stabf .eq. 4) then
        ustar = 0.4*windvel/(alog(z/zz))
        hmix = 0.17*ustar/.000088
        ! f = 0.000088 coriolis parameter
c
c    stable conditions
c
      else
        lamda = 1/(alpha(stabf)*(zz**beta(stabf)))
        ustar = 0.4*windvel/alog(z/zz) + 4.7*(z-zz)/lamda
        hmix = 0.4*(ustar*lamda/0.000088)**(0.5)
      endif
      return
      end
```

Β΄.1.3 Υπορουτίνες plrise, pcalc

```
       subroutine plrise (zz, z, hs, ds, vs, ts, u, t, he)
c this is a subroutine who calculates the plume
c rise from the stack top. It calculates also the
c wind velocity at the stack top (stackVelo file).
c The program doesn't compute the plume rise before
c the final height. It does compute stack tip downwash,
c wind profile and temperature gradient. It writes on
c files several computations as boyancy flux Fb (boyancy),
c stability parameter s(parameter), and wind velocity at
c stack height Vs (stackVelo). This subroutine calculates
```

```
c the plume rise ONLY for boyancy rise. If the the plume is
c characterized by momentum rise the user should use the
c ORION-II code. This code has the appropriate routines
c for the calculation of momentum rise. The only think is
c that the metprep routine can't give values for the mixing
c height and cut the plume rise values when it is necessary.
c ------------------------------------------------------------
c
c variables:
c s: stability parameter
c u: ground wind velocity (10m)
c t: ground temperature
c us: wind velocity at stack height
c hs1: stack height after computation for stack tip downwash
c he: effective stack height (hs1 + plume rise)
c vs: plume stack exit velocity
c ts: plume temperature at the exit of the stack
c hs: stack height
c ds: inside stack diameter
c fb: boyancy flux
c z : anemometer height(m)
c zz:roughness height (m)
-----copyright 2006 Nikos K. Papadopoulos-------------------
      real s(16,6), u(16,6), t(16,6), us(16,6), hs1(16,6),
     1 he(16,6), fb(16,6)
c
c -----calculation of plume rise (we have matrices (16,6),
c      so the calculations are made one by one with DO)

      do 20 j=1,6
      do 10 i=1,16
if (u(i,j) .eq. 0 .or. t(i,j) .eq. 0) then
!this if else command
!prevent the production
!of nan numbers
  he(i,j)=0

else
  call pcalc (zz, z, hs, j, p)
        us(i,j)= u(i,j)*(hs/z)**p
        !calculation of wind profile.
        fb(i,j)=9.81*vs*(ds**2)*(ts-t(i,j))/(4*ts)
        !calculation of fb.
        if (vs .lt. 1.5*us(i,j)) then
        !calculation of
          hs1(i,j)=hs+2*ds*(vs/us(i,j)-1.5)
```

```
          !stack tip downwash.
        else
          hs1(i,j)=hs
        endif
c
c ----in the matrices the columns represent
c     the stability category 1-A, 2-B, 3-C, etc.
c     So here we  make calculations for unstable and
c     neutral conditions.
c
      if (j .le. 4) then
 if (fb(i,j) .lt. 55) then   !he(i,j) for fb<55
        he(i,j) = hs1(i,j) + 21.425*((fb(i,j))**(0.75))/us(i,j)
 else   !he(i,j) for fb=>55
  he(i,j) = hs1(i,j) + 38.71*((fb(i,j))**(0.6))/us(i,j)
 endif
      else if (j .eq. 5) then
      ! stability category E
          s(i,j) = 9.81*0.02/t(i,j)
          he(i,j) = hs1(i,j) + 2.6*(fb(i,j)/(us(i,j)*s(i,j)))
     1    **(0.3333333333333333)
      else
      ! stability category F
          s(i,j)= 9.81*0.035/t(i,j)
          he(i,j) = hs1(i,j) + 2.6*(fb(i,j)/(us(i,j)*s(i,j)))
     1    **(0.3333333333333333)
        endif
endif
10     continue
20     continue
c
c      printout of results and files for comptutations tests
c
       write (60, 5500)
       write (70, 6500)
       write (60, 5010) ((he(i,j), j=1,6), i=1,16)
       write (70, 5010) ((us(i,j), j=1,6), i=1,16)
       write (60, 7000) vs, ts, hs, ds
       write (80, 5010) ((u(i,j), j=1,6), i=1,16)
       write (90, 5010) ((fb(i,j), j=1,6), i=1,16)
       write (100, 5010)  ((hs1(i,j), j=1,6), i=1,16)
       write (110, 5010) ((  s(i,j), j=1,6), i=1,16)
5010   format (11x, 6f11.5)
5500   format (' effective height of the plume')
6000   format (11x, 6f10.3)
6500   format ('wind velocity at stack height')
```

```
7000   format (// 'Vs(m/sec)=', f7.3 / 'Ts(K)=', f7.3 / 'Hs(m)=', f7.3 /
     1  'Ds(m)=', f7.3)
       end



c
c--------- subroutine pcalc:calculates p of the
c          exponential law
c
subroutine pcalc (zz, z, Z2, i, p)
c  this subroutine calculates the p of the exponential
c  law. The calculations are based on the formulas
c  of J.Irwin, A theoretical variation of the wind
c  profile power-law as a function of surface roughness
c  and stability, Atmospheric Environment 13, 1979, 191-194.
c  i : number of stability class
c  zz: roughness height
c  z : anemometer height
c  Z2: height of the top layer
c  Zm: average height between the top layer and the layer
c  of the anemometer height where Zm=(Z2-z)/2
c  rlamda: reciprocal of L(Monin-Obukhov lenght)
c  alpha(6): coefficient for the calculation of lamda
c  beta (6): coefficient for the calculation of lamda
c  p :exponent of the equation for the calculation of
c  wind profile
real alpha(6), beta(6)
data alpha / -0.0875, -0.03849, -0.00807, 0, 0.00807, 0.03849/
data beta  / -0.1029, -0.1714,  -0.3049,  0, -0.3049, -0.1714/
gamma=15
Zm=(Z2-z)/2
c
c ------------ calculation of rlamda=1/lamda
c
rlamda = alpha(i)*(zz)**beta(i)
c
c ------------ unstable conditions
c
      if (i .le. 3) then
   phi = (1-gamma*Zm*rlamda)**(-0.25)
   zita =(1-gamma*Zm*rlamda)**(0.25)
   zitaz=(1-gamma*zz*rlamda)**(0.25)
   fnum=((zitaz**2+1)*(zitaz+1)**2)
   fden1=(zita**2+1)
   fden2=(zita+1)**2
```

```
   fden=fden1*fden2
   fract=fnum/fden
   psi=alog(Zm/zz)+alog(fract)+2*(atan(zita)-atan(zitaz))
   p=phi/psi
else if (i .eq.4) then        !neutral conditions
   p=1/alog(Zm/zz)
else   !stable conditions
   phi=1+2*Zm*rlamda
   psi=alog(Zm/zz)+2*Zm*rlamda
   p=phi/psi
endif
return
end
```

Β΄.1.4 Υπορουτίνα calcdate

```
      subroutine calcdate (iday, imonth, risetim,
     1                 settim, sset, srise, iret)
c     this subroutine returns the sunset and sunrise
c     hour of the day for which the calculation of
c     the stability is done. The sunset and sunrise hours
c     are recorded in the sunset and sunrise files
c     respectively. This subroutine has a mini algorithm
c     for the leap years. The leap years have for the
c     "normal"  days the same
c     sunrise and sunset times as the "normal years".
c     So for the 29/02 we have an if and this if its true
c     the subroutine returns the appropriate value for
c     srise and sset. For all the other days the
c     subroutine returns the corresponding value from
c     the main algorithm of the subroutine.
c     ----------------------------------------------------
c     variables:
c     ndmonth(12): matrix. Each component of the matrix
c     is the sum of the days of the month
c     idoy: day of the year(example: 01/01/05 doy=1,
c           31/12/2005 doy=365)
c     srise: value of the sunrsise time of the
c     corresponded day
c     sset: value of the sunset time of the
c     corresponded day
c     iret: returned value when the iday is invalid
c     -------copyright 2006 Nikos K. Papadopoulos --------
      dimension ndmonth(12), risetim(365), settim(365)
      data ndmonth / 31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31 /
```

```
      idoy = 0
c
c     check for invalid iday
c
      if (imonth .eq. 4 .or. imonth .eq. 6 .or. imonth .eq. 9
     1                            .or. imonth .eq. 11) then
          if (iday .lt. 1 .or. iday .gt. 30) then
               iret=-7
               return
           endif
      else if (imonth .eq. 1 .or. imonth .eq. 3 .or. imonth .eq. 5 .or.
     1imonth .eq. 7 .or. imonth .eq. 8 .or. imonth .eq. 10 .or. imonth
     1                                                  .eq. 12) then
          if (iday .lt. 1 .or. iday .gt. 31) then
              iret = -7
              return
          endif
      else if (imonth .eq. 2) then
          if (iday .lt. 1 .or. iday  .gt. 29) then
              iret = -7
              return
          endif
       endif
c
c  determination of sset and sunrise when the day is 29/02
c
      if (imonth .eq. 2 .and. iday .eq. 29) then
          srise = 07.59
          sset  = 17.17
          return
      endif
c
c  calculation of idoy, sset and srise
c
      do 20 i=1, imonth-1
           idoy = idoy + ndmonth(i)
20    continue
      idoy = idoy+iday
      srise = risetim(idoy)
      sset  = settim(idoy)
      return
      end
```

Β΄.2 Ο προεπεξεργαστής γεωγραφικών δεδομένων *GeoCalc*

Β΄.2.1 Κύρια ρουτίνα

```
      program geocalc
c This program calculates the geographical coordinates
c of a point when we know the distance and the azimouth
c from another point with known coordinates. For
c distances greater than 10Km it uses the iterative
c algorithm of M. Hooijberg, Practical Geodesy, p.64.
c copyright Nikos Papadopoulos 2006
c ---------------------- Variables ------------------------
c G:     number of radius
c a:     equatorial radius of the earth (m)
c b:     polar radius of the earth (m)
c phi:   latitude of the reference point  (degrees)
c lamda: longitude of the reference point (degrees)
c r(20): this matrix contains the radius of the calculation
c athita(32): this matrix contains the azimuth angles of
c             the calculation
c aphi(20,32):this matrix contains the calculated values
c            of phi (degrees)
c phirad(20,32) this matrix contains the calculated values
c               of phi (rad)
c alamda(20,32):this matrix contains the calculated values of
c               lamda (degrees)
c M: radius of curvature in the Meridian
c N: radius of carvature in the Prime Vertical
c sphi: variable for the storing of the phi value of
c       reference point
c slamda: variable for the storing of the lamda value of
c         reference point
c equad: =(a^2-b^2)/b^2
c difphi:  phi angle between reference and calculation point
c diflamda:lamda angle between reference and calculation point
c thita:   azimuth angle (degrees)
c azim:= thita
c tn: =thita
c rl: =r(i)-w: lenght (distance) in the last loop of the
c              iterative method
c ------------------------------------------------------------
c ---------------------------- files -------------------------
c geo.out1 : input file that contains number of radius G, a, b,
c            phi, lamda
```

```
c            of the reference point and values of radius
c results.out1: output file that contains distance from the
c               refernce point, azimuth, thita, phi, lamda.
c-------------------------------------------------------------
      dimension r(20), athita(32)
double precision a, b, M, N, lamda, phi, phn, lan, alamda(20,32),
1 phrad(20,32), aphi(20,32), sphi, slamda
integer G
open (10, file="geo.dat1")
open (20, file="results.out1")
thita = 0
c
c --------- read the data from the geo.dat1 file
c
read (10,*) G
read (10,*) a, b
read (10,*) phi, lamda
read (10,*) (r(i), i=1,G)
c
c --------- conversion from degrees to rad
c
      phi= phi*3.1415927/180
lamda = lamda*3.1415927/180
c
c --------- secure data (we store the values of phi and lamda for
c           using them later)
c
      sphi = phi
      slamda = lamda
c
c --------- write headlines in the results.out1 file
c
      write (20,110)
c
c --------- calculation of phi, lamda
c
      equad = (a**2-b**2)/b**2
      do 30 i=1,G
 do 20 k=1,32
   k1=k-1 !k1 takes the value 0, k doesn't take that value
   thita = k1*11.25*3.1415927/180  !value of azimuth
   if (r(i) .le. 10000) then
c
c ---------- calculation of phi
c
     M = (a**2)/(b*((1+equad*(cos(phi))**2)**(1.5)))
```

```
     difphi = cos(thita)*r(i)/M
           phrad(i,k) = phi+difphi   !phi in rad
     aphi(i,k) = (phi+difphi)*180/3.1415927 !phi in degrees
c
c ---------- calculation of lamda
c
     N = a**2/(b*(1+equad*(cos(phrad(i,k)))**2)**(0.5))
     diflamda = r(i)*sin(thita)/(N*cos(phrad(i,k)))
     alamda(i,k) = (lamda+diflamda)*180/3.1415927
     !lamda in degrees
     athita(k) = thita*180/3.1415927
   else    !start of iterative method when r>10km
     l = r(i)/10000
     phi = sphi
     !we use the values of reference point that we have
     lamda = slamda !stored at the start of the code
     thita = k1*11.25*3.1415927/180
     !value of azimuth for the iterative method
 azim = thita
     do 10 j=1,l
       w = j*10000
       call flcalc(a, b, equad, w, azim, phi, lamda, i, k,
1                                       phn, lan, tn)
       phi = phn
       !phi and lamda take their values from the calculated
       lamda = lan
       !values phn, lan, tn (the subroutine flcalc delivers
       azim = tn
       !the values). Now we can run the flcalc subroutine
                   !with the new values of phi, lamda, azim.
10         continue   ! end of do 10

           if (r(i) .eq. w) then !when r(i)=10Km, 20Km or 30Km.
       continue
     else
             rl = r(i)-w
             !last iteration when r(i) diff than 10, 20 or 30Km.
       call flcalc(a, b, equad, rl, azim, phi, lamda, i, k,
1                                       phn, lan, tn)
       phi = phn
       lamda = lan
 endif
             aphi(i,k) = phi*180/3.1415927
             alamda(i,k) = lamda*180/3.1415927
       athita(k)=thita*180/3.1415927
   endif
```

```
 !write the r, thita, aphi, alamda values in the results.out1 (20) file
 write(20,100) r(i), athita(k), aphi(i,k), alamda(i,k)
20     continue
30    continue

100   format(1x, f8.1, 3x, 3(f11.6, 3x))
110   format(2x, "distance", 6x, "thita", 10x, "fi", 10x, "lamda")
      stop
end
```

Β΄.2.2 Υπορουτίνα flcalc

```
subroutine flcalc(a, b, equad, r, thita, phi, lamda, i, k, phn,
1lan, tn)
c ----------------------------- variables -----------------------
c Nz:    N number for the refernce point
c numer: Clairaut number for the refernce point
c phn : calculated phi for the new point (rad)
c lan : calculated lamda for the new point (rad)
c fg : =sin(thita)
c tn : =thita
c the other variables are the same with these in the main routine
c ------------------------------------------------------------------
double precision a, b, numer, phi, phn, lamda, lan, M, N, Nz
      M =a**2/(b*((1+equad*(cos(phi))**2)**(1.5)))
Nz = a**2/(b*(1+equad*(cos(phi))**2)**(0.5))
!Nz: value for the refernce point.
numer = Nz*cos(phi)*sin(thita) !numer=Clairaut number
                               !for the reference point
c
c ------------- calculation of phi
c
      difphi = cos(thita)*r/M
  phn = phi+difphi
c
c ------------- calculation of lamda
c
N = a**2/(b*(1+equad*(cos(phn))**2)**(0.5))
!value of N for the new point.
diflamda = r*sin(thita)/(N*cos(phn))
  lan = lamda+diflamda
c
c -------- calculation of thita with Clairaut's equation
c
fg= numer/(N*cos(phn))   !fg=sin(thita)
```

```
if (thita .ge. 0 .and. thita .le. 1.570796327) then
    thita = asin(fg)
else if (thita .gt. 1.570796 .and. thita .le. 3.1415927) then
    thita = 3.141592654 -  asin(fg)
else if (thita .gt. 3.1415927 .and. thita .le. 4.712389) then
    thita = 3.141592654 + abs(asin(fg))
else if (thita .gt. 4.712389 .and. thita .le. 6.283185) then
    thita = 4.71238898 + (1.570796327+asin(fg))
else
    write (*,*) 'wrong value of thita'
    write (*,*) 'i=',i, 'k=',k
    stop
endif
tn=thita
return
end
```

Β΄.3 Ο προεπεξεργαστής γεωγραφικών δεδομένων *geoCalc16D*

Β΄.3.1 Κύρια ρουτίνα

```
      program geoc16D
c This program calculates the geographical coordinates
c of a point when we know the distance and the azimouth
c from another point with known coordinates. For distances
c greater than 10Km it uses the iterative algorithm of
c M. Hooijberg, Practical Geodesy, p.64.
c copyright Nikos Papadopoulos 2006
c ---------------------- Variables -----------------------
c G:     number of radius
c a:     equatorial radius of the earth (m)
c b:     polar radius of the earth (m)
c phi:   latitude of the reference point  (degrees)
c lamda: longitude of the reference point (degrees)
c r(20): this matrix contains the radius of the
c calculation
c athita(32): this matrix contains the azimuth angles
c of the calculation.
c aphi(20,32):this matrix contains the calculated values
c of phi (degrees)
c phirad(20,32) this matrix contains the calculated values
c of phi (rad)
```

```
c alamda(20,32):this matrix contains the calculated values
c of lamda (degrees)
c M: radius of curvature in the Meridian
c N: radius of carvature in the Prime Vertical
c sphi: variable for the storing of the phi value of reference
c point.
c slamda: variable for the storing of the lamda value of
c reference point
c equad: =(a^2-b^2)/b^2
c difphi:  phi angle between reference and calculation point
c diflamda:lamda angle between reference and calculation point
c thita:   azimuth angle (degrees)
c azim:= thita
c tn: =thita
c rl: =r(i)-w: lenght (distance) in the last loop of the
c iterative method
c ------------------------------------------------------------
c ---------------------------- files -------------------------
c geo.out1 : input file that contains number of radius G, a, b,
c            phi, lamda of the reference point and values of
c            radius
c results.out1: output file that contains distance from the
c               refernce point,
c               azimuth thita, phi, lamda.
c-------------------------------------------------------------
      dimension r(20), athita(16)
double precision a, b, M, N, lamda, phi, phn, lan, alamda(20,16),
1 phrad(20,16), aphi(20,16), sphi, slamda
integer G
open (10, file="geo16D.dat1")
open (20, file="results16D.out1")
thita = 0
c
c --------- read the data from the geo.dat1 file
c
read (10,*) G
read (10,*) a, b
read (10,*) phi, lamda
read (10,*) (r(i), i=1,G)
c
c --------- conversion from degrees to rad
c
      phi= phi*3.1415927/180
lamda = lamda*3.1415927/180
c
c --------- secure data (we store the values of phi and lamda
```

```
c           for using them later)
c
      sphi = phi
      slamda = lamda
c
c --------- write headlines in the results.out1 file
c
      write (20,110)
c
c --------- calculation of phi, lamda
c
      equad = (a**2-b**2)/b**2
      do 30 i=1,G
 do 20 k=1,16
c    k1=k-1 !k1 takes the value 0, k doesn't take that value
   thita = k*22.5*3.1415927/180  !value of azimuth
   if (r(i) .le. 10000) then
c
c ---------- calculation of phi
c
     M = (a**2)/(b*((1+equad*(cos(phi))**2)**(1.5)))
     difphi = cos(thita)*r(i)/M
           phrad(i,k) = phi+difphi   !phi in rad
     aphi(i,k) = (phi+difphi)*180/3.1415927 !phi in degrees
c
c ---------- calculation of lamda
c
     N = a**2/(b*(1+equad*(cos(phrad(i,k)))**2)**(0.5))
     diflamda = r(i)*sin(thita)/(N*cos(phrad(i,k)))
     alamda(i,k) = (lamda+diflamda)*180/3.1415927  !lamda in degrees
     athita(k) = thita*180/3.1415927
   else    !start of iterative method when r>10km
     l = r(i)/10000
     phi = sphi
     !we use the values of reference point that we have
     lamda = slamda !stored at the start of the code
     thita = k*22.5*3.1415927/180
     !value of azimuth for the iterative
 azim = thita   !method
     do 10 j=1,l
       w = j*10000
       call flcalc(a, b, equad, w, azim, phi, lamda, i, k,
1                                       phn, lan, tn)
       phi = phn
       !phi and lamda take their values from the calculated
       lamda = lan
```

```
       !values phn, lan, tn (the subroutine flcalc delivers
       azim = tn   !the values). Now we can run the flcalc subroutine
                   !with the new values of phi, lamda, azim.
10         continue   ! end of do 10

           if (r(i) .eq. w) then !when r(i)=10Km, 20Km or 30Km.
       continue
     else
             rl = r(i)-w
             !last iteration when r(i) diff than 10, 20 or 30Km.
       call flcalc(a, b, equad, rl, azim, phi, lamda, i, k,
1                                      phn, lan, tn)
       phi = phn
       lamda = lan
 endif
             aphi(i,k) = phi*180/3.1415927
             alamda(i,k) = lamda*180/3.1415927
       athita(k)=thita*180/3.1415927
   endif
 !write the r, thita, aphi, alamda values in the results.out1 (20) file
 write(20,100) r(i), athita(k), aphi(i,k), alamda(i,k)
20     continue
30    continue

100   format(1x, f8.1, 3x, 3(f11.6, 3x))
110   format(2x, "distance", 6x, "thita", 10x, "fi", 10x, "lamda")
      stop
end
```

Β΄.3.2 Υπορουτίνα flcalc

```
subroutine flcalc(a, b, equad, r, thita, phi, lamda, i, k, phn,
1lan, tn)
c ----------------------------- variables ----------------------
c Nz:    N number for the refernce point
c numer: Clairaut number for the refernce point
c phn : calculated phi for the new point (rad)
c lan : calculated lamda for the new point (rad)
c fg : =sin(thita)
c tn : =thita
c the other variables are the same with these in the main routine
c ----------------------------------------------------------------
double precision a, b, numer, phi, phn, lamda, lan, M, N, Nz
      M =a**2/(b*((1+equad*(cos(phi))**2)**(1.5)))
Nz = a**2/(b*(1+equad*(cos(phi))**2)**(0.5))
```

```
!Nz: value for the refernce
numer = Nz*cos(phi)*sin(thita)
!point. numer=Clairaut number
!for the reference point
c
c ------------- calculation of phi
c
      difphi = cos(thita)*r/M
  phn = phi+difphi
c
c ------------- calculation of lamda
c
N = a**2/(b*(1+equad*(cos(phn))**2)**(0.5))
!value of N for the new point.
diflamda = r*sin(thita)/(N*cos(phn))
  lan = lamda+diflamda
c
c ------------- calculation of thita with Clairaut's equation
c
fg= numer/(N*cos(phn))   !fg=sin(thita)
if (thita .ge. 0 .and. thita .le. 1.570796327) then
    thita = asin(fg)
else if (thita .gt. 1.570796 .and. thita .le. 3.1415927) then
    thita = 3.141592654 -  asin(fg)
else if (thita .gt. 3.1415927 .and. thita .le. 4.712389) then
    thita = 3.141592654 + abs(asin(fg))
else if (thita .gt. 4.712389 .and. thita .le. 6.283185307) then
    thita = 4.71238898 + (1.570796327+asin(fg))
else
    write (*,*) 'wrong value of thita'
    write (*,200) i, k, thita
    stop
endif
tn=thita
200   format ("i=", i2, 2x, "k=", i2, 2x, "thita=", f11.8)
return
end
```

Β΄.4 Το πρόγραμμα *otran*

```
      program Otran
c     This routine transforms the results that
c     ORION-II produce in a form, that is convinient
c     for 3D mapping with programs such GNUPLOT and
```

```
c     surfer. ORION-II produce results in polar
c     coordinate system. The routine transforms the
c     results in cartesian coordinate system. The ORION-II
c     file must have a name polarconc.txt. The routine
c     stores the results in a file with name cartesconc.txt.
c     The ORION-II code calculates concnentrations in
c     sectors with 22.5 degrees angle. In the results' file
c     it prints only the coordinates of the sector's center.
c     -------------------------------------------------------
c     polarconc.txt : input file that contains the
c     concentration and the point in polar coordinate system.
c     (This file is produced from ORION-II.)
c     cartesconc.txt : output file that contains the points
c     with the coresponding concentration in cartesian
c     coordinate system
c     radius(20): matrix that contains the radius of the
c     polar system
c     concent(16,20): matrix that contains the concentrations
c     polarm(320,3): matrix that contains the points
c     (in polar system) with the coresponding concentrations.
c     cartm(320,3): matrix that contains the points
c     (in cartesian system) with the coresponding
c     concentrations.
c     k: counter for the polarm matrix.
c     --------------------------------------------------------
c     Copyright: Nikos Papadopoulos 2007.

dimension radius(20), concent(16,20), polarm(320,3), cartm(320,3)
open (50, file='polarconc.txt')
open (60, file='cartesconc.txt')
c
c ----- read the data file:polarconc.txt
read (50,*)
read (50,*)
read (50,1000) (radius(i), i=1,10)
read (50,*)
do 5 i=1,16
  read (50,1100) (concent(i,j), j=1,10)
5     continue
      read (50,*)
read (50,1000) (radius(i), i=11,20)
read (50,*)
do 7 i=1,16
  read(50,1100) (concent(i,j), j=11,20)
7     continue
c
```

```
c ----- matrix transformation
c
      do 30 i=1,16
  do 20 j=1,20
   k=20*(i-1)+j
c        with counter k the routine transforms each
c        element of the rows of concent(16,20) into
c        rows of the polarm(320,3). Each row contains one
c        point (R, thita, concentration).
   polarm(k,3)=concent(i,j) !polarm(k,3)=concentration (Ci/m^3)
   polarm(k,2)=(i)*22.5*3.141593/180
   !polarm(k,2)=thita, angle in radians
   polarm(k,1)=radius(j) !polarm(k,1)=R
20      continue
30    continue
c
c ----- transformation from polar to cartesian coordinates
c
      do 40 i=1,320
  cartm(i,1)=polarm(i,1)*sin(polarm(i,2))
  !cartm(i,1)=X, X=Rsin(thita)
  cartm(i,2)=polarm(i,1)*cos(polarm(i,2))
  !cartm(i,2)=Y, Y=Rcos(thita)
  cartm(i,3)=polarm(i,3)*3.7*(10**9)*10
  !cartm(i,3)=concentration (Bq/m^3)
40    continue
c
c ----- write the matrix in the file
c
      write (60, 1300)
      do 50 i=1,320
  write(60,1200) (cartm(i,j), j=1,3)
50    continue
1000  format (9x, 10(f7.1, 3x))
1100  format (7x, 10(1PE9.3, x))
1200  format (3x, 2(2x, f10.3), 2x, 1PE9.3)
1300  format (10x, 'X', 10x, 'Y', 6x, 'Concent(Bq/m^3)')
      end
```

Β΄.5 Το πρόγραμμα *ogt*

```
      program ogt
c     This routine transforms the results that
c     ORION-II produce in a form, that is convinient
```

```
c     for 3D mapping with programs such GNUPLOT and
c     surfer. ORION-II produce results in polar
c     coordinate system. The routine
c     transforms the results in cartesian coordinate
c     system. The ORION-II file
c     must have a name polarconc.txt. The routine stores
c     the results in a file  with name cartesconc.txt.
c     The ORION-II code calculates concentrations in
c     sectors with 22.5 degrees angle. In the results'
c     file it prints only the coordinates of the sector's
c     center. For better graphical representation
c     I insert another 2 points for each sector (which
c     have the same concetration). These points are:
c     (main point)+-10 degrees. See section
c    matrix transformation.
c     ----------------------------------------------------
c     polarconc.txt : input file that contains the
c     concentration and the point in polar coordinate
c     system. (This file is produced from ORION-II.)
c     cartesconc.txt : output file that contains the
c     points with the coresponding concentration in
c     cartesian coordinate system
c     radius(20): matrix that contains the radius of the
c     polar system
c     concent(16,20): matrix that contains the concentrations
c     polarm(960,3): matrix that contains the points(
c     in polar system) with the coresponding concentrations.
c     cartm(960,3): matrix that contains the
c     points(in cartesian system) with the coresponding
c     concentrations.
c     k: counter for the polarm matrix.
c     -------------------------------------------------------
c     Copyright: Nikos Papadopoulos 2007.
dimension radius(20), concent(16,20), polarm(960,3), cartm(960,3)
open (50, file='polarconc.txt')
open (60, file='cartesconc960.txt')
c
c ----- read the data file:polarconc.txt
c
read (50,*)
read (50,*)
read (50,1000) (radius(i), i=1,10)
read (50,*)
do 5 i=1,16
  read (50,1100) (concent(i,j), j=1,10)
5     continue
```

```
      read (50,*)
read (50,1000) (radius(i), i=11,20)
read (50,*)
do 7 i=1,16
  read(50,1100) (concent(i,j), j=11,20)
7     continue
c
c ---- matrix transformation
c
      k=0
      do 30 i=1,16
  do 20 j=1,20
         k=k+1
   polarm(k,3)=concent(i,j)
   polarm(k,2)=(i)*22.5*3.141593/180-10*3.141593/180
   !angle in radians
   polarm(k,1)=radius(j)
   !sector's start
     !(center-10 degrees)
c    polarm(k,1)=R, polarm(k,2)=thita, polarm(k,3)=concentration
         k=k+1
   polarm(k,3)=concent(i,j)
   polarm(k,2)=(i)*22.5*3.141593/180
   !angle in radians. Sector's center
   polarm(k,1)=radius(j)
   k=k+1
   polarm(k,3)=concent(i,j)
   polarm(k,2)=(i)*22.5*3.141593/180+10*3.141593/180
   !angle in radians
   polarm(k,1)=radius(j)  !sector's end
20      continue  !(center+10 degrees)
30    continue
c
c ----- transformation from polar to cartesian coordinates
c
      do 40 i=1,960
  cartm(i,1)=polarm(i,1)*sin(polarm(i,2))
  !polarm(i,1)=R, cartm(i,1)=X
  cartm(i,2)=polarm(i,1)*cos(polarm(i,2))
  !polar(i,2)=thita, cartm(i,2)=Y
  cartm(i,3)=polarm(i,3)*3.7*(10**9)*10
  !convert from Ci/m^3 to Bq/m^3
40    continue
c
c ----- write the matrix in the file
c
```

```
      write (60, 1300)
      do 50 i=1,960
  write(60,1200) (cartm(i,j), j=1,3)
50    continue
1000  format (9x, 10(f7.1, 3x))
1100  format (7x, 10(1PE9.3, x))
1200  format (3x, 2(2x, f10.3), 2x, 1PE9.3)
1300  format (10x, 'X', 10x, 'Y', 6x, 'Concent(Bq/m^3)')
      end
```

Β΄.6 Το πρόγραμμα *ogtdeposit*

```
      program ogtDeposit
c     This routine transforms the results(deposition rates) that produce ORION-II
c     in a form, that is convinient for 3D mapping with programs such GNUPLOT and
c     surfer. ORION-II produce results in polar coordinate system. The routine
c     transforms the results in cartesian coordinate system. The ORION-II file
c     must have a name polardepos.txt. The routine stores the results in a file
c     with name cartesdepos.txt. The ORION-II code calculates concentrations in
c     sectors with 22.5 degrees angle. In the results' file it prints only the
c     coordinates of the sector's center. For better graphical representation
c     I insert another 2 points for each sector (which have the same
c     concetration). These points are: (main point)+-10 degrees. See section
c    matrix transformation.
c     ------------------------------------------------------------------------
c     polardepos.txt : input file that contains the concentration and the point
c     in polar coordinate system. (This file is produced from ORION-II.)
c     cartesdepos960.txt : output file that contains the points with the
c     coresponding concentration in cartesian coordinate system
c     radius(20): matrix that contains the radius of the polar system
c     deposit(16,20): matrix that contains the deposition rate
c     polarm(960,3): matrix that contains the points(in polar system) with the
c     coresponding deposition rates.
c     cartm(960,3): matrix that contains the points(in cartesian system) with
c     the coresponding deposition rates.
c     k: counter for the polarm matrix.
c     ------------------------------------------------------------------------
c     Copyright: Nikos Papadopoulos 2007.
dimension radius(20), deposit(16,20), polarm(960,3), cartm(960,3)
open (50, file='polardepos.txt')
open (60, file='cartesdepos960.txt')
c
c ----- read the data file:polardepos.txt
c
```

```
read (50,*)
read (50,*)
read (50,1000) (radius(i), i=1,10)
read (50,*)
do 5 i=1,16
  read (50,1100) (deposit(i,j), j=1,10)
5     continue
      read (50,*)
read (50,1000) (radius(i), i=11,20)
read (50,*)
do 7 i=1,16
  read(50,1100) (deposit(i,j), j=11,20)
7     continue
c
c ---- matrix transformation
c
      k=0
      do 30 i=1,16
  do 20 j=1,20
         k=k+1
   polarm(k,3)=deposit(i,j)
   polarm(k,2)=(i)*22.5*3.141593/180-10*3.141593/180 !angle in radians
   polarm(k,1)=radius(j)  !sector's start
c                                                        !(center-10 degrees)
c    polarm(k,1)=R, polarm(k,2)=thita, polarm(k,3)=deposition rates
         k=k+1
   polarm(k,3)=deposit(i,j)
   polarm(k,2)=(i)*22.5*3.141593/180   !angle in radians. Sector's center
   polarm(k,1)=radius(j)
   k=k+1
   polarm(k,3)=deposit(i,j)
   polarm(k,2)=(i)*22.5*3.141593/180+10*3.141593/180 !angle in radians
   polarm(k,1)=radius(j)  !sector's end
20      continue  !(center+10 degrees)
30    continue
c
c ----- transformation from polar to cartesian coordinates
c
      do 40 i=1,960
  cartm(i,1)=polarm(i,1)*sin(polarm(i,2)) !polarm(i,1)=R, cartm(i,1)=X
  cartm(i,2)=polarm(i,1)*cos(polarm(i,2)) !polar(i,2)=thita, cartm(i,2)=Y
  cartm(i,3)=polarm(i,3)*3.7*(10**9)*10 !convert from Ci/m^3 to Bq/m^3
40    continue
c
c ----- write the matrix in the file
c
```

```
      write (60, 1300)
      do 50 i=1,960
  write(60,1200) (cartm(i,j), j=1,3)
50    continue
1000  format (9x, 10(f7.1, 3x))
1100  format (7x, 10(1PE9.3, x))
1200  format (3x, 2(2x, f10.3), 2x, 1PE9.3)
1300  format (10x, 'X', 10x, 'Y', 6x, 'deposition(Bq/(sm^2))')
      end
```

Β΄.7 Το πρόγραμμα *gtconc*

```
program GENtranForEPA
c     This routine transforms the results
c     that GENII produce in a form, that is
c     convinient for 3D mapping with programs
c     such GNUPLOT and surfer. GENII produce
c     results in polar coordinate system. The routine
c     transforms the results in cartesian coordinate
c     system. The GENII file must have a name
c     polarconc.txt. The routine stores the results
c     in a file with name cartesconc.txt. The GENII
c     code calculates concnentrations in sectors with 22.5
c     degrees angle. In the results' file it prints only the
c     coordinates of the sector's center.
c     -------------------------------------------------------
c     polarconc.txt : input file that contains the
c     concentration and the point in polar coordinate
c     system. (This file is produced from GENII.)
c     cartesconc.txt : output file that contains the points
c     with the coresponding concentration in cartesian
c     coordinate system
c     radius(10): matrix that contains the radius of
c     the polar system
c     concent(16,10): matrix that contains the concentrations
c     polarm(160,3): matrix that contains the points
c    (in polar system) with the  coresponding concentrations.
c     cartm(160,3): matrix that contains the points
c    (in cartesian system) with the coresponding concentrations.
c     k: counter for the polarm matrix.
c     ---------------------------------------------------------
c     Copyright: Nikos Papadopoulos 2007.
dimension radius(10), concent(16,10), polarm(160,3), cartm(160,3)
open (500, file='polarconc.txt')
```

```
open (600, file='cartesconc.txt')
read (500,*)
read (500,*)
read (500,*)
read (500,1000) (radius(i), i=1,10)
do 10 i=1,16
 read (500,1100) (concent(i,j), j=1,10)
10    continue
c
c ---- matrix transformation
c
      do 30 i=1,16
  do 20 j=1,10
   k=10*(i-1)+j
c      with counter k the routine transforms each
c      element of the rows of concent(16,10) into
c      rows of the polarm(160,3). Each row contains
c      one point (R, thita, concentration).
   polarm(k,3)=concent(i,j)
   !polarm(k,3)=concentration
   polarm(k,2)=(i)*22.5*3.141593/180
   !polarm(k,2)=thita, angle in radians
   polarm(k,1)=radius(j) !polarm(k,1)=R
20      continue
30    continue
c
c ----- transformation from polar to cartesian
c       coordinates
c
      do 40 i=1,160
  cartm(i,1)=polarm(i,1)*sin(polarm(i,2))
  !cartm(i,1)=X, X=Rsin(thita)
  cartm(i,2)=polarm(i,1)*cos(polarm(i,2))
  !cartm(i,2)=Y, Y=Rcos(thita)
  cartm(i,3)=polarm(i,3)
  !cartm(i,3)=concentration
40    continue
c
c ----- write the matrix in the file
c
      write (600, 1300)
      do 50 i=1,160
  write(600,1200) (cartm(i,j), j=1,3)
50    continue

1000  format (14x, f6.1, 9(3x, f7.1))
```

```
1100 format (10x, 10(3x, 1PE7.1))
1200  format (3x, 2(2x, f10.3), 2x, 1PE9.3)
1300  format (10x, 'X', 10x, 'Y', 6x, 'Concent(Bq/m^3)')
      end
```

Β΄.8 Το πρόγραμμα *gtdose*

```
program gtdose
c This routine transforms the results that GENII produce in a
c     form, that is convinient for 3D mapping with programs
c     such GNUPLOT and surfer. GENII produce results in polar
c     coordinate system. The routine transforms the results
c     in cartesian coordinate system. The GENII file
c     must have a name polardose.txt. The routine stores
c     the results in a file with name cartesdose.txt. The
c     GENII code calculates concnentrations in sectors with
c     22.5 degrees angle. In the results' file it prints
c     only the coordinates of the sector's center.
c     -------------------------------------------------------
c     polardose.txt : input file that contains the dose and
c     the point in polar coordinate system. (This file is
c     produced from GENII.)
c     cartesdose.txt : output file that contains the points
c     with the coresponding dose in cartesian coordinate
c     system
c     radius(10): matrix that contains the radius of the
c     polar system
c     dose(16,10): matrix that contains the doses
c     polarm(160,3): matrix that contains the points(in
c     polar system) with the coresponding doses.
c     cartm(160,3): matrix that contains the points(in
c     cartesian system) with the coresponding doses.
c     k: counter for the polarm matrix.
c     ---------------------------------------------------------
c     Copyright: Nikos Papadopoulos 2007.
dimension radius(10), dose(16,10), polarm(160,3), cartm(160,3)
open (500, file='polardose.txt')
open (600, file='cartesdose.txt')
read (500,*)
read (500,*)
read (500,*)
read (500,1000) (radius(i), i=1,10)
do 10 i=1,16
 read (500,1100) (dose(i,j), j=1,10)
```

```
10    continue
c
c ---- matrix transformation
c
      do 30 i=1,16
  do 20 j=1,10
   k=10*(i-1)+j
c        with counter k the routine transforms each element
c        of the rows of dose(16,10) into rows of the
c        polarm(160,3). Each row contains one
c        point (R, thita, dose).
   polarm(k,3)=dose(i,j) !polarm(k,3)=dose
   polarm(k,2)=(i)*22.5*3.141593/180
   !polarm(k,2)=thita, angle in radians
   polarm(k,1)=radius(j) !polarm(k,1)=R
20      continue
30    continue
c
c ----- transformation from polar to cartesian coordinates
c
      do 40 i=1,160
  cartm(i,1)=polarm(i,1)*sin(polarm(i,2))
  !cartm(i,1)=X, X=Rsin(thita)
  cartm(i,2)=polarm(i,1)*cos(polarm(i,2))
  !cartm(i,2)=Y, Y=Rcos(thita)
  cartm(i,3)=polarm(i,3)
  !cartm(i,3)=dose
40    continue
c
c ----- write the matrix in the file
c
      write (600, 1300)
      do 50 i=1,160
  write(600,1200) (cartm(i,j), j=1,3)
50    continue

1000  format (10x, f6.1, 9(1x, f7.1))
1100 format (7x, 10(1x, 1PE7.1))
1200  format (3x, 2(2x, f10.3), 2x, 1PE9.3)
1300  format (10x, 'X', 10x, 'Y', 7x, 'dose(Sv)')
      end
```

Β΄.9 Το πρόγραμμα *ggtconc*

```
program ggt
```

```
c     This routine transforms the results
c     that GENII produce in a form, that is
c     convinient for 3D mapping with programs such
c     GNUPLOT and surfer. GENII produce results
c     in polar coordinate system. The routine
c     transforms the results in cartesian coordinate
c     system. The GENII file must have a name
c     polarconc.txt. The routine stores the results in a file
c     with name cartesconc.txt. The GENII code calculates
c     concnentrations in sectors with 22.5 degrees angle.
c     In the results' file it prints only the
c     coordinates of the sector's center. For better
c     graphical representation I insert another 2 points
c     of each sector (which have the same concetration).
c     These points are: (main point)+-10 degrees. See
c     section matrix transformation.
c     -------------------------------------------------------
c     polarconc.txt : input file that contains the
c     concentration and the pointin polar coordinate
c     system. (This file is produced from GENII.)
c     cartesconc.txt : output file that contains the
c     points with the coresponding concentration in
c     cartesian coordinate system
c     radius(10): matrix that contains the radius of
c     the polar system
c     concent(16,10): matrix that contains the concentrations
c     polarm(480,3): matrix that contains the points(in polar
c     system) with the coresponding concentrations.
c     cartm(480,3): matrix that contains the points
c     (in cartesian system) with the coresponding
c     concentrations.
c     k: counter for the polarm matrix.
c     -------------------------------------------------------
c     Copyright: Nikos Papadopoulos 2007.
dimension radius(10), concent(16,10), polarm(480,3), cartm(480,3)
open (500, file='polarconc.txt')   !input file
open (600, file='cartesconc480.txt')  !output file
read (500,*)
read (500,*)
read (500,*)
read (500,1000) (radius(i), i=1,10)
do 10 i=1,16
 read (500,1100) (concent(i,j), j=1,10)
10    continue
c
c ---- matrix transformation
```

```
c
      k=0
      do 30 i=1,16
  do 20 j=1,10
         k=k+1
   polarm(k,3)=concent(i,j)
   polarm(k,2)=(i)*22.5*3.141593/180-10*3.141593/180
   !angle in radians
   polarm(k,1)=radius(j)
   !sector's start
    !(center-10 degrees)
c    polarm(k,1)=R, polarm(k,2)=thita, polarm(k,3)=concentration
         k=k+1
   polarm(k,3)=concent(i,j)
   polarm(k,2)=(i)*22.5*3.141593/180
   !angle in radians. Sector's center
   polarm(k,1)=radius(j)
   k=k+1
   polarm(k,3)=concent(i,j)
   polarm(k,2)=(i)*22.5*3.141593/180+10*3.141593/180
   !angle in radians
   polarm(k,1)=radius(j) !sector's end
20      continue !(center+10 degrees)
30    continue
c
c ----- transformation from polar to cartesian coordinates
c
      do 40 i=1,480
  cartm(i,1)=polarm(i,1)*sin(polarm(i,2))
  !polarm(i,1)=R, cartm(i,1)=X
  cartm(i,2)=polarm(i,1)*cos(polarm(i,2))
  !polar(i,2)=thita, cartm(i,2)=Y
  cartm(i,3)=polarm(i,3)
40    continue
c
c ----- write the matrix in the file
c
      write (600, 1300)
      do 50 i=1,480
  write(600,1200) (cartm(i,j), j=1,3)
50    continue

1000  format (14x, f6.1, 9(3x, f7.1))
1100 format (10x, 10(3x, 1PE7.1))
1200  format (3x, 2(2x, f10.3), 2x, 1PE9.3)
1300  format (10x, 'X', 10x, 'Y', 6x, 'Concent(Bq/m^3)')
```

```
      end
```

Β΄.10 Το πρόγραμμα *ggtdepos*

```
  program ggtdepos
c   This routine transforms the results that GENII produce in a
c     form, that is convinient for 3D mapping with programs such GNUPLOT and
c     surfer. GENII produce results in polar coordinate system. The routine
c     transforms the results in cartesian coordinate system. The GENII file
c     must have a name polardepos.txt. The routine stores the results in a file
c     with name cartesdepos.txt. The GENII code calculates concnentrations in
c     sectors with 22.5 degrees angle. In the results' file it prints only the
c     coordinates of the sector's center. For better graphical representation
c     I insert another 2 points of each sector (which have the same
c     concetration). These points are: (main point)+-10 degrees. See section
c    matrix transformation.
c     ---------------------------------------------------------------------
c     polardepos.txt : input file that contains the deposition rates and the point
c     in polar coordinate system. (This file is produced from GENII.)
c     cartesdepos.txt : output file that contains the points with the
c     coresponding deposition rates in cartesian coordinate system
c     radius(10): matrix that contains the radius of the polar system
c     deposit(16,10): matrix that contains the deposition rates
c     polarm(480,3): matrix that contains the points(in polar system) with the
c     coresponding deposition rates.
c     cartm(480,3): matrix that contains the points(in cartesian system) with
c     the coresponding deposition rates.
c     k: counter for the polarm matrix.
c     ---------------------------------------------------------------------
c     Copyright: Nikos Papadopoulos 2007.
dimension radius(10), deposit(16,10), polarm(480,3), cartm(480,3)
open (500, file='polardepos.txt')   !input file
open (600, file='cartesdepos480.txt')  !output file
read (500,*)
read (500,*)
read (500,*)
read (500,1000) (radius(i), i=1,10)
do 10 i=1,16
 read (500,1100) (deposit(i,j), j=1,10)
10    continue
c
c ---- matrix transformation
c
      k=0
```

```
      do 30 i=1,16
  do 20 j=1,10
         k=k+1
   polarm(k,3)=deposit(i,j)
   polarm(k,2)=(i)*22.5*3.141593/180-10*3.141593/180 !angle in radians
   polarm(k,1)=radius(j)  !sector's start
c                                                          !(center-10 degrees)
c    polarm(k,1)=R, polarm(k,2)=thita, polarm(k,3)=concentration
         k=k+1
   polarm(k,3)=deposit(i,j)
   polarm(k,2)=(i)*22.5*3.141593/180   !angle in radians. Sector's center
   polarm(k,1)=radius(j)
   k=k+1
   polarm(k,3)=deposit(i,j)
   polarm(k,2)=(i)*22.5*3.141593/180+10*3.141593/180 !angle in radians
   polarm(k,1)=radius(j)  !sector's end
20      continue  !(center+10 degrees)
30    continue
c
c ----- transformation from polar to cartesian coordinates
c
      do 40 i=1,480
  cartm(i,1)=polarm(i,1)*sin(polarm(i,2)) !polarm(i,1)=R, cartm(i,1)=X
  cartm(i,2)=polarm(i,1)*cos(polarm(i,2)) !polar(i,2)=thita, cartm(i,2)=Y
  cartm(i,3)=polarm(i,3)
40    continue
c
c ----- write the matrix in the file
c
      write (600, 1300)
      do 50 i=1,480
  write(600,1200) (cartm(i,j), j=1,3)
50    continue

1000  format (14x, f6.1, 9(3x, f7.1))
1100 format (10x, 10(3x, 1PE7.1))
1200  format (3x, 2(2x, f10.3), 2x, 1PE9.3)
1300  format (10x, 'X', 10x, 'Y', 6x, 'Deposition Rates(Bq/(sm^2))')
      end
```

Β΄.11 Το πρόγραμμα *ggtdose*

```
program ggtdose
c This routine transforms the results that GENII produce
```

```
c     in a form, that is convinient for 3D mapping with
c     programs such GNUPLOT and surfer. GENII produce
c     results in polar coordinate system. The routine
c     transforms the results in cartesian coordinate
c     system. The GENII file must have a name
c     polardose.txt. The routine stores the results in
c     a file with name cartesdose.txt. The GENII code
c     calculates concnentrations in sectors with 22.5
c     degrees angle. In the results' file it prints only
c     the coordinates of the sector's center. For better
c     graphical representation I insert another 2 points
c     of each sector (which have the same concetration).
c     These points are: (main point)+-10 degrees.
c     See section matrix transformation.
c     ----------------------------------------------------
c     polardose.txt : input file that contains the dose
c     and the point in polar coordinate system. (This file
c     is produced from GENII.)
c     cartesdose.txt : output file that contains the
c     points with the coresponding dose in cartesian
c     coordinate system
c     radius(10): matrix that contains the radius of the
c     polar system
c     dose(16,10): matrix that contains the doses
c     polarm(480,3): matrix that contains the points
c    (in polar system) with the coresponding doses.
c     cartm(480,3): matrix that contains the points
c    (in cartesian system) with the coresponding doses.
c     k: counter for the polarm matrix.
c     -----------------------------------------------------
c     Copyright: Nikos Papadopoulos 2007.
dimension radius(10), dose(16,10), polarm(480,3), cartm(480,3)
open (500, file='polardose.txt')   !input file
open (600, file='cartesdose480.txt') !output file
read (500,*)
read (500,*)
read (500,*)
read (500,1000) (radius(i), i=1,10)
do 10 i=1,16
 read (500,1100) (dose(i,j), j=1,10)
10    continue
c
c ---- matrix transformation
c
      k=0
      do 30 i=1,16
```

```
  do 20 j=1,10
         k=k+1
   polarm(k,3)=dose(i,j)
   polarm(k,2)=(i)*22.5*3.141593/180-10*3.141593/180
   !angle in radians
   polarm(k,1)=radius(j)
   !sector's start
     !(center-10 degrees)
c    polarm(k,1)=R, polarm(k,2)=thita, polarm(k,3)=dose
         k=k+1
   polarm(k,3)=dose(i,j)
   polarm(k,2)=(i)*22.5*3.141593/180
   !angle in radians. Sector's center
   polarm(k,1)=radius(j)
   k=k+1
   polarm(k,3)=dose(i,j)
   polarm(k,2)=(i)*22.5*3.141593/180+10*3.141593/180
   !angle in radians
   polarm(k,1)=radius(j)
   !sector's end (center+10 degrees)
20      continue
30    continue
c
c ----- transformation from polar to cartesian coordinates
c
      do 40 i=1,480
  cartm(i,1)=polarm(i,1)*sin(polarm(i,2))
  !polarm(i,1)=R, cartm(i,1)=X
  cartm(i,2)=polarm(i,1)*cos(polarm(i,2))
  !polar(i,2)=thita, cartm(i,2)=Y
  cartm(i,3)=polarm(i,3)
40    continue
c
c ----- write the matrix in the file
c
      write (600, 1300)
      do 50 i=1,480
  write(600,1200) (cartm(i,j), j=1,3)
50    continue

1000  format (10x, f6.1, 9(x, f7.1))
1100 format (7x, 10(x, 1PE7.1))
1200  format (3x, 2(2x, f10.3), 2x, 1PE9.3)
1300  format (10x, 'X', 10x, 'Y', 7x, 'Dose(Sv)')
      end
```

Β΄.12 Το πρόγραμμα μετατροπής αρχείου υψομέτρων *transheight*

```
program transHeight
c     This program transforms the stracture
c     the data stracture in the heights.prn file.
c     The new structure is printed in the
c     forgraph.out1 file. The data in the new
c     file are classified by the angle because i
c     want to plot the points with the same angle.
c     G(320,3): matrix that contains the heights at
c               the points of interest.
c               The column 1 contains distance from
                the center, the column 2 angle
c               and the column 3 mean sector height.
c     m: integer, which helps to print the right
c     data in the write place: I want to print every
c     16th line of the matrix because every 16th line
c     has the same angle (The routine print lines of
c     the matrix that are multiple of the 16. After
c     the first cycle it prints lines that are
c     multiple of 16 and the begginig is number
c     1 not 0 etc).
c     copyright 2007, Nikos K. Papadopoulos, under GPL.
dimension G(320,3)
open (50, file="heights.prn")
open (60, file="forgraph.out1")
c
c----- read the file heights.prn
c
open (50, file="heights.prn")
read (50,*)
do 100 i=1,320
     read(50,1000) G(i,1), G(i,2), G(i,3)
     read(50,*)
100   continue

c
c ---- write the data in the new file forgraph.out1
c
write (60,1200)
      do 210 k=1,16
  do 200 l=0,19
   m=k+16*l
   !for example m=2+0*16, m=2+1*16, m=2+2*16, angle 22.5
```

```
   write (60,1100) G(m,1), G(m,3), G(m,2)
200     continue
210   continue
1000  format (f7.2, x, f6.3, 8x, f5.0)
1100  format (f6.0, 4x, f7.0, 4x, f5.1)
1200  format ('heights', 3x, 'distance', 3x, 'angle')
stop
end
```

Παράρτημα Γ΄

Αρχεία δεδομένων και αποτελεσμάτων των προγραμμάτων μετατροπής πολικών συντεταγμένων σε καρτεσιανές

Γ΄.1 Το αρχείο συγκεντρώσεων polarconc.txt του ORION-II

Εδώ παρουσιάζεται το αρχείο συγκεντρώσεων polarconc.txt, όπως χρησιμοποιείται από τα προγράμματα otran, ogt για την μετατροπή των πολικών συντεταγμένων σε καρτεσιανές.

```
          STACK  ( TOTAL        )     NUCLIDE  ( RA-226   )          UNIT ( CI/M**3 )
0         500.0    1000.0    1500.0    2000.0    2500.0    3000.0    3500.0    4000.0    4500.0    5000.0

 NNE   0.000E+00 0.000E+00 3.384E-22 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
 NE    0.000E+00 7.136E-18 4.864E-17 7.015E-18 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
 ENE   0.000E+00 5.225E-18 3.462E-17 4.430E-18 3.902E-18 3.415E-18 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
 E     0.000E+00 4.249E-18 3.063E-17 2.931E-17 2.679E-17 2.586E-18 2.235E-18 1.959E-18 1.727E-18 1.534E-18
 ESE   0.000E+00 3.681E-18 3.229E-18 2.833E-18 2.271E-17 2.057E-17 1.861E-17 1.716E-17 1.594E-17 1.519E-17
 SE    0.000E+00 0.000E+00 2.731E-18 2.340E-18 2.021E-18 1.766E-18 3.279E-18 2.899E-18 2.515E-18 2.275E-18
 SSE   0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 4.370E-18 2.111E-17 1.700E-17 1.564E-17 1.459E-17 1.323E-17
 S     0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
 SSW   0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
 SW    4.807E-23 0.000E+00 0.000E+00 1.843E-21 3.405E-19 1.906E-18 2.041E-19 2.334E-19 1.893E-19 1.591E-19
 WSW   9.060E-22 1.018E-21 1.002E-19 1.170E-18 3.168E-18 4.552E-18 3.631E-18 3.161E-18 3.092E-18 3.116E-18
 W     6.217E-21 1.877E-20 9.054E-19 1.628E-18 1.949E-18 4.715E-18 4.289E-18 4.049E-18 4.015E-18 6.871E-18
 WNW   1.867E-20 5.409E-20 8.899E-20 2.167E-18 2.144E-18 1.987E-18 7.751E-18 7.183E-18 8.545E-18 2.946E-17
 NW    0.000E+00 7.859E-20 9.894E-20 1.039E-19 1.781E-18 4.923E-18 8.308E-18 9.467E-18 8.659E-18 1.055E-17
 NNW   0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 8.125E-20 6.919E-20 8.081E-20 7.971E-19 2.651E-18 3.735E-18 3.695E-18
 N     0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00

0         5500.0    6000.0    6500.0    7000.0    7500.0    8000.0    8500.0    9000.0    9500.0   10000.0

 NNE   0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
 NE    0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
 ENE   0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
 E     1.379E-18 1.257E-18 1.170E-18 1.118E-18 1.093E-18 1.030E-18 9.589E-19 8.965E-19 8.578E-19 0.000E+00
 ESE   1.459E-17 1.389E-17 1.309E-17 1.274E-17 1.316E-17 1.487E-17 7.901E-19 7.450E-19 1.175E-18 1.113E-18
 SE    2.026E-18 1.833E-18 1.253E-17 1.195E-17 1.159E-17 1.763E-17 1.724E-17 1.755E-17 1.700E-17 1.719E-17
```

SSE	2.085E-18	1.873E-18	1.668E-18	1.517E-18	1.396E-18	1.294E-18	1.194E-18	1.119E-18	1.044E-18	9.780E-19
S	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
SSW	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
SW	1.378E-19	1.233E-19	1.129E-19	1.026E-19	9.607E-20	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
WSW	1.340E-17	1.425E-17	3.138E-17	2.628E-17	3.361E-17	3.090E-17	2.859E-17	2.658E-17	1.557E-19	1.452E-19
W	9.181E-17	8.295E-17	7.566E-17	6.941E-17	6.399E-17	5.926E-17	5.510E-17	5.141E-17	6.193E-17	5.843E-17
WNW	5.887E-17	8.298E-17	8.970E-17	8.192E-17	7.531E-17	1.068E-16	9.944E-17	9.295E-17	8.718E-17	1.280E-16
NW	1.540E-16	2.078E-16	1.871E-16	1.698E-16	1.552E-16	1.427E-16	5.090E-17	4.019E-17	4.395E-17	4.107E-17
NNW	3.268E-18	3.243E-18	1.509E-19	1.283E-19	1.151E-19	1.033E-19	9.885E-20	9.380E-20	8.801E-20	8.155E-20
N	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

Γ΄.2 Το αρχείο συγκεντρώσεων polarconc.txt του GENII

Εδώ παρουσιάζεται το αρχείο συγκεντρώσεων polarconc.txt, όπως χρησιμοποιείται από τα προγράμματα gtconc, ggtconc για την μετατροπή των πολικών συντεταγμένων σε καρτεσιανές.

Radium-226 RA226 1 0
TIME PERIOD 1.0 yr
Air Concentration All 1 Bq/m^3 10 m 16 deg

	1000.0	2000.0	3000.0	4000.0	5000.0	6000.0	7000.0	8000.0	9000.0	10000.0
22.5	2.6E-06	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
45.0	2.4E-06	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
67.5	3.5E-10	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
90.0	0.0E+00	2.4E-11	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
112.5	0.0E+00	0.0E+00	3.1E-07	4.8E-07	4.7E-07	4.3E-07	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
135.0	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	2.5E-07	2.3E-07	2.2E-07	5.2E-07	4.9E-07
157.5	0.0E+00	3.9E-07	3.5E-07	3.2E-07	2.9E-07	2.6E-07	2.4E-07	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
180.0	0.0E+00	4.0E-07	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
202.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
225.0	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
247.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
270.0	9.8E-08	1.2E-07	1.2E-07	1.4E-07	1.7E-07	1.7E-07	1.6E-07	1.5E-07	1.4E-07	1.3E-07
292.5	9.4E-08	1.2E-07	1.8E-06	1.7E-06	1.5E-06	2.8E-06	2.4E-06	2.2E-06	1.9E-06	1.8E-06
315.0	8.3E-08	2.1E-06	1.9E-06	1.7E-06	1.5E-06	1.4E-06	5.7E-08	9.0E-08	8.4E-08	7.9E-08
337.5	2.4E-06	2.2E-06	6.9E-08	7.0E-08	6.7E-08	6.3E-08	5.9E-08	5.5E-08	0.0E+00	0.0E+00
360.0	2.5E-06	4.4E-08	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00

Γ΄.3 Το αρχείο συγκεντρώσεων polardepos.txt του GENII

Εδώ παρουσιάζεται το αρχείο συγκεντρώσεων polardepos.txt, όπως χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα ggtdepos για την μετατροπή των πολικών συντεταγμένων σε καρτεσιανές.

Radium-226 RA226 1 0
TIME PERIOD 1.0 yr
Deposition Rate All 1 dry (Bq/m^2)/s 10 m 16 deg

	1000.0	2000.0	3000.0	4000.0	5000.0	6000.0	7000.0	8000.0	9000.0	10000.0
22.5	2.0E-08	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
45.0	1.9E-08	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
67.5	3.8E-12	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
90.0	0.0E+00	2.6E-13	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
112.5	0.0E+00	0.0E+00	3.5E-09	5.3E-09	5.2E-09	4.7E-09	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
135.0	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.7E-09	1.5E-09	1.4E-09	4.8E-09	4.5E-09
157.5	0.0E+00	2.6E-09	2.4E-09	2.1E-09	1.9E-09	1.8E-09	1.6E-09	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
180.0	0.0E+00	2.7E-09	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
202.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
225.0	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
247.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
270.0	1.1E-09	1.3E-09	1.3E-09	1.4E-09	1.5E-09	1.5E-09	1.4E-09	1.3E-09	1.2E-09	1.2E-09
292.5	1.0E-09	1.3E-09	1.4E-08	1.2E-08	1.1E-08	1.5E-08	1.3E-08	1.2E-08	1.0E-08	9.6E-09
315.0	9.0E-10	1.6E-08	1.4E-08	1.3E-08	1.1E-08	1.0E-08	6.1E-10	8.0E-10	7.5E-10	7.1E-10
337.5	1.8E-08	1.7E-08	7.5E-10	7.5E-10	7.2E-10	6.7E-10	6.3E-10	5.9E-10	0.0E+00	0.0E+00
360.0	1.9E-08	4.7E-10	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00

Γ'.4 Το αρχείο δόσεων polardose.txt του GENII

Εδώ παρουσιάζεται το αρχείο δόσεων polardose.txt, όπως χρησιμοποιείται από τα προγράμματα gtdose, ggtdose για την μετατροπή των πολικών συντεταγμένων σε καρτεσιανές.

```
TIME PERIOD NUMBER  1, CORRESPONDING TO TIME   0. YEARS ---------------------------------------------------
INDIVIDUAL AGE RANGE  0 TO 70 YEARS
INDIVIDUAL EFFECTIVE DOSE BY DISTANCE AND DIRECTION (SV)
          1000.   2000.   3000.   4000.   5000.   6000.   7000.   8000.   9000.  10000.
    23. 6.0E-06 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00
    45. 5.6E-06 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00
    68. 3.5E-09 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00
    90. 0.0E+00 1.3E-08 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00
   113. 0.0E+00 0.0E+00 9.5E-07 1.4E-06 1.4E-06 1.3E-06 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00
   135. 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 5.3E-07 4.8E-07 4.5E-07 1.4E-06 1.3E-06
   158. 0.0E+00 8.2E-07 7.4E-07 6.7E-07 6.0E-07 5.5E-07 5.0E-07 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00
   180. 0.0E+00 8.3E-07 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00
   203. 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00
   225. 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00
   248. 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00
   270. 2.9E-07 3.7E-07 3.7E-07 3.9E-07 4.4E-07 4.4E-07 4.1E-07 3.9E-07 3.6E-07 3.4E-07
   293. 2.8E-07 3.7E-07 4.1E-06 3.7E-06 3.4E-06 5.1E-06 4.4E-06 3.9E-06 3.5E-06 3.2E-06
   315. 2.5E-07 4.8E-06 4.3E-06 3.8E-06 3.4E-06 3.1E-06 1.7E-07 2.3E-07 2.2E-07 2.0E-07
   338. 5.6E-06 5.0E-06 2.1E-07 2.1E-07 2.0E-07 1.9E-07 1.7E-07 1.6E-07 0.0E+00 0.0E+00
   360. 5.8E-06 1.3E-07 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00 0.0E+00
```

Γ'.5 Το αρχείο υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων cartesconc480.txt του GENII

Εδώ παρουσιάζεται το αρχείο συγκεντρώσεων cartesconc480.txt, όπως προκύπτει από την εκτέλεση του προγράμματος ggtconc.

```
      X          Y       Concent(Bq/m^3)
   216.440     976.296  2.600E-06
   382.683     923.880  2.600E-06
   537.300     843.391  2.600E-06
   432.879    1952.592  0.000E+00
   765.367    1847.759  0.000E+00
  1074.599    1686.783  0.000E+00
   649.319    2928.888  0.000E+00
  1148.050    2771.639  0.000E+00
  1611.899    2530.174  0.000E+00
   865.759    3905.184  0.000E+00
  1530.734    3695.518  0.000E+00
  2149.199    3373.566  0.000E+00
  1082.198    4881.480  0.000E+00
  1913.417    4619.397  0.000E+00
  2686.498    4216.957  0.000E+00
  1298.638    5857.776  0.000E+00
  2296.101    5543.277  0.000E+00
```

3223.798	5060.349	0.000E+00
1515.078	6834.072	0.000E+00
2678.784	6467.157	0.000E+00
3761.098	5903.740	0.000E+00
1731.517	7810.368	0.000E+00
3061.468	7391.036	0.000E+00
4298.397	6747.131	0.000E+00
1947.957	8786.664	0.000E+00
3444.151	8314.916	0.000E+00
4835.697	7590.522	0.000E+00
2164.396	9762.960	0.000E+00
3826.835	9238.795	0.000E+00
5372.997	8433.914	0.000E+00
573.576	819.152	2.400E-06
707.107	707.107	2.400E-06
819.152	573.576	2.400E-06
1147.153	1638.304	0.000E+00
1414.214	1414.214	0.000E+00
1638.304	1147.153	0.000E+00
1720.729	2457.456	0.000E+00
2121.321	2121.320	0.000E+00
2457.456	1720.729	0.000E+00
2294.306	3276.608	0.000E+00
2828.427	2828.427	0.000E+00
3276.608	2294.305	0.000E+00
2867.882	4095.760	0.000E+00
3535.534	3535.534	0.000E+00
4095.760	2867.882	0.000E+00
3441.459	4914.912	0.000E+00
4242.641	4242.640	0.000E+00
4914.913	3441.458	0.000E+00
4015.035	5734.064	0.000E+00
4949.748	4949.747	0.000E+00
5734.065	4015.034	0.000E+00
4588.612	6553.216	0.000E+00
5656.854	5656.854	0.000E+00
6553.217	4588.611	0.000E+00
5162.188	7372.368	0.000E+00
6363.961	6363.960	0.000E+00
7372.369	5162.187	0.000E+00
5735.765	8191.520	0.000E+00
7071.068	7071.067	0.000E+00
8191.521	5735.764	0.000E+00
843.392	537.299	3.500E-10
923.880	382.683	3.500E-10
976.296	216.439	3.500E-10

1686.783	1074.599	0.000E+00
1847.759	765.367	0.000E+00
1952.592	432.879	0.000E+00
2530.175	1611.898	0.000E+00
2771.639	1148.050	0.000E+00
2928.888	649.318	0.000E+00
3373.566	2149.198	0.000E+00
3695.518	1530.733	0.000E+00
3905.184	865.758	0.000E+00
4216.958	2686.497	0.000E+00
4619.398	1913.417	0.000E+00
4881.480	1082.197	0.000E+00
5060.349	3223.797	0.000E+00
5543.277	2296.100	0.000E+00
5857.776	1298.636	0.000E+00
5903.741	3761.096	0.000E+00
6467.157	2678.783	0.000E+00
6834.072	1515.076	0.000E+00
6747.132	4298.396	0.000E+00
7391.037	3061.467	0.000E+00
7810.369	1731.515	0.000E+00
7590.524	4835.695	0.000E+00
8314.916	3444.150	0.000E+00
8786.664	1947.955	0.000E+00
8433.915	5372.995	0.000E+00
9238.796	3826.833	0.000E+00
9762.961	2164.394	0.000E+00
984.808	173.648	0.000E+00
1000.000	.000	0.000E+00
984.808	-173.648	0.000E+00
1969.616	347.296	2.400E-11
2000.000	.000	2.400E-11
1969.615	-347.297	2.400E-11
2954.423	520.944	0.000E+00
3000.000	.000	0.000E+00
2954.423	-520.945	0.000E+00
3939.231	694.592	0.000E+00
4000.000	-.001	0.000E+00
3939.231	-694.594	0.000E+00
4924.039	868.240	0.000E+00
5000.000	-.001	0.000E+00
4924.039	-868.242	0.000E+00
5908.847	1041.888	0.000E+00
6000.000	-.001	0.000E+00
5908.846	-1041.891	0.000E+00
6893.654	1215.536	0.000E+00

7000.000	-.001	0.000E+00
6893.654	-1215.539	0.000E+00
7878.462	1389.184	0.000E+00
8000.000	-.001	0.000E+00
7878.462	-1389.187	0.000E+00
8863.271	1562.832	0.000E+00
9000.000	-.001	0.000E+00
8863.270	-1562.836	0.000E+00
9848.078	1736.480	0.000E+00
10000.000	-.002	0.000E+00
9848.077	-1736.484	0.000E+00
976.296	-216.440	0.000E+00
923.879	-382.684	0.000E+00
843.391	-537.300	0.000E+00
1952.592	-432.880	0.000E+00
1847.759	-765.367	0.000E+00
1686.783	-1074.600	0.000E+00
2928.888	-649.320	3.100E-07
2771.638	-1148.051	3.100E-07
2530.174	-1611.900	3.100E-07
3905.184	-865.759	4.800E-07
3695.518	-1530.735	4.800E-07
3373.565	-2149.199	4.800E-07
4881.480	-1082.199	4.700E-07
4619.397	-1913.419	4.700E-07
4216.957	-2686.499	4.700E-07
5857.776	-1298.639	4.300E-07
5543.276	-2296.102	4.300E-07
5060.348	-3223.799	4.300E-07
6834.072	-1515.079	0.000E+00
6467.156	-2678.786	0.000E+00
5903.739	-3761.099	0.000E+00
7810.368	-1731.519	0.000E+00
7391.035	-3061.470	0.000E+00
6747.130	-4298.399	0.000E+00
8786.664	-1947.959	0.000E+00
8314.915	-3444.154	0.000E+00
7590.521	-4835.699	0.000E+00
9762.960	-2164.398	0.000E+00
9238.794	-3826.837	0.000E+00
8433.913	-5372.999	0.000E+00
819.152	-573.577	0.000E+00
707.107	-707.107	0.000E+00
573.576	-819.152	0.000E+00
1638.304	-1147.153	0.000E+00
1414.213	-1414.214	0.000E+00

```
1147.152   -1638.305  0.000E+00
2457.456   -1720.730  0.000E+00
2121.320   -2121.321  0.000E+00
1720.728   -2457.457  0.000E+00
3276.607   -2294.307  0.000E+00
2828.427   -2828.428  0.000E+00
2294.304   -3276.609  0.000E+00
4095.760   -2867.883  0.000E+00
3535.533   -3535.535  0.000E+00
2867.880   -4095.761  0.000E+00
4914.911   -3441.460  2.500E-07
4242.640   -4242.642  2.500E-07
3441.456   -4914.914  2.500E-07
5734.063   -4015.037  2.300E-07
4949.746   -4949.749  2.300E-07
4015.032   -5734.066  2.300E-07
6553.215   -4588.613  2.200E-07
5656.853   -5656.855  2.200E-07
4588.608   -6553.218  2.200E-07
7372.367   -5162.190  5.200E-07
6363.959   -6363.962  5.200E-07
5162.185   -7372.371  5.200E-07
8191.519   -5735.767  4.900E-07
7071.066   -7071.069  4.900E-07
5735.761   -8191.523  4.900E-07
 537.299    -843.392  0.000E+00
 382.683    -923.880  0.000E+00
 216.439    -976.296  0.000E+00
1074.599   -1686.783  3.900E-07
 765.366   -1847.759  3.900E-07
 432.879   -1952.592  3.900E-07
1611.898   -2530.175  3.500E-07
1148.049   -2771.639  3.500E-07
 649.318   -2928.888  3.500E-07
2149.197   -3373.567  3.200E-07
1530.732   -3695.519  3.200E-07
 865.757   -3905.184  3.200E-07
2686.496   -4216.958  2.900E-07
1913.415   -4619.398  2.900E-07
1082.196   -4881.480  2.900E-07
3223.795   -5060.350  2.600E-07
2296.098   -5543.278  2.600E-07
1298.635   -5857.776  2.600E-07
3761.095   -5903.742  2.400E-07
2678.781   -6467.158  2.400E-07
1515.075   -6834.073  2.400E-07
```

4298.394	-6747.133	0.000E+00
3061.464	-7391.038	0.000E+00
1731.514	-7810.369	0.000E+00
4835.693	-7590.525	0.000E+00
3444.147	-8314.917	0.000E+00
1947.953	-8786.665	0.000E+00
5372.992	-8433.917	0.000E+00
3826.831	-9238.797	0.000E+00
2164.393	-9762.961	0.000E+00
173.648	-984.808	0.000E+00
.000	-1000.000	0.000E+00
-173.649	-984.808	0.000E+00
347.296	-1969.616	4.000E-07
-.001	-2000.000	4.000E-07
-347.297	-1969.615	4.000E-07
520.943	-2954.423	0.000E+00
-.001	-3000.000	0.000E+00
-520.946	-2954.423	0.000E+00
694.591	-3939.231	0.000E+00
-.001	-4000.000	0.000E+00
-694.595	-3939.231	0.000E+00
868.239	-4924.039	0.000E+00
-.002	-5000.000	0.000E+00
-868.243	-4924.038	0.000E+00
1041.887	-5908.847	0.000E+00
-.002	-6000.000	0.000E+00
-1041.892	-5908.846	0.000E+00
1215.535	-6893.655	0.000E+00
-.002	-7000.000	0.000E+00
-1215.541	-6893.654	0.000E+00
1389.183	-7878.462	0.000E+00
-.003	-8000.000	0.000E+00
-1389.190	-7878.461	0.000E+00
1562.830	-8863.271	0.000E+00
-.003	-9000.000	0.000E+00
-1562.838	-8863.269	0.000E+00
1736.478	-9848.078	0.000E+00
-.003	-10000.000	0.000E+00
-1736.487	-9848.076	0.000E+00
-216.440	-976.296	0.000E+00
-382.684	-923.879	0.000E+00
-537.300	-843.391	0.000E+00
-432.880	-1952.592	0.000E+00
-765.368	-1847.759	0.000E+00
-1074.600	-1686.782	0.000E+00
-649.320	-2928.888	0.000E+00

-1148.052	-2771.638	0.000E+00
-1611.900	-2530.174	0.000E+00
-865.760	-3905.184	0.000E+00
-1530.735	-3695.517	0.000E+00
-2149.200	-3373.565	0.000E+00
-1082.201	-4881.479	0.000E+00
-1913.419	-4619.397	0.000E+00
-2686.500	-4216.956	0.000E+00
-1298.641	-5857.775	0.000E+00
-2296.103	-5543.276	0.000E+00
-3223.800	-5060.347	0.000E+00
-1515.081	-6834.071	0.000E+00
-2678.787	-6467.155	0.000E+00
-3761.100	-5903.738	0.000E+00
-1731.521	-7810.367	0.000E+00
-3061.471	-7391.035	0.000E+00
-4298.400	-6747.129	0.000E+00
-1947.961	-8786.663	0.000E+00
-3444.155	-8314.914	0.000E+00
-4835.700	-7590.521	0.000E+00
-2164.401	-9762.959	0.000E+00
-3826.839	-9238.794	0.000E+00
-5373.000	-8433.912	0.000E+00
-573.577	-819.152	0.000E+00
-707.107	-707.106	0.000E+00
-819.152	-573.576	0.000E+00
-1147.154	-1638.304	0.000E+00
-1414.214	-1414.213	0.000E+00
-1638.305	-1147.152	0.000E+00
-1720.730	-2457.455	0.000E+00
-2121.322	-2121.319	0.000E+00
-2457.457	-1720.728	0.000E+00
-2294.307	-3276.607	0.000E+00
-2828.429	-2828.425	0.000E+00
-3276.610	-2294.304	0.000E+00
-2867.884	-4095.759	0.000E+00
-3535.536	-3535.532	0.000E+00
-4095.762	-2867.880	0.000E+00
-3441.461	-4914.911	0.000E+00
-4242.644	-4242.638	0.000E+00
-4914.915	-3441.456	0.000E+00
-4015.038	-5734.063	0.000E+00
-4949.750	-4949.744	0.000E+00
-5734.067	-4015.031	0.000E+00
-4588.614	-6553.214	0.000E+00
-5656.858	-5656.851	0.000E+00

-6553.219	-4588.607	0.000E+00
-5162.191	-7372.366	0.000E+00
-6363.965	-6363.957	0.000E+00
-7372.372	-5162.184	0.000E+00
-5735.768	-8191.518	0.000E+00
-7071.072	-7071.063	0.000E+00
-8191.524	-5735.759	0.000E+00
-843.392	-537.299	0.000E+00
-923.880	-382.683	0.000E+00
-976.296	-216.439	0.000E+00
-1686.783	-1074.599	0.000E+00
-1847.760	-765.365	0.000E+00
-1952.592	-432.878	0.000E+00
-2530.175	-1611.898	0.000E+00
-2771.639	-1148.048	0.000E+00
-2928.888	-649.317	0.000E+00
-3373.567	-2149.197	0.000E+00
-3695.519	-1530.731	0.000E+00
-3905.185	-865.755	0.000E+00
-4216.958	-2686.497	0.000E+00
-4619.399	-1913.413	0.000E+00
-4881.481	-1082.194	0.000E+00
-5060.350	-3223.796	0.000E+00
-5543.279	-2296.096	0.000E+00
-5857.777	-1298.633	0.000E+00
-5903.742	-3761.095	0.000E+00
-6467.159	-2678.779	0.000E+00
-6834.073	-1515.072	0.000E+00
-6747.133	-4298.395	0.000E+00
-7391.039	-3061.461	0.000E+00
-7810.370	-1731.511	0.000E+00
-7590.525	-4835.694	0.000E+00
-8314.919	-3444.144	0.000E+00
-8786.666	-1947.950	0.000E+00
-8433.916	-5372.993	0.000E+00
-9238.799	-3826.827	0.000E+00
-9762.962	-2164.389	0.000E+00
-984.808	-173.648	9.800E-08
-1000.000	.000	9.800E-08
-984.808	173.649	9.800E-08
-1969.616	-347.295	1.200E-07
-2000.000	.001	1.200E-07
-1969.615	347.297	1.200E-07
-2954.424	-520.943	1.200E-07
-3000.000	.001	1.200E-07
-2954.423	520.946	1.200E-07

-3939.231	-694.591	1.400E-07
-4000.000	.002	1.400E-07
-3939.231	694.594	1.400E-07
-4924.039	-868.238	1.700E-07
-5000.000	.002	1.700E-07
-4924.039	868.243	1.700E-07
-5908.847	-1041.886	1.700E-07
-6000.000	.003	1.700E-07
-5908.846	1041.892	1.700E-07
-6893.655	-1215.534	1.600E-07
-7000.000	.003	1.600E-07
-6893.654	1215.540	1.600E-07
-7878.463	-1389.181	1.500E-07
-8000.000	.004	1.500E-07
-7878.461	1389.189	1.500E-07
-8863.271	-1562.829	1.400E-07
-9000.000	.004	1.400E-07
-8863.270	1562.838	1.400E-07
-9848.078	-1736.477	1.300E-07
-10000.000	.005	1.300E-07
-9848.077	1736.486	1.300E-07
-976.296	216.440	9.400E-08
-923.879	382.684	9.400E-08
-843.391	537.300	9.400E-08
-1952.592	432.881	1.200E-07
-1847.759	765.368	1.200E-07
-1686.782	1074.600	1.200E-07
-2928.888	649.321	1.800E-06
-2771.638	1148.052	1.800E-06
-2530.173	1611.900	1.800E-06
-3905.183	865.761	1.700E-06
-3695.517	1530.736	1.700E-06
-3373.564	2149.200	1.700E-06
-4881.479	1082.201	1.500E-06
-4619.396	1913.420	1.500E-06
-4216.956	2686.501	1.500E-06
-5857.775	1298.642	2.800E-06
-5543.276	2296.104	2.800E-06
-5060.347	3223.801	2.800E-06
-6834.071	1515.082	2.400E-06
-6467.155	2678.788	2.400E-06
-5903.738	3761.101	2.400E-06
-7810.367	1731.522	2.200E-06
-7391.034	3061.472	2.200E-06
-6747.129	4298.401	2.200E-06
-8786.663	1947.963	1.900E-06

-8314.913	3444.156	1.900E-06
-7590.520	4835.701	1.900E-06
-9762.959	2164.403	1.800E-06
-9238.793	3826.840	1.800E-06
-8433.911	5373.001	1.800E-06
-819.152	573.577	8.300E-08
-707.106	707.107	8.300E-08
-573.576	819.152	8.300E-08
-1638.303	1147.154	2.100E-06
-1414.212	1414.215	2.100E-06
-1147.152	1638.305	2.100E-06
-2457.455	1720.731	1.900E-06
-2121.319	2121.322	1.900E-06
-1720.727	2457.458	1.900E-06
-3276.606	2294.309	1.700E-06
-2828.425	2828.429	1.700E-06
-2294.303	3276.610	1.700E-06
-4095.758	2867.886	1.500E-06
-3535.531	3535.537	1.500E-06
-2867.879	4095.762	1.500E-06
-4914.909	3441.463	1.400E-06
-4242.637	4242.644	1.400E-06
-3441.455	4914.915	1.400E-06
-5734.061	4015.040	5.700E-08
-4949.744	4949.751	5.700E-08
-4015.031	5734.067	5.700E-08
-6553.212	4588.617	9.000E-08
-5656.850	5656.859	9.000E-08
-4588.606	6553.220	9.000E-08
-7372.364	5162.194	8.400E-08
-6363.956	6363.966	8.400E-08
-5162.182	7372.373	8.400E-08
-8191.516	5735.771	7.900E-08
-7071.062	7071.074	7.900E-08
-5735.758	8191.525	7.900E-08
-537.299	843.392	2.400E-06
-382.683	923.880	2.400E-06
-216.439	976.296	2.400E-06
-1074.598	1686.784	2.200E-06
-765.365	1847.760	2.200E-06
-432.877	1952.592	2.200E-06
-1611.896	2530.176	6.900E-08
-1148.048	2771.640	6.900E-08
-649.316	2928.889	6.900E-08
-2149.195	3373.568	7.000E-08
-1530.730	3695.520	7.000E-08

-865.755	3905.185	7.000E-08
-2686.494	4216.960	6.700E-08
-1913.413	4619.399	6.700E-08
-1082.193	4881.481	6.700E-08
-3223.792	5060.352	6.300E-08
-2296.095	5543.279	6.300E-08
-1298.632	5857.777	6.300E-08
-3761.091	5903.744	5.900E-08
-2678.778	6467.159	5.900E-08
-1515.071	6834.073	5.900E-08
-4298.390	6747.136	5.500E-08
-3061.460	7391.039	5.500E-08
-1731.510	7810.370	5.500E-08
-4835.689	7590.528	0.000E+00
-3444.143	8314.919	0.000E+00
-1947.948	8786.666	0.000E+00
-5372.988	8433.920	0.000E+00
-3826.825	9238.799	0.000E+00
-2164.387	9762.962	0.000E+00
-173.648	984.808	2.500E-06
.001	1000.000	2.500E-06
173.649	984.808	2.500E-06
-347.295	1969.616	4.400E-08
.001	2000.000	4.400E-08
347.299	1969.615	4.400E-08
-520.943	2954.424	0.000E+00
.002	3000.000	0.000E+00
520.948	2954.423	0.000E+00
-694.590	3939.231	0.000E+00
.003	4000.000	0.000E+00
694.597	3939.230	0.000E+00
-868.237	4924.040	0.000E+00
.003	5000.000	0.000E+00
868.246	4924.038	0.000E+00
-1041.885	5908.847	0.000E+00
.004	6000.000	0.000E+00
1041.896	5908.845	0.000E+00
-1215.532	6893.655	0.000E+00
.005	7000.000	0.000E+00
1215.545	6893.653	0.000E+00
-1389.180	7878.463	0.000E+00
.005	8000.000	0.000E+00
1389.194	7878.460	0.000E+00
-1562.828	8863.271	0.000E+00
.006	9000.000	0.000E+00
1562.843	8863.269	0.000E+00

```
-1736.475    9848.079  0.000E+00
     .007   10000.000  0.000E+00
 1736.493    9848.075  0.000E+00
```

Γ΄.6 Το αρχείο υπολογιζόμενων ρυθμών απόθεσης cartesdepos480.txt του GENII

Εδώ παρουσιάζεται το αρχείο ρυθμών απόθεσης cartesdepos480.txt, όπως προκύπτει από την εκτέλεση του προγράμματος ggtdepos.

```
    X          Y      Deposition Rates(Bq/(sm^2))
  216.440     976.296  2.000E-08
  382.683     923.880  2.000E-08
  537.300     843.391  2.000E-08
  432.879    1952.592  0.000E+00
  765.367    1847.759  0.000E+00
 1074.599    1686.783  0.000E+00
  649.319    2928.888  0.000E+00
 1148.050    2771.639  0.000E+00
 1611.899    2530.174  0.000E+00
  865.759    3905.184  0.000E+00
 1530.734    3695.518  0.000E+00
 2149.199    3373.566  0.000E+00
 1082.198    4881.480  0.000E+00
 1913.417    4619.397  0.000E+00
 2686.498    4216.957  0.000E+00
 1298.638    5857.776  0.000E+00
 2296.101    5543.277  0.000E+00
 3223.798    5060.349  0.000E+00
 1515.078    6834.072  0.000E+00
 2678.784    6467.157  0.000E+00
 3761.098    5903.740  0.000E+00
 1731.517    7810.368  0.000E+00
 3061.468    7391.036  0.000E+00
 4298.397    6747.131  0.000E+00
 1947.957    8786.664  0.000E+00
 3444.151    8314.916  0.000E+00
 4835.697    7590.522  0.000E+00
 2164.396    9762.960  0.000E+00
 3826.835    9238.795  0.000E+00
 5372.997    8433.914  0.000E+00
  573.576     819.152  1.900E-08
  707.107     707.107  1.900E-08
```

819.152	573.576	1.900E-08
1147.153	1638.304	0.000E+00
1414.214	1414.214	0.000E+00
1638.304	1147.153	0.000E+00
1720.729	2457.456	0.000E+00
2121.321	2121.320	0.000E+00
2457.456	1720.729	0.000E+00
2294.306	3276.608	0.000E+00
2828.427	2828.427	0.000E+00
3276.608	2294.305	0.000E+00
2867.882	4095.760	0.000E+00
3535.534	3535.534	0.000E+00
4095.760	2867.882	0.000E+00
3441.459	4914.912	0.000E+00
4242.641	4242.640	0.000E+00
4914.913	3441.458	0.000E+00
4015.035	5734.064	0.000E+00
4949.748	4949.747	0.000E+00
5734.065	4015.034	0.000E+00
4588.612	6553.216	0.000E+00
5656.854	5656.854	0.000E+00
6553.217	4588.611	0.000E+00
5162.188	7372.368	0.000E+00
6363.961	6363.960	0.000E+00
7372.369	5162.187	0.000E+00
5735.765	8191.520	0.000E+00
7071.068	7071.067	0.000E+00
8191.521	5735.764	0.000E+00
843.392	537.299	3.800E-12
923.880	382.683	3.800E-12
976.296	216.439	3.800E-12
1686.783	1074.599	0.000E+00
1847.759	765.367	0.000E+00
1952.592	432.879	0.000E+00
2530.175	1611.898	0.000E+00
2771.639	1148.050	0.000E+00
2928.888	649.318	0.000E+00
3373.566	2149.198	0.000E+00
3695.518	1530.733	0.000E+00
3905.184	865.758	0.000E+00
4216.958	2686.497	0.000E+00
4619.398	1913.417	0.000E+00
4881.480	1082.197	0.000E+00
5060.349	3223.797	0.000E+00
5543.277	2296.100	0.000E+00
5857.776	1298.636	0.000E+00

5903.741	3761.096	0.000E+00
6467.157	2678.783	0.000E+00
6834.072	1515.076	0.000E+00
6747.132	4298.396	0.000E+00
7391.037	3061.467	0.000E+00
7810.369	1731.515	0.000E+00
7590.524	4835.695	0.000E+00
8314.916	3444.150	0.000E+00
8786.664	1947.955	0.000E+00
8433.915	5372.995	0.000E+00
9238.796	3826.833	0.000E+00
9762.961	2164.394	0.000E+00
984.808	173.648	0.000E+00
1000.000	.000	0.000E+00
984.808	-173.648	0.000E+00
1969.616	347.296	2.600E-13
2000.000	.000	2.600E-13
1969.615	-347.297	2.600E-13
2954.423	520.944	0.000E+00
3000.000	.000	0.000E+00
2954.423	-520.945	0.000E+00
3939.231	694.592	0.000E+00
4000.000	-.001	0.000E+00
3939.231	-694.594	0.000E+00
4924.039	868.240	0.000E+00
5000.000	-.001	0.000E+00
4924.039	-868.242	0.000E+00
5908.847	1041.888	0.000E+00
6000.000	-.001	0.000E+00
5908.846	-1041.891	0.000E+00
6893.654	1215.536	0.000E+00
7000.000	-.001	0.000E+00
6893.654	-1215.539	0.000E+00
7878.462	1389.184	0.000E+00
8000.000	-.001	0.000E+00
7878.462	-1389.187	0.000E+00
8863.271	1562.832	0.000E+00
9000.000	-.001	0.000E+00
8863.270	-1562.836	0.000E+00
9848.078	1736.480	0.000E+00
10000.000	-.002	0.000E+00
9848.077	-1736.484	0.000E+00
976.296	-216.440	0.000E+00
923.879	-382.684	0.000E+00
843.391	-537.300	0.000E+00
1952.592	-432.880	0.000E+00

```
1847.759    -765.367  0.000E+00
1686.783   -1074.600  0.000E+00
2928.888    -649.320  3.500E-09
2771.638   -1148.051  3.500E-09
2530.174   -1611.900  3.500E-09
3905.184    -865.759  5.300E-09
3695.518   -1530.735  5.300E-09
3373.565   -2149.199  5.300E-09
4881.480   -1082.199  5.200E-09
4619.397   -1913.419  5.200E-09
4216.957   -2686.499  5.200E-09
5857.776   -1298.639  4.700E-09
5543.276   -2296.102  4.700E-09
5060.348   -3223.799  4.700E-09
6834.072   -1515.079  0.000E+00
6467.156   -2678.786  0.000E+00
5903.739   -3761.099  0.000E+00
7810.368   -1731.519  0.000E+00
7391.035   -3061.470  0.000E+00
6747.130   -4298.399  0.000E+00
8786.664   -1947.959  0.000E+00
8314.915   -3444.154  0.000E+00
7590.521   -4835.699  0.000E+00
9762.960   -2164.398  0.000E+00
9238.794   -3826.837  0.000E+00
8433.913   -5372.999  0.000E+00
 819.152    -573.577  0.000E+00
 707.107    -707.107  0.000E+00
 573.576    -819.152  0.000E+00
1638.304   -1147.153  0.000E+00
1414.213   -1414.214  0.000E+00
1147.152   -1638.305  0.000E+00
2457.456   -1720.730  0.000E+00
2121.320   -2121.321  0.000E+00
1720.728   -2457.457  0.000E+00
3276.607   -2294.307  0.000E+00
2828.427   -2828.428  0.000E+00
2294.304   -3276.609  0.000E+00
4095.760   -2867.883  0.000E+00
3535.533   -3535.535  0.000E+00
2867.880   -4095.761  0.000E+00
4914.911   -3441.460  1.700E-09
4242.640   -4242.642  1.700E-09
3441.456   -4914.914  1.700E-09
5734.063   -4015.037  1.500E-09
4949.746   -4949.749  1.500E-09
```

4015.032	-5734.066	1.500E-09
6553.215	-4588.613	1.400E-09
5656.853	-5656.855	1.400E-09
4588.608	-6553.218	1.400E-09
7372.367	-5162.190	4.800E-09
6363.959	-6363.962	4.800E-09
5162.185	-7372.371	4.800E-09
8191.519	-5735.767	4.500E-09
7071.066	-7071.069	4.500E-09
5735.761	-8191.523	4.500E-09
537.299	-843.392	0.000E+00
382.683	-923.880	0.000E+00
216.439	-976.296	0.000E+00
1074.599	-1686.783	2.600E-09
765.366	-1847.759	2.600E-09
432.879	-1952.592	2.600E-09
1611.898	-2530.175	2.400E-09
1148.049	-2771.639	2.400E-09
649.318	-2928.888	2.400E-09
2149.197	-3373.567	2.100E-09
1530.732	-3695.519	2.100E-09
865.757	-3905.184	2.100E-09
2686.496	-4216.958	1.900E-09
1913.415	-4619.398	1.900E-09
1082.196	-4881.480	1.900E-09
3223.795	-5060.350	1.800E-09
2296.098	-5543.278	1.800E-09
1298.635	-5857.776	1.800E-09
3761.095	-5903.742	1.600E-09
2678.781	-6467.158	1.600E-09
1515.075	-6834.073	1.600E-09
4298.394	-6747.133	0.000E+00
3061.464	-7391.038	0.000E+00
1731.514	-7810.369	0.000E+00
4835.693	-7590.525	0.000E+00
3444.147	-8314.917	0.000E+00
1947.953	-8786.665	0.000E+00
5372.992	-8433.917	0.000E+00
3826.831	-9238.797	0.000E+00
2164.393	-9762.961	0.000E+00
173.648	-984.808	0.000E+00
.000	-1000.000	0.000E+00
-173.649	-984.808	0.000E+00
347.296	-1969.616	2.700E-09
-.001	-2000.000	2.700E-09
-347.297	-1969.615	2.700E-09

```
  520.943   -2954.423  0.000E+00
    -.001   -3000.000  0.000E+00
 -520.946   -2954.423  0.000E+00
  694.591   -3939.231  0.000E+00
    -.001   -4000.000  0.000E+00
 -694.595   -3939.231  0.000E+00
  868.239   -4924.039  0.000E+00
    -.002   -5000.000  0.000E+00
 -868.243   -4924.038  0.000E+00
 1041.887   -5908.847  0.000E+00
    -.002   -6000.000  0.000E+00
-1041.892   -5908.846  0.000E+00
 1215.535   -6893.655  0.000E+00
    -.002   -7000.000  0.000E+00
-1215.541   -6893.654  0.000E+00
 1389.183   -7878.462  0.000E+00
    -.003   -8000.000  0.000E+00
-1389.190   -7878.461  0.000E+00
 1562.830   -8863.271  0.000E+00
    -.003   -9000.000  0.000E+00
-1562.838   -8863.269  0.000E+00
 1736.478   -9848.078  0.000E+00
    -.003  -10000.000  0.000E+00
-1736.487   -9848.076  0.000E+00
 -216.440    -976.296  0.000E+00
 -382.684    -923.879  0.000E+00
 -537.300    -843.391  0.000E+00
 -432.880   -1952.592  0.000E+00
 -765.368   -1847.759  0.000E+00
-1074.600   -1686.782  0.000E+00
 -649.320   -2928.888  0.000E+00
-1148.052   -2771.638  0.000E+00
-1611.900   -2530.174  0.000E+00
 -865.760   -3905.184  0.000E+00
-1530.735   -3695.517  0.000E+00
-2149.200   -3373.565  0.000E+00
-1082.201   -4881.479  0.000E+00
-1913.419   -4619.397  0.000E+00
-2686.500   -4216.956  0.000E+00
-1298.641   -5857.775  0.000E+00
-2296.103   -5543.276  0.000E+00
-3223.800   -5060.347  0.000E+00
-1515.081   -6834.071  0.000E+00
-2678.787   -6467.155  0.000E+00
-3761.100   -5903.738  0.000E+00
-1731.521   -7810.367  0.000E+00
```

-3061.471	-7391.035	0.000E+00
-4298.400	-6747.129	0.000E+00
-1947.961	-8786.663	0.000E+00
-3444.155	-8314.914	0.000E+00
-4835.700	-7590.521	0.000E+00
-2164.401	-9762.959	0.000E+00
-3826.839	-9238.794	0.000E+00
-5373.000	-8433.912	0.000E+00
-573.577	-819.152	0.000E+00
-707.107	-707.106	0.000E+00
-819.152	-573.576	0.000E+00
-1147.154	-1638.304	0.000E+00
-1414.214	-1414.213	0.000E+00
-1638.305	-1147.152	0.000E+00
-1720.730	-2457.455	0.000E+00
-2121.322	-2121.319	0.000E+00
-2457.457	-1720.728	0.000E+00
-2294.307	-3276.607	0.000E+00
-2828.429	-2828.425	0.000E+00
-3276.610	-2294.304	0.000E+00
-2867.884	-4095.759	0.000E+00
-3535.536	-3535.532	0.000E+00
-4095.762	-2867.880	0.000E+00
-3441.461	-4914.911	0.000E+00
-4242.644	-4242.638	0.000E+00
-4914.915	-3441.456	0.000E+00
-4015.038	-5734.063	0.000E+00
-4949.750	-4949.744	0.000E+00
-5734.067	-4015.031	0.000E+00
-4588.614	-6553.214	0.000E+00
-5656.858	-5656.851	0.000E+00
-6553.219	-4588.607	0.000E+00
-5162.191	-7372.366	0.000E+00
-6363.965	-6363.957	0.000E+00
-7372.372	-5162.184	0.000E+00
-5735.768	-8191.518	0.000E+00
-7071.072	-7071.063	0.000E+00
-8191.524	-5735.759	0.000E+00
-843.392	-537.299	0.000E+00
-923.880	-382.683	0.000E+00
-976.296	-216.439	0.000E+00
-1686.783	-1074.599	0.000E+00
-1847.760	-765.365	0.000E+00
-1952.592	-432.878	0.000E+00
-2530.175	-1611.898	0.000E+00
-2771.639	-1148.048	0.000E+00

```
-2928.888    -649.317  0.000E+00
-3373.567   -2149.197  0.000E+00
-3695.519   -1530.731  0.000E+00
-3905.185    -865.755  0.000E+00
-4216.958   -2686.497  0.000E+00
-4619.399   -1913.413  0.000E+00
-4881.481   -1082.194  0.000E+00
-5060.350   -3223.796  0.000E+00
-5543.279   -2296.096  0.000E+00
-5857.777   -1298.633  0.000E+00
-5903.742   -3761.095  0.000E+00
-6467.159   -2678.779  0.000E+00
-6834.073   -1515.072  0.000E+00
-6747.133   -4298.395  0.000E+00
-7391.039   -3061.461  0.000E+00
-7810.370   -1731.511  0.000E+00
-7590.525   -4835.694  0.000E+00
-8314.919   -3444.144  0.000E+00
-8786.666   -1947.950  0.000E+00
-8433.916   -5372.993  0.000E+00
-9238.799   -3826.827  0.000E+00
-9762.962   -2164.389  0.000E+00
 -984.808    -173.648  1.100E-09
-1000.000        .000  1.100E-09
 -984.808     173.649  1.100E-09
-1969.616    -347.295  1.300E-09
-2000.000        .001  1.300E-09
-1969.615     347.297  1.300E-09
-2954.424    -520.943  1.300E-09
-3000.000        .001  1.300E-09
-2954.423     520.946  1.300E-09
-3939.231    -694.591  1.400E-09
-4000.000        .002  1.400E-09
-3939.231     694.594  1.400E-09
-4924.039    -868.238  1.500E-09
-5000.000        .002  1.500E-09
-4924.039     868.243  1.500E-09
-5908.847   -1041.886  1.500E-09
-6000.000        .003  1.500E-09
-5908.846    1041.892  1.500E-09
-6893.655   -1215.534  1.400E-09
-7000.000        .003  1.400E-09
-6893.654    1215.540  1.400E-09
-7878.463   -1389.181  1.300E-09
-8000.000        .004  1.300E-09
-7878.461    1389.189  1.300E-09
```

-8863.271	-1562.829	1.200E-09
-9000.000	.004	1.200E-09
-8863.270	1562.838	1.200E-09
-9848.078	-1736.477	1.200E-09
-10000.000	.005	1.200E-09
-9848.077	1736.486	1.200E-09
-976.296	216.440	1.000E-09
-923.879	382.684	1.000E-09
-843.391	537.300	1.000E-09
-1952.592	432.881	1.300E-09
-1847.759	765.368	1.300E-09
-1686.782	1074.600	1.300E-09
-2928.888	649.321	1.400E-08
-2771.638	1148.052	1.400E-08
-2530.173	1611.900	1.400E-08
-3905.183	865.761	1.200E-08
-3695.517	1530.736	1.200E-08
-3373.564	2149.200	1.200E-08
-4881.479	1082.201	1.100E-08
-4619.396	1913.420	1.100E-08
-4216.956	2686.501	1.100E-08
-5857.775	1298.642	1.500E-08
-5543.276	2296.104	1.500E-08
-5060.347	3223.801	1.500E-08
-6834.071	1515.082	1.300E-08
-6467.155	2678.788	1.300E-08
-5903.738	3761.101	1.300E-08
-7810.367	1731.522	1.200E-08
-7391.034	3061.472	1.200E-08
-6747.129	4298.401	1.200E-08
-8786.663	1947.963	1.000E-08
-8314.913	3444.156	1.000E-08
-7590.520	4835.701	1.000E-08
-9762.959	2164.403	9.600E-09
-9238.793	3826.840	9.600E-09
-8433.911	5373.001	9.600E-09
-819.152	573.577	9.000E-10
-707.106	707.107	9.000E-10
-573.576	819.152	9.000E-10
-1638.303	1147.154	1.600E-08
-1414.212	1414.215	1.600E-08
-1147.152	1638.305	1.600E-08
-2457.455	1720.731	1.400E-08
-2121.319	2121.322	1.400E-08
-1720.727	2457.458	1.400E-08
-3276.606	2294.309	1.300E-08

-2828.425	2828.429	1.300E-08
-2294.303	3276.610	1.300E-08
-4095.758	2867.886	1.100E-08
-3535.531	3535.537	1.100E-08
-2867.879	4095.762	1.100E-08
-4914.909	3441.463	1.000E-08
-4242.637	4242.644	1.000E-08
-3441.455	4914.915	1.000E-08
-5734.061	4015.040	6.100E-10
-4949.744	4949.751	6.100E-10
-4015.031	5734.067	6.100E-10
-6553.212	4588.617	8.000E-10
-5656.850	5656.859	8.000E-10
-4588.606	6553.220	8.000E-10
-7372.364	5162.194	7.500E-10
-6363.956	6363.966	7.500E-10
-5162.182	7372.373	7.500E-10
-8191.516	5735.771	7.100E-10
-7071.062	7071.074	7.100E-10
-5735.758	8191.525	7.100E-10
-537.299	843.392	1.800E-08
-382.683	923.880	1.800E-08
-216.439	976.296	1.800E-08
-1074.598	1686.784	1.700E-08
-765.365	1847.760	1.700E-08
-432.877	1952.592	1.700E-08
-1611.896	2530.176	7.500E-10
-1148.048	2771.640	7.500E-10
-649.316	2928.889	7.500E-10
-2149.195	3373.568	7.500E-10
-1530.730	3695.520	7.500E-10
-865.755	3905.185	7.500E-10
-2686.494	4216.960	7.200E-10
-1913.413	4619.399	7.200E-10
-1082.193	4881.481	7.200E-10
-3223.792	5060.352	6.700E-10
-2296.095	5543.279	6.700E-10
-1298.632	5857.777	6.700E-10
-3761.091	5903.744	6.300E-10
-2678.778	6467.159	6.300E-10
-1515.071	6834.073	6.300E-10
-4298.390	6747.136	5.900E-10
-3061.460	7391.039	5.900E-10
-1731.510	7810.370	5.900E-10
-4835.689	7590.528	0.000E+00
-3444.143	8314.919	0.000E+00

```
-1947.948    8786.666  0.000E+00
-5372.988    8433.920  0.000E+00
-3826.825    9238.799  0.000E+00
-2164.387    9762.962  0.000E+00
 -173.648     984.808  1.900E-08
     .001    1000.000  1.900E-08
  173.649     984.808  1.900E-08
 -347.295    1969.616  4.700E-10
     .001    2000.000  4.700E-10
  347.299    1969.615  4.700E-10
 -520.943    2954.424  0.000E+00
     .002    3000.000  0.000E+00
  520.948    2954.423  0.000E+00
 -694.590    3939.231  0.000E+00
     .003    4000.000  0.000E+00
  694.597    3939.230  0.000E+00
 -868.237    4924.040  0.000E+00
     .003    5000.000  0.000E+00
  868.246    4924.038  0.000E+00
-1041.885    5908.847  0.000E+00
     .004    6000.000  0.000E+00
 1041.896    5908.845  0.000E+00
-1215.532    6893.655  0.000E+00
     .005    7000.000  0.000E+00
 1215.545    6893.653  0.000E+00
-1389.180    7878.463  0.000E+00
     .005    8000.000  0.000E+00
 1389.194    7878.460  0.000E+00
-1562.828    8863.271  0.000E+00
     .006    9000.000  0.000E+00
 1562.843    8863.269  0.000E+00
-1736.475    9848.079  0.000E+00
     .007   10000.000  0.000E+00
 1736.493    9848.075  0.000E+00
```

Γ΄.7 Το αρχείο υπολογιζόμενων δόσεων cartesdose480.txt του GENII

Εδώ παρουσιάζεται το αρχείο υπολογιζόμενων δόσεων cartesdose480.txt, όπως προκύπτει από την εκτέλεση του προγράμματος ggtdepos.

```
   X          Y       Dose(Sv)
 216.440     976.296  6.400E-06
```

382.683	923.880	6.400E-06
537.300	843.391	6.400E-06
432.879	1952.592	0.000E+00
765.367	1847.759	0.000E+00
1074.599	1686.783	0.000E+00
649.319	2928.888	0.000E+00
1148.050	2771.639	0.000E+00
1611.899	2530.174	0.000E+00
865.759	3905.184	0.000E+00
1530.734	3695.518	0.000E+00
2149.199	3373.566	0.000E+00
1082.198	4881.480	0.000E+00
1913.417	4619.397	0.000E+00
2686.498	4216.957	0.000E+00
1298.638	5857.776	0.000E+00
2296.101	5543.277	0.000E+00
3223.798	5060.349	0.000E+00
1515.078	6834.072	0.000E+00
2678.784	6467.157	0.000E+00
3761.098	5903.740	0.000E+00
1731.517	7810.368	0.000E+00
3061.468	7391.036	0.000E+00
4298.397	6747.131	0.000E+00
1947.957	8786.664	0.000E+00
3444.151	8314.916	0.000E+00
4835.697	7590.522	0.000E+00
2164.396	9762.960	0.000E+00
3826.835	9238.795	0.000E+00
5372.997	8433.914	0.000E+00
573.576	819.152	6.000E-06
707.107	707.107	6.000E-06
819.152	573.576	6.000E-06
1147.153	1638.304	0.000E+00
1414.214	1414.214	0.000E+00
1638.304	1147.153	0.000E+00
1720.729	2457.456	0.000E+00
2121.321	2121.320	0.000E+00
2457.456	1720.729	0.000E+00
2294.306	3276.608	0.000E+00
2828.427	2828.427	0.000E+00
3276.608	2294.305	0.000E+00
2867.882	4095.760	0.000E+00
3535.534	3535.534	0.000E+00
4095.760	2867.882	0.000E+00
3441.459	4914.912	0.000E+00
4242.641	4242.640	0.000E+00

4914.913	3441.458	0.000E+00
4015.035	5734.064	0.000E+00
4949.748	4949.747	0.000E+00
5734.065	4015.034	0.000E+00
4588.612	6553.216	0.000E+00
5656.854	5656.854	0.000E+00
6553.217	4588.611	0.000E+00
5162.188	7372.368	0.000E+00
6363.961	6363.960	0.000E+00
7372.369	5162.187	0.000E+00
5735.765	8191.520	0.000E+00
7071.068	7071.067	0.000E+00
8191.521	5735.764	0.000E+00
843.392	537.299	4.700E-09
923.880	382.683	4.700E-09
976.296	216.439	4.700E-09
1686.783	1074.599	0.000E+00
1847.759	765.367	0.000E+00
1952.592	432.879	0.000E+00
2530.175	1611.898	0.000E+00
2771.639	1148.050	0.000E+00
2928.888	649.318	0.000E+00
3373.566	2149.198	0.000E+00
3695.518	1530.733	0.000E+00
3905.184	865.758	0.000E+00
4216.958	2686.497	0.000E+00
4619.398	1913.417	0.000E+00
4881.480	1082.197	0.000E+00
5060.349	3223.797	0.000E+00
5543.277	2296.100	0.000E+00
5857.776	1298.636	0.000E+00
5903.741	3761.096	0.000E+00
6467.157	2678.783	0.000E+00
6834.072	1515.076	0.000E+00
6747.132	4298.396	0.000E+00
7391.037	3061.467	0.000E+00
7810.369	1731.515	0.000E+00
7590.524	4835.695	0.000E+00
8314.916	3444.150	0.000E+00
8786.664	1947.955	0.000E+00
8433.915	5372.995	0.000E+00
9238.796	3826.833	0.000E+00
9762.961	2164.394	0.000E+00
984.808	173.648	0.000E+00
1000.000	.000	0.000E+00
984.808	-173.648	0.000E+00

1969.616	347.296	1.800E-08
2000.000	.000	1.800E-08
1969.615	-347.297	1.800E-08
2954.423	520.944	0.000E+00
3000.000	.000	0.000E+00
2954.423	-520.945	0.000E+00
3939.231	694.592	0.000E+00
4000.000	-.001	0.000E+00
3939.231	-694.594	0.000E+00
4924.039	868.240	0.000E+00
5000.000	-.001	0.000E+00
4924.039	-868.242	0.000E+00
5908.847	1041.888	0.000E+00
6000.000	-.001	0.000E+00
5908.846	-1041.891	0.000E+00
6893.654	1215.536	0.000E+00
7000.000	-.001	0.000E+00
6893.654	-1215.539	0.000E+00
7878.462	1389.184	0.000E+00
8000.000	-.001	0.000E+00
7878.462	-1389.187	0.000E+00
8863.271	1562.832	0.000E+00
9000.000	-.001	0.000E+00
8863.270	-1562.836	0.000E+00
9848.078	1736.480	0.000E+00
10000.000	-.002	0.000E+00
9848.077	-1736.484	0.000E+00
976.296	-216.440	0.000E+00
923.879	-382.684	0.000E+00
843.391	-537.300	0.000E+00
1952.592	-432.880	0.000E+00
1847.759	-765.367	0.000E+00
1686.783	-1074.600	0.000E+00
2928.888	-649.320	1.000E-06
2771.638	-1148.051	1.000E-06
2530.174	-1611.900	1.000E-06
3905.184	-865.759	1.500E-06
3695.518	-1530.735	1.500E-06
3373.565	-2149.199	1.500E-06
4881.480	-1082.199	1.500E-06
4619.397	-1913.419	1.500E-06
4216.957	-2686.499	1.500E-06
5857.776	-1298.639	1.400E-06
5543.276	-2296.102	1.400E-06
5060.348	-3223.799	1.400E-06
6834.072	-1515.079	0.000E+00

6467.156	-2678.786	0.000E+00
5903.739	-3761.099	0.000E+00
7810.368	-1731.519	0.000E+00
7391.035	-3061.470	0.000E+00
6747.130	-4298.399	0.000E+00
8786.664	-1947.959	0.000E+00
8314.915	-3444.154	0.000E+00
7590.521	-4835.699	0.000E+00
9762.960	-2164.398	0.000E+00
9238.794	-3826.837	0.000E+00
8433.913	-5372.999	0.000E+00
819.152	-573.577	0.000E+00
707.107	-707.107	0.000E+00
573.576	-819.152	0.000E+00
1638.304	-1147.153	0.000E+00
1414.213	-1414.214	0.000E+00
1147.152	-1638.305	0.000E+00
2457.456	-1720.730	0.000E+00
2121.320	-2121.321	0.000E+00
1720.728	-2457.457	0.000E+00
3276.607	-2294.307	0.000E+00
2828.427	-2828.428	0.000E+00
2294.304	-3276.609	0.000E+00
4095.760	-2867.883	0.000E+00
3535.533	-3535.535	0.000E+00
2867.880	-4095.761	0.000E+00
4914.911	-3441.460	5.600E-07
4242.640	-4242.642	5.600E-07
3441.456	-4914.914	5.600E-07
5734.063	-4015.037	5.200E-07
4949.746	-4949.749	5.200E-07
4015.032	-5734.066	5.200E-07
6553.215	-4588.613	4.800E-07
5656.853	-5656.855	4.800E-07
4588.608	-6553.218	4.800E-07
7372.367	-5162.190	1.500E-06
6363.959	-6363.962	1.500E-06
5162.185	-7372.371	1.500E-06
8191.519	-5735.767	1.400E-06
7071.066	-7071.069	1.400E-06
5735.761	-8191.523	1.400E-06
537.299	-843.392	0.000E+00
382.683	-923.880	0.000E+00
216.439	-976.296	0.000E+00
1074.599	-1686.783	8.800E-07
765.366	-1847.759	8.800E-07

432.879	-1952.592	8.800E-07
1611.898	-2530.175	8.000E-07
1148.049	-2771.639	8.000E-07
649.318	-2928.888	8.000E-07
2149.197	-3373.567	7.200E-07
1530.732	-3695.519	7.200E-07
865.757	-3905.184	7.200E-07
2686.496	-4216.958	6.500E-07
1913.415	-4619.398	6.500E-07
1082.196	-4881.480	6.500E-07
3223.795	-5060.350	5.900E-07
2296.098	-5543.278	5.900E-07
1298.635	-5857.776	5.900E-07
3761.095	-5903.742	5.400E-07
2678.781	-6467.158	5.400E-07
1515.075	-6834.073	5.400E-07
4298.394	-6747.133	0.000E+00
3061.464	-7391.038	0.000E+00
1731.514	-7810.369	0.000E+00
4835.693	-7590.525	0.000E+00
3444.147	-8314.917	0.000E+00
1947.953	-8786.665	0.000E+00
5372.992	-8433.917	0.000E+00
3826.831	-9238.797	0.000E+00
2164.393	-9762.961	0.000E+00
173.648	-984.808	0.000E+00
.000	-1000.000	0.000E+00
-173.649	-984.808	0.000E+00
347.296	-1969.616	8.900E-07
-.001	-2000.000	8.900E-07
-347.297	-1969.615	8.900E-07
520.943	-2954.423	0.000E+00
-.001	-3000.000	0.000E+00
-520.946	-2954.423	0.000E+00
694.591	-3939.231	0.000E+00
-.001	-4000.000	0.000E+00
-694.595	-3939.231	0.000E+00
868.239	-4924.039	0.000E+00
-.002	-5000.000	0.000E+00
-868.243	-4924.038	0.000E+00
1041.887	-5908.847	0.000E+00
-.002	-6000.000	0.000E+00
-1041.892	-5908.846	0.000E+00
1215.535	-6893.655	0.000E+00
-.002	-7000.000	0.000E+00
-1215.541	-6893.654	0.000E+00

1389.183	-7878.462	0.000E+00
-.003	-8000.000	0.000E+00
-1389.190	-7878.461	0.000E+00
1562.830	-8863.271	0.000E+00
-.003	-9000.000	0.000E+00
-1562.838	-8863.269	0.000E+00
1736.478	-9848.078	0.000E+00
-.003	-10000.000	0.000E+00
-1736.487	-9848.076	0.000E+00
-216.440	-976.296	0.000E+00
-382.684	-923.879	0.000E+00
-537.300	-843.391	0.000E+00
-432.880	-1952.592	0.000E+00
-765.368	-1847.759	0.000E+00
-1074.600	-1686.782	0.000E+00
-649.320	-2928.888	0.000E+00
-1148.052	-2771.638	0.000E+00
-1611.900	-2530.174	0.000E+00
-865.760	-3905.184	0.000E+00
-1530.735	-3695.517	0.000E+00
-2149.200	-3373.565	0.000E+00
-1082.201	-4881.479	0.000E+00
-1913.419	-4619.397	0.000E+00
-2686.500	-4216.956	0.000E+00
-1298.641	-5857.775	0.000E+00
-2296.103	-5543.276	0.000E+00
-3223.800	-5060.347	0.000E+00
-1515.081	-6834.071	0.000E+00
-2678.787	-6467.155	0.000E+00
-3761.100	-5903.738	0.000E+00
-1731.521	-7810.367	0.000E+00
-3061.471	-7391.035	0.000E+00
-4298.400	-6747.129	0.000E+00
-1947.961	-8786.663	0.000E+00
-3444.155	-8314.914	0.000E+00
-4835.700	-7590.521	0.000E+00
-2164.401	-9762.959	0.000E+00
-3826.839	-9238.794	0.000E+00
-5373.000	-8433.912	0.000E+00
-573.577	-819.152	0.000E+00
-707.107	-707.106	0.000E+00
-819.152	-573.576	0.000E+00
-1147.154	-1638.304	0.000E+00
-1414.214	-1414.213	0.000E+00
-1638.305	-1147.152	0.000E+00
-1720.730	-2457.455	0.000E+00

-2121.322	-2121.319	0.000E+00
-2457.457	-1720.728	0.000E+00
-2294.307	-3276.607	0.000E+00
-2828.429	-2828.425	0.000E+00
-3276.610	-2294.304	0.000E+00
-2867.884	-4095.759	0.000E+00
-3535.536	-3535.532	0.000E+00
-4095.762	-2867.880	0.000E+00
-3441.461	-4914.911	0.000E+00
-4242.644	-4242.638	0.000E+00
-4914.915	-3441.456	0.000E+00
-4015.038	-5734.063	0.000E+00
-4949.750	-4949.744	0.000E+00
-5734.067	-4015.031	0.000E+00
-4588.614	-6553.214	0.000E+00
-5656.858	-5656.851	0.000E+00
-6553.219	-4588.607	0.000E+00
-5162.191	-7372.366	0.000E+00
-6363.965	-6363.957	0.000E+00
-7372.372	-5162.184	0.000E+00
-5735.768	-8191.518	0.000E+00
-7071.072	-7071.063	0.000E+00
-8191.524	-5735.759	0.000E+00
-843.392	-537.299	0.000E+00
-923.880	-382.683	0.000E+00
-976.296	-216.439	0.000E+00
-1686.783	-1074.599	0.000E+00
-1847.760	-765.365	0.000E+00
-1952.592	-432.878	0.000E+00
-2530.175	-1611.898	0.000E+00
-2771.639	-1148.048	0.000E+00
-2928.888	-649.317	0.000E+00
-3373.567	-2149.197	0.000E+00
-3695.519	-1530.731	0.000E+00
-3905.185	-865.755	0.000E+00
-4216.958	-2686.497	0.000E+00
-4619.399	-1913.413	0.000E+00
-4881.481	-1082.194	0.000E+00
-5060.350	-3223.796	0.000E+00
-5543.279	-2296.096	0.000E+00
-5857.777	-1298.633	0.000E+00
-5903.742	-3761.095	0.000E+00
-6467.159	-2678.779	0.000E+00
-6834.073	-1515.072	0.000E+00
-6747.133	-4298.395	0.000E+00
-7391.039	-3061.461	0.000E+00

-7810.370	-1731.511	0.000E+00
-7590.525	-4835.694	0.000E+00
-8314.919	-3444.144	0.000E+00
-8786.666	-1947.950	0.000E+00
-8433.916	-5372.993	0.000E+00
-9238.799	-3826.827	0.000E+00
-9762.962	-2164.389	0.000E+00
-984.808	-173.648	3.100E-07
-1000.000	.000	3.100E-07
-984.808	173.649	3.100E-07
-1969.616	-347.295	3.900E-07
-2000.000	.001	3.900E-07
-1969.615	347.297	3.900E-07
-2954.424	-520.943	3.900E-07
-3000.000	.001	3.900E-07
-2954.423	520.946	3.900E-07
-3939.231	-694.591	4.100E-07
-4000.000	.002	4.100E-07
-3939.231	694.594	4.100E-07
-4924.039	-868.238	4.700E-07
-5000.000	.002	4.700E-07
-4924.039	868.243	4.700E-07
-5908.847	-1041.886	4.700E-07
-6000.000	.003	4.700E-07
-5908.846	1041.892	4.700E-07
-6893.655	-1215.534	4.400E-07
-7000.000	.003	4.400E-07
-6893.654	1215.540	4.400E-07
-7878.463	-1389.181	4.100E-07
-8000.000	.004	4.100E-07
-7878.461	1389.189	4.100E-07
-8863.271	-1562.829	3.800E-07
-9000.000	.004	3.800E-07
-8863.270	1562.838	3.800E-07
-9848.078	-1736.477	3.600E-07
-10000.000	.005	3.600E-07
-9848.077	1736.486	3.600E-07
-976.296	216.440	3.000E-07
-923.879	382.684	3.000E-07
-843.391	537.300	3.000E-07
-1952.592	432.881	3.900E-07
-1847.759	765.368	3.900E-07
-1686.782	1074.600	3.900E-07
-2928.888	649.321	4.400E-06
-2771.638	1148.052	4.400E-06
-2530.173	1611.900	4.400E-06

-3905.183	865.761	4.000E-06
-3695.517	1530.736	4.000E-06
-3373.564	2149.200	4.000E-06
-4881.479	1082.201	3.600E-06
-4619.396	1913.420	3.600E-06
-4216.956	2686.501	3.600E-06
-5857.775	1298.642	5.500E-06
-5543.276	2296.104	5.500E-06
-5060.347	3223.801	5.500E-06
-6834.071	1515.082	4.800E-06
-6467.155	2678.788	4.800E-06
-5903.738	3761.101	4.800E-06
-7810.367	1731.522	4.300E-06
-7391.034	3061.472	4.300E-06
-6747.129	4298.401	4.300E-06
-8786.663	1947.963	3.900E-06
-8314.913	3444.156	3.900E-06
-7590.520	4835.701	3.900E-06
-9762.959	2164.403	3.500E-06
-9238.793	3826.840	3.500E-06
-8433.911	5373.001	3.500E-06
-819.152	573.577	2.600E-07
-707.106	707.107	2.600E-07
-573.576	819.152	2.600E-07
-1638.303	1147.154	5.100E-06
-1414.212	1414.215	5.100E-06
-1147.152	1638.305	5.100E-06
-2457.455	1720.731	4.600E-06
-2121.319	2121.322	4.600E-06
-1720.727	2457.458	4.600E-06
-3276.606	2294.309	4.100E-06
-2828.425	2828.429	4.100E-06
-2294.303	3276.610	4.100E-06
-4095.758	2867.886	3.700E-06
-3535.531	3535.537	3.700E-06
-2867.879	4095.762	3.700E-06
-4914.909	3441.463	3.300E-06
-4242.637	4242.644	3.300E-06
-3441.455	4914.915	3.300E-06
-5734.061	4015.040	1.800E-07
-4949.744	4949.751	1.800E-07
-4015.031	5734.067	1.800E-07
-6553.212	4588.617	2.500E-07
-5656.850	5656.859	2.500E-07
-4588.606	6553.220	2.500E-07
-7372.364	5162.194	2.300E-07

-6363.956	6363.966	2.300E-07
-5162.182	7372.373	2.300E-07
-8191.516	5735.771	2.200E-07
-7071.062	7071.074	2.200E-07
-5735.758	8191.525	2.200E-07
-537.299	843.392	6.000E-06
-382.683	923.880	6.000E-06
-216.439	976.296	6.000E-06
-1074.598	1686.784	5.400E-06
-765.365	1847.760	5.400E-06
-432.877	1952.592	5.400E-06
-1611.896	2530.176	2.200E-07
-1148.048	2771.640	2.200E-07
-649.316	2928.889	2.200E-07
-2149.195	3373.568	2.200E-07
-1530.730	3695.520	2.200E-07
-865.755	3905.185	2.200E-07
-2686.494	4216.960	2.100E-07
-1913.413	4619.399	2.100E-07
-1082.193	4881.481	2.100E-07
-3223.792	5060.352	2.000E-07
-2296.095	5543.279	2.000E-07
-1298.632	5857.777	2.000E-07
-3761.091	5903.744	1.800E-07
-2678.778	6467.159	1.800E-07
-1515.071	6834.073	1.800E-07
-4298.390	6747.136	1.700E-07
-3061.460	7391.039	1.700E-07
-1731.510	7810.370	1.700E-07
-4835.689	7590.528	0.000E+00
-3444.143	8314.919	0.000E+00
-1947.948	8786.666	0.000E+00
-5372.988	8433.920	0.000E+00
-3826.825	9238.799	0.000E+00
-2164.387	9762.962	0.000E+00
-173.648	984.808	6.200E-06
.001	1000.000	6.200E-06
173.649	984.808	6.200E-06
-347.295	1969.616	1.400E-07
.001	2000.000	1.400E-07
347.299	1969.615	1.400E-07
-520.943	2954.424	0.000E+00
.002	3000.000	0.000E+00
520.948	2954.423	0.000E+00
-694.590	3939.231	0.000E+00
.003	4000.000	0.000E+00

```
   694.597    3939.230  0.000E+00
  -868.237    4924.040  0.000E+00
      .003    5000.000  0.000E+00
   868.246    4924.038  0.000E+00
 -1041.885    5908.847  0.000E+00
      .004    6000.000  0.000E+00
  1041.896    5908.845  0.000E+00
 -1215.532    6893.655  0.000E+00
      .005    7000.000  0.000E+00
  1215.545    6893.653  0.000E+00
 -1389.180    7878.463  0.000E+00
      .005    8000.000  0.000E+00
  1389.194    7878.460  0.000E+00
 -1562.828    8863.271  0.000E+00
      .006    9000.000  0.000E+00
  1562.843    8863.269  0.000E+00
 -1736.475    9848.079  0.000E+00
      .007   10000.000  0.000E+00
  1736.493    9848.075  0.000E+00
```

Παράρτημα Δ΄

Το ύψος ανάμιξης σε ουδέτερες και ευσταθείς συνθήκες

Δ΄.1 Ουδέτερες συνθήκες

Σε αυτή την παράγραφο εξετάζεται η εξάρτηση του ύψους ανάμιξης h_{mix} από τον συντελεστή c και το αεροδυναμικό ύψος επιφάνειας z_o σύμφωνα με τις εξισώσεις 4.9, 4.10, που παρουσιάστηκαν αναλυτικά στην παράγραφο 4.2.4.2. Θεωρούμε ως ταχύτητα ανέμου επιφανείας $u_{10} = 4\,\mathrm{msec}^{-1}$, που είναι η ελάχιστη ταχύτητα ανέμου για ουδέτερη ατμόσφαιρα. Για την κατασκευή του γραφήματος Δ΄.1 κρατάμε σταθερό τον συντελεστή c και δίνουμε τιμές στο z_o στο διάστημα 0.1-$0.25\,\mathrm{m}$. Δηλαδή στο διάγραμμα αυτό βλέπουμε την μεταβολή του ύψους ανάμιξης h_{mix} σε σχέση με την τραχύτητα του εδάφους z_o όταν κρατάμε τον συντελεστή c σταθερό.

Ομοίως κατασκευάζουμε το γράφημα Δ΄.2, όπου βλέπουμε την μεταβολή του ύψους ανάμιξης h_{mix} σε σχέση με τον συντελεστή c όταν κρατάμε το z_o σταθερό. Ο συντελεστής c κυμαίνεται στο διάστημα 0.15-0.4 και το $z_o = 0.1\,\mathrm{m}$.

Από τα γραφήματα προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το h_{mix} έχει μεγάλη εξάρτηση από το c όπως αναμενόταν. Το z_o επηρεάζει σε μικρότερο βαθμό το ύψος ανάμιξης h_{mix}.

- Για τιμές του $c > 0.25$ το h_{mix} ξεπερνά το $1\,\mathrm{km}$. Μάλιστα αυτοί οι υπολογισμοί έχουν γίνει με σχετικά μικρό $z_o = 0.1\,\mathrm{m}$, το οποίο είναι και αυτό ανάλογο με το h_{mix}. Συνεπώς ορθά επιλέξαμε συντελεστή c στο διάστημα 0.15-0.25 όπως προτείνουν και οι Panofsky and Dutton [139], αφού θέλουμε να έχουμε συντηρητικές τιμές για το h_{mix}.

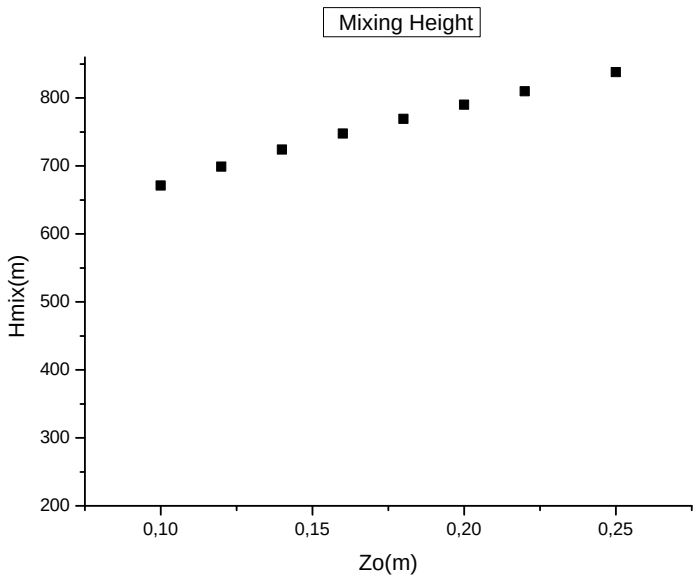
- Επιλέγοντας τις ελάχιστες δυνατές τιμές ($z_o = 0.1\,\mathrm{m}$ και $c = 0.15$) προκύπτει ότι ύψος ανάμιξης είναι $h_{mix} = 592.2\,\mathrm{m}$. Κάνοντας κάποιους πρόχειρους υπολογι-

σμούς για τους σταθμούς του ΑΗΣ Μεγαλόπολης με βάση την μεθοδολογία, που αναπτύξαμε στην παράγραφο 2.2.3.2, και επιλέγοντας την ελάχιστη ταχύτητα ανέμου σε ουδέτερες συνθήκες ($u_{10} = 4\,\mathrm{msec}^{-1}$) προκύπτει ενεργό ύψος πλουμίου $h_{ef} = 576.6\,\mathrm{m}$. Έτσι από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι το πλανητικό οριακό στρώμα δεν εμποδίζει την ανάπτυξη του πλουμίου στις ουδέτερες συνθήκες στην περιοχή της Μεγαλόπολης.

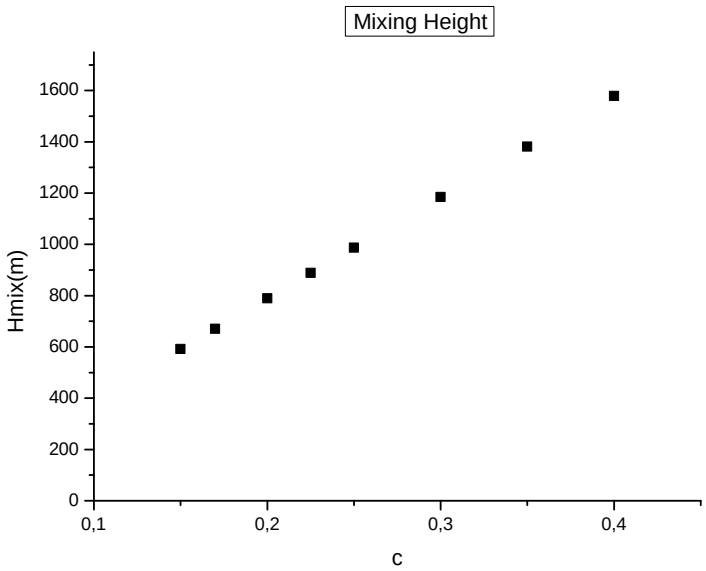
Δ΄.2 Ευσταθείς συνθήκες

Εδώ παρουσιάζουμε την μεταβολή του ύψους ανάμιξης h_{mix} σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου u με βάση τις εξισώσεις των Panofsky and Dutton [139] και Nath and Patil [131] (βλ. και παράγραφο 4.2.4.3). Για την πραγματοποίηση των υπολογισμών θεωρήσαμε ότι το αεροδυναμικό ύψος επιφάνειας z_o ισούται με $0.1\,\mathrm{m}$. Παρατηρούμε ότι με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου αυξάνει και το ύψος ανάμιξης. Βλέπουμε επίσης ότι τόσο σε συνθήκες ευστάθειας E όσο και F η εξίσωση των Nath and Patil [131] δίνει σχετικά μεγαλύτερα ύψη ανάμιξης από ότι αυτή των Panofsky and Dutton [139] (βλ. γραφήματα Δ΄.3 και Δ΄.4).

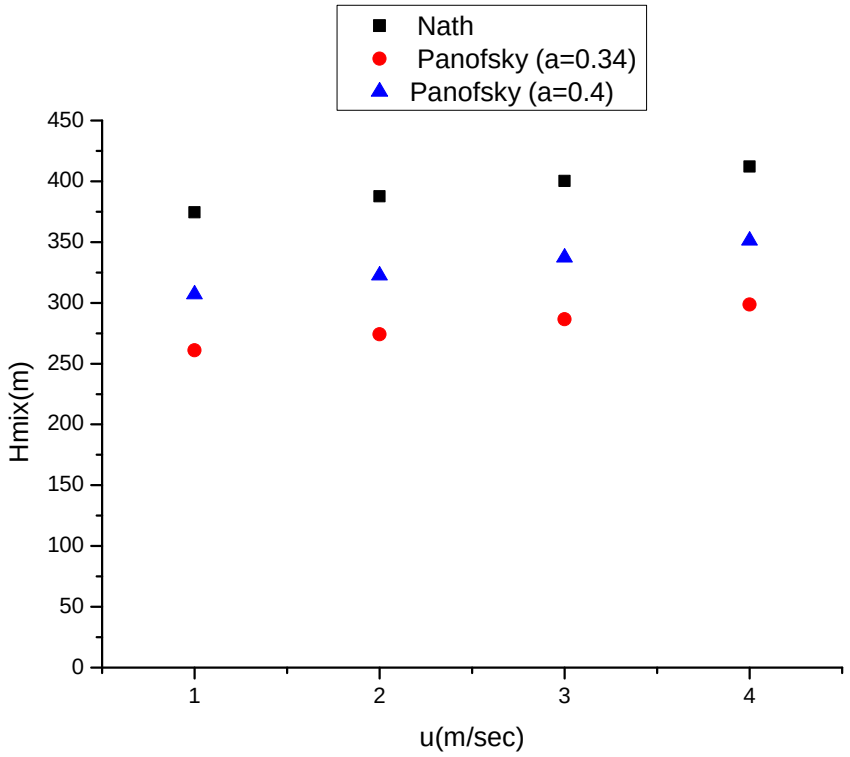
Σχήματα Κεφαλαίου



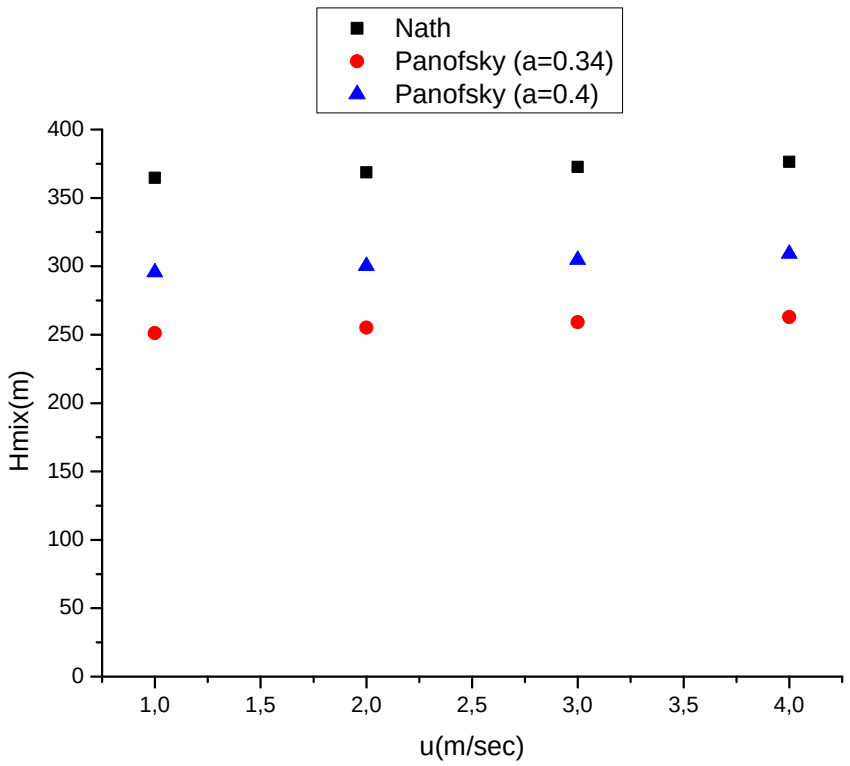
Σχήμα Δ΄.1: Μεταβολή του ύψους ανάμιξης h_{mix} σε σχέση με το αεροδυναμικό ύψος επιφάνειας z_o



Σχήμα Δ΄.2: Μεταβολή του ύψους ανάμιξης h_{mix} σε σχέση με τον συντελεστή c



Σχήμα Δ΄.3: Μεταβολή του ύψους ανάμιξης h_{mix} σε συνθήκες ευστάθειας E



Σχήμα Δ΄.4: Μεταβολή του ύψους ανάμιξης h_{mix} σε συνθήκες ευστάθειας F

Παράρτημα Ε΄

Πιστοποιητικό πηγής ραδονίου

Σε αυτό το παράρτημα παρουσιάζεται το πιστοποιητικό βαθμονόμησης της πηγής ραδονίου RF 200 που χρησιμοποιήθηκε στην βαθμονόμηση του οργάνου AlphaGuard.

Σχήματα Κεφαλαίου

CZECH METROLOGICAL INSTITUTE
INSPECTORATE FOR IONIZING RADIATION
Radiová 1, 102 00 Praha 10

CERTIFICATE

Certificate No : 931 - OL - 049/98 Type: RF 200 Prod. No: 524-01

Radionuclide: 226Ra Half life: 584300 days

Activity: 274,3 kBq Mass of 226Ra: 7,499 μg Emanating power: 0,997 ±0,001

Radon output: 0,5737 Bq/s Half life of 222Rn : 3,824 days

Radioactive impurities: -

Inner volume between valves: 272 ml Inner volume of the filter head: 20 ml

Reference date: 1.3.1998

Combined standard uncertainty of the activity: 1,5 %

Description:
Solid phase flow through source of 222Rn with emanating power >= 0,995 % closed in the stainless steel cylindrical case provided with two ball valves and two aerosol filters connected on output aperture of the valves. Radon source as polymer foil is placed in the centre of the tube.

Measuring method:
Comparison with IIR standards.

Note:
The source works reliably in temperature range 0 - 40 centigrades and relative humidity 0 - 100 % (non condensing).

Date of the certificate issue: 5.3.1998 Certificate validity: 3 years

Customer: National Technical Univesity of Athens
Mech. Eng. Dept. - Nuclear Eng. Section
Athens
GREECE

ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT Inspektorát pro ionizující záření PRAHA -90-

RNDr. Pavel Dryák, CSc.
director

Phone: 4202-67008497 Fax: 4202-67008466

Παράρτημα ΣΤ΄

Υψόμετρα σημείων υπολογισμού του ORION-II

Σε αυτό το παράρτημα παρατίθενται τα υψόμετρα των σημείων υπολογισμού στην περιοχή της Μεγαλόπολης, που χρησιμοποιούνται στις εκτελέσεις του ORION-II στα κεφάλαια 5 και 6. Το υπολογιζόμενο μέσο ύψος (*mean sector height*) δίνεται για την εγγραφή, που αντιστοιχεί στην μέση γωνία κάθε τομέα. Για παράδειγμα στον τομέα που έχει εύρος από 11.25°-33.75° η μέση τιμή του ύψους παρέχεται στην εγγραφή με θ=22.5°, η οποία είναι η μέση γωνία του τομέα.

```
distance  thita   mean sector height
500.0   .000000        361
500.0   11.250000
500.0   22.500000      360
500.0   33.750000
500.0   45.000000      361
500.0   56.250000
500.0   67.500000      364
500.0   78.750000
500.0   90.000000      370
500.0   101.250000
500.0   112.500000     367
500.0   123.750000
500.0   135.000000     363
500.0   146.250000
500.0   157.500000     368
500.0   168.750000
500.0   180.000000     373
500.0   191.250000
500.0   202.500000     369
500.0   213.750000
500.0   225.000000     354
```

500.0	236.250000	
500.0	247.500000	352
500.0	258.750000	
500.0	270.000000	352
500.0	281.250000	
500.0	292.500000	353
500.0	303.750000	
500.0	315.000000	353
500.0	326.250000	
500.0	337.500000	357
500.0	348.750000	
1000.0	.000000	366
1000.0	11.250000	
1000.0	22.500000	367
1000.0	33.750000	
1000.0	45.000000	361
1000.0	56.250000	
1000.0	67.500000	365
1000.0	78.750000	
1000.0	90.000000	373
1000.0	101.250000	
1000.0	112.500000	367
1000.0	123.750000	
1000.0	135.000000	335
1000.0	146.250000	
1000.0	157.500000	354
1000.0	168.750000	
1000.0	180.000000	362
1000.0	191.250000	
1000.0	202.500000	354
1000.0	213.750000	
1000.0	225.000000	356
1000.0	236.250000	
1000.0	247.500000	350
1000.0	258.750000	
1000.0	270.000000	347
1000.0	281.250000	
1000.0	292.500000	349
1000.0	303.750000	
1000.0	315.000000	350
1000.0	326.250000	
1000.0	337.500000	357
1000.0	348.750000	
1500.0	.000000	365
1500.0	11.250000	
1500.0	22.500000	353

```
1500.0  33.750000
1500.0  45.000000      361
1500.0  56.250000
1500.0  67.500000      380
1500.0  78.750000
1500.0  90.000000      379
1500.0  101.250000
1500.0  112.500000     371
1500.0  123.750000
1500.0  135.000000     333
1500.0  146.250000
1500.0  157.500000     345
1500.0  168.750000
1500.0  180.000000     357
1500.0  191.250000
1500.0  202.500000     368
1500.0  213.750000
1500.0  225.000000     397
1500.0  236.250000
1500.0  247.500000     383
1500.0  258.750000
1500.0  270.000000     361
1500.0  281.250000
1500.0  292.500000     353
1500.0  303.750000
1500.0  315.000000     349
1500.0  326.250000
1500.0  337.500000     363
1500.0  348.750000
2000.0  .000000        355
2000.0  11.250000
2000.0  22.500000      355
2000.0  33.750000
2000.0  45.000000      381
2000.0  56.250000
2000.0  67.500000      393
2000.0  78.750000
2000.0  90.000000      391
2000.0  101.250000
2000.0  112.500000     397
2000.0  123.750000
2000.0  135.000000     350
2000.0  146.250000
2000.0  157.500000     335
2000.0  168.750000
2000.0  180.000000     360
```

2000.0	191.250000	
2000.0	202.500000	384
2000.0	213.750000	
2000.0	225.000000	433
2000.0	236.250000	
2000.0	247.500000	422
2000.0	258.750000	
2000.0	270.000000	376
2000.0	281.250000	
2000.0	292.500000	361
2000.0	303.750000	
2000.0	315.000000	350
2000.0	326.250000	
2000.0	337.500000	347
2000.0	348.750000	
2500.0	.000000	357
2500.0	11.250000	
2500.0	22.500000	385
2500.0	33.750000	
2500.0	45.000000	403
2500.0	56.250000	
2500.0	67.500000	400
2500.0	78.750000	
2500.0	90.000000	396
2500.0	101.250000	
2500.0	112.500000	402
2500.0	123.750000	
2500.0	135.000000	358
2500.0	146.250000	
2500.0	157.500000	322
2500.0	168.750000	
2500.0	180.000000	355
2500.0	191.250000	
2500.0	202.500000	392
2500.0	213.750000	
2500.0	225.000000	443
2500.0	236.250000	
2500.0	247.500000	438
2500.0	258.750000	
2500.0	270.000000	384
2500.0	281.250000	
2500.0	292.500000	373
2500.0	303.750000	
2500.0	315.000000	369
2500.0	326.250000	
2500.0	337.500000	349

```
2500.0  348.750000
3000.0  .000000        346
3000.0  11.250000
3000.0  22.500000      386
3000.0  33.750000
3000.0  45.000000      415
3000.0  56.250000
3000.0  67.500000      414
3000.0  78.750000
3000.0  90.000000      412
3000.0  101.250000
3000.0  112.500000     415
3000.0  123.750000
3000.0  135.000000     364
3000.0  146.250000
3000.0  157.500000     310
3000.0  168.750000
3000.0  180.000000     360
3000.0  191.250000
3000.0  202.500000     399
3000.0  213.750000
3000.0  225.000000     452
3000.0  236.250000
3000.0  247.500000     429
3000.0  258.750000
3000.0  270.000000     393
3000.0  281.250000
3000.0  292.500000     390
3000.0  303.750000
3000.0  315.000000     382
3000.0  326.250000
3000.0  337.500000     347
3000.0  348.750000
3500.0  .000000        339
3500.0  11.250000
3500.0  22.500000      392
3500.0  33.750000
3500.0  45.000000      421
3500.0  56.250000
3500.0  67.500000      415
3500.0  78.750000
3500.0  90.000000      417
3500.0  101.250000
3500.0  112.500000     413
3500.0  123.750000
3500.0  135.000000     353
```

3500.0	146.250000	
3500.0	157.500000	314
3500.0	168.750000	
3500.0	180.000000	371
3500.0	191.250000	
3500.0	202.500000	399
3500.0	213.750000	
3500.0	225.000000	433
3500.0	236.250000	
3500.0	247.500000	448
3500.0	258.750000	
3500.0	270.000000	413
3500.0	281.250000	
3500.0	292.500000	414
3500.0	303.750000	
3500.0	315.000000	397
3500.0	326.250000	
3500.0	337.500000	350
3500.0	348.750000	
4000.0	.000000	354
4000.0	11.250000	
4000.0	22.500000	399
4000.0	33.750000	
4000.0	45.000000	428
4000.0	56.250000	
4000.0	67.500000	433
4000.0	78.750000	
4000.0	90.000000	424
4000.0	101.250000	
4000.0	112.500000	418
4000.0	123.750000	
4000.0	135.000000	373
4000.0	146.250000	
4000.0	157.500000	326
4000.0	168.750000	
4000.0	180.000000	373
4000.0	191.250000	
4000.0	202.500000	412
4000.0	213.750000	
4000.0	225.000000	485
4000.0	236.250000	
4000.0	247.500000	444
4000.0	258.750000	
4000.0	270.000000	457
4000.0	281.250000	
4000.0	292.500000	448

```
4000.0  303.750000
4000.0  315.000000     414
4000.0  326.250000
4000.0  337.500000     350
4000.0  348.750000
4500.0  .000000        371
4500.0  11.250000
4500.0  22.500000      403
4500.0  33.750000
4500.0  45.000000      422
4500.0  56.250000
4500.0  67.500000      434
4500.0  78.750000
4500.0  90.000000      425
4500.0  101.250000
4500.0  112.500000     419
4500.0  123.750000
4500.0  135.000000     372
4500.0  146.250000
4500.0  157.500000     343
4500.0  168.750000
4500.0  180.000000     373
4500.0  191.250000
4500.0  202.500000     401
4500.0  213.750000
4500.0  225.000000     481
4500.0  236.250000
4500.0  247.500000     511
4500.0  258.750000
4500.0  270.000000     499
4500.0  281.250000
4500.0  292.500000     498
4500.0  303.750000
4500.0  315.000000     430
4500.0  326.250000
4500.0  337.500000     360
4500.0  348.750000
5000.0  .000000        373
5000.0  11.250000
5000.0  22.500000      419
5000.0  33.750000
5000.0  45.000000      424
5000.0  56.250000
5000.0  67.500000      432
5000.0  78.750000
5000.0  90.000000      424
```

5000.0	101.250000	
5000.0	112.500000	429
5000.0	123.750000	
5000.0	135.000000	404
5000.0	146.250000	
5000.0	157.500000	377
5000.0	168.750000	
5000.0	180.000000	385
5000.0	191.250000	
5000.0	202.500000	429
5000.0	213.750000	
5000.0	225.000000	475
5000.0	236.250000	
5000.0	247.500000	525
5000.0	258.750000	
5000.0	270.000000	547
5000.0	281.250000	
5000.0	292.500000	550
5000.0	303.750000	
5000.0	315.000000	503
5000.0	326.250000	
5000.0	337.500000	401
5000.0	348.750000	
5500.0	.000000	368
5500.0	11.250000	
5500.0	22.500000	429
5500.0	33.750000	
5500.0	45.000000	447
5500.0	56.250000	
5500.0	67.500000	442
5500.0	78.750000	
5500.0	90.000000	427
5500.0	101.250000	
5500.0	112.500000	435
5500.0	123.750000	
5500.0	135.000000	405
5500.0	146.250000	
5500.0	157.500000	381
5500.0	168.750000	
5500.0	180.000000	392
5500.0	191.250000	
5500.0	202.500000	435
5500.0	213.750000	
5500.0	225.000000	485
5500.0	236.250000	
5500.0	247.500000	580

```
5500.0  258.750000
5500.0  270.000000     652
5500.0  281.250000
5500.0  292.500000     586
5500.0  303.750000
5500.0  315.000000     607
5500.0  326.250000
5500.0  337.500000     409
5500.0  348.750000
6000.0  .000000        380
6000.0  11.250000
6000.0  22.500000      467
6000.0  33.750000
6000.0  45.000000      482
6000.0  56.250000
6000.0  67.500000      461
6000.0  78.750000
6000.0  90.000000      437
6000.0  101.250000
6000.0  112.500000     433
6000.0  123.750000
6000.0  135.000000     413
6000.0  146.250000
6000.0  157.500000     394
6000.0  168.750000
6000.0  180.000000     395
6000.0  191.250000
6000.0  202.500000     442
6000.0  213.750000
6000.0  225.000000     518
6000.0  236.250000
6000.0  247.500000     582
6000.0  258.750000
6000.0  270.000000     661
6000.0  281.250000
6000.0  292.500000     619
6000.0  303.750000
6000.0  315.000000     665
6000.0  326.250000
6000.0  337.500000     478
6000.0  348.750000
6500.0  .000000        400
6500.0  11.250000
6500.0  22.500000      482
6500.0  33.750000
6500.0  45.000000      501
```

6500.0	56.250000	
6500.0	67.500000	497
6500.0	78.750000	
6500.0	90.000000	464
6500.0	101.250000	
6500.0	112.500000	425
6500.0	123.750000	
6500.0	135.000000	394
6500.0	146.250000	
6500.0	157.500000	384
6500.0	168.750000	
6500.0	180.000000	401
6500.0	191.250000	
6500.0	202.500000	475
6500.0	213.750000	
6500.0	225.000000	562
6500.0	236.250000	
6500.0	247.500000	615
6500.0	258.750000	
6500.0	270.000000	725
6500.0	281.250000	
6500.0	292.500000	684
6500.0	303.750000	
6500.0	315.000000	701
6500.0	326.250000	
6500.0	337.500000	432
6500.0	348.750000	
7000.0	.000000	408
7000.0	11.250000	
7000.0	22.500000	482
7000.0	33.750000	
7000.0	45.000000	512
7000.0	56.250000	
7000.0	67.500000	547
7000.0	78.750000	
7000.0	90.000000	518
7000.0	101.250000	
7000.0	112.500000	429
7000.0	123.750000	
7000.0	135.000000	391
7000.0	146.250000	
7000.0	157.500000	387
7000.0	168.750000	
7000.0	180.000000	423
7000.0	191.250000	
7000.0	202.500000	541

7000.0	213.750000	
7000.0	225.000000	583
7000.0	236.250000	
7000.0	247.500000	609
7000.0	258.750000	
7000.0	270.000000	713
7000.0	281.250000	
7000.0	292.500000	834
7000.0	303.750000	
7000.0	315.000000	761
7000.0	326.250000	
7000.0	337.500000	387
7000.0	348.750000	
7500.0	.000000	415
7500.0	11.250000	
7500.0	22.500000	520
7500.0	33.750000	
7500.0	45.000000	537
7500.0	56.250000	
7500.0	67.500000	600
7500.0	78.750000	
7500.0	90.000000	601
7500.0	101.250000	
7500.0	112.500000	446
7500.0	123.750000	
7500.0	135.000000	396
7500.0	146.250000	
7500.0	157.500000	396
7500.0	168.750000	
7500.0	180.000000	445
7500.0	191.250000	
7500.0	202.500000	561
7500.0	213.750000	
7500.0	225.000000	626
7500.0	236.250000	
7500.0	247.500000	699
7500.0	258.750000	
7500.0	270.000000	847
7500.0	281.250000	
7500.0	292.500000	929
7500.0	303.750000	
7500.0	315.000000	723
7500.0	326.250000	
7500.0	337.500000	386
7500.0	348.750000	
8000.0	.000000	431

8000.0	11.250000	
8000.0	22.500000	545
8000.0	33.750000	
8000.0	45.000000	572
8000.0	56.250000	
8000.0	67.500000	608
8000.0	78.750000	
8000.0	90.000000	629
8000.0	101.250000	
8000.0	112.500000	467
8000.0	123.750000	
8000.0	135.000000	408
8000.0	146.250000	
8000.0	157.500000	405
8000.0	168.750000	
8000.0	180.000000	456
8000.0	191.250000	
8000.0	202.500000	584
8000.0	213.750000	
8000.0	225.000000	679
8000.0	236.250000	
8000.0	247.500000	807
8000.0	258.750000	
8000.0	270.000000	945
8000.0	281.250000	
8000.0	292.500000	986
8000.0	303.750000	
8000.0	315.000000	719
8000.0	326.250000	
8000.0	337.500000	377
8000.0	348.750000	
8500.0	.000000	444
8500.0	11.250000	
8500.0	22.500000	567
8500.0	33.750000	
8500.0	45.000000	581
8500.0	56.250000	
8500.0	67.500000	629
8500.0	78.750000	
8500.0	90.000000	636
8500.0	101.250000	
8500.0	112.500000	506
8500.0	123.750000	
8500.0	135.000000	415
8500.0	146.250000	
8500.0	157.500000	403

8500.0	168.750000	
8500.0	180.000000	439
8500.0	191.250000	
8500.0	202.500000	557
8500.0	213.750000	
8500.0	225.000000	732
8500.0	236.250000	
8500.0	247.500000	891
8500.0	258.750000	
8500.0	270.000000	986
8500.0	281.250000	
8500.0	292.500000	1020
8500.0	303.750000	
8500.0	315.000000	678
8500.0	326.250000	
8500.0	337.500000	421
8500.0	348.750000	
9000.0	.000000	488
9000.0	11.250000	
9000.0	22.500000	653
9000.0	33.750000	
9000.0	45.000000	628
9000.0	56.250000	
9000.0	67.500000	653
9000.0	78.750000	
9000.0	90.000000	644
9000.0	101.250000	
9000.0	112.500000	517
9000.0	123.750000	
9000.0	135.000000	433
9000.0	146.250000	
9000.0	157.500000	414
9000.0	168.750000	
9000.0	180.000000	458
9000.0	191.250000	
9000.0	202.500000	535
9000.0	213.750000	
9000.0	225.000000	760
9000.0	236.250000	
9000.0	247.500000	987
9000.0	258.750000	
9000.0	270.000000	973
9000.0	281.250000	
9000.0	292.500000	1128
9000.0	303.750000	
9000.0	315.000000	616

```
9000.0  326.250000
9000.0  337.500000     451
9000.0  348.750000
9500.0  .000000        512
9500.0  11.250000
9500.0  22.500000      681
9500.0  33.750000
9500.0  45.000000      663
9500.0  56.250000
9500.0  67.500000      653
9500.0  78.750000
9500.0  90.000000      685
9500.0  101.250000
9500.0  112.500000     567
9500.0  123.750000
9500.0  135.000000     432
9500.0  146.250000
9500.0  157.500000     415
9500.0  168.750000
9500.0  180.000000     480
9500.0  191.250000
9500.0  202.500000     511
9500.0  213.750000
9500.0  225.000000     656
9500.0  236.250000
9500.0  247.500000    1016
9500.0  258.750000
9500.0  270.000000    1010
9500.0  281.250000
9500.0  292.500000    1184
9500.0  303.750000
9500.0  315.000000     673
9500.0  326.250000
9500.0  337.500000     465
9500.0  348.750000
10000.0 .000000        646
10000.0 11.250000
10000.0 22.500000      752
10000.0 33.750000
10000.0 45.000000      717
10000.0 56.250000
10000.0 67.500000      666
10000.0 78.750000
10000.0 90.000000      709
10000.0 101.250000
10000.0 112.500000     582
```

```
10000.0 123.750000
10000.0 135.000000     441
10000.0 146.250000
10000.0 157.500000     416
10000.0 168.750000
10000.0 180.000000     473
10000.0 191.250000
10000.0 202.500000     491
10000.0 213.750000
10000.0 225.000000     647
10000.0 236.250000
10000.0 247.500000    1034
10000.0 258.750000
10000.0 270.000000     915
10000.0 281.250000
10000.0 292.500000    1027
10000.0 303.750000
10000.0 315.000000     662
10000.0 326.250000
10000.0 337.500000     463
10000.0 348.750000
```

Παράρτημα Ζ΄

Το αρχείο μετεωρολογικών δεδομένων του GENII

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθεται το αρχείο μετεωρολογικών δεδομένων, που χρησιμοποιήθηκε με τον κώδικα GENII.

```
  N A 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
NNE A 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 NE A 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
ENE A 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  E A 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
ESE A 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 SE A 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
SSE A 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  S A 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
SSW A 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 SW A 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
WSW A 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  W A 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
WNW A 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 NW A 0.000000.121000.000000.000000.000000.00000
NNW A 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  N B 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
NNE B 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 NE B 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
ENE B 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  E B 0.000000.034000.000000.000000.000000.00000
ESE B 0.047000.000000.000000.000000.000000.00000
 SE B 0.000000.018000.000000.000000.000000.00000
SSE B 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  S B 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
SSW B 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 SW B 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
```

```
WSW B 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  W B 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
WNW B 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 NW B 0.000000.030000.000000.000000.000000.00000
NNW B 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  N C 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
NNE C 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 NE C 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
ENE C 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  E C 0.000000.009000.000000.000000.000000.00000
ESE C 0.023000.000000.000000.000000.000000.00000
 SE C 0.000000.008000.000000.000000.000000.00000
SSE C 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  S C 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
SSW C 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 SW C 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
WSW C 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  W C 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
WNW C 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 NW C 0.000000.034000.000000.000000.000000.00000
NNW C 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  N D 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
NNE D 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 NE D 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
ENE D 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  E D 0.000000.045000.000000.000000.000000.00000
ESE D 0.058000.000000.000000.000000.000000.00000
 SE D 0.000000.012000.000000.000000.000000.00000
SSE D 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  S D 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
SSW D 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 SW D 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
WSW D 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  W D 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
WNW D 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 NW D 0.000000.079000.000000.000000.000000.00000
NNW D 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  N E 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
NNE E 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 NE E 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
ENE E 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  E E 0.000000.014000.000000.000000.000000.00000
ESE E 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 SE E 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
SSE E 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  S E 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
```

```
SSW E 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 SW E 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
WSW E 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  W E 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
WNW E 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 NW E 0.000000.033000.000000.000000.000000.00000
NNW E 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  N F 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
NNE F 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 NE F 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
ENE F 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  E F 0.000000.067000.000000.000000.000000.00000
ESE F 0.124000.000000.000000.000000.000000.00000
 SE F 0.000000.045000.000000.000000.000000.00000
SSE F 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  S F 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
SSW F 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 SW F 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
WSW F 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
  W F 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
WNW F 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
 NW F 0.000000.200000.000000.000000.000000.00000
NNW F 0.000000.000000.000000.000000.000000.00000
```

Παράρτημα Η΄

Αρχεία εισαγωγής δεδομένων του προγράμματος metprep

Η΄.1 Το αρχείο datmet.txt

Στο συγκεκριμένο αρχείο περιέχονται τα μετεωρολογικά δεδομένα, τα οποία παράγει ένας μετεωρολογικός σταθμός και επεξεργάζονται από το πρόγραμμα metprep. Επισημαίνεται ότι οι εγγραφές στο μετεωρολογικό αρχείο πρέπει να ξεκινούν νυχτερινό διάστημα, ώστε να είναι δυνατή η λύση της διαφορικής εξίσωσης 4.4, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.2.8. Στον πίνακα Η΄.1 παρουσιάζεται η μορφή μιας τυπικής γραμμής του αρχείου. Ακολουθούν οι αντίστοιχες εντολές read και format, οι οποίες πραγματοποιούν την ανάγνωση του.

Σημειώνεται ότι για να εκτελείται το πρόγραμμα επιτυχώς πρέπει οι εγγραφές στο μετεωρολογικό αρχείο datmet.txt να ξεκινούν νυχτερινό διάστημα και μάλιστα όχι νωρίς το πρωί, ώστε να γίνεται επιτυχημένα η εκλογή του ρυθμού μεταβολής της δυνητικής θερμοκρασίας (*potential temperature gradient*) γ. Για περισσότερα μπορεί να δει κανείς την παράγραφο 4.2.4.1.

```
      read (1, 3000, end=4000) iday, imonth, ihour, windvel, winddir,
    1 stddir, temp
3000  format (i2, i2, 6x, i2, 4x, f4.1, 2x, f5.1, 2x, f4.1, 2x, f6.3)
```

Η΄.2 Το αρχείο datconstr.txt

Αυτό το αρχείο περιέχει τα κατασκευαστικά και τα δεδομένα εκπομπής, που χρειάζονται για την εκτέλεση του metprep. Η μορφή του αρχείου περιγράφεται στον πίνακα Η΄.2. Παραθέτονται επίσης οι αντίστοιχες εντολές read και format, οι οποίες πραγματοποιούν την ανάγνωση του αρχείου.

```
      read (120, 5400) Z0, inum
    read (120, 5500) zz, z
    read (120, 5500) Hs, Ds
    read (120, 5500) Vs, Ts
5400 format (x, f7.3, x, i2)
5500 format (x, f7.3, x, f7.3)
```

Πίνακες Κεφαλαίου

Θέση	*Μήκος πεδίου*	*Τύπος*	*Περιγραφή*
0	2	Ακέραιος	Ημέρα
2	2	Ακέραιος	Μήνας
4	6	Κενό διάστημα	–
10	2	Ακέραιος	Ώρα
12	4	Κενό διάστημα	–
16	4	Πραγματικός	Ταχύτητα ανέμου
20	2	Κενό διάστημα	–
22	5	Πραγματικός	Διεύθυνση ανέμου
27	2	Κενό διάστημα	–
29	4	Πραγματικός	Τυπ. απόκλιση της διεύθυνσης του ανέμου
31	2	Κενό διάστημα	–
33	6	Πραγματικός	Θερμοκρασία

Πίνακας Η΄.1: Μορφή μιας τυπικής γραμμής του αρχείου μετεωρολογικών δεδομένων datmet.txt

Γραμμή	*Θέση*	*Μήκος πεδίου*	*Τύπος*	*Περιγραφή*
1	0	1	Κενό διάστημα	–
1	1	7	Πραγματικός	Υψόμετρο εδάφους πηγής
1	8	1	Κενό διάστημα	–
1	9	2	Ακέραιος	Αριθμός πηγής
2	0	1	Κενό διάστημα	–
2	1	7	Πραγματικός	Τραχύτητα επιφάνειας
2	8	1	Κενό διάστημα	–
2	9	7	Ακέραιος	Ύψος ανεμομέτρου
3	0	1	Κενό διάστημα	–
3	1	7	Πραγματικός	Ύψος καμινάδας
3	8	1	Κενό διάστημα	–
3	9	7	Ακέραιος	Διάμετρος καμινάδας
4	0	1	Κενό διάστημα	–
4	1	7	Πραγματικός	Ταχύτητα εξόδου καυσαερίων
4	8	1	Κενό διάστημα	–
4	9	7	Ακέραιος	Θερμοκρ. εξόδου καυσαερίων

Πίνακας Η΄.2: Μορφή του αρχείου κατασκευαστικών δεδομένων datconstr.txt

Βιβλιογραφία

[1] D. Ahrens. *Meteorology today: An introduction to weather, climate, and the environment*. Brooks/Cole, Pacific Groove CA, 2000.

[2] J. Aigueperse, C. Bouvier, V. Chambrette, V. Chazel, C. Cossonnet, M. Donnadieu-Claraz, D. Franck, P. Gourmelon, P. Houpert, J. Jourdain, S. Lorthioir, F. Paquet, A. Rannou, M. Telle Lamberton και M. Tirmarche. *Etat des connaissances sur les risques potentiels associes a l' uranium appauvri utilise dans les armes*. Institut de Protection et de Surete Nuclaire, Fontenay-aux-Roses Cedex, 2001.

[3] M. Alvarez και L. Garzon. Assessment of radiological emissions from spanish coal power plants: Radioactive releases and associated risks. *Health Physics*, 57(5):765–769, 1989.

[4] American Society for Testing and Materials. Standard test method for trace uranium in water by pulsed laser phosphorimetry. ASTM D 5174-02, χ.χ.

[5] M. Anagnostakis, E. Hinis, S. Simopoulos και M. Angelopoulos. Natural radioactivity mapping of greek surface soils. *Environment International*, 22(Suppl. 1):S3–S8, 1996.

[6] M. Anagnostakis, N. Petropoulos, E. Hinis και S. Simopoulos. Radiological impact of the long-lived chernobyl fallout isotopes in Greece. *Vinca Bulletin*, 2(Supplemment 1):1–7, 1997.

[7] M. L' Annunziata. *Handbook of radioactivity analysis*. Academic Press, San Diego, 1998.

[8] S. Arya. *Air pollution meteorology and dispersion*. Oxford University Press, Oxford, 1999.

[9] T. Asano, K. Shinohara και O. Narita. Orion-II: A computer code to estimate environmental concentration and dose due to airborne release of radioactive material. PNCT N8410 87-17-Tr, 1987.

[10] G. Aycik και A. Ercan. Radioactivity measurments of coals and ashes from coal-fired power plants in the southeastern part of Turkey. *Journal of Environmental Radioactivity*, 35(1):23–35, 1997.

[11] C. Baes, R. Sharp, A. Sjoreen και R. Shor. *A review and analysis of parameters for assesing transport of environmental released radionuclides through agriculture*. Oak Ridge National Laboratory, ORNL 5786, 1984.

[12] A. Baklanov και A. Aloyan. Modelling of atmospheric radioactive aerosol and deposition. Στο *Air pollution modeling and its application XV, 25th NATO/CCMS international technical meeting on air pollution modeling and its application*, επιμελητές: C. Borrego και G. Schayes, σελίδες 45–56. Springer, 2002.

[13] T. Barton και P. Ziemer. The effects of particle size and moisture content on the emanation of Rn from coal ash. *Health Physics*, 50(5):581–588, 1986.

[14] E. Batchvarova και S. Gryning. Applied model for the growth of the daytime mixed layer. *Boundary Layer Meteorology*, 56(3):261–274, 1991.

[15] O. Baykara, M. Dogru, M. Inceoz και E. Aksoy. Measurements of radon emanation from soil samples in triple-junction of North and East Anatolian active faults systems in Turkey. *Radiation Measurements*, 39(2):209–212, 2005.

[16] H. Bem, M. Olszewski, M. Bysiek και T. Gluba. Evaluation of the coal combustion input to the ^{226}Ra ground level air concentration in the Lodz city, Poland. *Nukleonika*, 49(4):167–171, 2004.

[17] H. Bem, P. Wieczorkowski και M. Budzanowski. Evaluation of technologically enhanced natural radiation near the coal-fired power plants in the Lodge region of Poland. *Journal of Environmental Radioacivity*, 61(2):191–201, 2002.

[18] R. Boubel, D. Fox, D. Turner και A. Stern. *Fundamentals of air pollution*. Academic Press, San Diego, 1994.

[19] R. Brina και A. Miller. Determination of uranium and lanthanides in real-world samples by kinetic phosphorescence analysis. *Spectroscopy*, 8(3):25–28, 1993.

[20] R. Brina και A. Miller. Direct detection of trace levels of uranium by laser-induced kinetic phosphorimetry. *Analytical chemistry*, 64(13):1413–1418, 1993.

[21] F. Burden. *Environmental monitoring handbook*. McGraw-Hill, New York, 2002.

[22] W. Burnett. Advanced alpha spectrometry. A short course emphasizing advanced techniques in alpha spectrometry. Canberra Industries, Inc, 1992.

[23] Cambridge Environmental Research Consultants Ltd. ADMS 3 users guide, 2004.

[24] J. Campbell, J. Laul, K. Nielson και R. Smith. Separation and chemical characterization of finely-sized fly-ash particles. *Analytical Chemistry*, 50(8):1032–1040, 1978.

[25] F. Chabaux, J. Riotte, A. Schmitt, J. Carignan, P. Herckes, M. Pierret και H. Wortham. Variations of U and Sr isotope ratios in Alsace and Luxembourg rain waters: origin and hydrogeochemical implications. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(16):1447–1456, 2005.

[26] P. Chang, T. Chu και Y. Lin. Environmental radiation from a coal-fired power plant using domestically produced coals. *Journal of Radiation Research*, 23(3):283–289, 1982.

[27] R. Chauhan και S. Chakarvarti. Radon activity and exhalation rates in coal fired thermal power plants. *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, 40(4):242–245, 2002.

[28] Chemchek Instruments, inc. *Kinetic Phosphorescence Analyzer KPA-11, Operation and service manual*, χ.χ.

[29] J. Chen1, J. Ly, L. Bergman1, J. Wierdsma1 και R. A. Klassen. Variation of soil radon concentrations in southern ontario. *Radiation Protection Dosimetry*, 131(3):385–389, 2008.

[30] R. Cheng, V. Mohnen, T. Shen, M. Current και J. Hudson. Characterization of particulates from power plants. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 26(8):787–790, 1976.

[31] J. Chen, R. Falcomer, J. Ly, J. Wierdsma και L. Bergman. Long term monitoring of soil gas radon and permeability at two reference sites. *Radiation Protection Dosimetry*, 131(4):503–508, 2008.

[32] L. Clark και L. Sloss. *Trace elements - emissions from coal combustion and gasification*. IEA Coal Research, London, 1992.

[33] A. Clouvas, S. Xanthos και M. Antonopoulos-Domis. Extended survey of indoor and outdooor terrestrial gamma radiation in greek urban areas by in

situ gamma spectrometry with a portable Ge detector. *Radiation Protection Dosimetry*, 94(3):233–246, 2001.

[34] D. Coles, R. Ragaini και J. Ondov. Behavior of natural radionuclides in western coal-fired power plants. *Environmental Science and Technology*, 12(4):442–446, 1978.

[35] D. Coles, R. Ragaini, J. Ondov, G. Fisher, D. Silberman και B. Prentice. Chemical studies of stack fly ash from a coal-fired power plant. *Environmental Science and Technology*, 13(4):455–459, 1979.

[36] J. Corbett. The radiation dose from coal burning:A review of pathways and data. *Radiation Protection Dosimetry*, 4(1):5–19, 1983.

[37] P. Croato, I. Frank, K. Johnson, P. Mason και M. Smith. Evaluation of kinetic phosphorescence analysis for the determination of uranium, research and development report. New Brunswick Laboratory, US DOE, 1997.

[38] L. Currie. Limits for qualitative detection and quantitative determination. *Analytical Chemistry*, 40(3):586–593, 1968.

[39] E. Davakis, M. Varvayanni και N. Catsaros. Diagnosis of wind flow and dispersion over complex terrain based on limited meteorological data. *Environmental Pollution*, 103(2-3):333–343, 1998.

[40] M. Davis και D. Cornwell. *Introduction to environmental engineering*. McGrow-Hill, Boston, 1998.

[41] R. Davison, D. Natusch, J. Wallace και Ch. Evans Jr. Trace elements in fly ash. Dependence of concentration on particle size. *Environmental Science and Technology*, 8(13):1107–1113, 1974.

[42] N. de Nevers. *Air pollution control engineering*. McGraw-Hill, Boston, 2000.

[43] K. Debertin και R. Helmer. *Gamma- and x-ray spectrometry with semiconductor detectors*. Elsevier, Amsterdam, 1988.

[44] D. Delanghe, Bard E. και B. Hamelin. New TIMS constraints on the uranium-238 and uranium-234 in seawaters from the main ocean basins and the mediterranean sea. *Marine Chemistry*, 80(1):79–93, 2002.

[45] D. Desideri, M. Meli, C. Roselli, A. Rongoni και D. Saeta. ^{238}U, ^{234}U, ^{226}Ra, ^{210}Po concentrations of bottled mineral waters in italy and their dose contribution. *Journal of Environmental Radioactivity*, 94(2):86–97, 2007.

[46] D.Kalkwarf, P. Jackson και J. Kutt. Emanation coefficients for Rn in sized coal fly ash. *Health Physics*, 48(4):429–436, 1985.

[47] S. Durrani και R. Ilic. *Radon Measurements by Etched Track Detectors: Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment*. World Scientific Publishing Company, London, 1997.

[48] K. Eckerman, R. Leggett, C. Nelson, J. Puskin και A. Richardson. *Federal Guidance Report No.13: Health risks from low-level environmental exposure to radionuclides*. US EPA, Washington, 1998.

[49] K. Eckerman και J. Ryman. *Federal Guidance Report No.12: External exposure to radionuclides in air, water and soil*. US EPA, Washington, 1993.

[50] K. Eckerman, A. Wolbarst και A. Richardson. *Federal Guidance Report No.11: Limiting values of radionuclide intake and air concentration and dose conversion factors for inhalation, submersion, and ingestion*. US EPA, Washington, 1988.

[51] M. Eisenbud και T. Gesell. *Environmental Radioactivity: From natural, industrial and military sources*. Academic Press, New York, τέταρτη έκδοση, 1997.

[52] J. Erbrink. A practical model for the calculation of σ_y and σ_z for use in online Gaussian dispersion model for tall stacks, based on wind fluctuations. *Atmospheric envirionment*, 25A(2):277–283, 1991.

[53] J. Erbrink. Use of boundary-layer meteorological parameters in the gaussian model "STACKS". *Boundary-Layer Meteorology*, 74(3):211–235, 1995.

[54] M. Faheem και Matiullah. Radon exhalation and its dependence on moisture content from samples of soil and building materials. *Radiation Measurements*, 43(8):1458–1462, 2008.

[55] Q. Fatogoma και R. Jacko. A model to estimate mixing height and its effects on ozone modeling. *Atmospheric Environment*, 36(22):3699–3708, 2002.

[56] Federal - Provincial - Territorial Committee on Drinking Water Quality. National primary drinking water regulation; radionuclides; final rule. Federal Register, 65(236), 2000.

[57] B. Finlayson-Pitts και J. Pitts Jr. *Chemistry of the upper and lower atmosphere:theory, experiments and applications*. Academic Press, San Diego, 2000.

[58] G. Fisher, B. Prentice, D. Silberman, J. Ondov, A. Biermann, R. Ragaini και A. McFarland. Physical and morphological studies of size-classified coal fly ash. *Environmental Science and Technology*, 12(4):447–451, 1978.

[59] C. Fu, T. Yang, J. Dub, V. Waliac, Y. Chen, T. Liu και C. Chen. Variations of helium and radon concnetrations in soil gases from an active fault zone in southern Taiwan. *Radiation Measurements*, 43:S348–S352, 2008.

[60] J. Garratt. *The atmospheric boundary layer*. Cambridge University Press, Cambridge, 1992.

[61] S. Ghosal, J. Ebert και S. Self. Chemical composition and size distribution for fly ashes. *Fuel Processing Technology*, 44(1):81–94, 1994.

[62] S. Ghosal και S. Self. Particle size-density relation and cenosphere content of coal fly ash. *Fuel*, 74(4):522–529, 1995.

[63] G. Gilmore και J. Hemingway. *Practical gamma-ray spectrometry*. John Wiley & Sons, Boston, 1995.

[64] E. Gladney, J. Small, G. Gordon και W. Zoller. Composition and size distriburion of in-stack particulate material at a coal-fired power plant. *Atmospheric Environment*, 10(12):1071–1077, 1976.

[65] Genitron Instruments GmbH. *Portable Radon Monitor AlphaGuard User Manual*. Frankfurt, 1998.

[66] J. Godoy και M. Godoy. Natural radioactivity in brazilian groundwater. *Journal of Environmental Radioactivity*, 85(1):71–83, 2004.

[67] V. Golias, D. Pittauerova, R. Prochazka και Z. Triskala. Field alpha-spectroscopy of radon (^{222}Rn) and actinon (^{219}Rn) progeny in soil gas: Locating a radon source. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 266(3):461–470, 2005.

[68] Google Earth. http://earth.google.com, 2009.

[69] Google Maps. http://maps.google.com, 2010.

[70] L. Hallstadius. A method for the electrodeposition of actinides. *Nuclear Instruments ans Methods*, 223(2-3):266–267, 1984.

[71] St. Hanna, G. Briggs και R. Hosker Jr. *Εγχειρίδιο ατμοσφαιρικής διάχυσης*. Μετάφραση: Γ. Μπεργελές. Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1992.

[72] L. Hansen και G. Fisher. Elemental distribution in coal fly ash particles. *Environmental Science and Technology*, 14(9):1111–1117, 1980.

[73] R. Hedvall και B. Erlandsson. ^{210}Pb in bioenergy production. *Radiation Protection dosimetry*, 24(1/4):411–414, 1988.

[74] R. Heinsohn και R. Kabel. *Sources and control of air pollution*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1999.

[75] W. Henry και K. Knapp. Compound forms of fossil fuel fly ash emissions. *Environmental Science & Technology*, 14(4):450–456, 1980.

[76] J. Hock και D. Lichtman. A comprative study of in-plume and in-stack collected individual coal fly ash particles. *Atmospheric Environment*, 17(4):849–852, 1983.

[77] H. Hoetzl και R. Winkler. Activity concentrations of ^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{210}Pb, ^{40}K and ^{7}Be and their temporal variations in surface air. *Journal of Environmental Radioactivity*, 5(6):445–458, 1987.

[78] T. Holsen και K. Noll. Dry deposition of atmospheric particles: Application of current models to ambient data. *Environmental Science and Technology*, 26(9):1807–1815, 1992.

[79] A. Holtslag και A. Van Ulden. A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data. *Journal of climate and applied meteorology*, 22(4):517–529, 1983.

[80] M. Hooijberg. *Practical Geodesy using computers*. Springer, Berlin, 1997.

[81] R. Hosker Jr. Estimates of dry deposition and plume depletion over forests and grassland. Στο *Physical behaviour of radioactive contaminants in the atmosphere, Symposium Proceedings*, σελίδες 291–308. IAEA, 1973.

[82] R. Hosker Jr. και S. Lindberg. Review: Atmospheric deposition and plant assimilation of gases and particles. *Atmospheric Environment*, 16(5):889–910, 1982.

[83] S. Hsu και Y. Zhongde. Comments on “A simple model to determine in-situ mixing height growth from surface measurments”. *Environmental Fluid Mechanics*, 4(3):333–335, 2004.

[84] International Energy Agency. http://www.iea.org, 2009.

[85] G. Ielsch, D. Thieblemont, V. Labed, P. Richon, G. Tymen, C. Ferry, M. Robe, J. Baubron και F. Bechennec. Radon (^{222}Rn) level variations on a regional scale: influence of the basement trace element (U, Th) geochemistry on radon exhalation rates. *Journal of Environmental Radioactivity*, 53(1):75–90, 2001.

[86] International Atomic Energy Agency. *International Basic Safety Standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources*. IAEA, Vienna, 1996.

[87] International Atomic Energy Agency. *Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment*. IAEA, Vienna, 2001.

[88] International Commission on Radiological Protection. Icrp publication 30. *Annals of the ICRP*, 6(2-3):120–124, 1981.

[89] International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Recomendations of the International Commission on Radiological Protection. *Annals of the ICRP*, 21:1–201, 1991.

[90] International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 71. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4 Inhalation dose coefficients. *Annals of the ICRP*, 25(3-4):i–xiv, 1995.

[91] J. Irwin. A theoretical variation of the wind profile power-law exponent as a function of surface roughness and stability. *Atmospheric Environment*, 13(1):191–194, 1979.

[92] J. Irwin και J. Paumier. Characterizing the dispersive state of convective boundary layers for applied dispersion modelling. *Boundary-Layer meteorology*, 53(3):267–296, 1990.

[93] G. Jia και G. Torri. Estimation of radiation doses to members of the public in italy from intakes of some important naturally occurring radionuclides (^{238}U, ^{234}U, ^{235}U, ^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{224}Ra and ^{210}Po) in drinking water. *Applied Radiation and Isotopes*, 65(7):849–857, 2207.

[94] F. Jiang, S. Lee, S. Bakhtiar και P. Kuroda. Determination of thorium, uranium and plutonium isotops in atmospheric samples. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 100(1):65–72, 1986.

[95] J. Kaakinen, R. Jorden, M. Lawasani και R. West. Trace element behavior in coal-fired power plant. *Environmental Science and Technology*, 9(9):862–869, 1975.

[96] J. Kaimal και J. Finnigan. *Atmospheric boundary layer flows: Their structure and measurment*. Oxford University Press, New York, 1994.

[97] D. Karangelos, N. Petropoulos, M. Anagnostakis, E. Hinis και S. Simopoulos. Radiological characteristics and investigation of the radioactive equilibrium in the ashes produced in lignite-fired power plants. *Journal of Environmental Radioactivity*, 77(3):233–246, 2004.

[98] D. Karangelos, P. Rouni, N. Petropoulos, M. Anagnostakis, E. Hinis και S. Simopoulos. Radioenvironmental survey of the Megalopolis fly ash deposits. Στο *Seventh International Symposium on The Natural Radiation Environment VII, Rhodes, Greece, 20-24 May 2002*, σελίδες 1025–1029, Amsterdam, 2005. Elsevier.

[99] A. Khater. Radiological aspects of some egyptian thermo-mineral springs. *Journal of Environmental Monitoring*, 5(3):414–418, 2003.

[100] E. Kim, D. Kalman και T. Larson. Dry deposition of large airborne particles onto a surrogate surface. *Atmospheric Environment*, 34(15):2387–2397, 2000.

[101] M. Kitto και M. Kim. Naturaly occuring radionuclides in community water supplies of New York State. *Health Physics*, 88(3):253–260, 2005.

[102] D. Klein, A. Andren, J. Carter, J. Emery, C. Feldman, W. Fulkerson, W. Lyon, J. Ogle, Y. Talmi, R. Van Hook και N. Bolton. Pathways of thirty-seven trace elements through coal-fired power plant. *Environmental Science and Technology*, 9(10):973–979, 1975.

[103] G. Knoll. *Radiation detection and measurement*. John Wiley and Sons, New York, 1989.

[104] N. Kolovos, A. Georgakopoulos, A. Filippidis και C. Kavouridis. Utilization of lignite reserves and simultaneous improvement of dust emissions and operation efficiency of a power plant by controling the calcium (total and free) content of the fed lignite. Application on the Agios Dimitrios power plant, Ptolemais, Greece. *Energy & Fuels*, 16(6):1516–1522, 2002.

[105] N. Koukouzas, E. Kakaras και P. Grammelis. The lignite electricity-generating sector in Greece: Current status and future prospects. *International Journal of Energy Research*, 28(9):785–798, 2004.

[106] T. Kovacs, E. Bodrogi, P. Dombovary, J. Somlai, C. Nemeth, A. Capote και S. Tarjan. ^{238}U, ^{226}Ra, ^{210}Po concentrations of bottled mineral waters in hungary and their committed effective dose. *Radiation Protection Dosimetry*, 108(2):175 – 181, 2004.

[107] U. Kulshrestha, M. Kulshrestha, R. Sekar, G. Sastry και M. Vairamani. Chemical characteristics of rainwater at an urban site of south-central India. *Atmospheric Environment*, 37(21):3019–3026, 2003.

[108] P. Kuroda, I. Essien και D. Sandoval. Fallout of uranium isotopes from the 1980 eruption of Mount st. Helens. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 84(1):23–32, 1984.

[109] S. Labidi, M. Dachraoui, H. Mahjoubi, R. Lemaitre, N. Ben Salah και S. Mtimet. Natural radioactive nuclides in some tunisian thermo-mineral springs. *Journal of Environmental Radioactivity*, 62(1):87–96, 2202.

[110] B. Lalit, T. Ramachandran και U. Mishra. Radiation exposures due to coal-fired power stations in India. *Radiation Protection Dosimetry*, 15(3):197–202, 1986.

[111] I. Levin, M. Born, M. Cuntz, U. Langendoerfer, S. Mantsch, T. Naegler, M. Schmidt, A. Varlagin, S. Verclas και D. Wagenbach. Observations of atmospheric variability and soil exhalation rate of radon-222 at a Russian forest site. *Tellus*, 54B:462–475, 2002.

[112] D. Lide. *Handbook of chemistry and physics*. CRC Press, London, 1994.

[113] T. Lind, J. Hokkinen, J. Jokiniemi, S. Saarikoski και R. Hillamo. Electrostatic precipitator collection efficiency and trace element emissions from co-combustion of biomass and recovered fuel in fluidized-bed combustion. *Environmental Science and Technology*, 37(12):2842–2846, 2003.

[114] J. Lin, G. Fang, T. Holsen και K. Noll. A comparison of dry deposition modeled from size distribution data and measured with a smooth surface for total particle mass, lead and calcium in chicago. *Atmospheric Environment*, 27A(7):1131–1138, 1993.

[115] J. List. *Smithsonian Meteorological Tables*. Smithsonian Institution Press, Washington, 1968.

[116] D. Liu και B. Liptak. *Environmental Engineers' Handbook*. Lewis Publishers, New York, 1997.

[117] Y. Mamane, J. Miller και T. Dzubay. Characterization of individual fly ash paricles from coal- and oil-fired power plants. *Atmospheric Environment*, 20(11):2125–2135, 1986.

[118] A. Mandal και D. Sengupta. Radiolemental study of Kolaghat thermal power plant, West Bengal, India: Possible environmental hazards. *Environmental Geology*, 44(2):180–186, 2003.

[119] M. Manolopoulou και C. Papastefanou. Behavior of natural radionuclides in lignites and fly ashes. *Journal of Environmental Radioactivity*, 16(3):261–271, 1992.

[120] E. Maraziotis. Effects of intraparticle porosity on the radon emanation. *Environmental Science and Technology*, 30(8):24412448, 1996.

[121] A. Martinez-Aguirre, M. Moron και M. Garcia-Leon. Measurements of U- and Ra-isotopes in rainwater samples. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 152(1):37–46, 1991.

[122] S. De Martino, C. Sabbarese και G. Monetti. Radon emanation and exhalation rates from soils measured with an electrostatic collector. *Applied Radiation and Isotopes*, 49(4):407–413, 1998.

[123] P. Martin. Uranium and thorium series radionuclides in rainwater over several tropical storms. *Journal of Environmental Radioactivity*, 65(1):1–18, 2003.

[124] T. McMahon και P. Denison. Empirical atmospheric deposition parameters-a survey. *Atmospheric Environment*, 13(5):571–585, 1979.

[125] U. Mishra. Environmental impact of coal industry and thermal power plants in India. *Journal of Environmental Radioactivity*, 72(1-2):35–40, 2004.

[126] B. Napier. Computer modeling codes for radiological and chemical airborne releases. *Health Physics*, 81 Supplement:S15–S17, 2001.

[127] B. Napier. *GENII version 2 NESHAPS users' guide*. US EPA, Oak Ridge, 2005.

[128] B. Napier, D. Strenge, J. Ramsdell Jr., P. Eslinger και C. Fosmire. *GENII version 2, software design document*. US EPA, Oak Ridge, 2004.

[129] NASA World Wind. http://worldwind.arc.nasa.gov, 2009.

[130] P. Nastos, D. Alexakis, H. Kanellopoulou και A. Kelepertsis. Chemical composition of wet deposition in a Mediterranean site Athens, Greece related to the origin of air masses. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 58(2):167–179, 2007.

[131] S. Nath και R. Patil. A simple model to determine in-situ mixing height growth from surface measurments. *Environmental Fluid Mechanics*, 3(3):195–219, 2003.

[132] National Health and Medical Research Council. Australian drinking water guidelines 6, 2004.

[133] W. Nazaroff και A. Nero. *Radon and its decay products in indoor air*. John Wiley & sons, New York, 1988.

[134] M. Neznal, M. Matolin, G. Just και K. Turek. Short-term temporal variations of soil gas radon concentration and comparison of measurement techniques. *Radiation Protection Dosimetry*, 108(1):55–63, 2004.

[135] E. Nho-Kim, M. Michou και V. Peuch. Parameterization of size-depended particle dry deposition velocities for global modeling. *Atmospheric Environment*, 38(13):1933–1942, 2004.

[136] K. Noll και K. Fang. Development of a dry deposition model for atmospheric coarse particles. *Atmospheric Environment*, 23(3):585–594, 1989.

[137] J. Ondov, R. Ragaini και A. Biermann. Emissions and particle-size distributions of minor and trace elements at two western coal-fired power plants. *Environmental Science & Technology*, 13(8):946–953, 1979.

[138] M. Palmer και J. Edmond. Uranium in river water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(20):4947–4955, 1993.

[139] H. Panofsky και J. Dutton. *Atmospheric turbulance: Models and methods for engineering applications*. John Wiley & sons, New York, 1984.

[140] H. Papaefthymiou, P. Kritidis, J. Anousis και J. Sarafidou. Comparative assessment of natural radioactivity in fallout samples from Patras and Megalopolis, Greece. *Journal of Environmental Radioactivity*, 78(3):249–265, 2005.

[141] C. Papanicolaou, M. Galetakis και A. Foscolos. Quality characteristics of greek brown coals and their relation to the applied exploitation and utilization methods. *Energy & Fuels*, 19(1):230–239, 2005.

[142] C. Papastefanou και S. Charalabous. On the escaping radioactivity from coal power plants (CPP). *Health Physics*, 46(2):293–302, 1984.

[143] C. Papastefanou και S. Charalambous. Hazards from radioactivity of fly ash of greek coal power plants (CPP). Στο *Proceedings of the 5th international congress of the International Radiation Protection Association, vol. III*, σελίδες 161–165. IRPA, 1980.

[144] F. Parungo, E. Ackerman, H. Proulx και R. Pueschel. Nucleation properties of fly ash in a coal-fired power-plant plume. *Atmospheric Environment*, 12(4):929–935, 1978.

[145] A. Pelicho, L. Martins, S. Nomi και M. Solci. Integrated and sequential bulk and wet-only samplings of atmospheric precipitation in Londrina, South Brazil (1998-2002). *Atmospheric Environment*, 10(35):6827–6835, 2006.

[146] T. Peppas, K. Karfopoulos, D. Karangelos, P. Rouni, M. Anagnostakis και S. Simopoulos. Radiological and instrumental neutron activation analysis determined characteristics of size-fractionated fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, In press, 2010.

[147] N. Petropoulos, M. Anagnostakis και S. Simopoulos. Building materials radon exhalation rate: ERRICCA intercomparison exercise results. *The Science of the Total Environment*, 272(1-3):109–118, 2001.

[148] N. Petropoulos, M. Anagnostakis και S. Simopoulos. Photon attenuation, natural radioactivity content and radon exhalation rate of building materials. *Journal of Environmental Radioactivity*, 61(3):257–269, 2002.

[149] P.Melidis, C. Akratos, V. Tsihrintzis και E. Trikilidou. Characterization of rain and roof drainage water quality in Xanthi, Greece. *Environmental Monitoring and Assessment*, 127(1-3):15–27, 2007.

[150] G. Prasad, Y. Prasad, G. Gusain και R. Ramola. Measurement of radon and thoron levels in soil,water and indoor atmosphere of Budhakedar in Garhwal Himalaya, India. *Radiation Measurements*, 43:S375–S379, 2008.

[151] W. Press, S. Teukolsky, W. Vetterling και B. Flannery. *Numerical recipes in Fortran 77 : the art of scientific computing*. Cambridge University Press, Cambridge, 1994.

[152] QUARG. Airborne particulate matter in the United Kingdom. Third report of the Quality of Urban Air Review Group. Department of the Environment, 1996.

[153] D. Quelo, B. Sportisse και O. Isnard. Data assimilation for short range of atmospheric dispersion of radionuclides: a case study of second-order sensitivity. *Journal of Environmental Radioactivity*, 84(3):393–408, 2005.

[154] P. Richon, P. Bernard, V. Labed, J. Sabroux, A. Beneito, D. Lucius, S. Abbad και M. Robe. Results of monitoring ^{222}Rn in soil gas of the Gulf of Corinth region, Greece. *Radiation Measurements*, 42(1):87–93, 2007.

[155] D. Roeck, T. Reavey και J. Hardin. Partitioning of natural radionuclides in the waste streams of coal-fired utilities. *Health Physics*, 52(3):311–323, 1987.

[156] N. Rose, S. Juggins και J. Watt. The characterization of carbonaceous fly-ash particles from major European fossil-fuel types and applications to environmental samples. *Atmospheric Environment*, 33(17):2699–2713, 1999.

[157] P. Rouni, N. Petropoulos, M. Anagnostakis, E. Hinis και S. Simopoulos. Radioenvironmental survey of the Megalopolis lignite field basin. *The Sience of the Total Environment*, 272(1-3):261–272, 2001.

[158] W. Ruijgrok, H. Tieben και P. Eisinga. The dry deposition of particles to a forest canopy: A comparison of model and experimetal results. *Atmospheric Environment*, 31(3):399–415, 1997.

[159] J. Saegusa, K. Yamasaki, T. Tsujimoto, T. Yamauchi και M. Shimo. Development of an apparatus for measuring ground exhalation rates of ^{222}Rn and ^{220}Rn. *Environment International*, 22:S483–S490, 1996.

[160] V. Sakorafa, K. Michailidis και F. Burragato. Mineralogy, geochemistry and physical properties of fly ash from the Megalopolis lignite fields, Peloponnese, Southern Greece. *Fuel*, 75(4):419–423, 1996.

[161] L. Salmon, A. Toureau και A. Lally. The radioactivity content of United Kingdom coal. *The Sience of the Total Environment*, 35(3):403–415, 1984.

[162] C. Samara, R. Tsitouridou και C. Balafoutis. Chemical composition of rain in Thessaloniki, Greece, in relation to meteorological conditions. *Atmospheric Environment*, 26B(3):359–367, 1992.

[163] C. Samuelsson. Closed-can exhalation method for measuring radon. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 95(2):167–169, 1990.

[164] J. Schnoor. *Περιβαλλοντικά μοντέλα: Τύχη και μεταφορά ρύπων στον αέρα, νερό και έδαφος*. Μετάφραση: Β. Γκέκας. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2003.

[165] M. Schure, P. Soltys, D. Natusch και T. Mauney. Surface area and porosity of coal fly ash. *Environmental Science and Technology*, 19(1):82–86, 1985.

[166] G. Sehmel. Particle and gas dry deposition:A review. *Atmospheric Environment*, 14(9):983–1011, 1980.

[167] P. Seibert, F. Beyrich, S. Gryning, S. Joffre, A. Rasmussen και P. Tercier. Mixing height determination for dispersion modeling. Στο *COST Action 710 "Harmonization of the pre-processing of meteorological data for atmospheric dispersion models"*. Final Report EUR 18195 EN, 1997.

[168] P. Seibert, F. Beyrich, S. Gryning, S. Joffre, A. Rasmussen και P. Tercier. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. *Atmospheric Environment*, 34(7):1001–1027, 2000.

[169] J. Seinfeld και S. Pandis. *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change*. John Wiley & Sons, New York, 1998.

[170] A. Shakhashiro, A. Fajgelj και U. Sansone. Comparison of different approaches to evaluate proficiency test data. Στο *Proccedings of the International Workshop Compbining and Reprting Analytical Results:The role of traceability and uncertainty for comparing analytical results held in Rome on 6-8 March 2006*, σελίδες 220–228. The Royal Society of Chemistry, 2007.

[171] K. Shinohara. Environmental monitoring and public dose assessment around the Tokai reprocessing plant. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 260(3):563–567, 2004.

[172] K. Shiraishi, S. Kimura, S. Sahoo και H. Arae. Dose effect for Japanese due to ^{238}Th and ^{238}U in imported drinking water. *Health Physics*, 86(4):365–373, 2004.

[173] S. Simopoulos και M. Angelopoulos. Natural radioactivity from lignite power plants in Greece. *Journal of Environmental Radioactivity*, 5(5):379–389, 1987.

[174] B. Skwarzec, D. Strumninska και A. Borylo. Radionuclides of ^{210}Po, ^{234}U and ^{238}U in drinking bottled mineral water in poland. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 256(2):361–364, 2003.

[175] W. Slinn. Some approximations for the wet and dry removal of particles and gases from the atmosphere. *Water, Air and Soil Pollution*, 7(4):513–543, 1977.

[176] K. Smith, G. Crockett, W. Oatway, M. Harvey, J. Penfold και S. Mobbs. *Radiological Impact on the UK population of industries which use or produce materials containing enhanced levels of naturally occuring radionuclides, Part I:Coal-fired electricity generation*. NRPB-R327, Chilton Didcot, 2001.

[177] R. Smith. The trace element chemistry of coal during combustion and the emission from coal-fired plants. *Progress in Energy and Combustion Science*, 6(1):53–119, 1980.

[178] R. Smith, J. Campbell και K. Nielson. Concentration dependence upon particle size of volatilized elements in fly ash. *Environmental Science and technology*, 13(5):553–558, 1979.

[179] D. Srinivas. Status of electrostatic precipitator technology usage in india. Information Monitor on Environmental Science, Tata Energy Research Institute, 1996.

[180] B. Steen. Dry deposition of 4-50 μm dolomite particles on vegetation, flat surfaces and deposition gauges. *Atmospheric Environment*, 20(8):1597–1604, 1986.

[181] E. Straden. Building materials as a source of indoor radon. Στο *Radon and its decay products in indoor air*, επιμελητές: W. Nazaroff και A. Nero. John Wiley and Sons, New York, 1988.

[182] R. Stull. *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1988.

[183] R. Stull. *Meteorology for scientists and engineers*. Brooks/Cole, Pacific Groove, CA, 2000.

[184] H. Sun και D. Furbish. Moisture content effect on radon emanation in porous media. *Journal of Contaminant Hydrology*, 18(3):239–255, 1995.

[185] A. Swan και M. Sandilands. *Introduction to geological data analysis*. Blackwell Science, Oxford, 1995.

[186] J. Tadmor. Atmospheric release of volatilized spieces of radioelements from coal-fired plants. *Health Physics*, 50(2):270–273, 1986.

[187] J. Tadmor. Radioactivity from coal power plants:A review. *Journal of Environmental Radioactivity*, 4(3):177–204, 1986.

[188] P. Thomas. Radionuclides in the terrestrial ecosystem near a canadian uranium mill – part III: atmospheric deposition rates (pilot test). *Health Physics*, 78(6):633–640, 2000.

[189] W. Torge. *Geodesy*. Walter de Gruyter, Berlin, 2001.

[190] B. Tracy και F. Prantl. Radiological impact of coal-fired power generation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2(2):145–160, 1985.

[191] M. Tso και J. Leung. Radiological impact of coal ash from the power plants in Hong Kong. *Journal of Environmental Radioactivity*, 30(1):1–14, 1996.

[192] B. Turner. *Workbook of atmospheric dispersion estimates: An introduction to dispersion modeling*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 1994.

[193] United Nations Scientiffic Committe on the Effects of Atomic Radiation. *Sources, effects and risks of ionizing radiation*. 1988 Report to the General Assemply with Annexes, New York, 1988.

[194] United Nations Scientiffic Committe on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and effects of ionizing radiation*. UNSCEAR 2000 Report to the General Assemply, with Scientiffic Annexes, New York, 2000.

[195] US DOE, Office of Environment, Safety and Health, Washington, DC. *GENII computer code application guidance for documented safety analysis. Final Report*, Ιούνιος 2004.

[196] US Environmental Protection Agency. User's guide to the Complex Terrain Dispersion Model plus algorithms for unstable situations (CDTMplus), 1989.

[197] US Environmental Protection Agency. Appendix X to part 266-Guideline on air quality models. US EPA, 1991.

[198] US Environmental Protection Agency. Meteorological monitoring guidance for regulatory modeling applications. US EPA, 2000.

[199] US Environmental Protection Agency. National primary drinking water regulation; radionuclides; final rule. Federal Register, 65(236), 2000.

[200] US Environmental Protection Agency. CAP88-PC version 3.0 user guide, 2002.

[201] US Environmental Protection Agency. User's guide for the AMS/EPA regulatory model - AERMOD, 2004.

[202] US Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste. *Users guide for the industrial source complex (ISC3) dispersion models for use in the multimedia, multipathway and multireceptor risk assessment (3MRA) for HWIR99. Volume II:Description of model algorithms*, 1999.

[203] US Environmental Protection Agency. http://www.epa.gov/rpdweb00-/assessment/genii.html, 2009.

[204] P. Vesterbacka, I. Makelainen και H. Arvela. Natural radioactivity in drinking water in private wells in finland. *Radiation Protection Dosimetry*, 113(2):223–232, 2005.

[205] L. Villalba, M. E. Montero-Cabrera, G. Manjon-Collado, L. Colmenero-Sujo, M. Renteria-Villalobos, A. Cano-Jimenez, A. Rodriguez-Pineda, I. Davila-Rangel, L. Quirino-Torres και E. F. Herrera-Peraza. Natural radioactivity in groundwater and estimates of committed effective dose due to water ingestion in the state of Chihuahua (Mexico). *Radiation Protection Dosimetry*, 121(2):148–157, 2006.

[206] E. Voldner, L. Barrie και A. Sirois. A literature review of dry deposition of oxides of sulphur and nitrogen with emphasis on long-range transport modelling in North America. *Atmospheric Environment*, 20(11):2101–2123, 1986.

[207] Y. Weng και T. Chu. Concentrations of radionuclides of sized fractionated fly-ash emissions from a thermal power plant using Taiwan coal. *Journal of Radiation Research*, 33(2):141–150, 1992.

[208] M. Wesely και B. Hicks. A review of the current status of knowledge on dry deposition. *Atmospheric Environment*, 34(12-14):2261–2282, 2000.

[209] World Health Organisation. *Guidelines for drinking water quality, Vol. I: Recomendations, Incorporating first Addendum.* World Health Organisation, 3η έκδοση, 2006.

[210] Weather Underground. http://www.wunderground.com, 2009.

[211] T. Yu. Determining the height of the nocturnal boundary layer. *Journal of applied Meteorology*, 17(1):28–33, 1978.

[212] P. Zannetti. *Air polllution modeling: Theories, computational methods and available software*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.

[213] Th. Zeevaert, L. Sweeck και H. Vanmarcke. The radiological impact from airborne routine discharges of a modern coal-fired power plant. *Journal of Environmental Radioactivity*, 85(1):1–22, 2006.

[214] L. Zhang, S. Gong, J. Padro και L. Barrie. A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module. *Atmospheric Environment*, 35(3):549–560, 2001.

[215] N. Zouridakis, K. Ochsenkuehn και A. Savidou. Determination of uranium and radon in potable water samples. *Journal of Environmental Radioactivity*, 61(2):225–232, 2002.

[216] Μ. Αναγνωστάκης. *γ-Φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων χαμηλών ραδιενεργειών στην περιοχή χαμηλών ενεργειών*. Διδακτορική Διατριβή , Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, 1998.

[217] Γ. Βέης, Χ. Μπιλλήρης και Κ. Παπαζήση. *Ανώτερη Γεωδαισία*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1991.

[218] Σ. Δανάλη-Κωτσάκη. *Έρευνα ραδιενεργού μόλυνσης περιβάλλοντος περιοχών ΑΗΣ και ραδιενέργειας λιγνιτών και τσιμέντων*. Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών 'Δημόκριτος', DEMO 83/21 G, 1983.

[219] Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας. http://www.desmie.gr, 2009.

[220] ΕΜΥ. *Κλιματικά στοιχεία των σταθμών της ΕΜΥ*. Επεξεργασία: Γ. Κορνάρος, Αθήνα, 1999.

[221] Α. Ευσταθόπουλος. *Στοιχειακές και ισοτοπικές αναλύσεις ουρανίου σε υγρά δείγματα*. Διδακτορική Διατριβή , Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Υπό εκπόνηση.

[222] Δ. Καράγγελος. *Ραδιοπεριβαλλοντική και συνακόλουθες εφαρμογές*. Διδακτορική Διατριβή , Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, 2008.

[223] Δ. Καράγγελος, Ν. Πετρόπουλος και Σ. Σιμόπουλος. *Προσωπική επικοινωνία*. 2010.

[224] Δ. Καράγγελος, Ν. Πετρόπουλος και Ε. Χίνης. *Προσωπική επικοινωνία.* 2009.

[225] Μ. Μανωλοπούλου. *Συμβολή στην ραδιοοικολογική μελέτη του περιβάλλοντος ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού.* Διδακτορική Διατριβή , Τμήμα Φυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 1990.

[226] Γ. Μπεργελές, Α. Βλάσση και Β. Τσάδαρη. Μια υβριδική μεθοδολογία προτύπου Gauss και εξισώσεων Navier-Stokes για μια μελέτη της διασποράς των ρυπαντών στην άτμόσφαιρα - Εφαρμογή σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της ΔΕΗ. *Heleco 95, Β΄ διεθνής έκθεση και συνέδριο στην Αθήνα, Τεχνολογία περιβάλλοντος για τον μεσογειακό χώρο, 9-12 Νοεμβρίου, ΤΕΕ*, σελίδες 209–216, 1995.

[227] Γ. Μπεργελές και Β. Τσάδαρη. Βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας στο λεκανοπέδιο πτολεμαΐδας από την εφαρμογή της αντιρρυπαντικής στρατηγικής της δέή στα ηλεκτροστατικά φίλτρα των θερμοηλεκτρικών σταθμών. *ΤΕΕ*, σελίδες 94–115, 1993.

[228] Γ. Παπαγεωργίου. *Θέματα αριθμητικής ανάλυσης.* Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1990.

[229] Γ. Παπαγεωργίου. *Ατμοπαραγωγοί Ι :Γενικές αρχές.* Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1991.

[230] Ν. Παπαδόπουλος. *Μετρητική μεθοδολογία προσδιορισμού του ραδονίου στο νερό.* Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, 1999.

[231] Θ. Πέππας. *Εγκατάσταση και παραμετρική μελέτη διάταξης ανάλυσης κοκκομετρίας - Εφαρμογή στην κοκκομετρική ανάλυση και του προσδιορισμό των ραδιολογικών χαρακτηριστικών των διαφόρων κλασμάτων ιπτάμενης τέφρας.* Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, 2008.

[232] Σ. Σιμόπουλος. *Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1989.

[233] Α. Τριανταφύλλου, Δ. Ασημακόπουλος και Κ. Χέλμης. Το πρόβλημα της μεταφοράς αερίων ρύπων από την κοιλάδα της πτολεμαΐδας στην πόλη της κοζάνης. *Τεχνικά Χρονικά Γ*, 12(3-4):24–40, 1992.

[234] Α. Τριανταφύλλου, Κ. Χέλμης, Δ. Ασημακόπουλος και Ν. Σταμνάς. Περιπτώσεις επεισοδίων ρύπανσης στην βιομηχανική περιοχή κοζάνης - πτολεμαΐδας. *ΤΕΕ*, σελίδες 138–145, 1993.

[235] Α. Φωτίου και Ε. Λιβιεράτος. *Γεωμετρική γεωδαισία και δίκτυα.* Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2000.