



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Εκτίμηση του εύρους των πιθανών επιπτώσεων στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, λόγω υποθετικού μείζονος πυρηνικού ατυχήματος»

Γεώργιος Καλπαξής

Επιβλέπων: Δημήτριος Μητράκος, Επικ. Καθηγητής

Αθήνα, Ιούνιος 2023



National Technical University of Athens
School of Mechanical Engineering
Department of Nuclear Engineering

Diploma Thesis:

“Assessment of the range of potential impacts in the wider Mediterranean region due to a hypothetical severe nuclear accident”

Georgios Kalpaxis

Supervisor: Dimitrios Mitrakos, Assistant Prof.

Athens, June 2023

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ονοματεπώνυμο: Γεώργιος Καλπαξής

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	7
Περίληψη.....	11
Abstract.....	13
1. Εισαγωγή.....	15
2. Εξεταζόμενη τοποθεσία – πυρηνικός σταθμός Ακκούγιου.....	18
3. Μοντελοποίηση και δεδομένα.....	23
3.1. Έκθεση πληθυσμού.....	23
3.1.1. Μοντέλα για την πρώτη φάση.....	24
3.1.2. Μοντέλα για μεταγενέστερη φάση.....	25
3.2. Μεταφορά σε υδάτινες οδούς και έκθεση.....	26
3.3. Όρος πηγής και χρονικό πλαίσιο έκλυσης.....	28
3.4. Υπολογισμοί διασποράς.....	31
3.4.1. Υπολογισμός συγκεντρώσεων.....	32
3.4.2. Παράμετροι διασποράς.....	33
3.5. Εναπόθεση.....	34
3.5.1. Ξηρή εναπόθεση.....	34
3.5.2. Υγρή εναπόθεση.....	35
3.6. Υπολογισμός δόσης λόγω γ ακτινοβολίας από το νέφος και την εναπόθεση.....	36
3.6.1. Ρυθμός γ δόσης από τμήματα του νέφους (ruffs).....	36
3.6.2. Ρυθμός γ δόσης από την εναπόθεση.....	37
3.7. Μετεωρολογικά δεδομένα.....	38
3.8. Εσωτερική δόση από κατάποση.....	40

3.9. Δόση εισπνοής από το πλούμιο.....	42
3.10. Κριτήρια δόσης.....	43
4. Μεθοδολογία.....	45
4.1. Διαδικασία υπολογισμών.....	45
4.2. Στατιστική επεξεργασία.....	47
4.3. Δημιουργία χαρτών αποτελεσμάτων.....	49
5. Αποτελέσματα.....	53
5.1. Εκτίμηση στατιστικής διακύμανσης μοναδιαίας δόσης ανά νουκλίδιο.....	53
5.1.1. Συγκέντρωση καισίου στον αέρα.....	53
5.1.2. Συγκέντρωση ιωδίου στον αέρα.....	55
5.1.3. Συγκέντρωση καισίου στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση).....	56
5.1.4. Συγκέντρωση ιωδίου στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση).....	58
5.1.5. Ενεργός δόση στο έδαφος ανά ώρα λόγω καισίου.....	60
5.1.6. Ενεργός δόση στο έδαφος ανά ώρα λόγω ιωδίου.....	61
5.1.7. Ολική δυνητική δόση λόγω καισίου.....	63
5.1.8. Ολική δυνητική δόση λόγω ιωδίου.....	64
5.1.9. Ολική δυνητική δόση στον θυρεοειδή.....	66
5.2. Εκτίμηση ραδιολογικών επιπτώσεων για υποθετικό όρο πηγής.....	68
5.2.1. Αθροιστική ενεργός δόση από όλα τα νουκλίδια σε 1 έτους παιδιά σε 1 έτος...68	
5.2.2. Αθροιστική ενεργός δόση από όλα τα νουκλίδια σε ενήλικες σε 1 έτος.....	70
5.2.3. Συγκέντρωση στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση).....	72
5.2.4. Ενεργός δόση ανά ώρα.....	73
5.2.5. Ενεργός δόση λόγω εισπνοής.....	75
5.2.6. Ολική δυνητική ενεργός δόση.....	76

5.2.7. Ολική δυνητική δόση στον θυρεοειδή.....	78
5.2.8. Στατιστική ανάλυση δόσης θυρεοειδή στην περιοχή της Λευκωσίας.....	80
6. Συμπεράσματα.....	84
Κατάλογος διαγραμμάτων.....	87
Κατάλογος εικόνων.....	88
Κατάλογος πινάκων.....	90
Κατάλογος αναφορών.....	92
Παράρτημα	94

Περίληψη

Το ζήτημα της πυρηνικής ενέργειας απασχολεί αρκετές χώρες, αλλά και οργανισμούς (ΕΕ, ΙΑΕΑ, ΟΕCD, IPCC), λόγω της κλιματικής αλλαγής και της άμεσης ανάγκης για τη δραματική μείωση των εκπομπών CO₂. Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες σχάσης δεν εκπέμπουν CO₂, ενώ παρέχουν τεράστια ποσά ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτοντας πολύ μικρή χωρική έκταση, σε σχέση με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες έχουν επίσης το μειονέκτημα της μη συνεχούς, διακοπτόμενης παραγωγής που δεν καθορίζεται από τις ανάγκες αλλά από τις καιρικές συνθήκες. Για αυτόν τον λόγο, φαίνεται ως βιώσιμη η επιλογή της όσο το δυνατόν μεγαλύτερης εισχώρησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αλλά με την υποστήριξη αδιάκοπων, ελεγχόμενων (dispatchable) μορφών ενέργειας. Η μόνη, ωστόσο, τέτοια μορφή ενέργειας ως τώρα είναι η πυρηνική ενέργεια σχάσης. Για τον λόγο αυτό, η πυρηνική ενέργεια αναγνωρίζεται ως μια από τις μορφές ενέργειας στις οποίες θα στηριχθεί η μετάβαση στην εποχή των μηδενικών εκπομπών CO₂ (ΕΕ, IPCC). Είναι μάλλον εύλογο να υποθέσει κανείς ότι η χρήση της στο άμεσο μέλλον δεν θα εγκαταλειφθεί, αλλά ίσως και να ενισχυθεί. Μια παράμετρος, ωστόσο, που προκαλεί ανησυχία είναι η πιθανότητα ενός σοβαρού ατυχήματος, η οποία θα μπορούσε να προκαλέσει έκλυση ραδιενέργειας στο περιβάλλον.

Ένα πυρηνικό ατύχημα στην περιοχή της Μεσογείου, αν και αρκετά απίθανο να συμβεί, ενδέχεται να προκαλέσει σημαντικές ραδιολογικές ή/και οικονομικές επιπτώσεις. Συνεπώς, είναι σημαντική η εκ των προτέρων εκτίμηση του πιθανού επιπέδου των ραδιολογικών επιπτώσεων που θα μπορούσε να βοηθήσει στην αποτελεσματικότερη ανάπτυξη και εφαρμογή των σχετικών σχεδίων έκτακτης ανάγκης και την παροχή πληροφοριών και προστασίας από τους αρμόδιους φορείς στο κοινό. Ένα τέτοιο υποθετικό ατύχημα είναι πιθανό να έχει διασυνοριακό χαρακτήρα, επηρεάζοντας τις γειτονικές χώρες. Στην παρούσα μελέτη, εκτιμάται και αξιολογείται το εύρος των πιθανών ραδιολογικών επιπτώσεων ενός υποθετικού μείζονος πυρηνικού ατυχήματος στην τοποθεσία του πυρηνικού σταθμού στο Ακκούγιου της Τουρκίας. Ειδικότερα, εκτιμώνται υπολογιστικά η μέγιστη και η μέση δόση στον πληθυσμό, με βάση την στατιστική επεξεργασία σειράς προσομοιώσεων με διαφορετικές πιθανές ημερομηνίες έκλυσης, χρησιμοποιώντας πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα που καλύπτουν διάρκεια έξι μηνών. Ακολουθούνται δύο προσεγγίσεις. Στην πρώτη προσέγγιση ο σκοπός είναι η εκτίμηση του πιθανού εύρους της μοναδιαία έκθεσης ανά νουκλίδιο. Στη δεύτερη θεωρείται ένας υποθετικός όρος πηγής (παρεμφερής με αυτόν του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας - ΔΟΑΕ), για την εκτίμηση της συνολικής έκθεσης του πληθυσμού και της διακύμανσής ανάλογα με τις μετεωρολογικές συνθήκες. Οι χάρτες δόσεων και συγκεντρώσεων που προκύπτουν συγκρίνονται με τα διεθνή επίπεδα αναφοράς. Όπως προκύπτει, η απόσταση δεν είναι ο μόνος καθοριστικός παράγοντας για την εκτίμηση της πιθανής ραδιολογικής επίπτωσης από ένα πυρηνικό ατύχημα. Οι καιρικές συνθήκες στην περιοχή φαίνεται ότι μπορεί να έχουν καθοριστική επίδραση στη μεταφορά και εναπόθεση των ραδιονουκλιδίων και

τελικά στην έκθεση του πληθυσμού και στη μακροπρόθεσμη ρύπανση, τόσο σε κοντινές αποστάσεις γύρω από τον σταθμό, όσο και σε σχετικά μακρύτερες αποστάσεις. Όσον αφορά την Κύπρο, φαίνεται ότι στις περισσότερες μελετώμενες περιπτώσεις δεν ξεπερνώνονται τα ανώτατα επίπεδα αναφοράς για την ενεργό δόση. Ωστόσο, η μέγιστη δόση στον θυρεοειδή και η μέγιστη συγκέντρωση στο έδαφος φαίνεται να ξεπερνούν αυτά τα ανώτατα επίπεδα, ειδικά στην περιοχή της Λευκωσίας. Στην Ελλάδα, η οποία βρίσκεται αρκετά πιο μακριά από το Ακκούγιου σε σχέση με την Κύπρο, η έκθεση δεν υπερβαίνει τα επίπεδα αναφοράς δόσεων.

Abstract

The issue of nuclear energy concerns several countries, as well as organizations (EU, IAEA, OECD, IPCC), due to climate change and the immediate need to dramatically reduce CO₂ emissions. Nuclear fission reactors do not emit CO₂, while providing huge amounts of electricity covering a very small spatial area, compared to renewable energy sources, which also have the disadvantage of intermittent productivity that is not determined by needs but by weather conditions. For this reason, the choice of the greatest possible penetration of renewable energy sources, but with the support of uninterrupted, dispatchable forms of energy, seems viable. However, the only such form of energy so far is nuclear fission energy. For this reason, nuclear energy is recognized as one of the forms of energy on which the transition to the level of zero CO₂ emissions will be supported (EU, IPCC). It is rather reasonable to assume that its use in the near future will not be abandoned, but may even be strengthened. One parameter, however, that causes concern is the possibility of a serious accident, which could cause a release of radioactivity into the environment.

A nuclear accident in the Mediterranean region, although quite unlikely to occur, may cause significant radiological and/or economic consequences. Therefore, it is important to assess in advance the potential level of radiological effects that could help in the more effective development and implementation of the relevant emergency plans and the provision of information and protection by the relevant agencies to the public. Such a hypothetical accident is likely to be transboundary, affecting neighboring countries. In the present study, the range of potential radiological impacts of a hypothetical major nuclear accident at the Akkuyu nuclear power plant site in Turkey is estimated and assessed. In particular, the maximum and the average dose in the population are calculated, based on the statistical processing of a series of simulations with different possible release dates, using real meteorological data covering a period of six months. There are two approaches. In the first approach the aim is to estimate the possible range of unit exposure per nuclide. In the second, a hypothetical source term (similar to that of the International Atomic Energy Agency - IAEA) is considered, to estimate the total exposure of the population and the variation according to meteorological conditions. The resulting dose and concentration maps are compared to international reference levels. As it turns out, distance is not the only determining factor in assessing the potential radiological impact from a nuclear accident. It seems that weather conditions in the area have a decisive effect on the transport and deposition of radionuclides and ultimately on population exposure and long-term pollution, both at short distances around the station and at relatively longer distances. As far as Cyprus is concerned, it seems that in most studied cases the maximum reference levels for the active dose are not exceeded. However, the maximum thyroid dose and the maximum ground contamination appear to exceed these maximum levels, especially in the area of Nicosia. In Greece, which is even farther from Akkuyu than Cyprus, the dose reference levels are not exceeded.

1. Εισαγωγή

Είναι γενικά αποδεκτό ότι ένα πυρηνικό ατύχημα είναι πιθανό να έχει σημαντικές διασυννοριακές επιπτώσεις ή όπως έχει επισημανθεί «ένα πυρηνικό ατύχημα κάπου είναι ένα πυρηνικό ατύχημα παντού (a nuclear accident anywhere is a nuclear accident everywhere)»^[1]. Γενικά είναι αδύνατη η αξιόπιστη και ακριβής πρόβλεψη των ραδιολογικών συνεπειών εκ των προτέρων. Αυτό οφείλεται στην πολύπλοκη εξέλιξη του ατυχήματος, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει μεγάλο εύρος πιθανών αλληλουχιών γεγονότων και ποικιλία καθοριστικών παραγόντων. Ειδικότερα, ο συνδυασμός της χρονικής εξέλιξης και των χαρακτηριστικών της έκλυσης του ραδιενεργού αερολύματος στην ατμόσφαιρα με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες, μπορεί να οδηγήσει σε εξαιρετικά διαφορετική εικόνα ραδιολογικών επιπτώσεων. Αυτό μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί από την απλή σύγκριση των χαρτών ρύπανσης του ατυχήματος του Τσερνόμπιλ και της Φουκουσίμα^[2]. Στην πρώτη περίπτωση ο συνδυασμός της χρονικής εξέλιξης και των χαρακτηριστικών της έκλυσης οδήγησε σε ραδιορύπανση σε αξιολογήσιμα επίπεδα, σε ευρεία έκταση, με σημεία αυξημένης ρύπανσης σε όλη την Ευρώπη. Αντίθετα, οι ίδιοι παράγοντες, δηλαδή ο συνδυασμός των χαρακτηριστικών της έκλυσης και των καιρικών συνθηκών περιόρισαν τη ρύπανση σε μία στενή ζώνη στην περίπτωση της Φουκουσίμα. Εκτός των ραδιολογικών επιπτώσεων, ωστόσο, ένα πυρηνικό ατύχημα μπορεί να έχει σημαντικές κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες, ακόμα και με περιορισμένες πραγματικές ραδιολογικές επιπτώσεις^{[3],[4]}.

Αν και, όπως σημειώθηκε παραπάνω, η ακριβής πρόβλεψη των επιπτώσεων ενός ατυχήματος είναι αδύνατη, εντούτοις, συγχρόνως είναι αναγκαίο να μπορεί να γίνει τουλάχιστον εκτίμηση του εύρους των πιθανών ραδιολογικών επιπτώσεων. Μια τέτοια εκτίμηση συχνά αποτελεί τη βάση για την εκπόνηση, θέσπιση και εφαρμογή των σχετικών εθνικών σχεδίων έκτακτης ανάγκης των κρατών και της απόκρισης σε περίπτωση ατυχήματος^[5]. Η εκ των προτέρων κατανόηση των πιθανών επιπτώσεων, πέρα από τον ρόλο της στην προστασία από τον ραδιολογικό κίνδυνο αυτό καθαυτό, συμβάλλει και ουσιαστικά στην προετοιμασία για την επικοινωνία της κατάστασης και την εξήγηση των πραγματικών κινδύνων στο κοινό. Αυτό με τη σειρά του συντελεί στην πιο αξιόπιστη απόκριση και στην αύξηση της εμπιστοσύνης του κοινού προς τις αρμόδιες αρχές, ελαχιστοποιώντας έτσι τόσο τις ραδιολογικές, αλλά και τις μη-ραδιολογικές συνέπειες του ατυχήματος, οι οποίες μπορεί να είναι εξίσου σημαντικές^[6].

Στην περιοχή της Μεσογείου, η οποία μάλιστα είναι μία σχετικά κλειστή θάλασσα, ένα πυρηνικό ατύχημα, σε αντίθεση με το ατύχημα της Φουκουσίμα, είναι πολύ πιθανό να προκαλέσει σημαντικό διασυννοριακό αντίκτυπο, καθώς πολλά κράτη βρέχονται από τη Μεσόγειο θάλασσα. Σημαντική είναι επίσης η πιθανότητα για κάποιες οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις που ενδέχεται να προκληθούν, όχι μόνο από τις ραδιολογικές

επιπτώσεις αυτές καθαυτές, αλλά και από την ανησυχία, τόσο στην Τουρκία, όσο και στις γειτονικές της χώρες, στις οποίες μπορεί να φτάσει το ραδιενεργό νέφος.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η εκτίμηση των πιθανών ραδιολογικών επιπτώσεων, και επομένως και η ανάπτυξη και χρήση σχετικής τεχνογνωσίας και εργαλείων είναι σημαντική για την πληρέστερη προετοιμασία των κρατών και την αποτελεσματικότερη απόκριση.

Σε αυτή την εργασία, πραγματοποιούνται υπολογισμοί των ενδεχόμενων δόσεων και συγκεντρώσεων, όπως προκύπτουν ύστερα από ένα υποθετικό πυρηνικό ατύχημα στο Ακκούγιου, σε αποστάσεις που φτάνουν γύρω στα 800 km.

Στο πρώτο στάδιο των υπολογισμών χρησιμοποιείται το σύστημα υποστήριξης αποφάσεων Jrodos, το οποίο είναι διεθνώς αναγνωρισμένο και αξιοποιείται σε πολλές μελέτες [7],[8]. Εισάγοντας σε αυτό δεδομένα όπως οι ακριβείς συντεταγμένες του εργοστασίου, ο όρος πηγής και τα μετεωρολογικά δεδομένα, επιτυγχάνονται προσομοιώσεις της ραδιενεργού διασποράς με διαφορετικές πιθανές ημερομηνίες έκλυσης. Έπειτα, τα αποτελέσματα από το JRodos επεξεργάζονται με χρήση Matlab ώστε να υπολογιστούν οι μέγιστες και οι μέσες δόσεις στον πληθυσμό, εστιάζοντας στις δόσεις στον θυρεοειδή και την ενεργό δόση κατά τη φάση διέλευσης του νέφους. Επίσης, πέρα από τις δόσεις αυτές, εκτιμώνται μακροπρόθεσμες δόσεις 1 έτους τόσο σε νεογέννητα παιδιά, όσο και σε ενήλικες ξεχωριστά. Στη συνέχεια, αξιοποιώντας το πρόγραμμα QGIS, πραγματοποιείται η απεικόνιση των χαρτών δόσεων και συγκεντρώσεων ανά περιοχή. Σημειώνεται ότι η διαδικασία επαναλαμβάνεται παρεμφερώς δύο φορές. Στην πρώτη περίπτωση εκτιμάται το πιθανό εύρος της μοναδιαίας έκθεσης ανά νουκλίδιο, ενώ στη δεύτερη η συνολική έκθεση του πληθυσμού και η διακύμανση ανάλογα με τις μετεωρολογικές συνθήκες θεωρώντας έναν υποθετικό όρο πηγής. Τελικά οι χάρτες συγκρίνονται με τα διεθνή επίπεδα αναφοράς και παρατίθενται τα συμπεράσματα.

Κύριος στόχος της μελέτης είναι η εκτίμηση της διακύμανσης των επιπτώσεων όπως αυτή καθορίζεται από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες στην περιοχή. Ο όρος πηγής που χρησιμοποιείται, βασίζεται στον όρο πηγής τυπικού αντιδραστήρα, όπως έχει χρησιμοποιηθεί από τον ΔΟΑΕ, για την εκτίμηση των ζωνών έκτακτης ανάγκης γύρω από πυρηνικό αντιδραστήρα. Τονίζεται ωστόσο ότι ο αντιδραστήρας του Ακκούγιου είναι αντιδραστήρας νέας γενιάς με προηγμένα συστήματα ασφάλειας και μετριασμού των ραδιενεργών εκλύσεων ακόμα και σε μείζονα ατυχήματα. Ως εκ τούτου, ο όρος πηγής που χρησιμοποιείται είναι μία τάξη μεγέθους χαμηλότερος από αυτόν του ΔΟΑΕ. Σημειώνεται ότι ακόμα και αυτός ο μειωμένος όρος πηγής πιθανότατα υπερεκτιμά τις πιθανές ραδιενεργές εκλύσεις και τη χρονική εξέλιξη τους. Επιπλέον, έμφαση δίνεται στην καινοτομία υπολογισμού και παράθεσης των τιμών, μέσω συνδυασμού ειδικών προγραμμάτων (Jrodos, QGIS) και γλώσσας προγραμματισμού (Matlab). Αξιοποιώντας τις δυνατότητες κάθε προγράμματος και δημιουργώντας συνοχή μεταξύ τους, επιτυγχάνεται ο

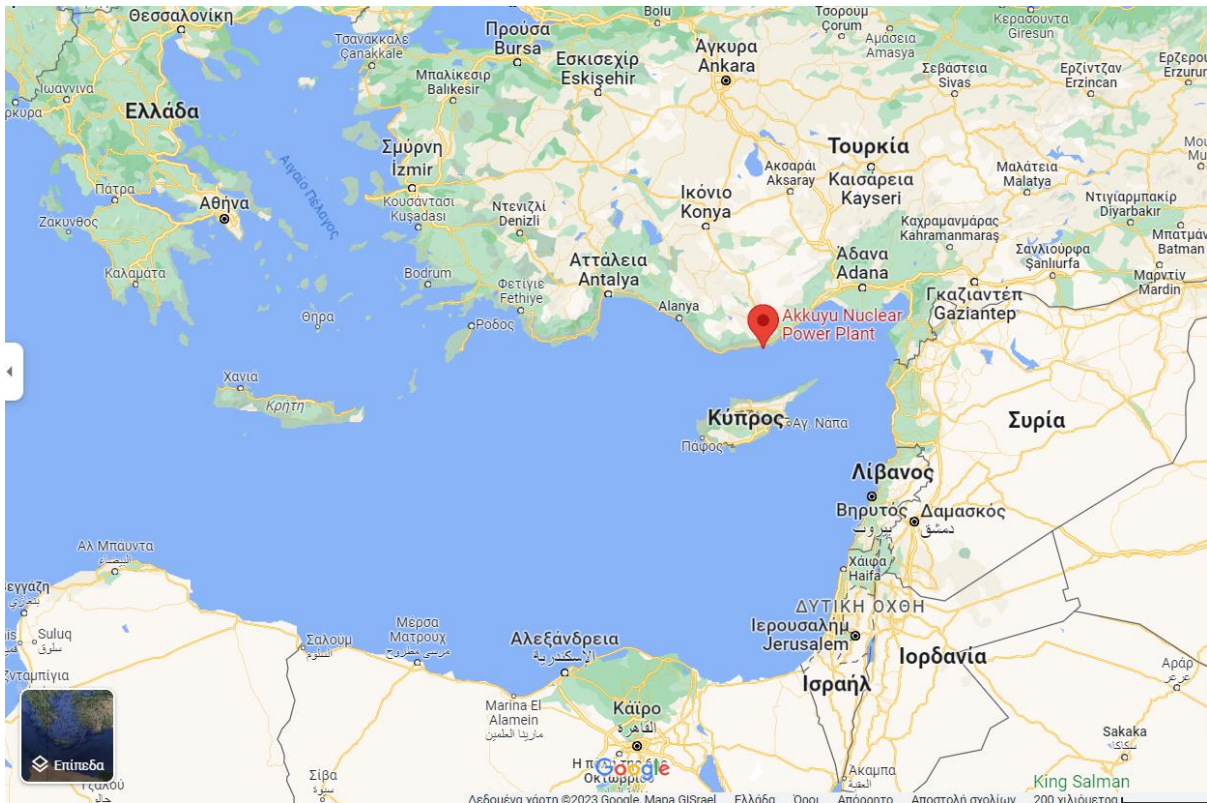
υπολογισμός τιμών δόσεων και συγκεντρώσεων και συνεπώς παρέχεται μία πρώτη εικόνα για την αντιμετώπιση μίας ενδεχόμενης ραδιενεργούς διασποράς.

Η διάρθρωση της εργασίας έχει ως εξής: Στο κεφάλαιο 2, γίνεται σύντομη περιγραφή του πυρηνικού σταθμού στο Ακκούγιου (που εικάζεται ως η υποθετική τοποθεσία του ατυχήματος) και του έργου για την κατασκευή του. Στο κεφάλαιο 3, αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά του υπολογιστικού προγράμματος Jrodos, το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό της ατμοσφαιρικής μεταφοράς και διασποράς της εκλυόμενης ραδιενέργειας και της έκθεσης του πληθυσμού. Στο κεφάλαιο 4, περιγράφεται διεξοδικά η μεθοδολογία που ακολουθείται για την προσομοίωση των επιπτώσεων και της έκθεσης του πληθυσμού και η δημιουργία των σχετικών χαρτών δόσεων και συγκεντρώσεων. Στο κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και οι εκτιμώμενες δόσεις, οι οποίες αξιολογούνται βάσει των διεθνών επιπέδων αναφοράς. Εντέλει, στο κεφάλαιο 6, παρατίθενται τα συμπεράσματα της εργασίας.

2. Εξεταζόμενη τοποθεσία – πυρηνικός σταθμός Ακκούγιου

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, η πυρηνική ενέργεια είναι πιθανό να αποτελέσει σημαντικό μέσο για τη μείωση των εκπομπών άνθρακα παγκοσμίως, και επομένως ενδέχεται τις επόμενες δεκαετίες να διατηρηθεί ή ακόμα και να ενισχυθεί το μερίδιό της στο ενεργειακό μίγμα διαφόρων χωρών. Στην περιοχή της Μεσογείου είναι σε εξέλιξη η κατασκευή του πυρηνικού σταθμού στο Ακκούγιου, το οποίο αυτή τη στιγμή είναι και το μεγαλύτερο έργο κατασκευής αντιδραστήρων στον κόσμο. Οι αντιδραστήρες στο Ακκούγιου μπορούν να θεωρηθούν αντιδραστήρες γενιάς III/III+, με προηγμένα συστήματα και χαρακτηριστικά ασφάλειας, τόσο παθητικά όσο και ενεργητικά. Ενδεικτικά αναφέρονται: το διπλό περίβλημα, τα συστήματα προστασίας του περιβλήματος από ανάφλεξη υδρογόνου, η παθητική ψύξη έκτακτης ανάγκης της καρδιάς και το σύστημα παγίδευσης της τηγμένης καρδιάς (core catcher). Παρακάτω παρατίθενται κάποιες γενικές πληροφορίες για την ιστορία και το πλαίσιο του έργου, όπως αντλήθηκαν από τις αντίστοιχες πηγές.

Στις 12 Μαΐου 2010 υπογράφηκε «Συμφωνία Συνεργασίας» από τις κυβερνήσεις της Ρωσικής Ομοσπονδίας και της Δημοκρατίας της Τουρκίας. Σκοπός ήταν η κατασκευή του πρώτου πυρηνικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής στην Τουρκία, ο οποίος θα διέθετε τέσσερις μονάδες με αντιδραστήρες τύπου VVER-1200, συνολικής ηλεκτρικής ισχύος 4800 MW. Η τοποθεσία που ορίστηκε είναι το Ακκούγιου που βρίσκεται στα νότια παράλια της Τουρκίας, στην επαρχία Mersin (βλ. εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Πυρηνικός σταθμός Ακκούγιου (Πηγή: Google Maps)

Στις 13 Δεκεμβρίου 2010, ιδρύθηκε η υπεύθυνη εταιρία για το έργο: «Akkuyu Nuclear Joint-Stock Company». Κατά το πλαίσιο της μακροπρόθεσμης σύμβασης, η μελέτη, η κατασκευή, η συντήρηση, η λειτουργία καθώς και ο παροπλισμός του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής αναλαμβάνονται όλα από την εταιρεία. Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι το έργο κατασκευής του πυρηνικού σταθμού Ακκούγιου είναι το πρώτο έργο πυρηνικής ενέργειας παγκοσμίως που υλοποιείται σύμφωνα με το μοντέλο BOO (Build-Own-Operate). [9]

Όσον αφορά το συνολικό κόστος του έργου, αυτό ανέρχεται στα 20 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ. [9]

Στις 27 Απριλίου 2023 εγκαινιάστηκε ο πυρηνικός σταθμός Ακκούγιου. Ωστόσο, η λειτουργία του θα ξεκινήσει μέσα στο 2024, όπως μεταδόθηκε από το ρωσικό πρακτορείο ειδήσεων TASS. Όπως δήλωσε ο πρόεδρος της Τουρκίας: «Ο σταθμός Ακκούγιου θα παράγει το 10% της ενέργειας της Τουρκίας, θα έχει 4 αντιδραστήρες και όλοι τους θα λειτουργούν μέχρι το 2028». [10]

Στις εικόνες 2.2 και 2.3 φαίνονται το σχέδιο κάτοψης της εγκατάστασης και η κατασκευή της αντιστοίχως.



Εικόνα 2.2: Σχέδιο κάτοψης εγκατάστασης Ακκούγιου (Πηγή: Wikipedia.org)



Εικόνα 2.3: Φάση κατασκευής του εργοστασίου Ακκούγιου (Πηγή: <<http://www.akkuyu.com/photo-gallery>>)

Στην Τουρκία, η ιδέα της κατασκευής ενός πυρηνικού εργοστασίου ηλεκτροπαραγωγής όχι μόνο δεν είναι πρόσφατη, αλλά αποτελεί μείζον θέμα πολιτικής συζήτησης εδώ και καιρό. Ωστόσο, οι απόψεις πολιτικών, ατόμων που λαμβάνουν αποφάσεις (decision makers), ακτιβιστών, καθώς και των επιστημόνων δίστανται. Αυτό συμβαίνει επειδή αναδύονται τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα, που συχνά σχετίζονται με τις υποκειμενικές πεποιθήσεις.

Ξεκινώντας από τα πλεονεκτήματα, τα ορυκτά καύσιμα πρέπει να αντικατασταθούν καθώς αποτελούν κύρια πηγή αερίων του θερμοκηπίου, εντείνοντας έτσι την κλιματική αλλαγή και την παγκόσμια υπερθέρμανση. Εν αντιθέσει με τα ορυκτά καύσιμα, σε ένα πυρηνικό εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής άμεσα δεν εκπέμπονται καθόλου επιβλαβή για το περιβάλλον αέρια. Συνεπώς, δεδομένης της αυξανόμενης εκπομπής αερίων CO₂ στην Τουρκία, η πυρηνική ενέργεια φαίνεται ως μία ελκυστική επιλογή. Επιπλέον απαιτείται χαμηλό λειτουργικό κόστος για τη λειτουργία ενός πυρηνικού εργοστασίου, σε αντίθεση με αυτό ενός συμβατικού με ορυκτά καύσιμα. Επομένως, αναμένεται η τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας στην Τουρκία να ελαττωθεί. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι ο πυρηνικός σταθμός προσφέρει μειωμένη εξάρτηση από το πετρέλαιο. Δεδομένης της αυξανόμενης ηλεκτρικής κατανάλωσης στην Τουρκία και του αξιοσημείωτου ποσοστού εισαγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (70% το 2015), προσφέρεται μία επιλογή ανεξάρτητη από το πετρέλαιο. ^{[11],[12]}

Πρόκειται δηλαδή για μία βιώσιμη και συνεχή πηγή ενέργειας. Σε αντίθεση με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που βασίζονται σε κατάλληλες μετεωρολογικές συνθήκες, ένας πυρηνικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής παραμένει διαρκώς αποτελεσματικός. Όσον αφορά το λειτουργικό προσδόκιμο ζωής των πυρηνικών εργοστασίων, αυτό έχει αυξηθεί σημαντικά από 40 χρόνια το 1960, σε 80 και πλέον το 2016. Επίσης, δεδομένου ότι αξιοποιούνται πλούσια αποθέματα ουρανίου, αυτό σημαίνει ότι υπάρχει επάρκεια για ακόμα 150 χρόνια. Σημειώνεται ότι σε ένα πυρηνικό εργοστάσιο παράγεται τεράστιο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα από 1 κιλό κάρβουνο παράγεται ηλεκτρική ενέργεια 3 KWh, από 1 κιλό πετρελαίου 4 KWh ενέργειας, ενώ από 1 κιλό ουρανίου παράγεται ηλεκτρική ενέργεια 50000 KWh! Επιπλέον παρέχεται η δυνατότητα ανακύκλωσης των πυρηνικών αποβλήτων με χρήση προηγμένης τεχνολογίας, συμβάλλοντας έτσι στην παραγωγή ορυκτών καυσίμων. Τέλος, η παραγόμενη ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί μέχρι και για 10 χρόνια, αποτελώντας μία σταθερή πηγή ενέργειας. ^{[11],[12]}

Πέρα όμως από τα πλεονεκτήματα, εγείρονται ερωτήματα και αμφιβολίες σχετικά με το κόστος και την ασφάλεια, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια. Αρχικά, η πυρηνική ενέργεια είναι μία δαπανηρή πηγή ενέργειας. Αν και το λειτουργικό κόστος μπορεί να είναι μικρό, απαιτούνται τεράστια χρηματικά ποσά ως αρχική επένδυση, σε αντίθεση με τα συμβατικά εργοστάσια. Δεν είναι τυχαίο άλλωστε ότι προηγούμενες προσπάθειες κατασκευής πυρηνικού εργοστασίου στην Τουρκία είχαν ακυρωθεί εξαιτίας έλλειψης χρηματικών

πόρων. Επίσης, το ζήτημα της διαχείρισης των τοξικών αποβλήτων είναι φλέγον. Παρόλο που τα απόβλητα ενός πυρηνικού εργοστασίου είναι δηλητηριώδη και μακροβίως ραδιενεργά, γενικότερα δεν έχει βρεθεί ακόμα μία αποτελεσματική λύση στη διαχείρισή τους από την πυρηνική βιομηχανία. Οπότε, αφού τα απόβλητα παραμένουν επικίνδυνα για χιλιάδες χρόνια, απειλείται το περιβάλλον και το ανθρώπινο είδος. Όσον αφορά μάλιστα την απομάκρυνση των τοξικών αποβλήτων από το εργοστάσιο, το κόστος ανέρχεται περίπου στα 2.5 δισεκατομμύρια αμερικάνικα δολάρια ετησίως!

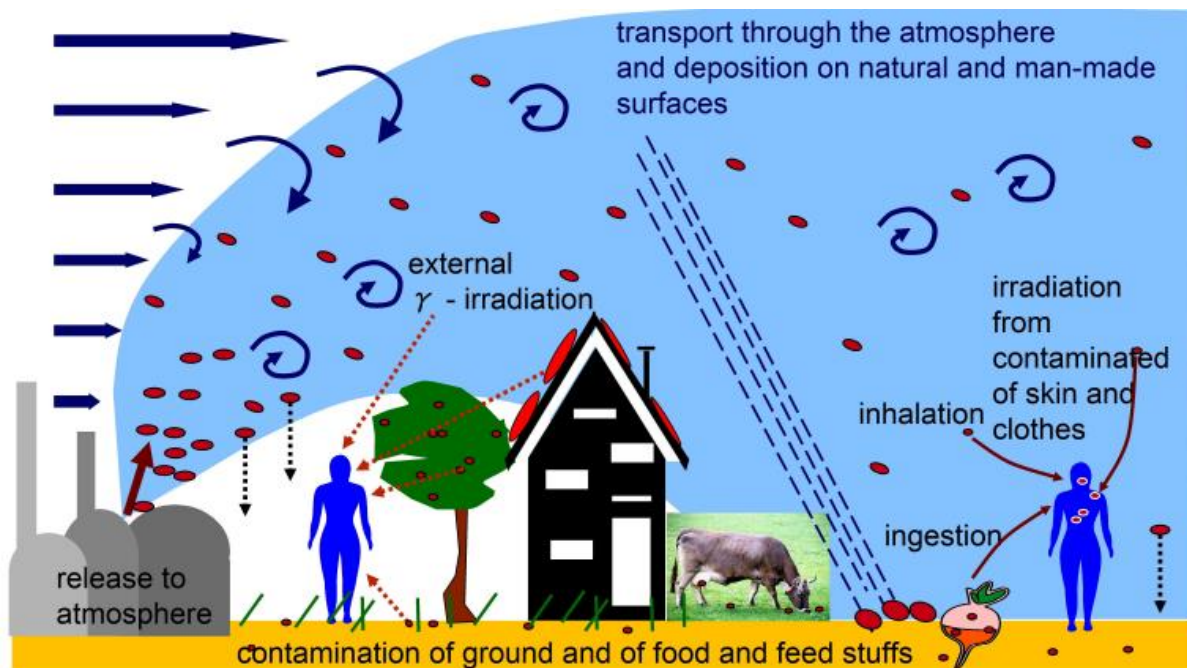
Πέρα από το θέμα της διαχείρισης της τοξικότητας των αποβλήτων, υπάρχει και αυτό της ποσότητας αποβλήτων που προκύπτουν από επεξεργασία του ουρανίου. Για παράδειγμα, για να αποκτηθεί 1 τόνος ουρανίου, απελευθερώνονται 20 τόνοι αποβλήτων. ^{[11],[12]}

Ένα ακόμα πρωτεύον ζήτημα είναι αυτό της επάρκειας και εκπαίδευσης του ανθρώπινου δυναμικού. Αναφέρεται μάλιστα ότι η Τουρκία δεν διαθέτει επιθυμητό αριθμό έμπειρων χειριστών και υπευθύνους τους, ώστε να επιβλέπεται και να εκτελείται ορθά η λειτουργία του εργοστασίου. Συνεπώς, η ασφάλεια και διαχείριση μπορεί να αμφισβητηθεί, γεγονός που δεν αποπνέει εμπιστοσύνη, ειδικά για μία τόσο εξελιγμένη τεχνολογία. Οι συνέπειες ενός ατυχήματος μπορεί να είναι καταστροφικές τόσο για τον άνθρωπο όσο και για το περιβάλλον γενικότερα. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ιστορικά τα πυρηνικά εργοστάσια είναι ιδιαίτερα ευάλωτα σε φυσικές καταστροφές, όπως είναι οι σεισμοί και τα τσουνάμια. Επομένως πρέπει να τονιστεί ότι το εργοστάσιο στο Ακκούγιου βρίσκεται κοντά σε μία ενεργή μεσογειακή σεισμική ζώνη, αυξάνοντας έτσι τις ανησυχίες. Επιπλέον εγκυμονεί πάντα ο κίνδυνος αξιοποίησης της πυρηνικής ενέργειας σε πυρηνικά όπλα. Ωστόσο, σημειώνεται ότι η Τουρκία έχει υπογράψει και αποδεχθεί τη συνθήκη «Non-Proliferation Treaty» (2009). Μάλιστα τονίζεται ότι, ως απόρροια των προαναφερθέντων, το 90% των Τούρκων πολιτών που συμμετείχαν σε έρευνα φαίνεται πως αποδοκιμάζουν το έργο, ελαττώνοντας έτσι και το πλήθος των επενδύσεων. ^{[11],[12]}

3. Μοντελοποίηση και δεδομένα

3.1. Έκθεση πληθυσμού

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται σύντομα τα βασικά μοντέλα στο Jrodos που σχετίζονται με την έκθεση του πληθυσμού. Στην Εικόνα 3.1 απεικονίζονται οι μέθοδοι ατμοσφαιρικής μεταφοράς και εναπόθεσης, καθώς και οι επακόλουθες οδοί έκθεσης ύστερα από την απελευθέρωση του ραδιενεργού νέφους από έναν πυρηνικό αντιδραστήρα. Αρχικά, το ραδιενεργό αερόλυμα που απελευθερώνεται καθοδηγείται από την ροή του ανέμου. Καθώς η απόσταση από το σημείο έκλυσης αυξάνεται, η συγκέντρωση του ραδιενεργού υλικού μειώνεται λόγω διασποράς (κυρίως τυρβώδους) και άλλων μηχανισμών, όπως η ραδιενεργή διάσπαση και η εναπόθεση. Κατά τη διέλευση του νέφους, ο πληθυσμός υφίσταται εξωτερική έκθεση (ακτινοβολία γ από το νέφος) και εσωτερική έκθεση λόγω εισπνοής. Επιπλέον, εξαιτίας της ξηρής και της υγρής εναπόθεσης προκαλείται ραδιενεργή ρύπανση των επιφανειών, με συνέπεια την επακόλουθη εξωτερική έκθεση σε ακτινοβολία γ . Επίσης, η ραδιενέργεια που έχει εναποτεθεί σε φυσικές επιφάνειες δύναται να καταλήξει τελικά στην τροφική αλυσίδα και έτσι σε εσωτερική έκθεση λόγω κατανάλωσης ρυπασμένων τροφίμων, όπως λαχανικά, φρούτα, κρέας και γάλα. ^[13]

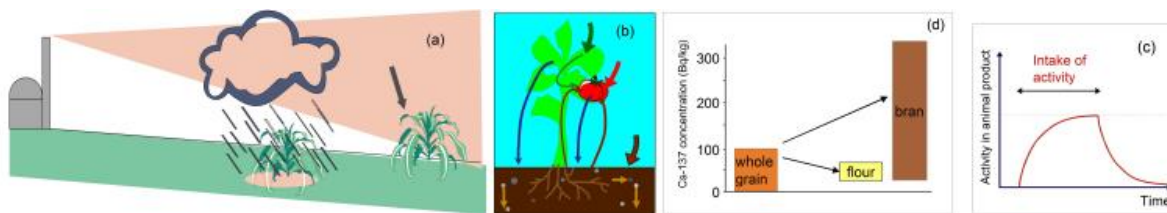


Εικόνα 3.1: Ατμοσφαιρική μεταφορά, φαινόμενα εναπόθεσης και μονοπάτια έκθεσης (Πηγή: «JRodos: An off-site emergency management system for nuclear accidents», Karlsruhe Institute of Technology (KIT), March 2017)

3.1.1. Μοντέλα για την πρώιμη φάση

Στο Jrodos περιλαμβάνονται πολλά μοντέλα σχετικά με την ατμοσφαιρική διασπορά και την εναπόθεση. Μερικά από αυτά «περιορίζονται» σε τοπική κλίμακα δεκάδων χιλιομέτρων, ενώ άλλα μπορούν να καλύψουν εκατοντάδες χιλιόμετρα. Όσον αφορά τη μεταφορά ραδιενεργού υλικού στα τρόφιμα και κατά επέκταση στον άνθρωπο, αυτή μοντελοποιείται στην «Επίγεια Τροφική Αλυσίδα και Μονάδα Δόσης» (Terrestrial Food Chain and Dose Module). Για εφαρμογές πρώιμης φάσης, οι συγκεντρώσεις ραδιονουκλιδίων στον αέρα κοντά στο έδαφος και οι πληροφορίες για τις βροχοπτώσεις εισάγονται ως δεδομένα για το μοντέλο. [13]

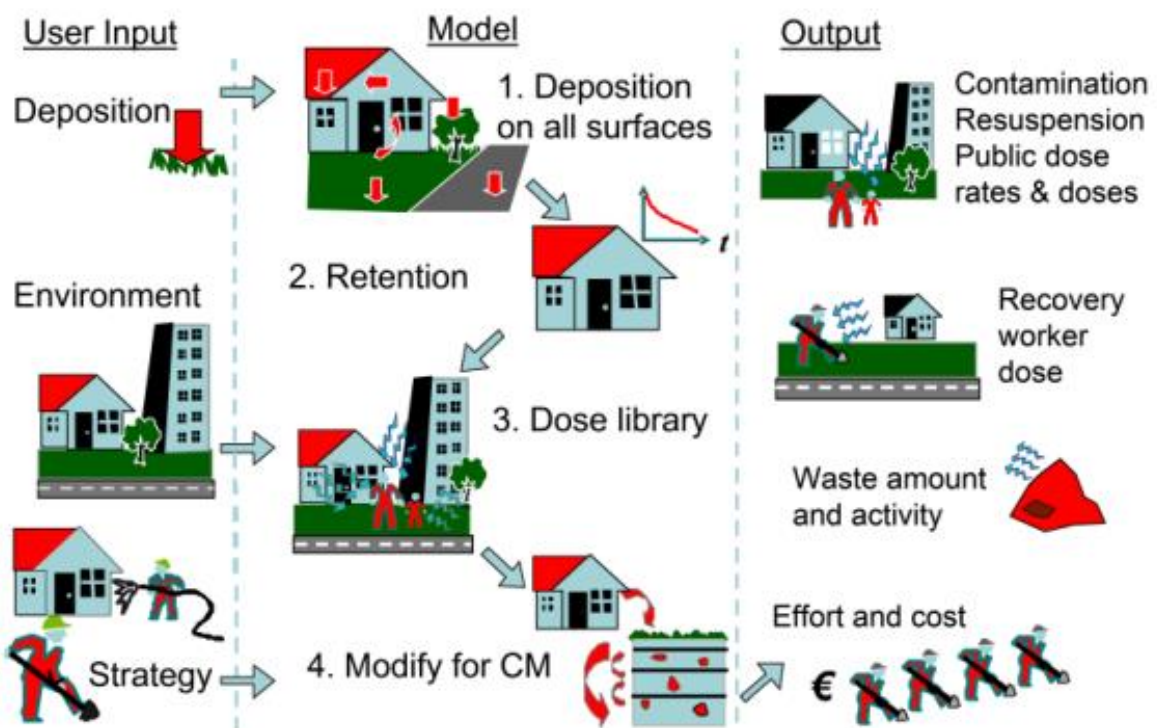
Τα φαινόμενα που λαμβάνονται υπόψη για την τροφική αλυσίδα φαίνονται στην Εικόνα 3.2. Συγκεκριμένα, η αερομεταφερόμενη δραστηριότητα εναποτίθεται τόσο στο έδαφος όσο και στη βλάστηση μέσω ξηρής και υγρής εναπόθεσης (Εικόνα 3.2a). Κατά το πέρασμα το καιρού, ένα τμήμα της εναποτιθέμενης ραδιενέργειας προσχωρεί στις υπόγειες ρίζες των φυτών, με αποτέλεσμα να μεταφέρεται και στα υπόλοιπα. Σε αντίθεση, το υπόλοιπο τμήμα της ραδιενέργειας αφαιρείται λόγω των καιρικών συνθηκών και έτσι καταλήγει στο ανώτερο στρώμα εδάφους (Εικόνα 3.2b). Αναλόγως της εποχιακής ανάπτυξης του φυτού, επηρεάζονται και οι διαδικασίες άμεσης εναπόθεσης στα φυτά. Για αυτό και η ημερομηνία που θα συμβεί το ατύχημα παίζει καταλυτικό ρόλο στην εσωτερική έκθεση από τη βρώση. Ως επακόλουθο της μόλυνσης των φυτών, αυτή μεταφέρεται μέσω των ζώων και του ποτίσματος μέσα στην τροφική αλυσίδα (Εικόνα 3.2c). Επομένως, τα ακατέργαστα προϊόντα πρέπει να υποβάλλονται σε επεξεργασία (πλύσιμο, ξεφλούδισμα, κλπ.) πριν την κατανάλωση, ελέγχοντας τα επίπεδα συγκέντρωσης ραδιενέργειας (Εικόνα 3.2d). [13]



Εικόνα 3.2: Φαινόμενα που λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο επίγειας τροφικής αλυσίδας όπως περιγράφονται στην παραπάνω παράγραφο (Πηγή: «JRodos: An off-site emergency management system for nuclear accidents», Karlsruhe Institute of Technology (KIT), March 2017)

3.1.2. Μοντέλα για μεταγενέστερη φάση

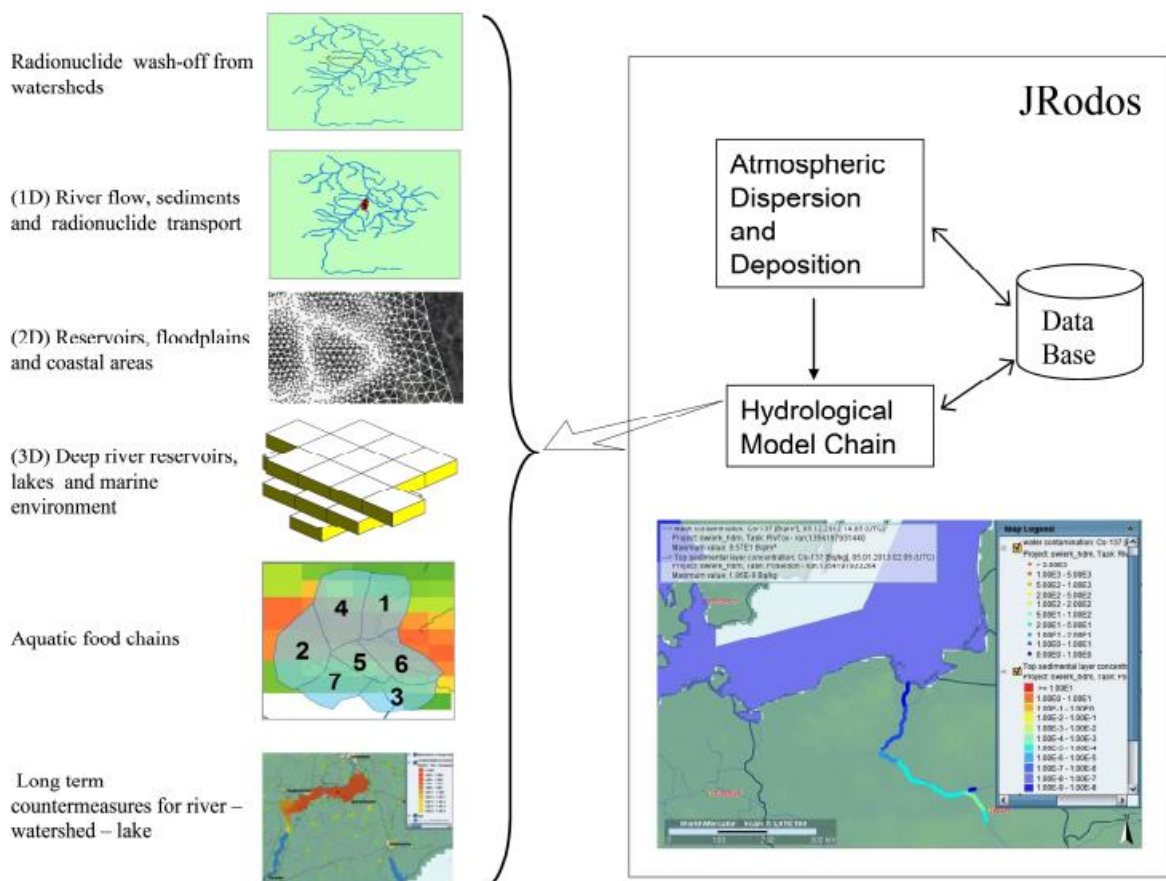
Η εναπόθεση του ραδιενεργού υλικού σε φυσικές και ανθρωπογενείς επιφάνειες, καθώς και η ρύπανση των τροφίμων μπορεί να διαρκέσει για μήνες, χρόνια ή ακόμα και δεκαετίες. Για αυτό απαιτείται ειδική διαχείριση και αντίμετρα για τις πληγείσες περιοχές (και συγκεκριμένα για τα τρόφιμα και τις ζωοτροφές), ώστε οι συνθήκες διαβίωσης να γίνουν πάλι κανονικές, εάν είναι δυνατόν. Για την αξιολόγηση της χρονικής εξέλιξης και των συγκεντρώσεων στα τρόφιμα στη μεταγενέστερη φάση, το «Terrestrial Food Chain and Dose Module» μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με μετρήσεις (ραδιενεργή δραστηριότητα στον αέρα, πεδίο βροχόπτωσης, κλπ.). Όσον αφορά το μοντέλο για κατοικημένες περιοχές, αυτό ασχολείται με φαινόμενα που σχετίζονται με τη ρύπανση αστικών επιφανειών και του περιβάλλοντος χώρο, καθώς και με πιθανά αντίμετρα (απομάκρυνση ανθρώπων από την περιοχή, απορρύπανση ρυπασμένων επιφανειών, πλήρη αφαίρεση τέτοιων επιφανειών, κλπ.). Τα παραπάνω περιγράφονται περιεκτικά στην εικόνα 3.3. ^[13]



Εικόνα 3.3: Μοντέλο για κατοικημένες περιοχές (Πηγή: «JRodos: An off-site emergency management system for nuclear accidents», Karlsruhe Institute of Technology (KIT), March 2017)

3.2. Μεταφορά σε υδάτινες οδούς και έκθεση

Το ατύχημα της Φουκουσίμα απέδειξε τη σημασία της επαρκούς δυνατότητας προσομοίωσης υδάτινης μεταφοράς. Συνεπώς, στο JRodos περιλαμβάνεται ένα περιεκτικό μοντέλο ονόματι «Hydrological Model Chain», το οποίο περιγράφεται στην Εικόνα 3.4. Στο μοντέλο αυτό καλύπτεται η διασπορά του ραδιενεργού υλικού μέσα στα περισσότερα υδάτινα περιβάλλοντα (ποτάμια, λίμνες, δεξαμενές, ανοικτές θάλασσες, εκβολές ποταμών, παράκτια ύδατα), καθώς και η εναπόθεση σε θαλάσσια σώματα από την ατμόσφαιρα. Επίσης, τα μοντέλα υδάτινης τροφικής αλυσίδας και δόσης (Aquatic Food Chain and Dose Models) παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμού των ραδιονουκλιδίων που μεταφέρονται στον άνθρωπο από το μολυσμένο νερό και τα ψάρια. Δηλαδή, πέρα από την ανθρώπινη μόλυνση μέσω της τροφικής αλυσίδας, εξετάζονται και οι περιπτώσεις μολυσμένου πόσιμου, ποτιστικού και άρδευσης νερού. Τονίζεται ότι τα μοντέλα αυτά διαρκώς ενημερώνονται και προστίθενται νέα που συμπεριλαμβάνουν μακροπρόθεσμα υδρόβια αντίμετρα σε ποτάμια, λίμνες, κλπ. Αναλόγως της περίπτωσης, ο χρήστης χρησιμοποιεί τα αντίστοιχα μοντέλα. [13]



Εικόνα 3.4: Το «Hydrological Model Chain» του Jrodos (Πηγή: «JRodos: An off-site emergency management system for nuclear accidents», Karlsruhe Institute of Technology (KIT), March 2017)

Επιπλέον μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα πρόγνωσης καιρού «NOMADS»^[14] και η βάση δεδομένων υδρολογικών προβλέψεων «MyOcean»^[15] για τη βελτίωση των τρισδιάστατων μοντέλων. Έτσι καθίσταται για πρώτη φορά δυνατή μία συνδυασμένη πρόγνωση της ατμοσφαιρικής διασποράς, της εναπόθεσης στη γη και στο νερό, και της περεταίρω μεταφοράς μέσω του νερού, βάσει προβλέψεων από αριθμητικά μοντέλα. Ωστόσο, σημειώνεται ότι τα μοντέλα αυτά προϋποθέτουν κατάλληλη μελέτη και προσαρμογή για κάθε περιβάλλον αντιστοίχως, πληροφορίες οι οποίες διαρκώς προστίθενται στο πρόγραμμα.

3.3. Όρος πηγής και χρονικό πλαίσιο έκλυσης

Στην παράγραφο αυτή εκτιμάται η ποσότητα των ραδιονουκλιδίων που διαφεύγει από τον πυρήνα κατά το πυρηνικό ατύχημα. Αρχικά, προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός αυτός, απαιτείται ο προσδιορισμός του αποθέματος των ραδιονουκλιδίων στον πυρήνα. Για τον ακριβή υπολογισμό της τιμής της ενεργότητας των προϊόντων σχάσης στην καρδιά του αντιδραστήρα απαιτούνται πολύπλοκοι υπολογισμοί για τον ισολογισμό ενεργότητας κάθε νουκλιδίου, λαμβάνοντας υπόψη την πραγματική φόρτιση της καρδιάς του αντιδραστήρα και του προγράμματος λειτουργίας, με χρήση σχετικά μεγάλων υπολογιστικών κωδίκων (πχ ORIGEN). Παρόλα αυτά, για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης θεωρείται ικανοποιητική προσέγγιση η χρήση σχετικών δεδομένων για τυπικό αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος (PWR) που έχει χρησιμοποιήσει ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας - ΔΟΑΕ (International Atomic Energy Agency - IAEA)^[5] σε υπολογισμούς των ζωνών έκτακτης ανάγκης πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος. Η χρήση αυτού του γενικού αποθέματος ενεργότητας στην καρδιά του αντιδραστήρα δεν αναμένεται να έχει σημαντική επίδραση στην εκτίμηση του εύρους των πιθανών ραδιολογικών επιπτώσεων.

Τα προαναφερθέντα δεδομένα αναφέρονται σε τυπικό αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος (PWR) θερμικής ισχύος 3000 MWth (Πίνακας 3.1). Ο πυρηνικός σταθμός Ακκούγιου διαθέτει 4 μονάδες, ηλεκτρικής ισχύος 1200 MW η καθεμιά. Με την παραδοχή τυπικού βαθμού απόδοσης μετατροπής από θερμική σε ηλεκτρική ισχύ ίσο με 33%, η θερμική ισχύς κάθε αντιδραστήρα εκτιμάται ίση με 3600 MWth. Επομένως, η ενεργότητα που χρησιμοποιείται τελικά προσαυξάνεται με τον λόγο 3600/3000 (Πίνακας 3.1).

Ο όρος πηγής για την έκλυση του εξεταζόμενου υποθετικού ατυχήματος, υπολογίζεται με βάση τις σχετικές παραδοχές, στις οποίες στηρίζονται οι εκτιμήσεις για τις ζώνες έκτακτης ανάγκης γύρω από πυρηνικές εγκαταστάσεις. Ειδικότερα, σύμφωνα με τον ΔΟΑΕ^[16], θεωρείται ότι συνολικά εκλύεται το 10% του αποθέματος σε συνολικό διάστημα ίσο με 10 ώρες. Λαμβάνοντας υπόψη τα πραγματικά ατυχήματα έως τώρα, η διάρκεια της έκλυσης θεωρείται πολύ μικρή, και αναμένεται να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση των ραδιολογικών επιπτώσεων, καθώς μικρότερη διάρκεια έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη μεταβολή των καιρικών συνθηκών (πχ κατεύθυνση ανέμου) και συνεπώς συγκέντρωση μεγαλύτερου μέρους της έκλυσης στην ίδια περιοχή. Επιπλέον, ο πυρηνικός σταθμός του Ακκούγιου είναι τελευταίας τεχνολογίας, καθώς ανήκει στους λεγόμενους αντιδραστήρες III/III+, με σημαντικές βελτιώσεις στην ασφάλεια. Οι βελτιώσεις αυτές, εκτός της μείωσης της πιθανότητας τήξης της καρδιάς, επιπλέον διαθέτουν και παθητικά και ενεργητικά συστήματα ασφάλειας (core catcher, αυξημένη απομόνωση και συγκράτηση ραδιενέργειας στο περίβλημα, προστασία τους περιβλήματος και συστήματα για την αντιμετώπιση παρατεταμένης αδυναμίας ανθρώπινης παρέμβασης και απομόνωσης από εξωτερική βοήθεια κα.) σε περίπτωση τήξης, που μετριάζουν σημαντικά τις συνολικές εκλύσεις. Ως εκ τούτου, το παραπάνω 10% θεωρείται ότι δεν ανταποκρίνεται στον συγκεκριμένο

αντιδραστήρα. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται μικρότερα κλάσματα έκλυσης στην ατμόσφαιρα. Ειδικότερα, θεωρείται ότι η συνολική έκλυση είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερη. Τα κλάσματα έκλυσης για τα διάφορα ραδιονουκλίδια, όπως εκτιμώνται με βάση τα παραπάνω, δίνονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Απόθεμα ραδιονουκλιδίων στην καρδιά του αντιδραστήρα και όρος πηγής

Ραδιονουκλίδιο ^[5]	Απόθεμα ενεργότητας σε τυπικό αντιδραστήρα (Bq) για LWR 3000MWth ^[5]	KNPP ($\times 1.2$)	Κλάσματα έκλυσης	Συνολική έκλυση σε 10 ώρες (Bq)
Rb-86	9.60E+14	1.15E+15	0.01	1.15E+13
Sr-89	3.50E+18	4.20E+18	0.002	8.40E+15
Sr-90+	1.40E+17	1.68E+17	0.002	3.36E+14
Sr-91	4.10E+18	4.92E+18	0.002	9.84E+15
Y-91	4.40E+18	5.28E+18	0.0001	5.28E+14
Zr-95+	5.60E+18	6.72E+18	0.0001	6.72E+14
Zr-97+	5.60E+18	6.72E+18	0.0001	6.72E+14
Mo-99+	5.90E+18	7.08E+18	0.0001	7.08E+14
Ru-103+	4.10E+18	4.92E+18	0.0001	4.92E+14
Ru-105	2.70E+18	3.24E+18	0.0001	3.24E+14
Ru-106+	9.30E+17	1.12E+18	0.0001	1.12E+14
Rh-105	1.80E+18	2.16E+18	0.0001	2.16E+14
Te-127m+	4.10E+16	4.92E+16	0.005	2.46E+14
Te-127	2.20E+17	2.64E+17	0.005	1.32E+15
Te-129m+	2.00E+17	2.40E+17	0.005	1.20E+15
Te-131m	4.80E+17	5.76E+17	0.005	2.88E+15
Te-132+	4.40E+18	5.28E+18	0.005	2.64E+16
I-131	3.20E+18	3.84E+18	0.01	3.84E+16
I-133	6.30E+18	7.56E+18	0.01	7.56E+16
I-134	7.00E+18	8.40E+18	0.01	8.40E+16
I-135	5.60E+18	6.72E+18	0.01	6.72E+16
Cs-134	2.80E+17	3.36E+17	0.01	3.36E+15
Cs-136	1.10E+17	1.32E+17	0.01	1.32E+15
Cs-137+	1.70E+17	2.04E+17	0.01	2.04E+15
Ba-140+	5.90E+18	7.08E+18	0.002	1.42E+16
Ce-141	5.60E+18	6.72E+18	0.0001	6.72E+14
Ce-143	4.80E+18	5.76E+18	0.0001	5.76E+14
Ce-144+	3.20E+18	3.84E+18	0.0001	3.84E+14
Pr-143	4.80E+18	5.76E+18	0.0001	5.76E+14
Nd-147	2.20E+18	2.64E+18	0.0001	2.64E+14
Np-239	5.90E+19	7.08E+19	0.0001	7.08E+15
Pu-238	2.10E+15	2.52E+15	0.0001	2.52E+11

Pu-239	7.80E+14	9.36E+14	0.0001	9.36E+10
Pu-240	7.80E+14	9.36E+14	0.0001	9.36E+10
Pu-241	1.30E+17	1.56E+17	0.0001	1.56E+13
Am-241	6.30E+13	7.56E+13	0.0001	7.56E+09
Cm-242	1.90E+16	2.28E+16	0.0001	2.28E+12
Cm-244	8.50E+14	1.02E+15	0.0001	1.02E+11

Η έκλυση θεωρείται ότι λαμβάνει χώρα με σταθερό ρυθμό στο διάστημα των 10 ωρών.

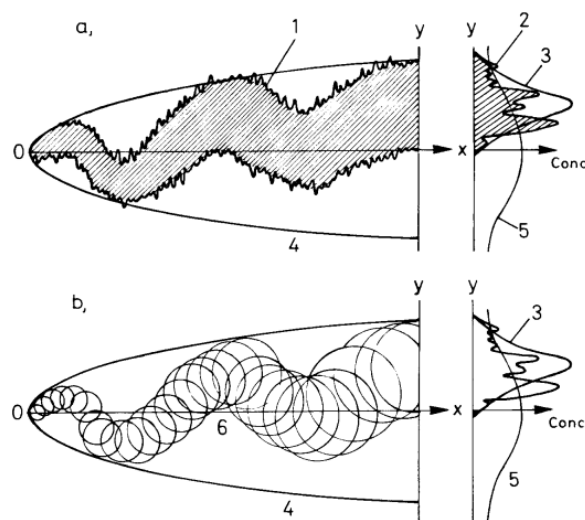
Ο υπολογισμός της μεταφοράς και διασποράς του ραδιενεργού νέφους πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα επαν-ανάλυσης (re-analysis) διαθέσιμα από το την αμερικανική «Εθνική Διοίκηση Ωκεανών και Ατμόσφαιρας» (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) ^[17]. Σημειώνεται ότι τα μετεωρολογικά δεδομένα αυτά είναι προγνωστικά δεδομένα, τα οποία έχουν διορθωθεί αναδρομικά με βάση πραγματικές μετρήσεις σε όλη τη Γη. Για την εκτίμηση της διακύμανσης των πιθανών επιπτώσεων πραγματοποιείται σειρά υπολογισμών, για διαδοχικές μέρες έκλυσης, θεωρώντας μία έκλυση κάθε ημέρα. Συνολικά η σειρά των υπολογισμών καλύπτει το πρώτο εξάμηνο του 2021. Επομένως, πραγματοποιούνται συνολικά 174 προσομοιώσεις του ατυχήματος που περιγράφεται από τον παραπάνω όρο πηγής, μία για κάθε ημέρα και σε τυχαία ώρα έναρξης για κάθε ημέρα. Η κάθε προσομοίωση καλύπτει περιοχή που εκτείνεται στα 800 km γύρω από τον σταθμό, η οποία αποτελεί και τη μέγιστη απόσταση που επιτρέπεται στο JRODOS.

Σημειώνεται ότι γενικά για την πιο αξιόπιστη στατιστική ανάλυση του εύρους των επιπτώσεων είναι επιθυμητό μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, της τάξης των δύο ή τριών ετών. Στο χρονικό πλαίσιο της εκπόνησης της εργασίας, ωστόσο, το διάστημα των έξι μηνών ήταν εφικτό και επιπλέον θεωρείται επαρκές για την πρώτη εκτίμηση των επιπτώσεων. Η μεθοδολογία, η διαδικασία και τα υπολογιστικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν (JRODOS, GIS) ή/και κατασκευάστηκαν (πχ κώδικας Matlab για τη στατιστική επεξεργασία των χωρικών/χρονικών δεδομένων των διάφορων μεγεθών που παρέχονται από το JRODOS) μπορούν άμεσα να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση μεγαλύτερου διαστήματος. Για τον σκοπό αυτό, θα απαιτηθεί φυσικά η λήψη επιπλέον μετεωρολογικών δεδομένων ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται στο σχετικό εγχειρίδιο του JRODOS ^[18]. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι ο όγκος των μετεωρολογικών δεδομένων για το εξάμηνο είναι της τάξης των 264 GB.

3.4. Υπολογισμοί διασποράς

Για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων και των δόσεων που προκύπτουν από τη διασπορά αερομεταφερόμενων στοιχείων χρησιμοποιείται το RIMPUFF (Riso Mesoscale PUFF model). Πρόκειται για ένα Lagrange μοντέλο ατμοσφαιρικής διασποράς, το οποίο λαμβάνει υπόψη τις μετεωρολογικές συνθήκες και εκτιμά τις συνέπειες από ένα ατύχημα. Επίσης, δυνατή είναι η προσομοίωση για μεταβαλλόμενες ώρες εκλύσεων, θεωρώντας μια διαδοχική απελευθέρωση σε ένα καθορισμένο πλέγμα μεγάλου αριθμού υπο-τμημάτων της έκλυσης (puffs), κάθε ένα από τα οποία διασπείρεται ακολουθώντας κατανομή Gauss. Αυτά τα τμήματα σε κάθε χρονικό βήμα είτε διαχέονται είτε εναποτίθενται, βάσει των τοπικών μετεωρολογικών συνθηκών. Οι συγκεντρώσεις και οι δόσεις σε κάθε σημείο του πλέγματος υπολογίζονται ύστερα από άθροιση της συνεισφοράς όλων των τμημάτων που βρίσκονται στο σημείο.

Η βασική αρχή ενός υπολογιστικού μοντέλου τμημάτων της έκλυσης (puff-model) για την προσομοίωση της ατμοσφαιρικής διασποράς μπορεί να γίνει κατανοητή μελετώντας ποιοτικά την εικόνα 3.5. Εκεί απεικονίζεται ένα στιγμιότυπο κάτοψης (top view contour) (σκιασμένη περιοχή) και η κατανομή συγκέντρωσης του νέφους (ραδιονουκλιδίων), κατά τη μέση κατεύθυνση του ανέμου, από το σημείο της έκλυσης. Επιπλέον φαίνεται η μέση μακροπρόθεσμη κατανομή συγκεντρώσεων, όπως αυτή προκύπτει από ένα κλασικό Γκαουσιανό μοντέλο πλουμίου. Στο τμήμα b της εικόνας 3.5, απεικονίζεται ένα βραχυπρόθεσμο τυπικό πλούμιο, όπου κάθε τμήμα της έκλυσης (puff) αντιστοιχεί σε έναν κύκλο. Γνωρίζοντας την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου και ορίζοντας το χρονικό βήμα, είναι δυνατός ο υπολογισμός της μεταφοράς των τμημάτων της έκλυσης (puffs). Ωστόσο πέρα από αυτά, απαραίτητη είναι η γνώση της έντασης των αναταράξεων και της ατμοσφαιρικής τύρβης. ^[19]



Εικόνα 3.5: Προσομοίωση ατμοσφαιρικής διασποράς τμημάτων της έκλυσης (puffs). (a) Συμπεριφορά του πλουμίου, (b) βραχυπρόθεσμη προσομοίωση (Πηγή: S. Thykier-Nielsen, S. Deme, T. Mikkelsen, «Description of the Atmospheric Dispersion Module RIMPUFF, RODOS(WG2)-TN(98)-02», April 1999)

3.4.1. Υπολογισμός συγκεντρώσεων

Η ανάπτυξη των τμημάτων της έκλυσης υπολογίζεται από ταυτόχρονες μετρήσεις ή προδιαγραφές της έντασης των ατμοσφαιρικών αναταράξεων στην περιοχή διασποράς. Το ύψος αναστροφής, το οποίο υποτίθεται δεν διαπερνάται από ρύπους, καθώς και το υψόμετρο της πηγής, μπορούν εύκολα να ρυθμιστούν. Για τον υπολογισμό των δεδομένων, οι αποστάσεις του πλέγματος μπορεί να ποικίλουν από μέτρα έως και χιλιόμετρα, ενώ η χρονική διάρκεια έκλυσης από δευτερόλεπτα έως και ώρες. Επίσης, η ποσότητα ανάκλασης/απορρόφησης του ρύπου στην επιφάνεια του εδάφους και του ύψους αναστροφής ελέγχεται από μία παράμετρο (συνήθως μάλιστα λαμβάνεται υπόψη η ολική ανάκλαση). Η συγκέντρωση σε κάθε σημείο του πλέγματος υπολογίζεται από το μοντέλο αθροίζοντας τις συνεισφορές από τα περιβάλλοντα τμήματα της έκλυσης σε κάθε «βήμα». Οι συγκεντρώσεις/δόσεις στο πλέγμα μπορούν είτε να συσσωρεύονται είτε να ενημερώνονται με τις τελευταίες στιγμιαίες υπολογισμένες τιμές ανά χρονικό βήμα t_{av} . [19]

Τα αποτελέσματα του μοντέλου περιλαμβάνουν αέριες συγκεντρώσεις καθώς και εναποθέσεις (και ρυθμούς δόσεις ακτινοβολίας) σε σημεία του πλέγματος ως συνάρτηση του χρόνου, σε χρονικές στιγμές που καθορίζονται από τον χρήστη. Αφότου υπολογιστεί η μεταφορά και το πλήθος όλων των τμημάτων της έκλυσης, ενημερωμένες συγκεντρώσεις του πλέγματος $x(x_g, y_g, z_g)$ λαμβάνονται για κάθε σημείο του πλέγματος (x_g, y_g, z_g) , αθροίζοντας όλες τις συνεισφορές από τα τμήματα της έκλυσης μέσα στο πλέγμα. Οπότε, υποθέτοντας κατανομή Gauss και λαμβάνοντας υπόψη την ανάκλαση λόγω του εδάφους και του ορίου της αναστροφής, ο υπολογισμός της συγκέντρωσης $[Bq/m^3]$ σε ένα σημείο (x_g, y_g, z_g) του πλέγματος, για πλήθος τμημάτων έκλυσης i , δίνεται από τη σχέση (3.1) [19]:

$$c_i(x_g, y_g, z_g) = \frac{Q(i)}{(2\pi)^{3/2} s(i)_{xy}^2 s(i)_z} \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\left(\frac{x_g - x_c(i)}{s(i)_{xy}} \right)^2 + \left(\frac{y_g - y_c(i)}{s(i)_{xy}} \right)^2 \right) \right] \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z_g - z_c(i)}{s(i)_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z_{inv} - z_c(i)}{s(i)_z} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

όπου

$Q(i)$: ενεργότητα σε κάθε τμήμα έκλυσης (puff inventory)

$x_c(i), y_c(i), z_c(i)$: οι κεντρικές συντεταγμένες του πλήθους αναπνοών (i)

z_{inv} : ύψος αναστροφής

$\sigma_{xy}(i), \sigma_z(i)$: παράμετροι διασποράς αναπνοών σε οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση αντιστοίχως (με $\sigma_{xy}(i) > 0$ και $\sigma_z(i) > 0$)

3.4.2. Παράμετροι διασποράς

Η επέκταση με τον χρόνο ενός μόνο τμήματος έκλυσης σχετίζεται θεμελιωδώς με τη διαδικασία διάχυσης. Στο επίπεδο της επιφάνειας, αυτό περιγράφεται πιο βολικά ως μία συνάρτηση των τοπικών εντάσεων των αναταράξεων και της κατάντι απόστασης. Άρα, οι εντάσεις αναταράξεων πρέπει να περιλαμβάνονται στα δεδομένα, προκειμένη τη βέλτιστη λειτουργία του μοντέλου. Ειδάλλως, απουσία αυτών των δεδομένων, οι πληροφορίες για την τυπική διασπορά πλουμίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως υπαγορεύει το σύστημα Pasquill-Turner ή το σύστημα Karlsruhe-Jülich. Μερικές, μάλιστα, από αυτές τις εκδοχές υλοποιούνται στην έκδοση του RIMPUFF. Σημειώνεται ότι οι παράμετροι διασποράς αποτελούν συνάρτηση της κατάντι απόστασης για όλα τα προαναφερθέντα συστήματα. Σχετικά με την ένταση των αναταράξεων, αυτή είναι συνάρτηση των μετρούμενων μετεωρολογικών δεδομένων. Ωστόσο, επί του παρόντος, χρησιμοποιείται μία τροποποιημένη εκδοχή του συστήματος Pasquill-Turner, με παραμέτρους διασποράς που εξαρτώνται από το ύψος. Η σχέση μεταξύ της κατάντι απόστασης και της παραμέτρου διασποράς μπορεί να είναι γραμμική, πολυωνυμική ή άλλη συνάρτηση. ^[19]

3.5. Εναπόθεση

Κατά την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών συνεπειών από τις εκλύσεις ενός πυρηνικού ατυχήματος, ο υπολογισμός της δόσης που εναπόκειται στο έδαφος έχει πρωτεύουσα σημασία. Ωστόσο, εξαίρεση αποτελούν τα ευγενή αέρια. Η εναπόθεση, λοιπόν, χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: ξηρή εναπόθεση και υγρή εναπόθεση. Η πρώτη προκαλείται από αλληλεπίδραση αερομεταφερόμενων στοιχείων και εδάφους, ενώ η δεύτερη από αλληλεπίδραση στοιχείων και νερού. ^[19]

3.5.1. Ξηρή εναπόθεση

Η ξηρή εναπόθεση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την έννοια της απομείωσης της πηγής (source depletion), δηλαδή υποτίθεται πλήρης ανάμιξη μεταξύ των αερομεταφερόμενων στοιχείων, δίχως καμιά διόρθωση για την αισθητή μείωση κοντά στην επίγεια επιφάνεια. Σχετικά με τις παραμέτρους της ξηρής εναπόθεσης, αυτές επιλέγονται για κάθε τμήμα της έκλυσης, ανάλογα με το ισότοπο, την ταχύτητα του ανέμου, την ατμοσφαιρική σταθερότητα καθώς και την τραχύτητα της επιφάνειας. Συγκεκριμένα, η ξηρή εναπόθεση μοντελοποιείται στο RODOS μέσω μίας «ταχύτητας ξηρής εναπόθεσης» V_d [m/s], η οποία συνήθως κυμαίνεται στο 1 mm/s. Η καθοδική ροή F_d [$Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$] υπολογίζεται στο RODOS από την ταχύτητα V_d επί τη συγκέντρωση στο επίπεδο του εδάφους Π. Έτσι, η εναπόθεση στο επίπεδο του εδάφους εξαρτάται αποκλειστικά από τις προαναφερθείσες, εξίσου σημαντικές, ποσότητες. ^[19]

Οι ρυθμοί ξηρής εναπόθεσης διαφέρουν από ατμούς σε σωματίδια, αλλά και οι δύο εξαρτώνται άμεσα από την επιφάνεια. Επομένως, διαφορετικά υλικά έχουν διαφορετική εναπόθεση σε διαφορετικές επιφάνειες. Συγκεκριμένα, η ταχύτητα ξηρής εναπόθεσης για αεροζόλ είναι συνάρτηση της ταχύτητας τριβής (friction velocity) και της ταχύτητας του ανέμου, όπως φαίνεται στη σχέση (3.2):

$$V_d \approx \frac{u_*^2}{u_-} \quad (3.2)$$

Ο τύπος της επιφάνειας του εδάφους μπορεί να ληφθεί υπόψη στην παρούσα έκδοση του μοντέλου. Επομένως είναι εφικτή η αναγνώριση του εδάφους, δηλαδή αν πρόκειται για αστική ή αγροτική ή δασική ή θαλάσσια επιφάνεια, χάρη στην επιφανειακή αντίσταση. Η τελευταία μάλιστα εξαρτάται από την τραχύτητα και την ταχύτητας τριβής (friction velocity). ^[19]

3.5.2. Υγρή εναπόθεση

Η κατάπτωση νερού (βροχή, χιόνι, χαλάζι) είναι ικανή να «καθαρίσει» ένα μολυσμένο πλούμιο. Τόσο τα αέρια όσο και τα στερεά σωματίδια μέσα στο πλούμιο διαλύονται από το νερό. Μάλιστα όσο πιο έντονη η κατάπτωση νερού, τόσο πιο αποτελεσματικά πραγματοποιείται αυτό. Επίσης, σημασία έχουν και τα χαρακτηριστικά του ρύπου, όπως η διαλυτότητα των αερίων και το σχήμα, ο όγκος και η πυκνότητα των στερεών σωματιδίων. Ωστόσο, η επίδραση μίας βροχόπτωσης αποτελεί κύριο παράγοντα μόλυνσης του εδάφους. Όσον αφορά την υγρή εναπόθεση, αυτή μοντελοποιείται παρομοίως με την ξηρή εναπόθεση, μόνο που σε αυτή την περίπτωση η ταχύτητα εναπόθεσης αντικαθίσταται από έναν συντελεστή εκκαθάρισης (wash-out) λ [s^{-1}], το μέγεθος του οποίου εξαρτάται από την ένταση της βροχής I [$mm\ h^{-1}$] και περιγράφεται από τη σχέση (3.3):

$$\lambda [s^{-1}] = \Lambda I^\alpha \quad (3.3)$$

όπου ο συντελεστής Λ κυμαίνεται μεταξύ [3×10^{-5} , 3×10^{-3}] και ο εκθέτης α μεταξύ [0.5, 1] αναλόγως το μέγεθος του πυρήνα και του σωματιδίου. ^[19]

Συγκεκριμένα, στην παρούσα έκδοση του RIMPUFF χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες τιμές (Πίνακας 3.2) για τις αντίστοιχες παραμέτρους εναπόθεσης:

Πίνακας 3.2: Ομάδα ισοτόπων και παράμετροι εναπόθεσης

Ομάδα ισοτόπου	Όνομα ομάδας	Βασική παράμετρος ξηρής εναπόθεσης [m/s]	Παράμετρος υγρής εναπόθεσης [s^{-1}]
1	Noble gases	-	-
2	Iodine elementary	0.01	$8.0E-5 \times \Lambda^{0.6}$
3	Iodine organic	0.0005	$8.0E-7 \times \Lambda^{0.6}$
4	Aerosols	0.001	$8.0E-5 \times \Lambda^{0.8}$

Πηγή: S. Thykier-Nielsen, S. Deme, T. Mikkelsen, «Description of the Atmospheric Dispersion Module RIMPUFF, RODOS(WG2)-TN(98)-02», April 1999

Σημείωση: Οι παράμετροι ξηρής και υγρής εναπόθεσης είναι οι ίδιοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται από το πρωτότυπο σύστημα του RODOS, όπου Λ είναι η ένταση της βροχόπτωσης μετρούμενη σε mm/h.

3.6. Υπολογισμός δόσης λόγω γ ακτινοβολίας από το νέφος και την εναπόθεση

Το RIMPUFF περιέχει μοντέλα για τον υπολογισμό των εξωτερικών δόσεων γ , οι οποίες προέρχονται τόσο από αερομεταφερόμενη όσο εναποτιθέμενη ραδιενέργεια. ^[19]

3.6.1. Ρυθμός γ δόσης από τμήματα του νέφους (puffs)

Η μέθοδος υπολογισμού του ρυθμού δόσης γ για έναν συγκεκριμένο υποδοχέα, για ένα τμήμα έκλυσης, για κάθε τιμή ενέργειας ακτινοβολίας γ , προκύπτει από την επίλυση της εξίσωσης (3.4) σε Gy/s:

$$d(Q, E_\gamma, \sigma_y, \sigma_z, H, R_{xy}) = 2K\sigma_{en}E \int_{x=-\infty}^{\infty} \int_{y=0}^{\infty} \int_{z=-\infty}^{\infty} \frac{B(\mu r)}{4\pi r^2} e^{-\mu r} \chi(x, y, z) dx dy dz \quad (3.4)$$

όπου

Q: ραδιενέργεια από ένα τμήμα έκλυσης [Bq]

E_γ : τιμή ενέργειας της ακτινοβολίας γ [MeV]

σ_y : παράμετρος διασποράς τμήματος έκλυσης λόγω ανέμου [m] ($\sigma_x = \sigma_y$)

σ_z : κατακόρυφη παράμετρος διασποράς τμήματος έκλυσης [m]

H: ύψος του τμήματος έκλυσης [m]

R_{xy} : απόσταση τμήματος έκλυσης με συντεταγμένες $x=y=0$, $z=-H$ από το σημείο ενδιαφέροντος [m]

K: σταθερά ίση με 1.6×10^{-13} [Gy/s/MeV/kg]

σ_{en} : συντελεστής απορρόφησης ενέργειας για τον αέρα [m²/kg]

B: παράγοντας συσσώρευσης

μ : γραμμικός συντελεστής απόσβεσης για τον αέρα [m⁻¹]

r: απόσταση του όγκου $dx dy dz$ από το σημείο του παραλήπτη σε απόσταση R_{xy} από το κέντρο του τμήματος έκλυσης

$\chi(x, y, z)$: η συγκέντρωση στο σημείο x, y, z [Bq/m³], η οποία δίνεται από τη σχέση (3.5)

$$\chi(x, y, z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_y^2 \sigma_z} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (3.5)$$

Ωστόσο, δεδομένου ότι αυτός ο υπολογισμός είναι πολύ χρονοβόρος, η χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η ακόλουθη. Η εξίσωση για τον ρυθμό δόσης επιλύεται για διαφορετικά σετ παραμέτρων (σ_y , σ_z/σ_y , H, R_{xy} και E_γ), επιλύοντας αριθμητικά το ολοκλήρωμα. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα πινακοποιούνται και χρησιμοποιούνται για ταχύτερο υπολογισμό των γ δόσεων από το νέφος. ^[19]

3.6.2. Ρυθμός –γ δόσης από την εναπόθεση

Ο ρυθμός δόσης από τα ισότοπα που συσσωρεύονται στην επιφάνεια του εδάφους λόγω ξηρής και υγρής εναπόθεσης υπολογίζονται από την ποσότητα της εναποτιθέμενης ραδιενέργειας και από σταθερές σχετικές με τις δόσεις, θεωρώντας μία ημι-άπειρη επίπεδη πηγή και ένα χρονικό βήμα για την οριζόντια μεταφορά. Η διάσπαση των ισωτόπων καθώς και η παραγωγή θυγατρικών στοιχείων στην επιφάνεια του εδάφους λαμβάνονται επίσης υπόψη. ^[19]

Το πλήθος των μητρικών και θυγατρικών στοιχείων προκύπτει ύστερα από επίλυση συνόλου εξισώσεων της μορφής (3.6). ^[19]

$$\frac{dQ_i(t)}{dt} = -\lambda_i Q_i(t) + \lambda_i f_{j,i} \sum_{j=1}^{i-1} Q_j(t) - G_i(t) Q_i(t) \quad (3.6)$$

όπου

t = ο χρόνος μεταφοράς

$Q_i(t)$ = πλήθος ισωτόπων νούμερου i σε χρόνο t

$f_{j,i}$ = αναλογία διάσπασης του ισωτόπου νούμερου i προς σχηματισμό ισωτόπου νούμερου j

$G_i(t)$ = συνάρτηση παραγωγής/εξάντλησης ισωτόπου νούμερου i

i = αριθμός ισωτόπου. Το πρώτο ισότοπο μίας αλυσίδας αποσύνθεσης είναι το νούμερο 1, το επόμενο είναι το 2, κλπ.

3.7. Μετεωρολογικά δεδομένα

Τα μετεωρολογικά δεδομένα λαμβάνονται από την αμερικανική «Εθνική Διοίκηση Ωκεανών και Ατμόσφαιρας» (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA). Πρόκειται για μία επιστημονική και ρυθμιστική υπηρεσία με έδρα την Ουάσιγκτον, η οποία υπάγεται στο Υπουργείο Εμπορίου των Ηνωμένων Πολιτειών.

Η υπηρεσία αυτή είναι υπεύθυνη για πρόγνωση καιρού, προειδοποιήσεις για ισχυρές θύελλες, παρακολούθηση του κλίματος, διαχείριση της αλιείας και αποκατάσταση των ακτών. Τονίζεται μάλιστα ότι οι υπηρεσίες του NOAA υποστηρίζουν την οικονομία και επηρεάζουν περισσότερο από το ένα τρίτο του ακαθάριστου εγχωρίου προϊόντος της Αμερικής. Ωστόσο, η συνεισφορά του NOAA εκτείνεται και πέρα από τα εθνικά του σύνορα, με στόχο την παρακολούθηση του καιρού και του κλίματος σε παγκόσμια κλίμακα, μέσα στα πλαίσια διεθνών συνεργασιών. ^[17]

Τα βασικά μετεωρολογικά δεδομένα που απαιτούνται από το JRodos περιλαμβάνουν τα εξής: ^[19]

- Πεδίο ταχύτητας και κατεύθυνσης ανέμου
- Πεδίο ευστάθειας
- Πάχος στρώματος αναστροφής (inversion layer)
- Πεδίο βροχόπτωσης
- Τοπογραφικά δεδομένα

Στον Πίνακα 3.3 φαίνεται το σετ μετεωρολογικών δεδομένων.

Πίνακας 3.3: Υπολογιστική δομή του μοντέλου RIMPUFF στο JRodos

Εισαγωγή δεδομένων	Υπολογισμοί	Εξαγωγή αποτελεσμάτων
(a) Χρονοεξαρτώμενα δεδομένα:	- Παραγωγή και μεταφορά των κέντρων των τμημάτων έκλυσης βάσει του πεδίου ανέμου	- Χρονική ολοκλήρωση συγκεντρώσεων ραδιονουκλιδίων και ρυθμών δόσεων γ στα σημεία του πλέγματος
- Μετεωρολογικά (πεδίο ανέμου, πεδίο ευστάθειας, πεδίο βροχόπτωσης)	- Υπολογισμός μεγέθους και καταγραφή ραδιονουκλιδίων από κάθε τμήμα έκλυσης	
- Δεδομένα έκλυσης	- Υπολογισμός γ δόσεων	

Πηγή: S. Thykier-Nielsen, S. Deme, T. Mikkelsen, «Description of the Atmospheric Dispersion Module RIMPUFF, RODOS(WG2)-TN(98)-02», April 1999

Όπως σημειώθηκε παραπάνω, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία έχουν παραχθεί από επαν-ανάλυση προγνωστικών δεδομένων. Τα δεδομένα είναι σε μορφή grib2, καλύπτουν διάστημα έξι μηνών, από 01/01/2021 έως 30/06/2021, και παρέχονται ανά έξι ώρες σε χωρικό πλέγμα με διαμέριση ίση με 0.5 μοίρες. Η λήψη τους έγινε από τους Nomads servers του US NOAA στους οποίους είναι διαθέσιμα τα προϊόντα του National Center for Environmental Prediction (NCEP).

3.8. Εσωτερική δόση από κατάποση

Η εσωτερική δόση από κατάποση στον άνθρωπο είναι μία χρονοεξαρτώμενη συνάρτηση η οποία σχετίζεται με τη συγκέντρωση ραδιονουκλιδίων στα τρόφιμα καθώς και με τον ρυθμό κατανάλωσης τροφίμων και περιγράφεται από την εξίσωση 3.7: [20]

$$A_h(t) = \sum_{k=1}^K C_k(t) V_k(t) \quad (3.7)$$

Όπου $A_h(t)$ = ανθρώπινος ρυθμός πρόσληψης ($Bq\ d^{-1}$)

K = αριθμός θεωρούμενων τροφίμων (επιλέγεται η προεπιλεγμένη τιμή από το JRodos)

$C_k(t)$ = συγκέντρωση ($Bq\ kg^{-1}$) στα τρόφιμα k (επιλέγεται η προεπιλεγμένη τιμή από το JRodos), λαμβάνοντας υπόψη τη μεταφορά ραδιονουκλιδίων από τα φυτά στα ζώα και κατά επέκταση στον άνθρωπο [20]

$V_k(t)$ = ρυθμός κατανάλωσης ($kg\ d^{-1}$) των k τροφίμων (επιλέγεται η προεπιλεγμένη τιμή από το JRodos)

Κατά το FDMT (που χρησιμοποιείται στο Jrodos) τα τρόφιμα που καταναλώνονται θεωρείται ότι παράγονται τοπικά, δηλαδή οι υπολογιζόμενες δόσεις αφορούν πιθανές δόσεις για ανθρώπους που καταναλώνουν μόνο τοπικά τρόφιμα. Επίσης λαμβάνονται υπόψη οι ρυθμοί κατανάλωσης βάσει της ηλικίας, ακόμα και των διατροφικών συνθηκών των ανθρώπων (χορτοφάγοι, ψαράδες), ώστε να εκτιμηθούν επακριβέστερα οι δόσεις από κατάποση. Λόγω αβεβαιότητας για τους διάφορους προαναφερθέντες ρυθμούς κατανάλωσης και λόγω διαφορετικών ρυθμών κατανάλωσης, αναμένεται ποικιλία εσωτερικής δόσης από κατάποση από άνθρωπο σε άνθρωπο. [20]

Βέβαια οι διατροφικές συνήθειες μπορεί να εξαρτώνται και από την εποχή. Για τον λόγο αυτό, στο προεπιλεγμένο σετ δεδομένων θεωρείται ότι η κατανάλωση διαφόρων λαχανικών το καλοκαίρι είναι αυξημένη, ενώ το χειμώνα είναι μειωμένη. Συγκεκριμένα, για την περίοδο Μάιος-Οκτώβριος ορίζεται συντελεστής κατανάλωσης 1.5, ενώ για την περίοδο Νοέμβριος-Απρίλιος ο αντίστοιχος συντελεστής είναι 0.1. [20]

Η δόση $D_{ing}(T)$ λόγω κατάποσης μολυσμένης τροφής εντός χρόνου T μετά την απόθεση δίνεται από τη σχέση (3.8): [20]

$$D_{ing}(T) = \int_0^T A_h(t) g_{Ing}(t) dt \quad (3.8)$$

Όπου $D_{ing}(T)$ = η δόση από κατάποση (Sv)

$G_{ing}(t)$ = ο εξαρτώμενος από την ηλικία συντελεστής κατάποσης ($Sv\ Bq^{-1}$)

Σημειώνεται ότι οι παραπάνω συντελεστές δόσεις, που εφαρμόζονται στο FDMT, υπολογίζονται από το εσωτερικό πρόγραμμα δοσιμετρίας «PLEIADES», το οποίο είναι συμβατό με τις εκδόσεις ICRP-68, ICRP-72 και IAEA BSS. ^[20]

3.9. Δόση εισπνοής από το πλούμιο

Η δόση D_{Inh} εξαιτίας της εισπνοής ραδιονουκλιδίων κατά τη διάρκεια περάσματος του πλουμίου υπολογίζεται από την χρονικά ολοκληρωμένη συγκέντρωση του αέρα κοντά στο έδαφος, του ρυθμού αναπνοής καθώς και την ηλικία του ανθρώπου (5 ηλικιακές ομάδες). Επίσης μπορεί να εφαρμοστεί παράγοντας μείωσης λόγω μειωμένης συγκέντρωσης στον αέρα εντός των σπιτιών. Η δόση D_{Inh} δίνεται από τη σχέση 3.9: ^[20]

$$D_{Inh} = C_{air} \times I_{Inh} \times g_{Inh} \times R_{Inh} \quad (3.9)$$

Όπου D_{Inh} = η δόση από την εισπνοή (Sv)

C_{air} = η χρονικά ολοκληρωμένη συγκέντρωση στον αέρα ($Bq \cdot h \cdot m^{-3}$)

I_{Inh} = ο ρυθμός εισπνοής ($m^3 \cdot h^{-1}$)

g_{Inh} = ο συντελεστής δόσης για εισπνοή ($Sv \cdot Bq^{-1}$)

R_{Inh} = ο συντελεστής τοποθεσίας για διαμονή στο σπίτι (επιλέγεται η προεπιλεγμένη τιμή από το JRodos)

Ωστόσο, πέρα από την εισπνοή ραδιονουκλιδίων, είναι δυνατή η πρόσληψη δόσης από εισπνοή επαναιωρούμενων ραδιονουκλιδίων. Τόσο για την πρόσληψή τους, όσο και γενικότερα για τη μεταφορά τους, μπορεί κανείς να ανατρέξει για περισσότερες λεπτομέρειες στην αντίστοιχη πηγή. ^[20]

3.10. Κριτήρια δόσης

Τα επίπεδα αναφοράς για την προστασία του πληθυσμού σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης μπορεί να οριστούν βάσει της ισοδύναμης δόσης ή της ενεργού δόσης σε όργανο ή ιστό, όπως αυτό σημειώνεται στο Παράρτημα Ι της Οδηγίας 59/2013/ΕΥΡΑΤΟΜ. Ωστόσο, όπως τονίζεται από τον ΔΟΑΕ ^[21], δεν αρκεί η εκτίμηση της ενεργού δόσης για την προστασία του πληθυσμού. Αυτό γιατί, ακόμα και αν η ενεργός δόση παραμένει κάτω από τα επίπεδα αναφοράς, η ισοδύναμη δόση στον θυρεοειδή ή στο έμβρυο, λόγω έκθεσης σε ραδιενεργό ιώδιο, ενδέχεται να ξεπεράσει κατά πολύ τα κριτήρια δόσης. Η δόση στον θυρεοειδή μπορεί να φτάσει ακόμα και σε επίπεδα συγκρίσιμα με τα επίπεδα εμφάνισης σοβαρών ντετερμινιστικών επιπτώσεων, ενώ συγχρόνως η ενεργός δόση να παραμένει σε επίπεδα συγκρίσιμα ή και κάτω από τα κριτήρια για την προστασία έναντι στοχαστικών επιπτώσεων.

Τα επίπεδα αναφοράς που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία για την αξιολόγηση της έκθεσης, λαμβάνοντας υπόψη τα γενικά κριτήρια για χρήση σε έκτακτη ανάγκη του ΔΟΑΕ ^{[21]-[24]}, παρουσιάζονται στον πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4: Κριτήρια δόσης που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία

Δοσιμετρικό μέγεθος	Επίπεδο δόσης
Ντετερμινιστικές επιπτώσεις	
Απορροφούμενη δόση στο έμβρυο	100 Gy
Απορροφούμενη δόση στον θυρεοειδή	10000 Gy
Στοχαστικές επιπτώσεις	
Ενεργός δόση	20-100 mSv
Ισοδύναμη δόση στο έμβρυο	20-100 mSV
Ισοδύναμη δόση στον θυρεοειδή	50 mSv

Οι παραπάνω δόσεις αναφέρονται στην προβαλλόμενη, παραμένουσα δόση στον πληθυσμό, λαμβάνοντας υπόψη τη μείωση της έκθεσης λόγω της εφαρμογής μέτρων προστασίας. Πρόκειται μάλιστα για το μέγιστο μέγεθος της έκθεσης που επιτρέπεται κατά τον σχεδιασμό της προετοιμασίας. Υπογραμμίζεται δε, ότι όπως καθορίζεται στο άρθρο 7 της οδηγίας 59/2013/ΕΥΡΑΤΟΜ (άρθρο 7 ΠΔ 101/2018) και είναι επίσης διεθνώς αποδεκτό (ICRP 2007, ICRP 2009, IAEA 2015): «Η προστασία του πληθυσμού θα πρέπει να δίνει προτεραιότητα σε εκθέσεις πάνω από τα επίπεδα αναφοράς, αλλά να συνεχίζεται με σκοπό τη βελτιστοποίηση και για τιμές έκθεσης κάτω από αυτά».

Ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της δυνητικής έκθεσης του πληθυσμού, σε τέτοιο βαθμό ώστε τα μέτρα προστασίας να εφαρμόζονται με ασφάλεια και να μην προκαλούνται σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στην οικονομία, στην υγεία και στην κοινωνία γενικότερα. Κατά την ανάπτυξη στρατηγικής προστασίας, πέρα από την εκτίμηση των

δυνητικών δόσεων, αξία έχει τόσο η αποδοχή των μέτρων από την τοπική κοινωνία, όσο και η επιτευξιμότητά τους. Όμως σε εξαιρετικά επείγουσα κατάσταση, όπου ξεπερνάται το διεθνές επίπεδο αναφοράς των 100 mSv, απαιτείται η εφαρμογή μέτρων ακόμα και με σημαντικό κοινωνικό αντίκτυπο (π.χ. εκκένωση ή μετεγκατάσταση).

4. Μεθοδολογία

4.1. Διαδικασία υπολογισμών

Η διαδικασία των υπολογισμών περιλαμβάνει τρία βασικά βήματα: αρχικά ορίζεται και πραγματοποιείται η σειρά των υπολογισμών ατμοσφαιρικής διασποράς και έκθεσης έκθεσης χρησιμοποιώντας το εργαλείο «Statistic Output tool» του JRodos. Οι υπολογισμοί αυτοί παράγουν τις επιλεγμένες παραμέτρους (πχ. συγκεντρώσεις ανά νουκλίδιο, δόση για διάφορες οδούς) σε κάθε κελί του υπολογιστικού πλέγματος. Συνολικά παράγονται 174 σειρές τέτοιων δεδομένων (αρχείων), ένα για κάθε προσομοίωση έκλυσης. Στη συνέχεια ο όγκος των δεδομένων (συγκεντρώσεις, δόσεις σε κάθε κελί του υπολογιστικού πλέγματος) επεξεργάζεται στατιστικά για τον υπολογισμό της μέσης και μέγιστης τιμής σε κάθε κελί. Η επεξεργασία αυτή γίνεται εξωτερικά από το JRodos με χρήση κώδικα που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία σε περιβάλλον Matlab R2019 (Mathworks 2019). Τα επεξεργασμένα δεδομένα μετατρέπονται σε μορφή κατάλληλη να εισαχθούν σε πρόγραμμα GIS (QGIS ^[25]), όπου και τελικά παράγονται οι τελικοί χάρτες των αποτελεσμάτων. Για την επαναληπτική διαδικασία των υπολογισμών για τις διαφορετικές ημερομηνίες έκλυσης απαιτείται ο ορισμός ενός προτύπου σεναρίου, το οποίο θα επαναλαμβάνεται για κάθε προσομοίωση. Το πρότυπο αυτό σενάριο αφορά στην προσομοίωση της ατμοσφαιρικής διασποράς και έκθεση για τον όρο πηγής που περιγράφηκε προηγουμένως και για χρονικό διάστημα συνολικά 120 ώρες (διάρκεια πρόγνωσης) από την έναρξη της έκλυσης. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, όπως έχει φανεί και από τους υπολογισμούς, το νέφος ξεπερνά τα όρια των 800 km του ευρύτερου δυνατού πλέγματος που επιτρέπεται στο JRodos. Το πλέγμα αυτό, λόγω της μεγάλης απόστασης από τον σταθμό, καλύπτει μόνο ένα μικρό μέρος της Ελλάδας. Ωστόσο, η συνολική εικόνα της διασποράς και της έκθεσης, και ειδικά η μέση και μέγιστη τιμή ανά κελί, επιτρέπουν την εκτίμηση τουλάχιστον ποιοτικά του πιθανού εύρους των επιπτώσεων στη χώρα. Κάθε προσομοίωση εκτελείται με χρονικό βήμα 60 λεπτών για κάθε μία από τις 174 ημέρες που μελετώνται.

Περισσότερες λεπτομέρειες για τα επιμέρους βήματα δίνονται παρακάτω.

Αφότου τα δεδομένα εισαχθούν στο πρόγραμμα JRodos, αρχικά πραγματοποιείται μία εικονική προσομοίωση της ατμοσφαιρικής διασποράς και έκθεσης για να δημιουργηθεί το αρχείο εισόδου («XML file»), το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως πρότυπο για την αυτόματη εκτέλεση της σειράς των προσομοιώσεων από το «Statistics Output». Για την προσομοίωση αυτή απαιτούνται τα παρακάτω δεδομένα:

- Γεωγραφικές συντεταγμένες πηγής
- Όρος πηγής
- Ημερομηνία έναρξης έκλυσης και ημερομηνία λήξης μελετώμενης περιόδου

- Διάρκεια έκλυσης
- Διάρκεια πρόγνωσης
- Μετεωρολογικά δεδομένα
- Χρονικό βήμα μελέτης

Τα αποτελέσματα των παραμέτρων ενδιαφέροντος σε όλα τα κελιά του πλέγματος αποθηκεύονται σε αρχεία ένα για κάθε ημέρα.

Το εργαλείο που χρησιμοποιείται για την αυτόματη εκτέλεση της σειράς των προσομοιώσεων είναι το «Statistic Output», το οποίο είναι ένα από τα «Tools» του JRodos. Στη συνέχεια θα περιγραφεί περιεκτικά ο τρόπος λειτουργίας του.

Για κάθε ημέρα, επιλέγεται τυχαία η χρονική στιγμή έναρξης της έκλυσης. Η ατμοσφαιρική διασπορά και η επακόλουθη έκθεση του πληθυσμού καθορίζονται από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες κατά τη μεταφορά του νέφους, οι οποίες είναι διαφορετικές για κάθε μια προσομοίωση, καθώς αναφέρονται σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα εντός του εξαμήνου που εξετάζεται.

Όπως έχει αναφερθεί η διάρκεια έκλυσης, λαμβάνεται ίση με 10 ώρες. Το νέφος από την έκλυση των 10 ωρών μεταφέρεται σύμφωνα με τα δεδομένα καιρού. Για κάθε μία από τις 174 ημέρες που μελετώνται, πραγματοποιείται πρόγνωση της μεταφοράς του νέφους για διάρκεια 120 ωρών, με χρονικό βήμα 1 ώρας. Άρα, συνολικά προκύπτουν τιμές των μεταβλητών ενδιαφέροντος (πχ συγκεντρώσεις ή δόσεις) που στο πλήθος τους ισοδυναμούν με $174 \text{ ημέρες} \times 120 \text{ ώρες} \times 8056 \text{ σημεία του πλέγματος}$.

Οι παραπάνω τιμές εξάγονται πινακοποιημένες σε αρχεία ένα για κάθε μέρα της μελετώμενης περιόδου, σε μορφή πίνακα με 121 στήλες (1 στήλη για τον προσδιορισμό του σημείου πλέγματος συν 120 που αντιστοιχούν στις ώρες της διάρκειας πρόγνωσης) και 8056 σειρές (8056 σημεία του πλέγματος). Αυτό το πλήθος αρχείων αποθηκεύεται στον αντίστοιχο προ-δημιουργημένο φάκελο, έναν για κάθε είδος μελετώμενης δόσης. Άρα εντέλει, υπάρχουν τόσοι φάκελοι όσα και τα μελετώμενα είδη δόσεων και τόσα αρχεία μέσα σε κάθε φάκελο όσα και οι μελετώμενες 174 μέρες.

4.2. Στατιστική επεξεργασία

Η στατιστική επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων που παράγονται από το JRodos πραγματοποιείται με δημιουργία προγράμματος σε υπολογιστικό/προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab R2019b. Σκοπός είναι ο υπολογισμός της μέγιστης και της μέσης τιμής κάθε είδους μελετώμενης δόσης ή συγκέντρωσης ενεργότητας, για κάθε σημείο του πλέγματος. Επιλέγεται δηλαδή η εύρεση της μέγιστης τιμής για να καλύπτεται η χειρίστη περίπτωση, καθώς και της μέσης τιμής, ώστε να καλύπτεται η περίπτωση μίας πιθανώς αναμενόμενης τιμής.

Συγκεκριμένα, η μεθοδολογία που εφαρμόζεται στο πρόγραμμα Matlab για κάθε είδος δόσης ξεχωριστά είναι η ακόλουθη:

1. Άνοιγμα του συνόλου αρχείων από τον φάκελο της εκάστοτε δόσης.
2. Διάβασμα των τιμών εντός του προαναφερθέντος συνόλου αρχείων. Άρα δηλαδή διαβάζονται οι τιμές από τα 174 αρχεία (174 το πλήθος ημερών), σε μορφή πίνακα με 121 στήλες και 8056 σειρές, όπως δηλαδή έχει προσδιοριστεί στην προηγούμενη παράγραφο.
3. Δεδομένου ότι μελετάται η αθροιστική δόση σε κάθε σημείο του πλέγματος, η οποία είναι η μέγιστη και εμφανίζεται την τελευταία ώρα πρόγνωσης (120^η ώρα), οι τιμές μόνο της τελευταίας στήλης κάθε αρχείου (που αντιστοιχούν στην 120^η ώρα) αποθηκεύονται σε νέο πίνακα. Συνεπώς δημιουργείται πίνακας που περιλαμβάνει 8056 σειρές (όσες το πλήθος των σημείων του πλέγματος) και 174 στήλες (όσες οι μελετώμενες μέρες) και περιέχει τις αθροιστικές/μέγιστες τιμές δόσεων, που εμφανίζονται την 120^η ώρα.
4. Δημιουργία τελικών πινάκων, οι οποίοι αποτελούνται από 4 στήλες (αριθμητική ονομασία σημείου πλέγματος, γεωγραφική τετμημένη σημείου, γεωγραφική τεταγμένη σημείου, τιμή δόσης) και 8057 σειρές (1 για την καταγραφή τίτλων των στηλών και 8056 για κάθε σημείο). Οι τιμές δόσεων που περιέχονται εδώ είναι η μέγιστη της σειράς (δηλαδή η μέγιστη που εμφανίζεται σε κάθε σημείο του πλέγματος) και η μέση (αντιστοίχως για κάθε σημείο από τα 8056 του πλέγματος) αντιστοίχως. Οι τιμές αυτές υπολογίζονται ύστερα από υπολογισμό στη Matlab.
5. Ξεχωριστή αποθήκευση καθενός τελικού πίνακα σε προ-δημιουργημένο αρχείο txt, ώστε να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια ως δεδομένο για την απεικόνιση των δόσεων πάνω σε χάρτη.

Ο κώδικας Matlab που αναπτύχθηκε για τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων του JRodos για τον όρο πηγής του Διεθνή Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας δίνεται στο Παράρτημα 1.















4.3. Δημιουργία χαρτών αποτελεσμάτων

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται η επεξεργασία και η δημιουργία χαρτών αποτελεσμάτων, τα οποία λαμβάνονται σε αρχείο txt από το Matlab, πάνω σε χάρτη. Η διαδικασία αυτή επιλέγεται να πραγματοποιηθεί με τη χρήση του ελεύθερου προγράμματος GIS (Open Source Geographic Information System, QGIS 3.28 Firenze) ^[25].

Όσον αφορά το QGIS, πρόκειται για ένα φιλικό προς τον χρήστη Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών Ανοικτού Κώδικα. Οι δυνατότητες του QGIS περιλαμβάνουν τη διαχείριση, επεξεργασία και οπτικοποίηση δεδομένων σε γεωγραφικές συντεταγμένες. Επίσης παρέχει τη δυνατότητα εύκολης κοινής χρήσης και εξαγωγής των διαγραμμάτων/χαρτών σε διάφορες μορφές αρχείων, όπως «shapfiles», «KML files», κ.ά. ^[25]

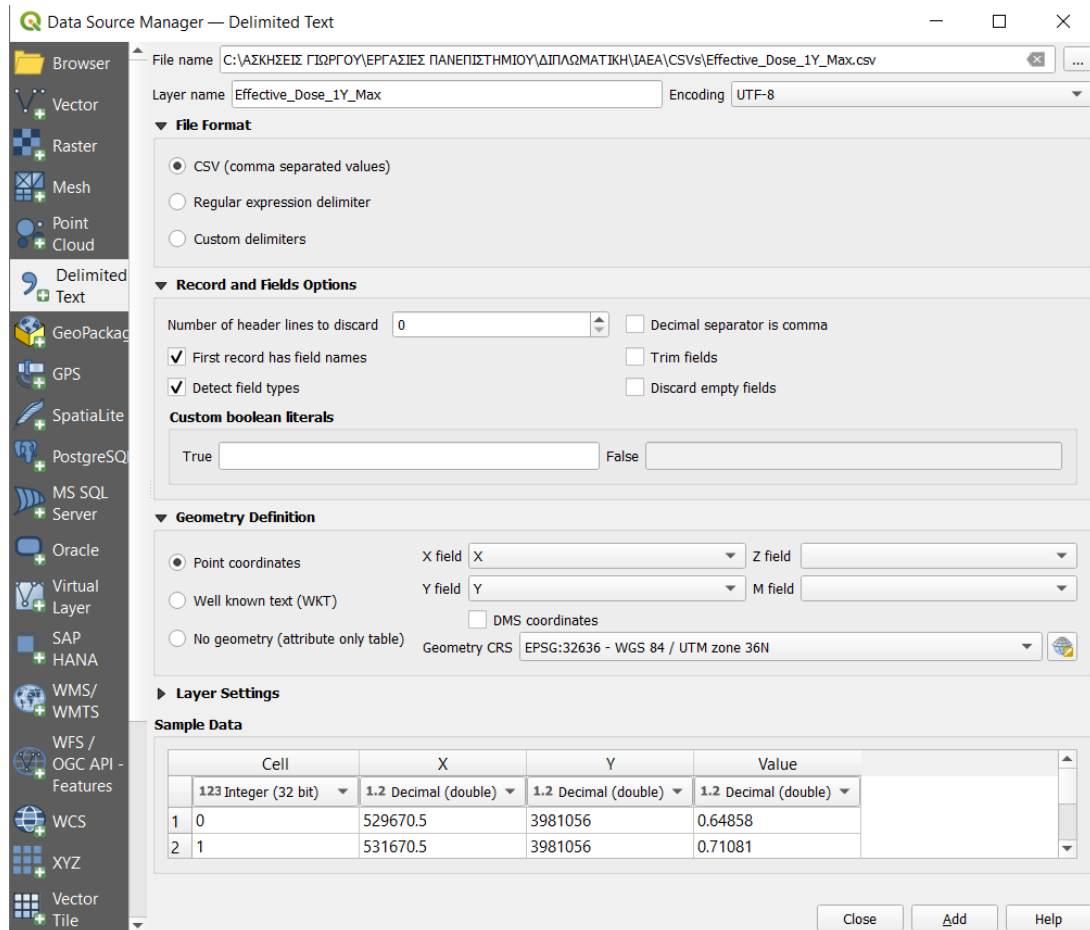
Συγκεκριμένα, η μεθοδολογία που εφαρμόζεται στο QGIS για κάθε είδος δόσης ξεχωριστά είναι η ακόλουθη:

1. Άνοιγμα και αποθήκευση των τιμών που βρίσκονται στο αρχείο txt σε μορφή csv. Παράδειγμα της μορφής ενός τέτοιου αρχείου δίνεται στην εικόνα 4.1.

 Effective_Dose_1Y_Max.csv	18/04/2023 16:15	Αρχείο τιμών δια...	251 KB
 Effective_Dose_1Y_Mean.csv	18/04/2023 16:17	Αρχείο τιμών δια...	255 KB
 Effective_Dose_Adults_Max.csv	18/04/2023 16:18	Αρχείο τιμών δια...	251 KB
 Effective_Dose_Adults_Mean.csv	18/04/2023 16:19	Αρχείο τιμών δια...	255 KB
 Ground_Contamination_Drywet_Max.csv	04/04/2023 16:26	Αρχείο τιμών δια...	260 KB
 Ground_Contamination_Drywet_Mean.csv	04/04/2023 16:28	Αρχείο τιμών δια...	256 KB
 Ground_Effective_Max.csv	04/04/2023 16:29	Αρχείο τιμών δια...	261 KB
 Ground_Effective_Mean.csv	04/04/2023 16:30	Αρχείο τιμών δια...	261 KB
 Inhalation_Dose_Effective_Max.csv	04/04/2023 16:31	Αρχείο τιμών δια...	244 KB
 Inhalation_Dose_Effective_Mean.csv	04/04/2023 16:33	Αρχείο τιμών δια...	252 KB
 Total_Potential_Effective_Max.csv	04/04/2023 16:34	Αρχείο τιμών δια...	244 KB
 Total_Potential_Effective_Mean.csv	04/04/2023 16:35	Αρχείο τιμών δια...	252 KB
 Total_Potential_Thyroid_Max.csv	04/04/2023 16:36	Αρχείο τιμών δια...	247 KB
 Total_Potential_Thyroid_Mean.csv	04/04/2023 16:38	Αρχείο τιμών δια...	246 KB

Εικόνα 4.1: Αρχεία μορφής csv

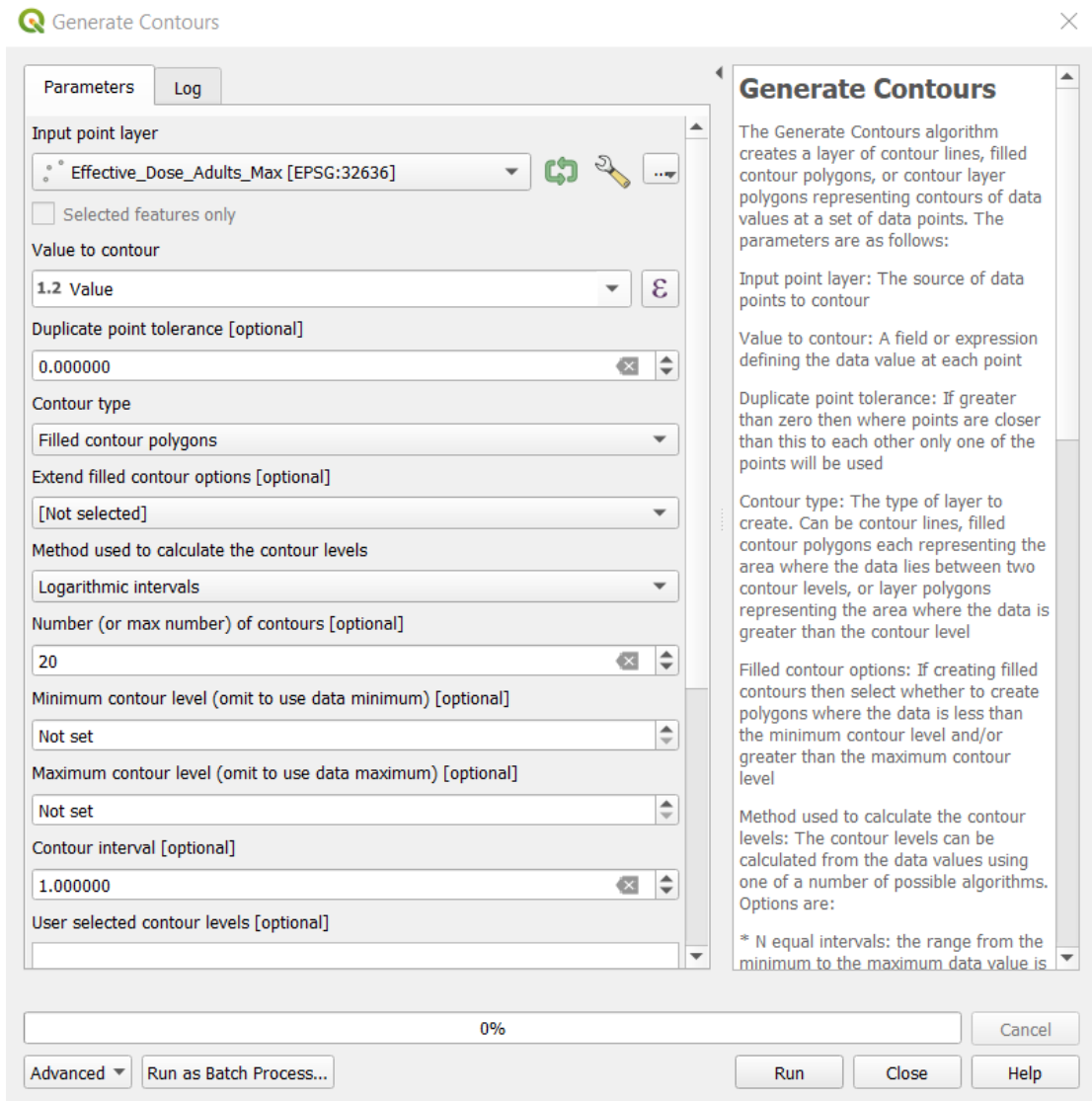
2. Εισαγωγή του αρχείου csv στο «Data Source Manager» του QGIS, σύμφωνα με τις ρυθμίσεις που φαίνονται στην εικόνα 4.2. Προσοχή χρειάζεται στην επιλογή του συστήματος γεω-αναφοράς (Geometry CRS) ώστε αυτό να είναι συμβατό με το σύστημα αναφοράς του JRodos.



Εικόνα 4.2: Παράθυρο Data Source Manager

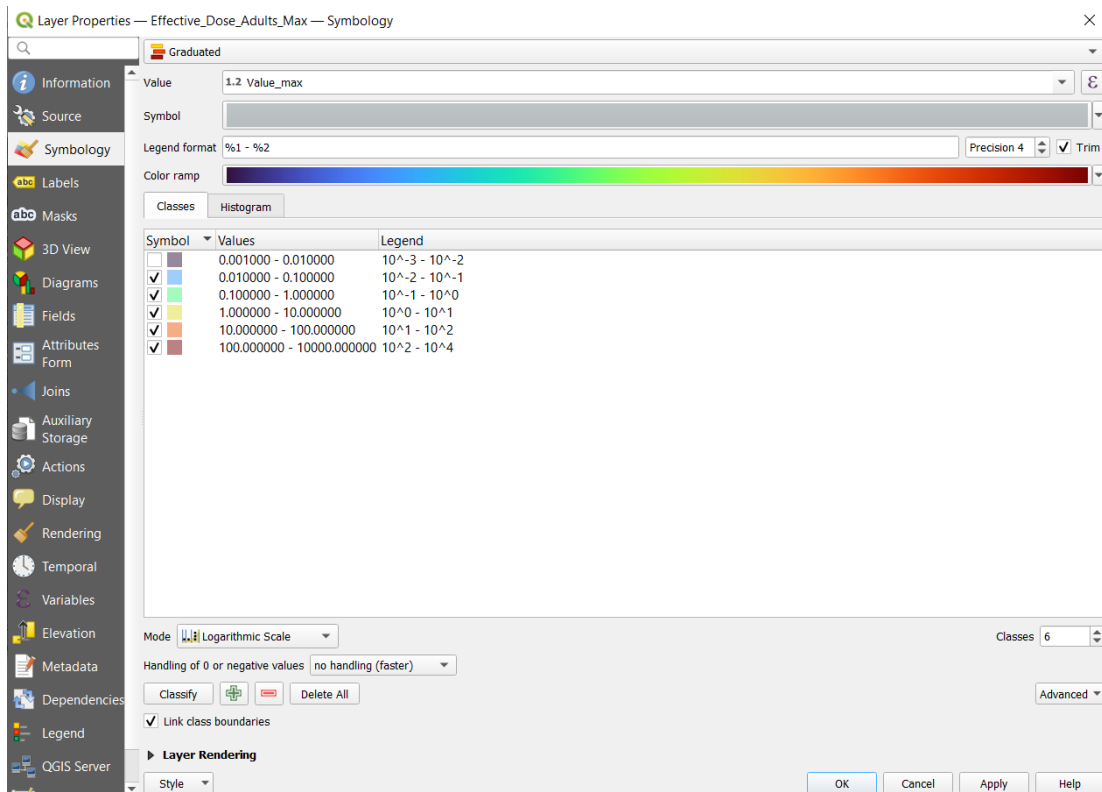
3. Εφαρμογή στο QGIS της επιλογής «Generate Contours», για την κατασκευή των χαρτών στους οποίους τα δεδομένα απεικονίζονται με τη μορφή contours στη μελετώμενη περιοχή.

4. Εντός του «Generate Contours», επιλέγεται είδος Contour «Filled contour polygons» και μέθοδος υπολογισμού για τις διαβαθμίσεις «Logarithmic Intervals». Ύστερα πραγματοποιείται αποθήκευση του Contour και ξεκινά η εκτέλεση του. Οι επιλογές στο σχετικό παράθυρο φαίνονται στην εικόνα 4.3.



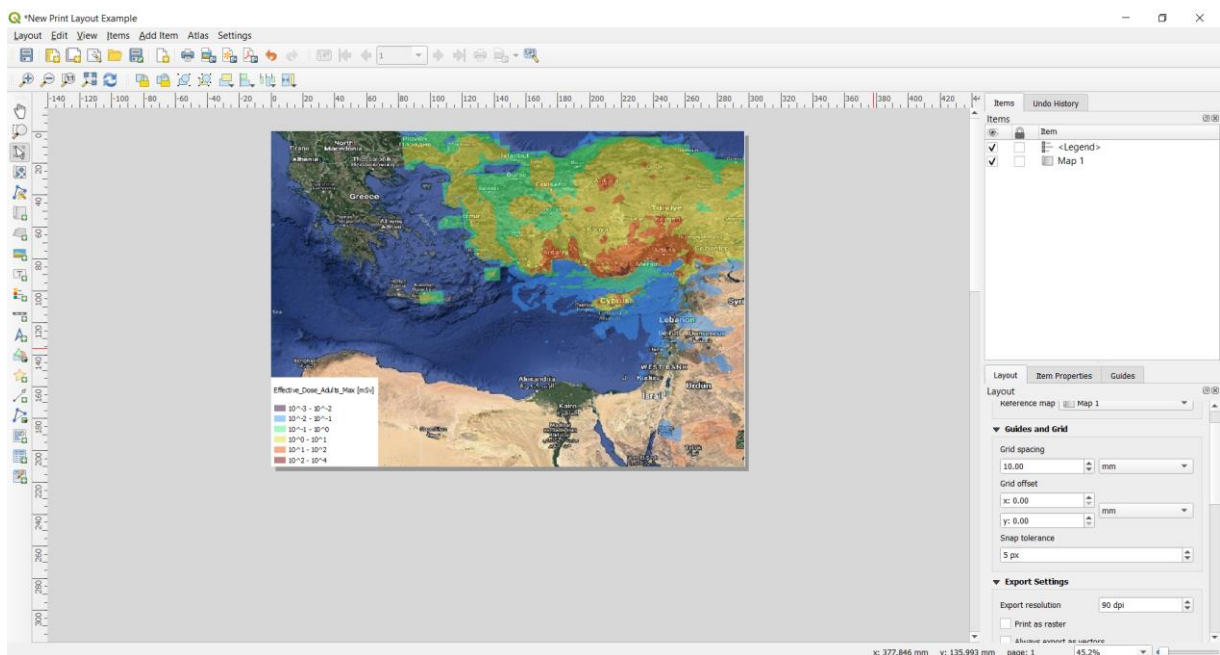
Εικόνα 4.3: Παράθυρο Generate Contours

5. Ακολουθεί επεξεργασία του απεικονιζόμενου στον χάρτη Contour, μέσα από το παράθυρο «Layer Properties». Συγκεκριμένα τροποποιείται η μορφή των συμβόλων, τα χρώματα και τα εύρη τιμών για τις διαβαθμίσεις και επιλέγεται πάλι λογαριθμική κλίμακα. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται η ευκρίνεια και η αντίληψη των δόσεων ανά περιοχή πάνω στον χάρτη. Ενδεικτικές επιλογές/ρυθμίσεις δίνονται στην εικόνα 4.4.



Εικόνα 4.4: Παράθυρο Layer Properties

- Εξαγωγή του χάρτη (σε μορφή εικόνων jpeg) πάνω στον οποίο φαίνεται το contour και το επεξεργασμένο, αντίστοιχο υπόμνημα, με χρήση του «New Print Layout» (από την καρτέλα Project) στο QGIS.



Εικόνα 4.5: Παράθυρο New Print Layout

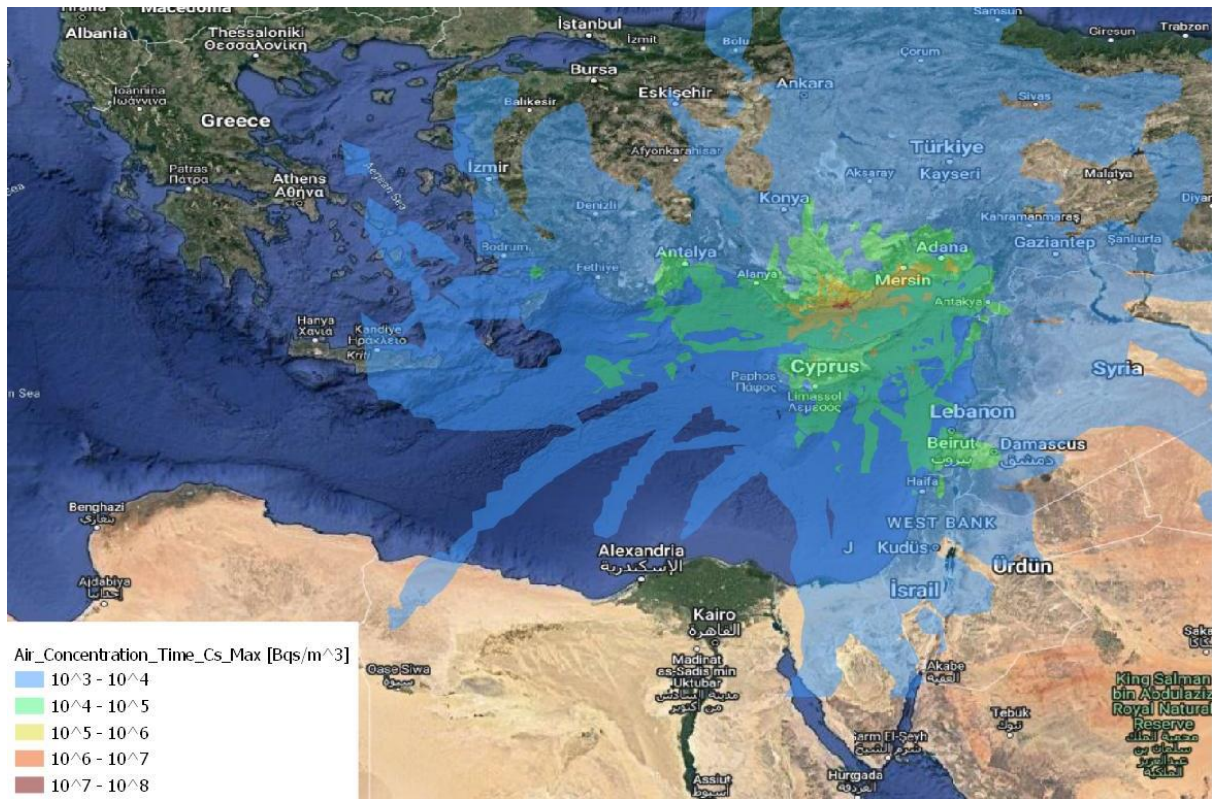
5. Αποτελέσματα

5.1. Εκτίμηση στατιστικής διακύμανσης μοναδιαίας δόσης ανά νουκλίδιο

Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4. Η ανάλυση αφορά στα δύο σημαντικότερα ραδιονουκλίδια, δηλαδή I-131 και Cs-137. Το πρώτο αποτελεί χαρακτηριστικό νουκλίδιο για την πρώιμη φάση λόγω των πολύ σημαντικών επιπτώσεων στον θυρεοειδή και του μικρού του χρόνου ημιζωής (περίπου 8 ημέρες). Έκθεση στο ιώδιο μπορεί να γίνει κατά τη διάρκεια της διέλευσης του ραδιενεργού νέφους, λόγω εισπνοής, αλλά και τις πρώτες εβδομάδες μέσω της τροφικής αλυσίδας. Ενδεικτικά, η σημαντικότερη οδός έκθεσης των παιδιών στο ατύχημα του Τσερνόμπιλ συνδέεται με την κατανάλωση ρυπασμένου με ραδιενεργό ιώδιο γάλακτος και άλλων τροφίμων τις πρώτες εβδομάδες μετά το ατύχημα. Το καίσιο καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις μακροπρόθεσμες συνέπειες, λόγω της ρύπανσης του εδάφους και της τροφικής αλυσίδας. Για τα δύο αυτά νουκλίδια θεωρείται μοναδιαία έκλυση ίση με 1 TBq Cs-137 και 1 TBq I-131 με σκοπό να μελετηθεί η δόση ανά μονάδα ενεργότητας που εκλύεται, ανά νουκλίδιο, ανάλογα με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι χάρτες δόσεων και συγκεντρώσεων, στους οποίους απεικονίζονται αντιστοίχως τόσο οι μέγιστες όσο και οι μέσες τιμές. Επίσης, ενδεικτικά δίνονται οι εκτιμώμενες τιμές σε τρεις τέσσερις περιοχές της Ελλάδας (Καστελόριζο, Ρόδος, Άγιος Νικόλαος Κρήτης) και στη Λευκωσία της Κύπρου.

5.1.1. Συγκέντρωση καισίου στον αέρα

Στην εικόνα 5.1 παρουσιάζεται ο χάρτης των μέγιστων και μέσων (ολοκληρωμένων στον χρόνο) συγκεντρώσεων καισίου σε κάθε τοποθεσία, όπως υπολογίστηκαν στο διάστημα των έξι μηνών των μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν. Όπως αναμένεται, οι μέγιστες συγκεντρώσεις εμφανίζονται γύρω από τον πυρηνικό σταθμό και φτάνουν κοντά στα 10^8 Bq/m³. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις στην Κύπρο κυμαίνονται μεταξύ 10^4 - 10^5 Bq/m³, ενώ στην Ελλάδα δεν ξεπερνούν τα 10^4 Bq/m³. Όσον αφορά τη μέση συγκέντρωση, αυτή είναι μία ή δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη από τη μέγιστη. Συγκεκριμένα, τόσο στην Κύπρο, όσο και στην Ελλάδα, σχεδόν παντού δεν ξεπερνά τα 10^3 Bq/m³.



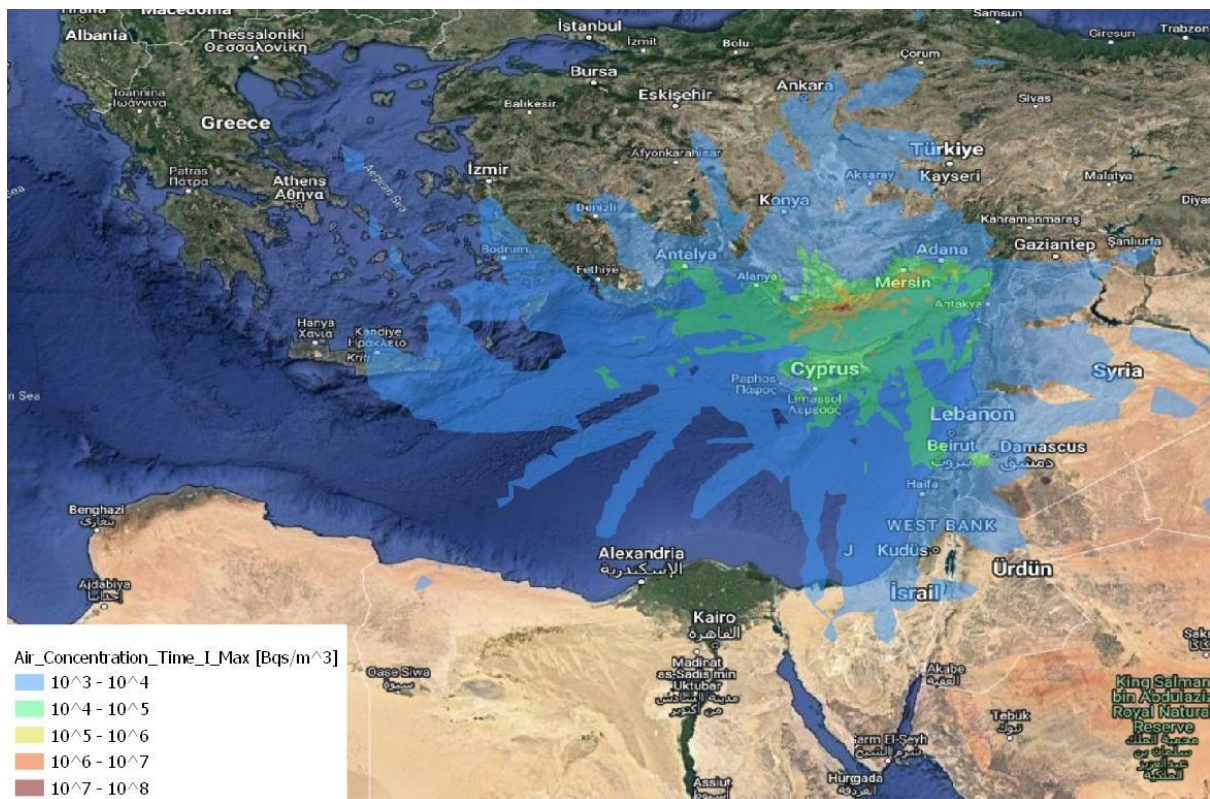
Εικόνα 5.1: Μέγιστη και μέση ολοκληρωμένη συγκέντρωση καισίου στον αέρα

Πίνακας 5.1: Ολοκληρωμένη συγκέντρωση καισίου στον αέρα στις επιλεγμένες τοποθεσίες

	Καστελόριζο	Ρόδος	Άγιος Νικόλαος Κρήτης	Λευκωσία
Ολοκληρωμένη μέγιστη συγκέντρωση [Bqs/m ³]	5603	2020	1765	51990
Ολοκληρωμένη μέση συγκέντρωση [Bqs/m ³]	60	48	12	618

5.1.2. Συγκέντρωση ιωδίου στον αέρα

Στην εικόνα 5.2 παρουσιάζεται ο χάρτης των μέγιστων και μέσων (ολοκληρωμένων στον χρόνο) συγκεντρώσεων ιωδίου σε κάθε τοποθεσία, όπως υπολογίστηκαν στο διάστημα των έξι μηνών των μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν. Παρομοίως με την εικόνα 5.1, στην εικόνα 5.2 πάλι φαίνεται ότι οι μέγιστες συγκεντρώσεις εμφανίζονται στο εργοστάσιο Ακκούγιου και φτάνουν κοντά στα 10^8 Bqs/m³. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις στην Κύπρο κυμαίνονται μεταξύ 10^4 - 10^5 Bqs/m³, ενώ στην Ελλάδα δεν ξεπερνούν τα 10^4 Bqs/m³. Όσον αφορά τη μέση συγκέντρωση, αυτή είναι πάλι μία ή δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη από τη μέγιστη. Συγκεκριμένα, τόσο στην Κύπρο, όσο και στην Ελλάδα, σχεδόν παντού δεν ξεπερνά τα 10^3 Bqs/m³.





Εικόνα 5.2: Μέγιστη και μέση ολοκληρωμένη συγκέντρωση στον αέρα λόγω ιωδίου

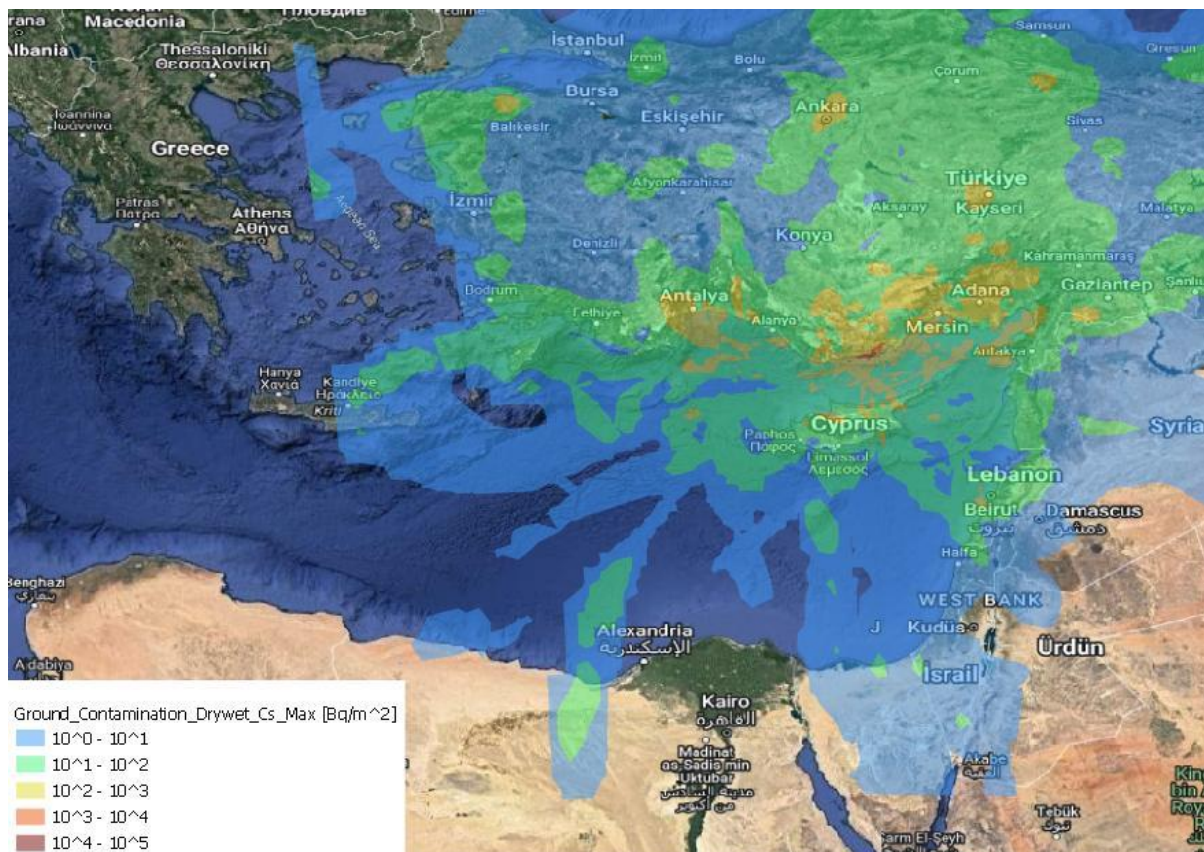
Πίνακας 5.2: Ολοκληρωμένη συγκέντρωση ιωδίου στον αέρα στις επιλεγμένες περιοχές

	Καστελόριζο	Ρόδος	Άγιος Νικόλαος Κρήτης	Λευκωσία
Ολοκληρωμένη μέγιστη συγκέντρωση [Bqs/m ³]	4011	1474	1254	48410
Ολοκληρωμένη μέση συγκέντρωση [Bqs/m ³]	39	34	8	491

5.1.3. Συγκέντρωση καισίου στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση)

Στην εικόνα 5.3 απεικονίζονται η μέγιστη και η μέση συνολική εναπόθεση καισίου (ραδιορύπανση). Όπως φαίνεται, η μέγιστη συγκέντρωση παρουσιάζει μεταβολές, πιθανόν λόγω των μετεωρολογικών δεδομένων. Για παράδειγμα στην πρωτεύουσα της Τουρκίας Ankara, η οποία βρίσκεται αρκετά βορειότερα από το Ακκούγιου, οι τιμές μεγίστων συγκεντρώσεων φτάνουν κοντά στα 10³ Bq/m². Ενώ σε περιοχές που βρίσκονται ενδιάμεσα στην Ankara και στο Ακκούγιου, οι τιμές σε πολλές περιοχές κυμαίνονται μεταξύ 10¹-10² Bq/m², δηλαδή είναι αρκετά μικρότερες. Αυτό καταδεικνύει την πολυπλοκότητα των μηχανισμών που καθορίζουν τελικά την ρύπανση των περιοχών, καθώς και ότι η απόσταση δεν είναι απαραίτητα η καθοριστική παράμετρος. Ανάλογα με τις μετεωρολογικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα γεγονότα βροχοπτώσεων, η ρύπανση σε κοντινές περιοχές

μπορεί να διαφέρει σημαντικά. Αυτό εξάλλου φάνηκε και από το ατύχημα του Τσερνόμπιλ, όπου σημαντική ραδιορύπανση παρατηρήθηκε σε συγκεκριμένες τοποθεσίες ακόμα και πολύ μακριά από τον σταθμό. Το ατύχημα της Φουκουσίμα από την άλλη μεριά είχε ως αποτέλεσμα εντελώς διαφορετική εικόνα ρύπανσης, με την έκταση με σημαντική ρύπανση να περιορίζεται, όχι σε μια ακτίνα γύρω από τον σταθμό, αλλά σε μια στενή περιοχή μήκους κάποιων δεκάδων χιλιομέτρων [2]. Όσον αφορά την Κύπρο, οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 10^1 - 10^3 Bq/m², ενώ στην Ελλάδα δεν ξεπερνούν τα 10^2 Bq/m². Σχετικά με τις μέσες συγκεντρώσεις, αυτές είναι μία ή δύο τάξεις μεγέθους μικρότερες. Βέβαια σημειώνεται ότι σε καμία περίπτωση (μέγιστη και μέση τιμή), οι συγκεντρώσεις δεν ξεπερνούν το όριο αναφοράς 3.7×10^4 Bq/m² [6], με εξαίρεση ακριβώς στο εργοστάσιο.





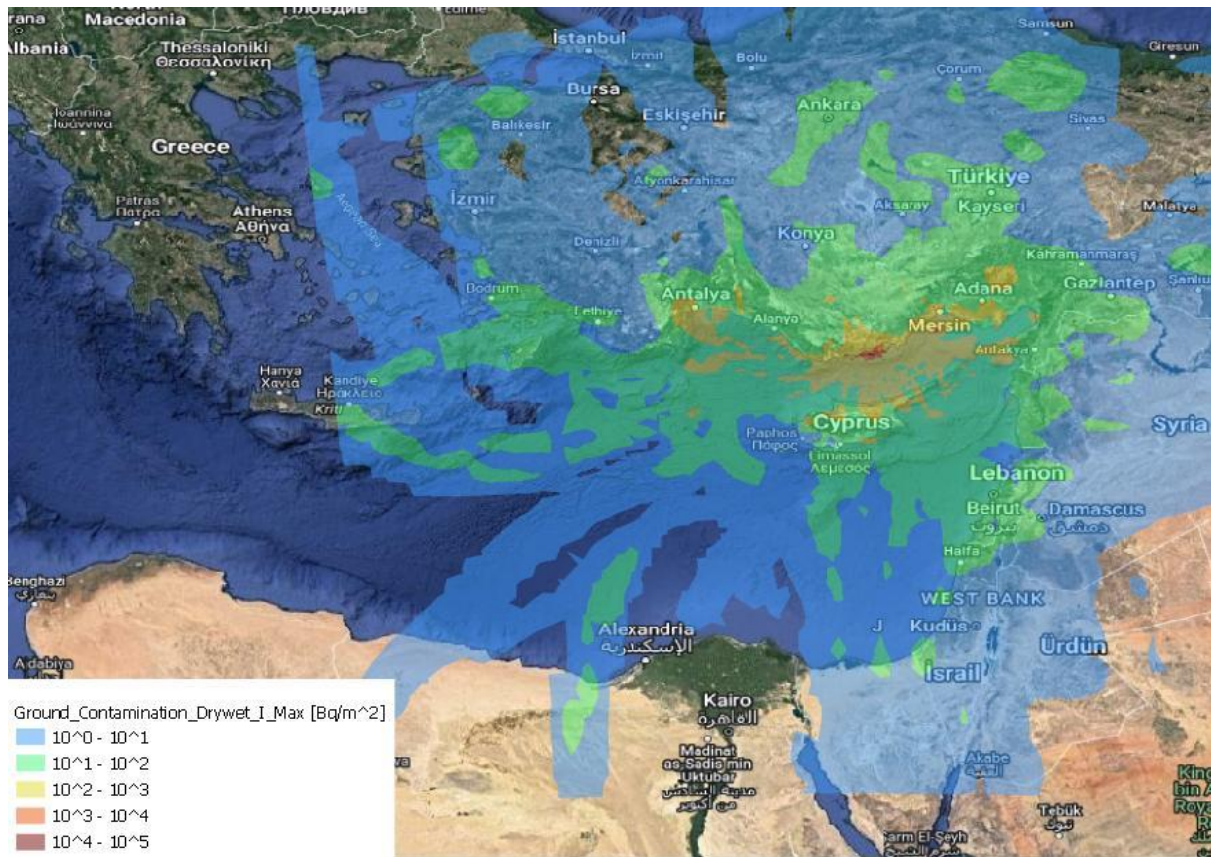
Εικόνα 5.3: Μέγιστη και μέση συγκέντρωση καισίου στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση)

Πίνακας 5.3: Συγκέντρωση καισίου στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση) στις επιλεγμένες περιοχές

	Καστελόριζο	Ρόδος	Άγιος Νικόλαος Κρήτης	Λευκωσία
Μέγιστη συγκέντρωση [Bq/m²]	516×10^{-2}	5030×10^{-2}	301×10^{-2}	2835×10^{-2}
Μέση συγκέντρωση [Bq/m²]	9×10^{-2}	49×10^{-2}	3×10^{-2}	55×10^{-2}

5.1.4. Συγκέντρωση ιωδίου στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση)

Στην εικόνα 5.4 απεικονίζονται η μέγιστη και η μέση συνολική εναπόθεση ιωδίου (ραδιοιούπανση). Φαίνεται ότι η μέγιστη συγκέντρωση παρουσιάζει επίσης έντονες μεταβολές, όπως στην εικόνα 5.3. Οι τιμές στην Κύπρο κυμαίνονται πάλι μεταξύ 10^1 - 10^3 Bq/m², ενώ στην Ελλάδα δεν ξεπερνούν τα 10^2 Bq/m². Σχετικά με τις μέσες συγκεντρώσεις, αυτές είναι πάλι μία ή δύο τάξεις μεγέθους μικρότερες. Βέβαια πάλι σημειώνεται ότι σε καμία περίπτωση (μέγιστη και μέση τιμή), οι συγκεντρώσεις δεν ξεπερνούν το όριο αναφοράς 3.7×10^4 Bq/m² [6], με εξαίρεση ακριβώς στο εργοστάσιο.



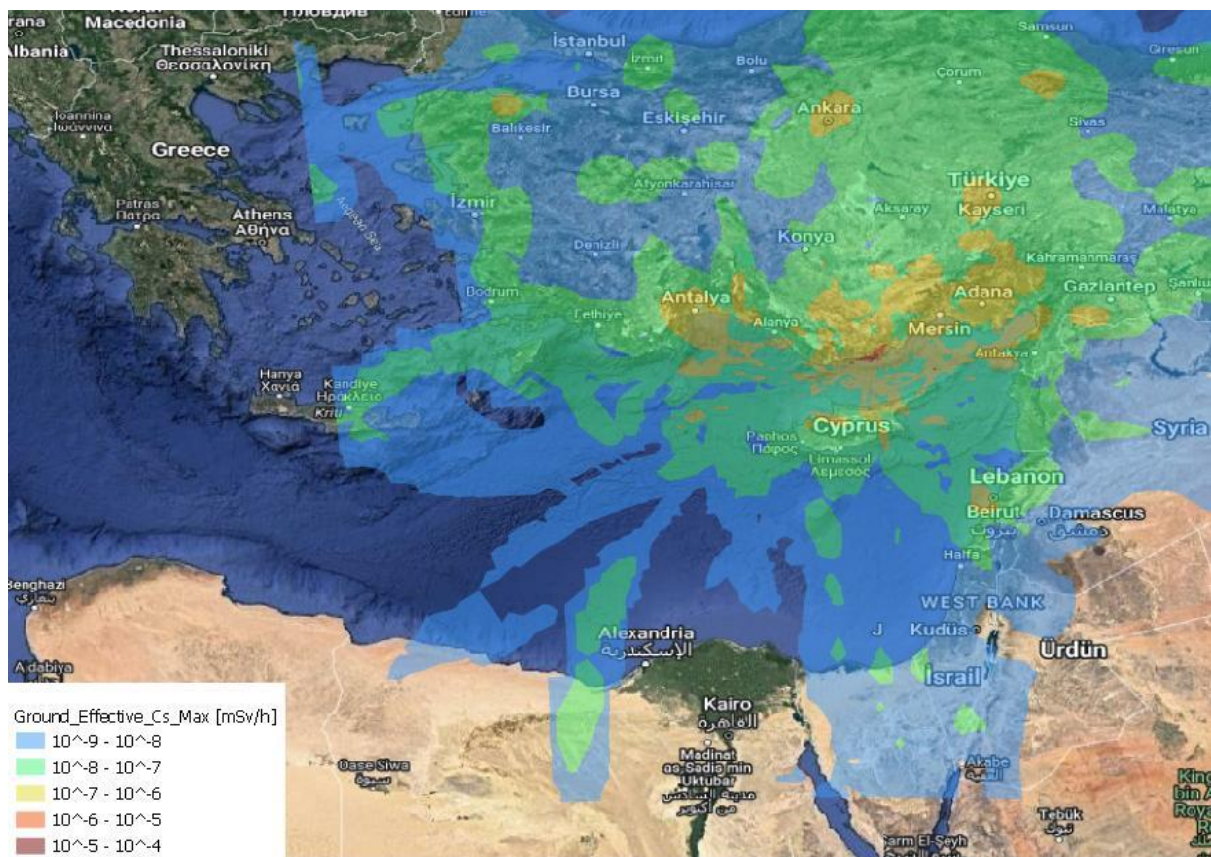
Εικόνα 5.4: Μέγιστη και μέση συγκέντρωση ιωδίου στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση)

Πίνακας 5.4: Συγκέντρωση ιωδίου στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση) στις επιλεγμένες περιοχές

	Καστελόριζο	Ρόδος	Άγιος Νικόλαος Κρήτης	Λευκωσία
Μέγιστη συγκέντρωση [Bq/m ²]	860×10 ⁻²	3720×10 ⁻²	494×10 ⁻²	9900×10 ⁻²
Μέση συγκέντρωση [Bq/m ²]	12×10 ⁻²	41×10 ⁻²	4×10 ⁻²	113×10 ⁻²

5.1.5. Ενεργός δόση στο έδαφος ανά ώρα λόγω καισίου

Στην εικόνα 5.5 παρουσιάζεται η μέγιστη και μέση ενεργός δόση στο έδαφος ανά ώρα λόγω καισίου. Φαίνεται ότι η μέγιστη δόση παρουσιάζει έντονες μεταβολές. Για παράδειγμα στην πρωτεύουσα της Τουρκίας Ankara, η οποία βρίσκεται αρκετά βορειότερα από το Ακκούγιου, οι τιμές μεγίστων δόσεων φτάνουν κοντά στα 10⁻⁶ mSv/h. Ενώ σε περιοχές που βρίσκονται ενδιάμεσα στην Ankara και στο Ακκούγιου, οι τιμές σε πολλές περιοχές κυμαίνονται μεταξύ 10⁻⁸-10⁻⁷ mSv/h. Όσον αφορά την Κύπρο, οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 10⁻⁸-10⁻⁶ mSv/h, ενώ στην Ελλάδα δεν ξεπερνούν τα 10⁻⁷ mSv/h. Σχετικά με τις μέσες συγκεντρώσεις, αυτές είναι περίπου δύο τάξεις μεγέθους μικρότερες και παρουσιάζουν αυξομείωση σε γύρω από περιοχές, όπως στην Ankara.





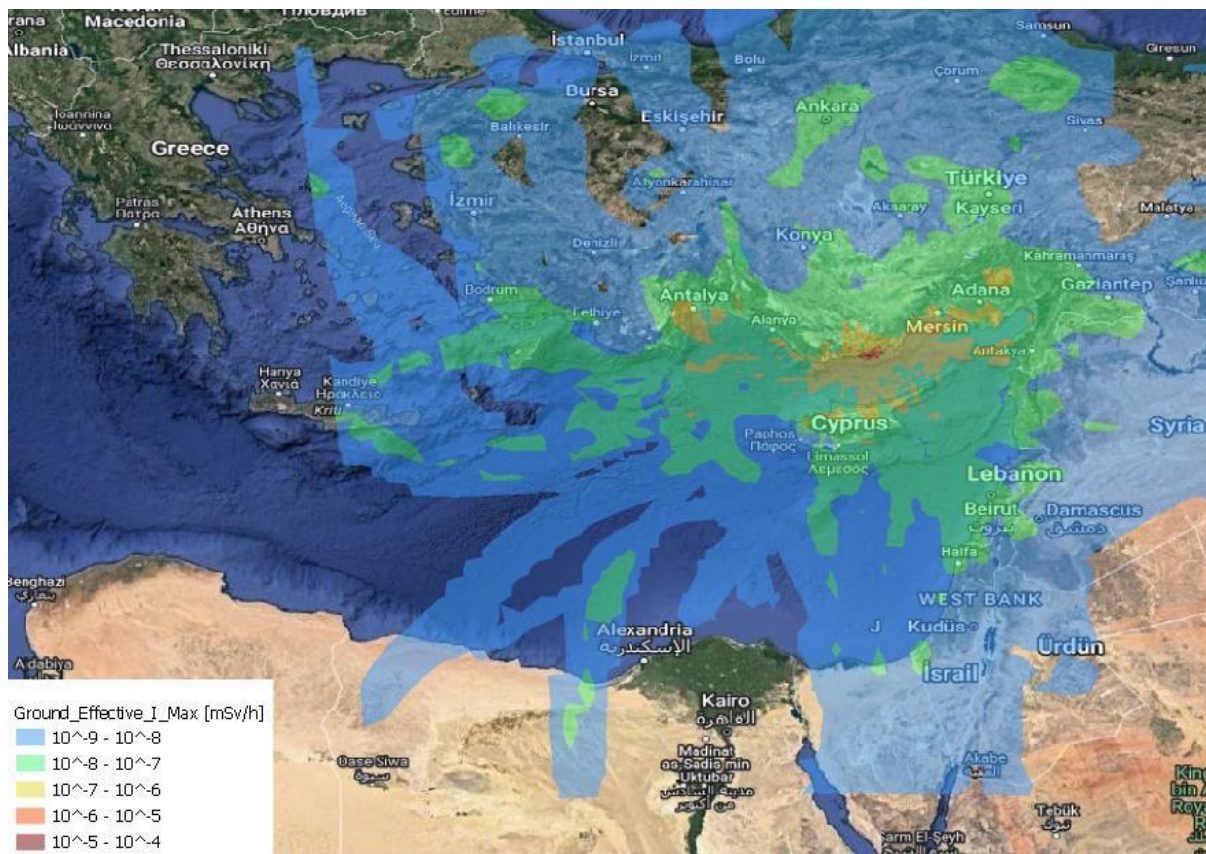
Εικόνα 5.5: Μέγιστη και μέση ενεργός δόση στο έδαφος ανά ώρα λόγω καϊσίου

Πίνακας 5.5: Ενεργός δόση στο έδαφος ανά ώρα λόγω καϊσίου στις επιλεγμένες περιοχές

	Καστελόριζο	Ρόδος	Άγιος Νικόλαος Κρήτης	Λευκωσία
Μέγιστη ενεργός δόση ανά ώρα [mSv/h]	6.70×10^{-9}	65.30×10^{-9}	3.91×10^{-9}	36.90×10^{-9}
Μέση ενεργός δόση ανά ώρα [mSv/h]	0.11×10^{-9}	0.63×10^{-9}	0.04×10^{-9}	0.71×10^{-9}

5.1.6. Ενεργός δόση στο έδαφος ανά ώρα λόγω ιωδίου

Στην εικόνα 5.6 παρουσιάζεται η μέγιστη και μέση ενεργός δόση στο έδαφος ανά ώρα λόγω ιωδίου. Παρατηρείται ότι οι μέγιστες δόσεις εμφανίζονται στο εργοστάσιο Ακκούγιου και φτάνουν κοντά στα 10^{-4} mSv/h. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις στην Κύπρο κυμαίνονται μεταξύ 10^{-8} - 10^{-6} mSv/h, ενώ στην Ελλάδα δεν ξεπερνούν τα 10^{-7} mSv/h. Όσον αφορά τη μέση συγκέντρωση, αυτή είναι περίπου δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη από τη μέγιστη. Συγκεκριμένα, τόσο στην Κύπρο, όσο και στην Ελλάδα, σχεδόν παντού δεν ξεπερνά τα 10^{-9} mSv/h.



Εικόνα 5.6: Μέγιστη και μέση ενεργός δόση στο έδαφος ανά ώρα λόγω ιωδίου

Πίνακας 5.6: Ενεργός δόση στο έδαφος ανά ώρα λόγω ιωδίου στις επιλεγμένες περιοχές

	Καστελόριζο	Ρόδος	Άγιος Νικόλαος Κρήτης	Λευκωσία
Μέγιστη ενεργός δόση ανά ώρα [mSv/h]	7.34×10^{-9}	31.80×10^{-9}	4.22×10^{-9}	84.20×10^{-9}
Μέση ενεργός δόση ανά ώρα [mSv/h]	0.10×10^{-9}	0.35×10^{-9}	0.03×10^{-9}	0.96×10^{-9}

5.1.7. Ολική δυνητική δόση λόγω καισίου

Στην εικόνα 5.7 παρουσιάζεται η μέγιστη και μέση ολική δυνητική δόση λόγω καισίου. Παρατηρείται ότι η μέγιστη δόση στις περισσότερες περιοχές δεν ξεπερνά τα 10^{-3} mSv/TBq, με εξαίρεση στο Ακκούγιου όπου μπορεί να φτάσει κοντά 1 mSv/TBq. Ειδικότερα, στην Κύπρο κυμαίνεται μεταξύ 10^{-5} - 10^{-3} mSv/TBq, ενώ στην Ελλάδα σε ελάχιστες περιοχές φτάνει κοντά στα 10^{-5} mSv/TBq. Όσον αφορά τις μέσες δόσεις, αυτές είναι περίπου δύο τάξεις μεγέθους μικρότερες. Φαίνεται μάλιστα ότι η μέση δόση δεν ξεπερνά τα 10^{-4} mSv/TBq, παρά μόνο σε μία μικρή ακτίνα γύρω από το Ακκούγιου όπου μπορεί να φτάσει κοντά στα 10^{-2} mSv/TBq.





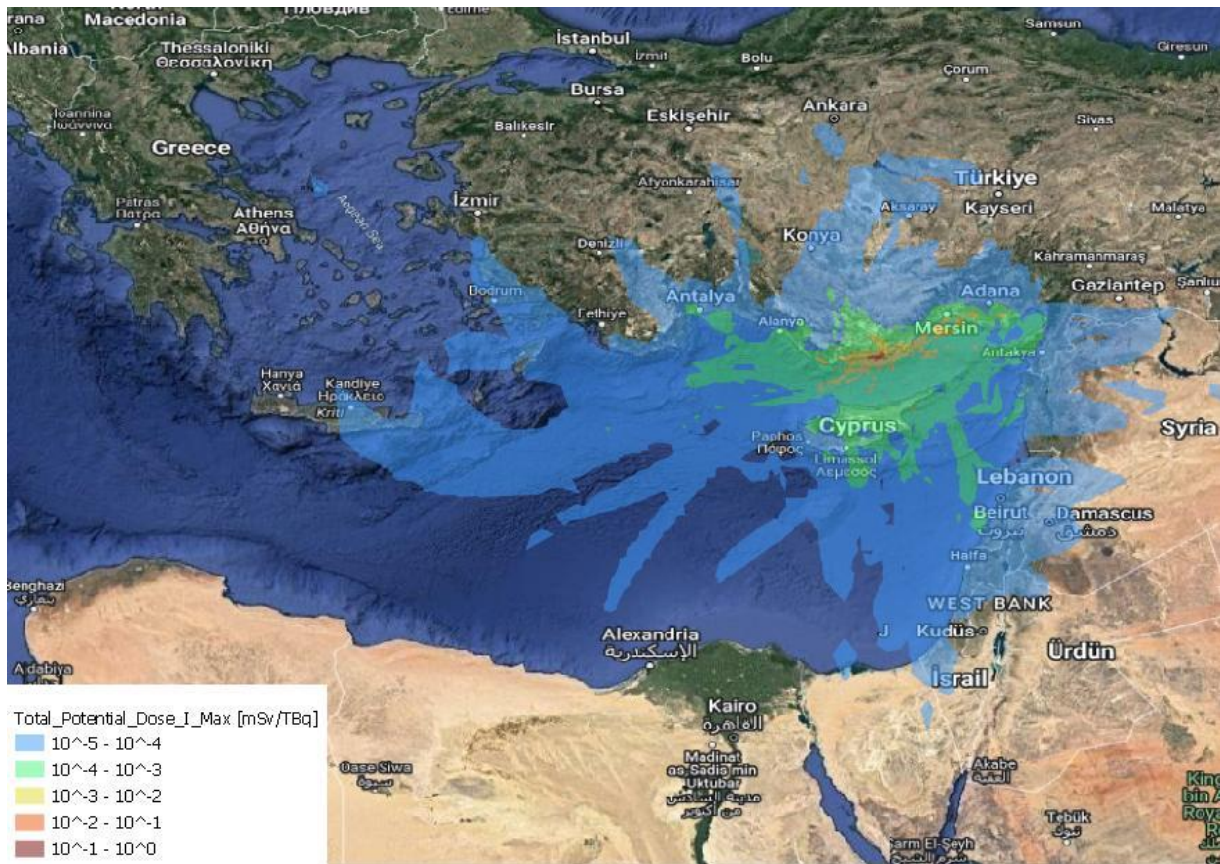
Εικόνα 5.7: Μέγιστη και μέση ολική δυνητική δόση λόγω καϊσίου

Πίνακας 5.7: Ολική δυνητική δόση λόγω καϊσίου στις επιλεγμένες περιοχές

	Καστελόριζο	Ρόδος	Άγιος Νικόλαος Κρήτης	Λευκωσία
Μέγιστη ολική δυνητική δόση [mSv/TBq]	9720×10^{-9}	3480×10^{-9}	2900×10^{-9}	93000×10^{-9}
Μέση ολική δυνητική δόση [mSv/TBq]	91×10^{-9}	77×10^{-9}	19×10^{-9}	10700×10^{-9}

5.1.8. Ολική δυνητική δόση λόγω ιωδίου

Στην εικόνα 5.8 παρουσιάζεται η μέγιστη και μέση ολική δυνητική δόση λόγω ιωδίου. Φαίνεται ότι η μέγιστη δόση στις περισσότερες περιοχές δεν ξεπερνά τα 10^{-3} mSv/TBq, με εξαίρεση στο Ακκούγιου όπου μπορεί να φτάσει κοντά στο 1 mSv/TBq. Ειδικότερα, στην Κύπρο κυμαίνεται μεταξύ 10^{-5} - 10^{-3} mSv/TBq, ενώ στην Ελλάδα δεν ξεπερνά τα 10^{-4} mSv/TBq. Όσον αφορά τις μέσες δόσεις, αυτές είναι περίπου δύο τάξεις μεγέθους μικρότερες. Φαίνεται μάλιστα ότι η μέση δόση δεν ξεπερνά τα 10^{-4} mSv/TBq, παρά μόνο σε μία μικρή ακτίνα γύρω από το Ακκούγιου όπου μπορεί να φτάσει μέχρι κοντά στα 10^{-2} mSv/TBq.



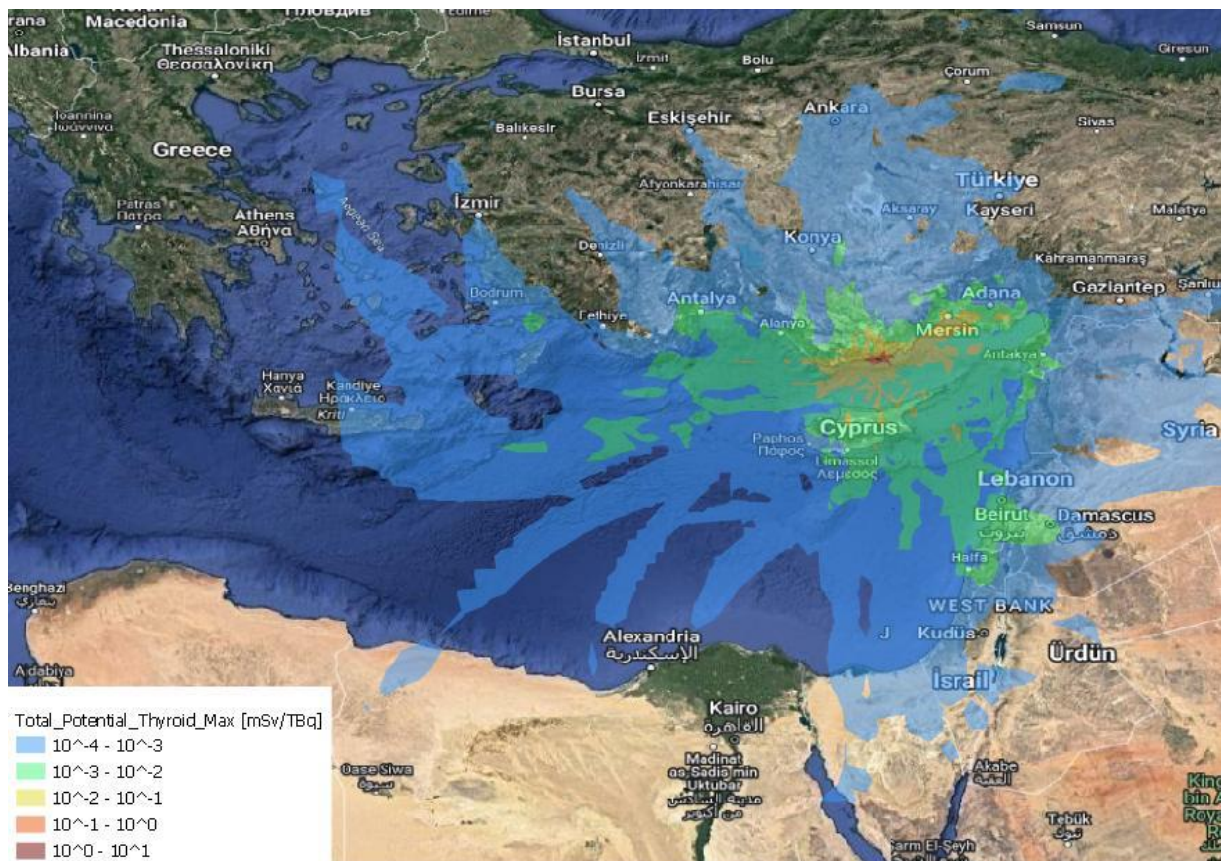
Εικόνα 5.8: Μέγιστη και μέση ολική δυνητική δόση λόγω ιωδίου

Πίνακας 5.8: Ολική δυνητική δόση λόγω ιωδίου στις επιλεγμένες περιοχές

	Καστελόριζο	Ρόδος	Άγιος Νικόλαος Κρήτης	Λευκωσία
Μέγιστη ολική δυνητική δόση [mSv/TBq]	30700×10^{-9}	10800×10^{-9}	8690×10^{-9}	375000×10^{-9}
Μέση ολική δυνητική δόση [mSv/TBq]	263×10^{-9}	238×10^{-9}	54×10^{-9}	3720×10^{-9}

5.1.9. Ολική δυνητική δόση στον θυροειδή

Στην εικόνα 5.9 απεικονίζεται η μέγιστη και μέση ολική δυνητική δόση στον θυροειδή. Παρατηρείται ότι η μέγιστη δόση φτάνει κοντά 10 mSv/TBq στο Ακκούγιου. Συγκεκριμένα στην Κύπρο κυμαίνεται μεταξύ 10^{-3} - 10^{-1} mSv/TBq, ενώ στην Ελλάδα φαίνεται να μην ξεπερνά τα 10^{-3} mSv/TBq. Σχετικά με τη μέση δόση, αυτή ξεπερνά τα 10^{-4} mSv/TBq σε μία ακτίνα γύρω από το Ακκούγιου, με μέγιστη τιμή μέσης δόσης κοντά στα 10^{-1} mSv/TBq.





Εικόνα 5.9: Μέγιστη και μέση ολική δυνητική δόση στον θυροειδή

Πίνακας 5.9: Ολική δυνητική δόση στον θυροειδή

	Καστελόριζο	Ρόδος	Άγιος Νικόλαος Κρήτης	Λευκωσία
Μέγιστη ολική δυνητική δόση [mSv/TBq]	607×10^{-6}	215×10^{-6}	172×10^{-6}	7400×10^{-6}
Μέση ολική δυνητική δόση [mSv/TBq]	5×10^{-6}	5×10^{-6}	1×10^{-6}	54×10^{-6}

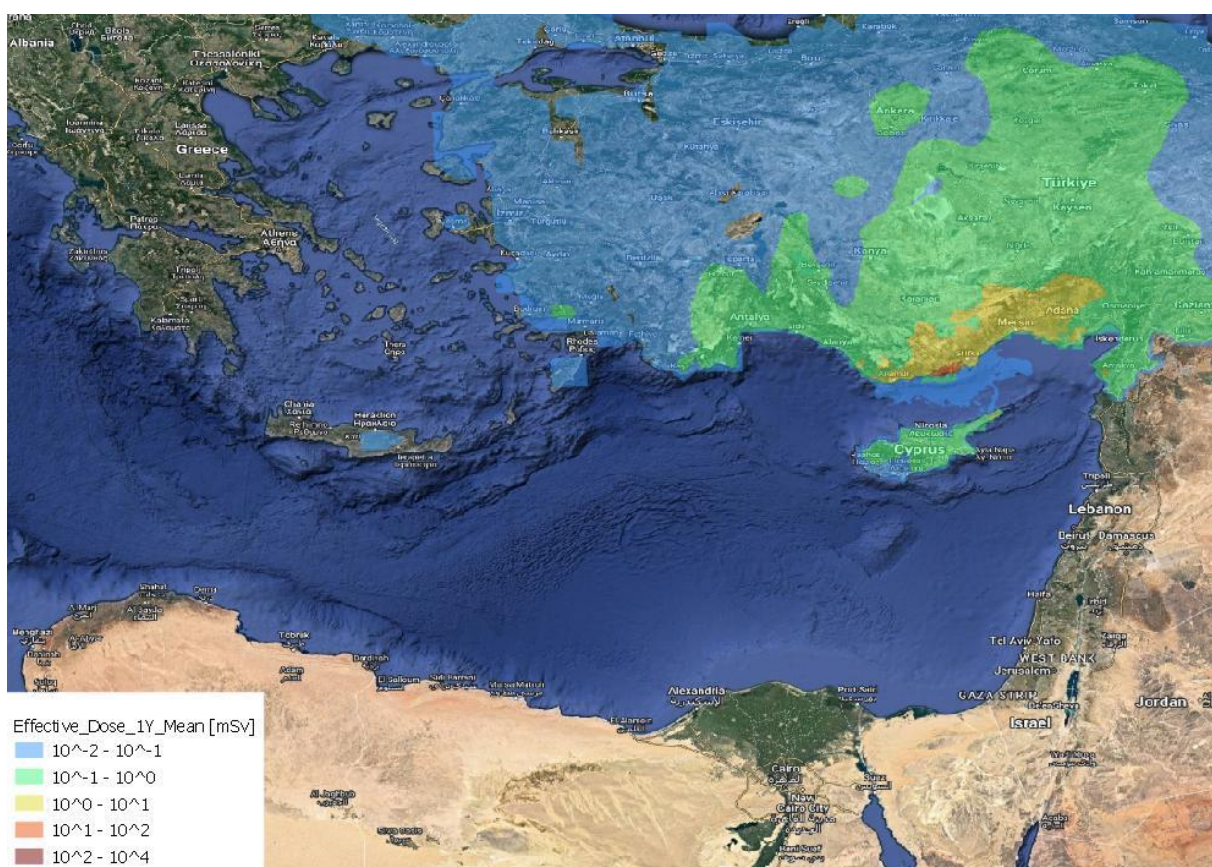
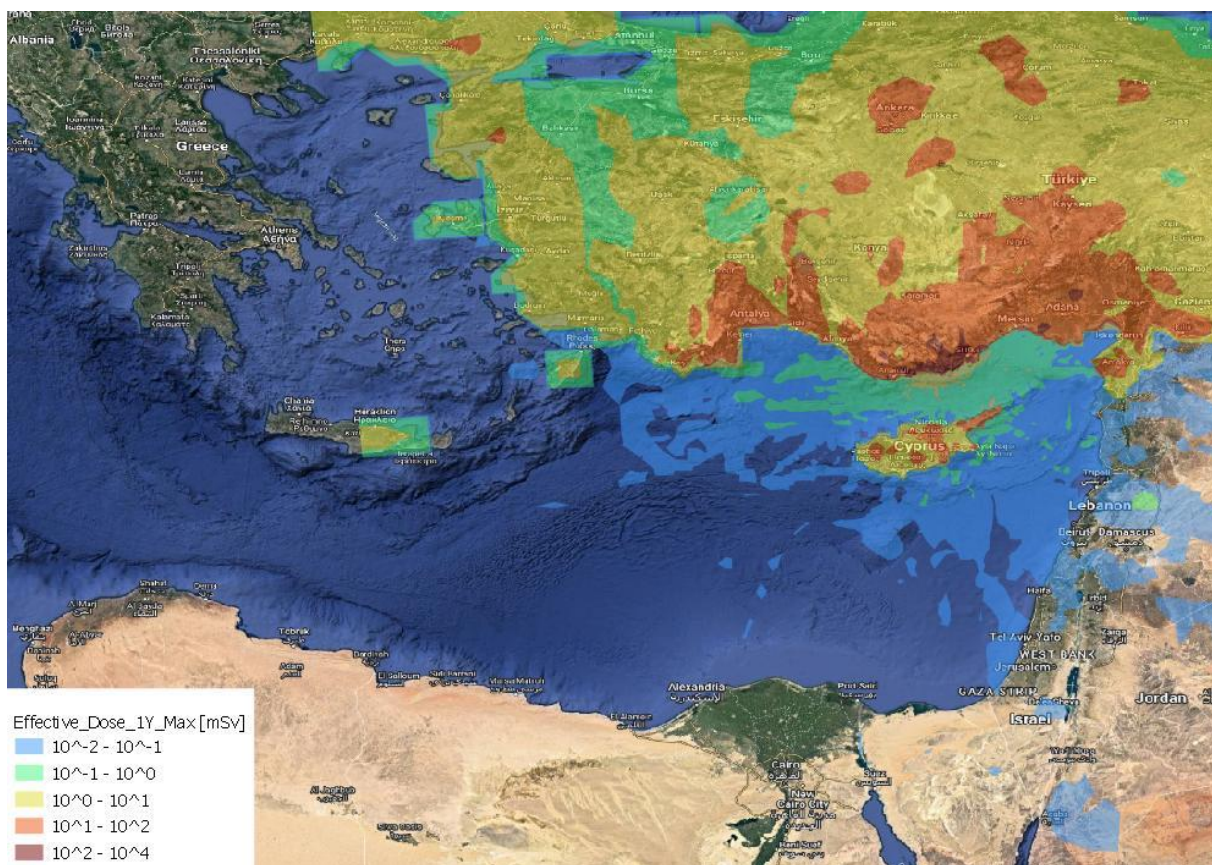
5.2. Εκτίμηση ραδιολογικών επιπτώσεων λόγω υποθετικού όρου πηγής

Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται οι χάρτες δόσεων και συγκεντρώσεων, όπως προέκυψαν εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4. Σε αντίθεση με την παράγραφο 5.1, χρησιμοποιείται ένας προσεγγιστικός, αρκετά ρεαλιστικός όρος πηγής. Πρόκειται για όρο πηγής ο οποίος είναι παρεμφερής με αυτόν του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας - ΔΟΑΕ (International Atomic Energy Agency, IAEA) και αναλύεται στην παράγραφο 3.3. Βέβαια τονίζεται εκ νέου ότι ο λόγος που δεν είναι όμοιος, αλλά είναι παρεμφερής, είναι επειδή ο πυρηνικός σταθμός Ακκούγιου είναι τελευταίας τεχνολογίας και συνεπώς δεν ανταποκρίνεται επακριβώς στον αντίστοιχο του ΔΟΑΕ. Στη συνέχεια περιγράφονται λεπτομερώς οι χάρτες δόσεων και συγκεντρώσεων, στους οποίους απεικονίζονται αντιστοίχως τόσο οι μέγιστες όσο και οι μέσες τιμές. Επίσης, ενδεικτικά φαίνονται σε πίνακα οι μετρούμενες τιμές στις εξής τέσσερις περιοχές της Ελλάδας και της Κύπρου: Καστελόριζο, Ρόδος, Άγιος Νικόλαος Κρήτης, Λευκωσία.

5.2.1. Αθροιστική ενεργός δόση από όλα τα νουκλίδια σε 1 έτους παιδιά σε 1 έτος

Στην εικόνα 5.10 απεικονίζονται οι χάρτες μέγιστης και μέσης αθροιστικής ενεργού δόσης από όλα τα νουκλίδια σε 1 έτους παιδιά μέσα σε 1 έτος. Φαίνεται ότι η μέγιστη δόση μπορεί να πλησιάσει τα 10^4 mSv σε μία μικρή ακτίνα (μαξ 2 χιλιομέτρων) γύρω από το εργοστάσιο Ακκούγιου. Ωστόσο, παραπέρα η μέγιστη δόση δεν ξεπερνά τα 10^2 mSv. Παρατηρείται μία μικρή ανομοιογένεια μεταξύ κάποιων περιοχών (ποικιλία χρωμάτων), η οποία πιθανώς οφείλεται στα μετεωρολογικά δεδομένα. Όσον αφορά την Κύπρο οι μέγιστες δόσεις ανά περιοχή κυμαίνονται μεταξύ 10^0 - 10^2 mSv, ενώ στην Ελλάδα δεν ξεπερνούν τα 10^1 mSv. Σχετικά με τις μέσες δόσεις, αυτές παρουσιάζουν περισσότερη ομοιογένεια και δεν ξεπερνούν τα 10^1 mSv παρά μόνο σε περιοχή 15 χιλιομέτρων γύρω από το Ακκούγιου. Συγκεκριμένα, στην Κύπρο δεν ξεπερνούν τα 10^0 mSv, ενώ στην Ελλάδα τα 10^{-1} mSv.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.10, η μέγιστη ενεργός δόση σε πολλές περιοχές (ακόμα και στην Κύπρο) κυμαίνεται στο εύρος 20-100 mSv, που αποτελεί επίπεδο αναφοράς, και μόνο σε μικρή ακτίνα γύρω από το Ακκούγιου ξεπερνά εμφανώς τα 100 mSv (ανώτατο επίπεδο, βλ. παράγραφο 3.10). Ωστόσο, η μέση ενεργός δόση σπανίως ξεπερνά τα 10 mSv μακριά από το Ακκούγιου.



Εικόνα 5.10: Μέγιστη και μέση αθροιστική ενεργός δόση από όλα τα νουκλίδια σε 1 έτος παιδιά σε 1 έτος

Πίνακας 5.10: Αθροιστική ενεργός δόση από όλα τα νουκλίδια σε 1 έτους παιδιά σε 1 έτος στις επιλεγμένες περιοχές

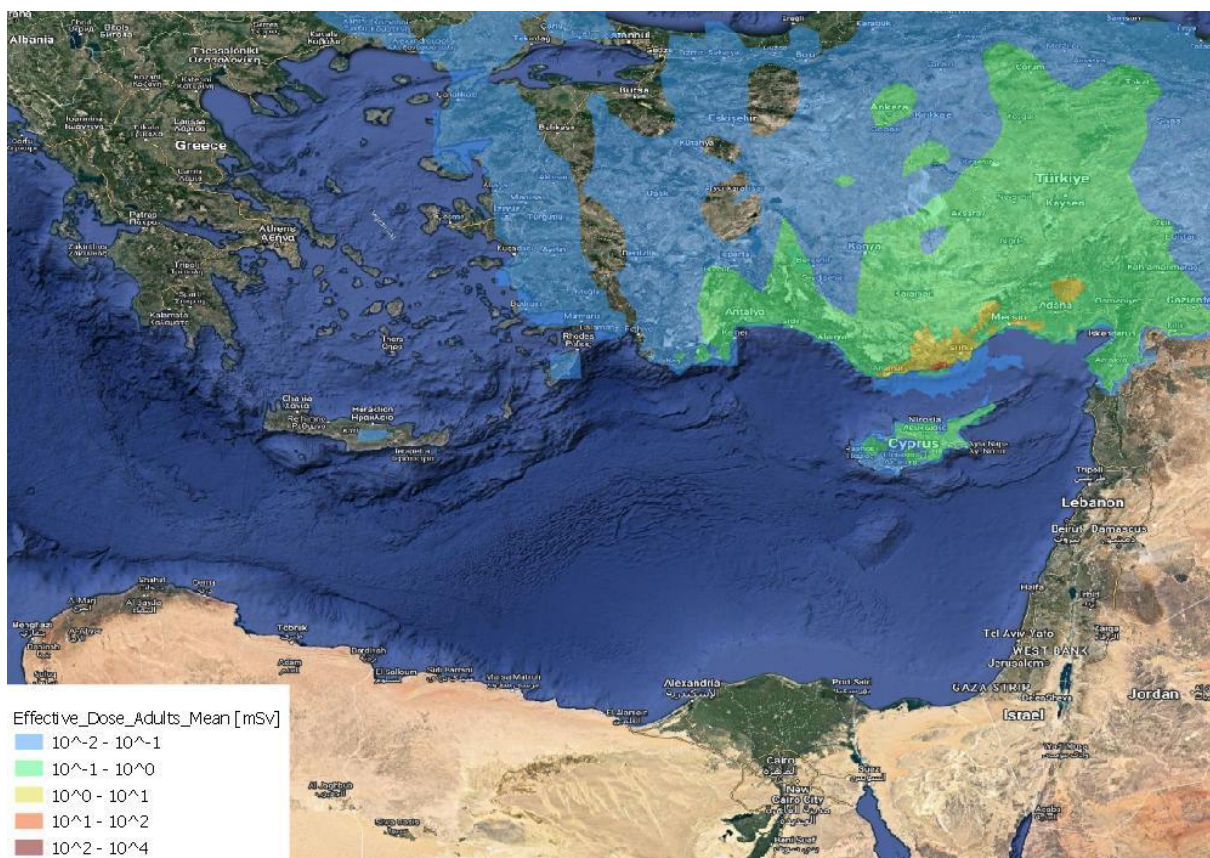
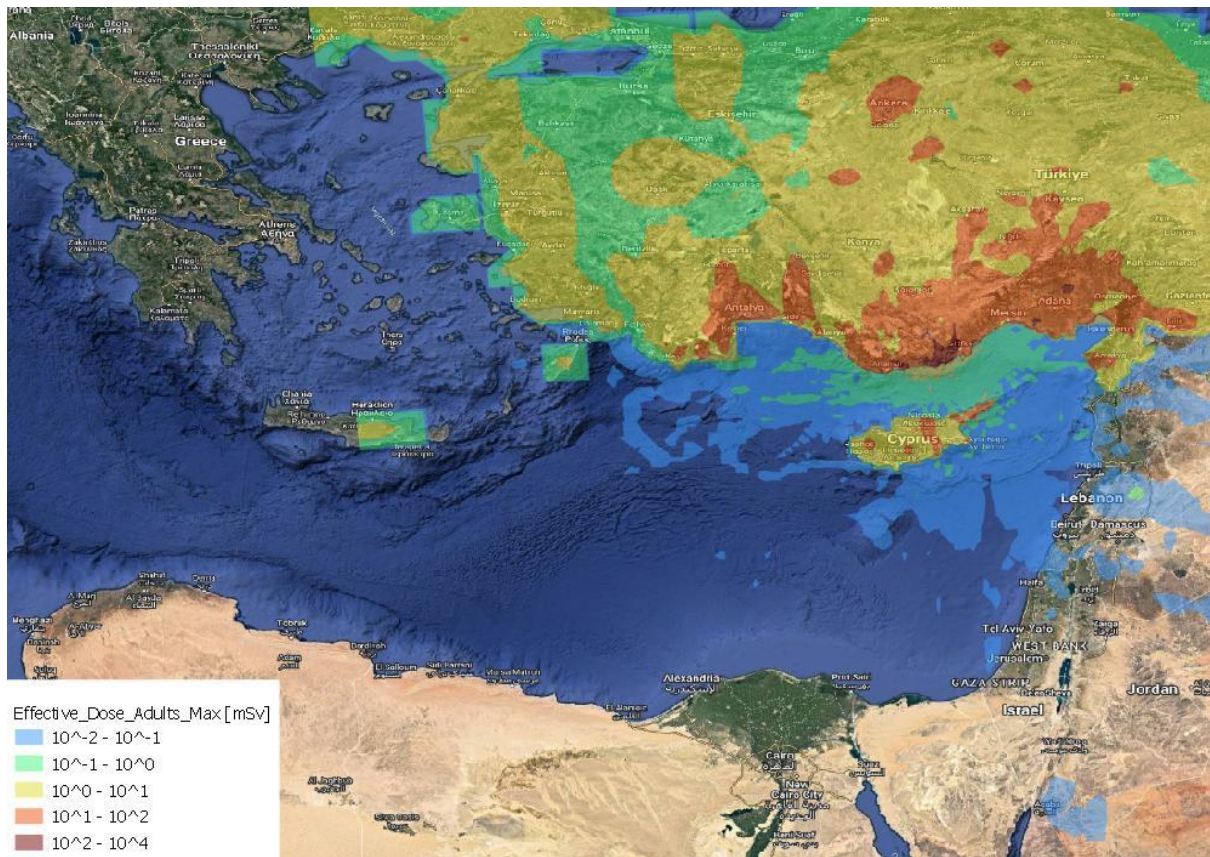
	Καστελόριζο	Ρόδος	Άγιος Νικόλαος Κρήτης	Λευκωσία
Μέγιστη δόση [mSv]	14.5×10^{-3}	1900×10^{-3}	1103×10^{-3}	27700×10^{-3}
Μέση δόση [mSv]	0.3×10^{-3}	38.1×10^{-3}	9.9×10^{-3}	437.0×10^{-3}

5.2.2. Αθροιστική ενεργός δόση από όλα τα νουκλίδια σε ενήλικες σε 1 έτος

Στην εικόνα 5.11 παρουσιάζονται οι χάρτες μέγιστης και μέσης αθροιστικής ενεργού δόσης από όλα τα νουκλίδια σε ενήλικες μέσα σε 1 έτος. Φαίνεται ότι η μέγιστη δόση μπορεί να πλησιάσει τα 10^4 mSv σε μία μικρή ακτίνα (μαξ 2 χιλιομέτρων) γύρω από το εργοστάσιο Ακκούγιου. Ωστόσο, λίγο παραπέρα η μέγιστη δόση δεν ξεπερνά τα 10^2 mSv. Παρατηρείται μία μικρή ανομοιογένεια μεταξύ κάποιων περιοχών (ποικιλία χρωμάτων), η οποία πιθανώς οφείλεται στα μετεωρολογικά δεδομένα. Όσον αφορά την Κύπρο οι μέγιστες δόσεις ανά περιοχή κυμαίνονται μεταξύ 10^0 - 10^2 mSv, ενώ στην Ελλάδα δεν ξεπερνούν τα 10^1 mSv κυρίως βορειοανατολικά, στην ανατολική Κρήτη και στην περιοχή της Ρόδου. Σχετικά με τις μέσες δόσεις, αυτές παρουσιάζουν περισσότερη ομοιογένεια και δεν ξεπερνούν τα 10^1 mSv παρά μόνο σε περιοχή ακτίνας 15 χιλιομέτρων γύρω από το Ακκούγιου. Συγκεκριμένα, στην Κύπρο δεν ξεπερνούν τα 10^0 mSv, ενώ στην Ελλάδα τα 10^{-1} mSv.

Είναι πάλι φανερό ότι η μέγιστη ενεργός δόση ξεπερνά το κατώτερο επίπεδο αναφοράς των 20 mSv σε πολλές περιοχές (πχ. στην Κύπρο) και είναι μεγαλύτερη από 100 mSv στο Ακκούγιου. Όμως, η μέση τιμή σχεδόν πουθενά δεν ξεπερνά τα 10 mSv.

Όπως γίνεται αντιληπτό οι εικόνες 5.10 και 5.11 είναι παρόμοιες. Με μία προσεκτική σύγκριση, αυτό που θα μπορούσε κανείς να πει είναι ότι η δόση στα ενός έτους παιδιά είναι λίγο μεγαλύτερη.



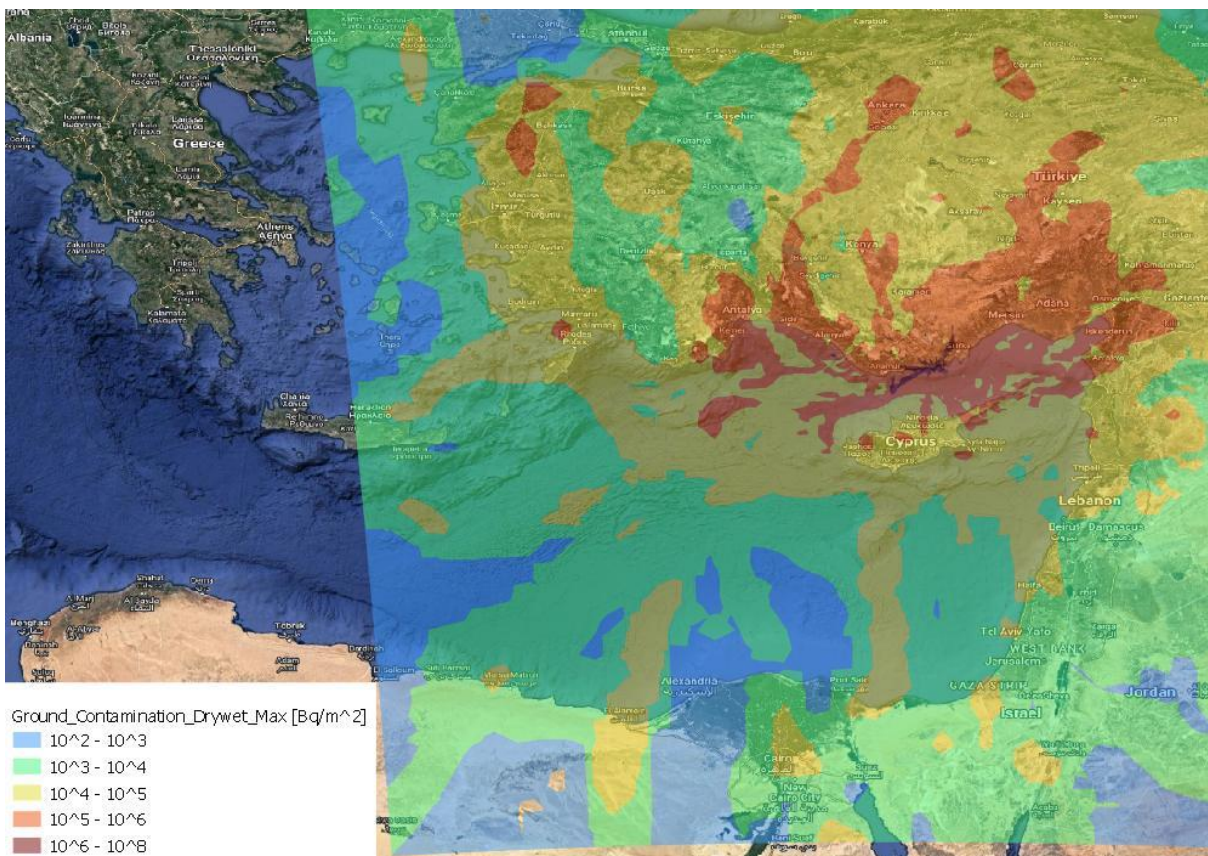
Εικόνα 5.11: Μέγιστη και μέση αθροιστική ενεργός δόση από όλα τα νουκλίδια σε ενήλικες σε 1 έτος

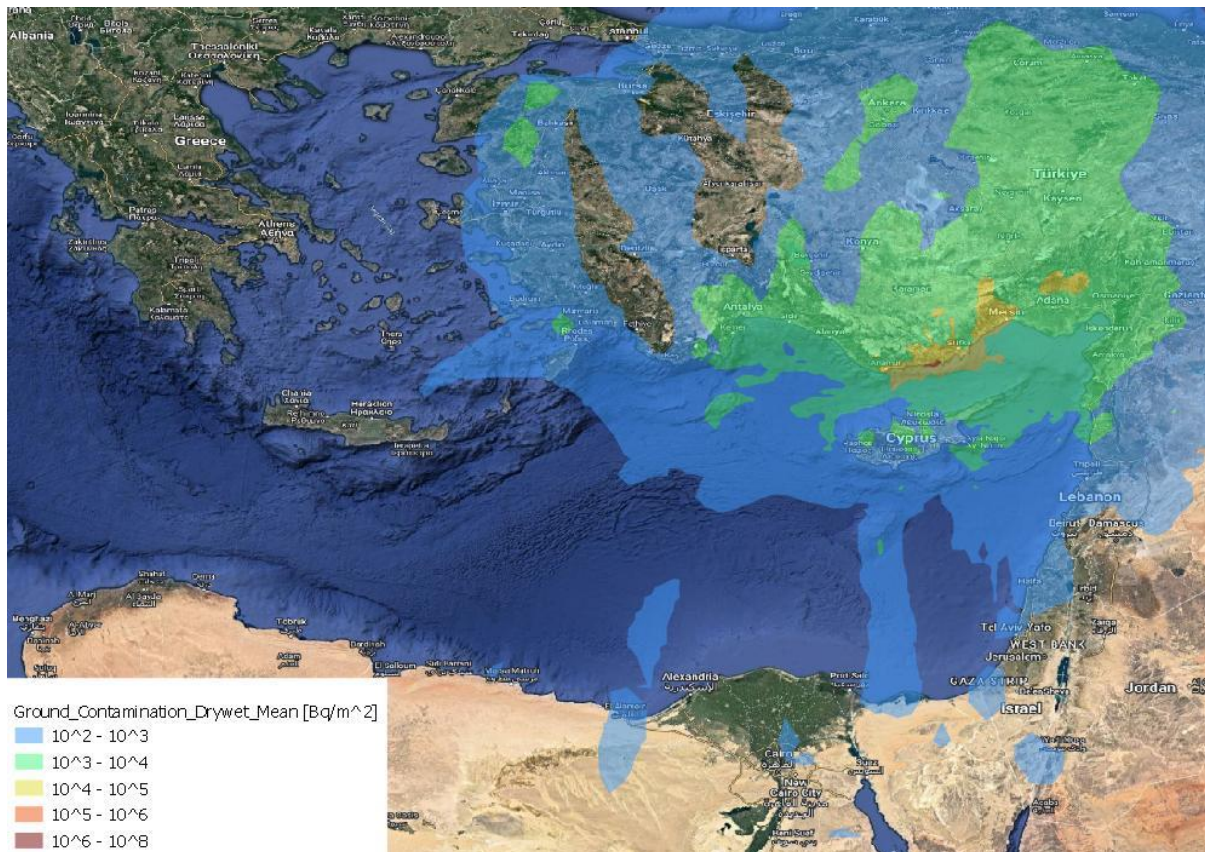
Πίνακας 5.11: Αθροιστική ενεργός δόση από όλα τα νουκλίδια σε ενήλικες σε 1 έτος στις επιλεγμένες περιοχές

	Καστελόριζο	Ρόδος	Άγιος Νικόλαος Κρήτης	Λευκωσία
Μέγιστη δόση [mSv]	11×10^{-3}	1430×10^{-3}	770×10^{-3}	18200×10^{-3}
Μέση δόση [mSv]	2×10^{-3}	27×10^{-3}	7×10^{-3}	293×10^{-3}

5.2.3. Συγκέντρωση στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση)

Στην εικόνα 5.12 απεικονίζεται η μέγιστη και μέση συγκέντρωση στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση). Φαίνεται ότι η μέγιστη συγκέντρωση στο έδαφος είναι υψηλή στη μελετώμενη περιοχή (τετραγωνική επιφάνεια πλευράς 800 χιλιομέτρων, με κέντρο το Ακκούγιου), ξεπερνώντας συχνά το επίπεδο αναφοράς των 3.7×10^4 Bq/m². Πολύ κοντά στο εργοστάσιο Ακκούγιου (μαξ 2 χιλιόμετρα) πλησιάζει τα 10^8 Bq/m², ενώ λίγο παραπέρα τα 10^6 Bq/m². Συγκεκριμένα, στην Κύπρο οι μέγιστες συγκεντρώσεις κυμαίνονται μεταξύ 10^4 - 10^6 Bq/m², ενώ στην Ελλάδα υπάρχει μεγαλύτερη διαβάθμιση μεταξύ 10^2 - 10^5 (μέγιστες τιμές κυρίως γύρω από την Αλεξανδρούπολη και στα νοτιοανατολικά). Οι μέσες τιμές φαίνεται να μην ξεπερνούν τα 10^5 Bq/m², παρά μόνο στην περιοχή 10 χιλιομέτρων γύρω από το Ακκούγιου όπου εμφανίζουν μέγιστα κοντά στα 10^6 Bq/m². Ενδεικτικά στην Κύπρο δεν ξεπερνούν τα 10^4 Bq/m² (πιο κάτω από το επίπεδο αναφοράς), ενώ στην Ελλάδα τα 10^3 Bq/m².





Εικόνα 5.12: Μέγιστη και μέση συγκέντρωση στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση)

Πίνακας 5.12: Συγκέντρωση στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση) στις επιλεγμένες περιοχές

	Καστελόριζο	Ρόδος	Άγιος Νικόλαος Κρήτης	Λευκωσία
Μέγιστη συγκέντρωση [Bq/m²]	16052	28251	6277	142212
Μέση δόση [Bq/m²]	176	434	50	1650

5.2.4. Ενεργός δόση ανά ώρα

Στην εικόνα 5.12 παρουσιάζονται οι χάρτες μέγιστης και μέσης ενεργού δόσης ανά ώρα. Παρατηρείται ότι η μέγιστη ενεργός δόση ανά ώρα δεν ξεπερνά τα 10^0 mSv/h, με εξαίρεση μία μικρή περιοχή ακτίνας κοντά 2 χιλιομέτρων γύρω από το εργοστάσιο Ακκούγιου όπου κυμαίνεται μεταξύ 10^0 - 10^1 mSv/h. Τόσο στην Ελλάδα, όσο και σχεδόν σε ολόκληρη την Κύπρο, η μέγιστη δόση δεν ξεπερνά τα 10^{-2} mSv/h. Σχετικά με τις μέσες δόσεις αυτές δεν ξεπερνούν πουθενά τα 10^{-2} mSv/h, με εξαίρεση μία περιοχή ακτίνας 2 χιλιομέτρων από το Ακκυγυ όπου μπορεί να φτάσουν κοντά τα 10^{-1} mSv/h.



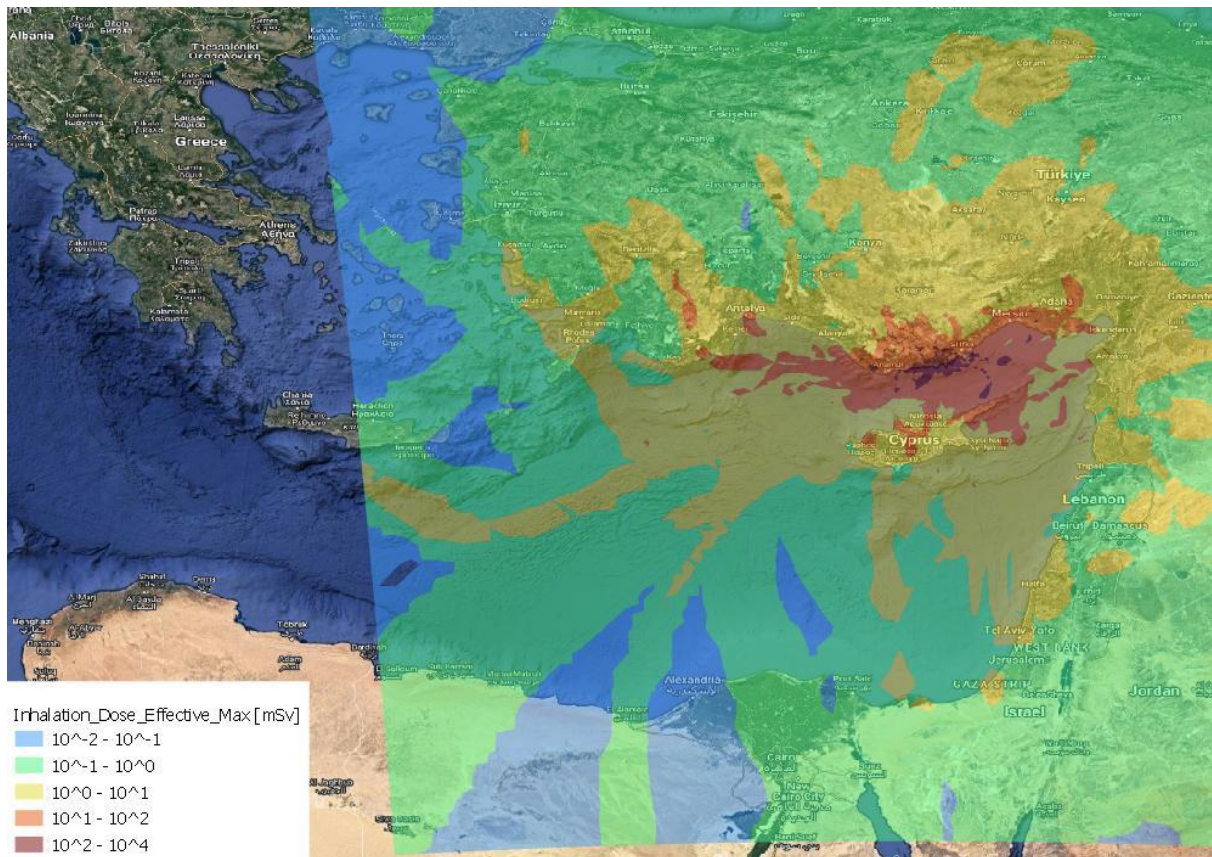
Εικόνα 5.13: Μέγιστη και μέση ενεργός δόση ανά ώρα

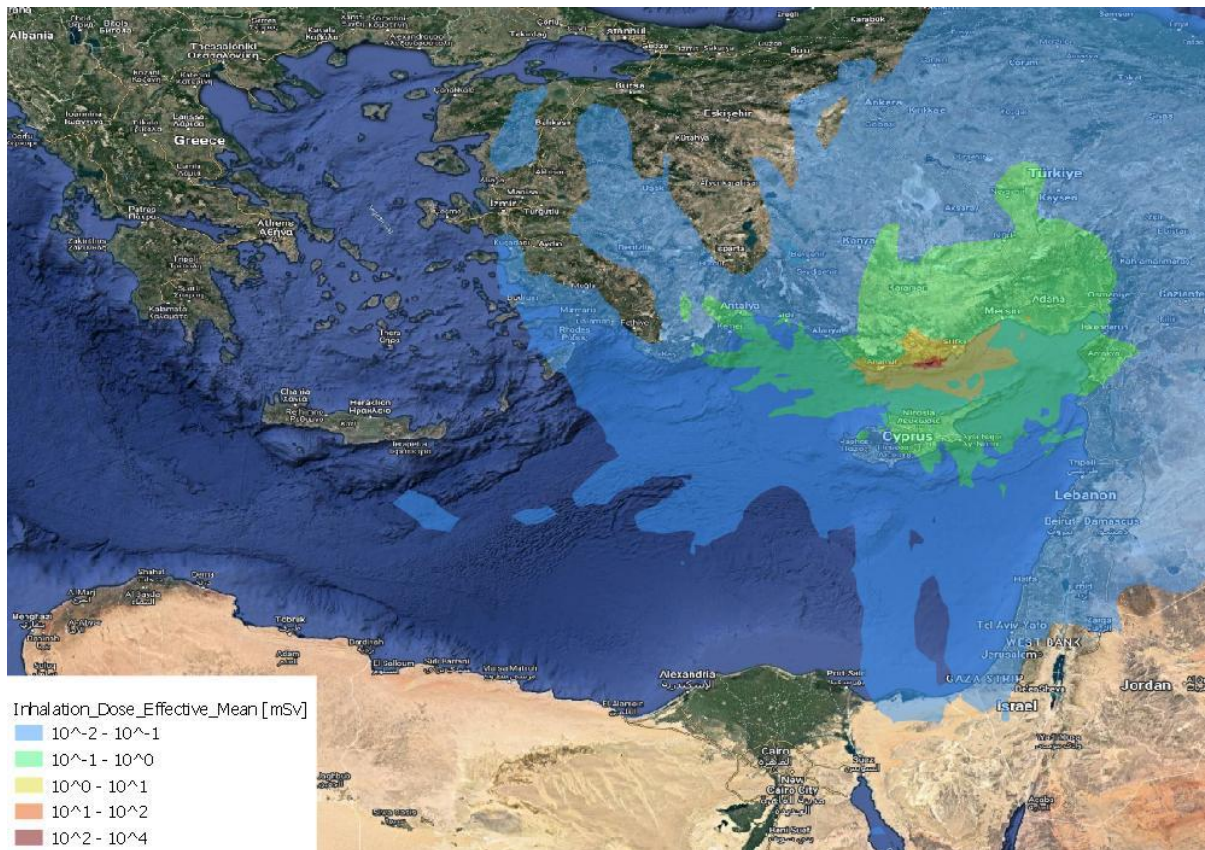
Πίνακας 5.13: Ενεργός δόση ανά ώρα στις επιλεγμένες περιοχές

	Καστελόριζο	Ρόδος	Άγιος Νικόλαος Κρήτης	Λευκωσία
Μέγιστη δόση ανά ώρα [mSv/h]	1150×10^{-6}	1990×10^{-6}	446×10^{-6}	10600×10^{-6}
Μέση δόση ανά ώρα [mSv/h]	13×10^{-6}	32×10^{-6}	4×10^{-6}	128×10^{-6}

5.2.5. Ενεργός δόση λόγω εισπνοής

Στην εικόνα 5.14 απεικονίζεται η μέγιστη και μέση ενεργός δόση λόγω εισπνοής. Φαίνεται ότι η μέγιστη δόση σε αρκετές περιοχές γύρω από το Ακκούγιου ξεπερνά το κατώτερο επίπεδο αναφοράς των 20 mSv. Κοντά στο εργοστάσιο Ακκούγιου (μαξ 2 χιλιόμετρα) πλησιάζει τα 10^4 mSv, ενώ λίγο παραπέρα τα 10^2 mSv. Ενδεικτικά, στην Κύπρο οι μέγιστες δόσεις κυμαίνονται μεταξύ 10^0 - 10^2 mSv, ενώ στην Ελλάδα μεταξύ 10^{-2} - 10^1 mSv. Οι μέσες τιμές φαίνεται να μην ξεπερνούν τα 10^1 mSv, παρά μόνο σε ακτίνα περίπου 20 χιλιομέτρων από το Ακκούγιου. Συγκεκριμένα στην Κύπρο δεν ξεπερνούν τα 10^0 mSv, ενώ στην Ελλάδα μόνο σε νοτιοανατολικά νησιά (πχ. Ρόδος, Καστελόριζο) ξεπερνούν για λίγο τα 10^{-2} mSv.





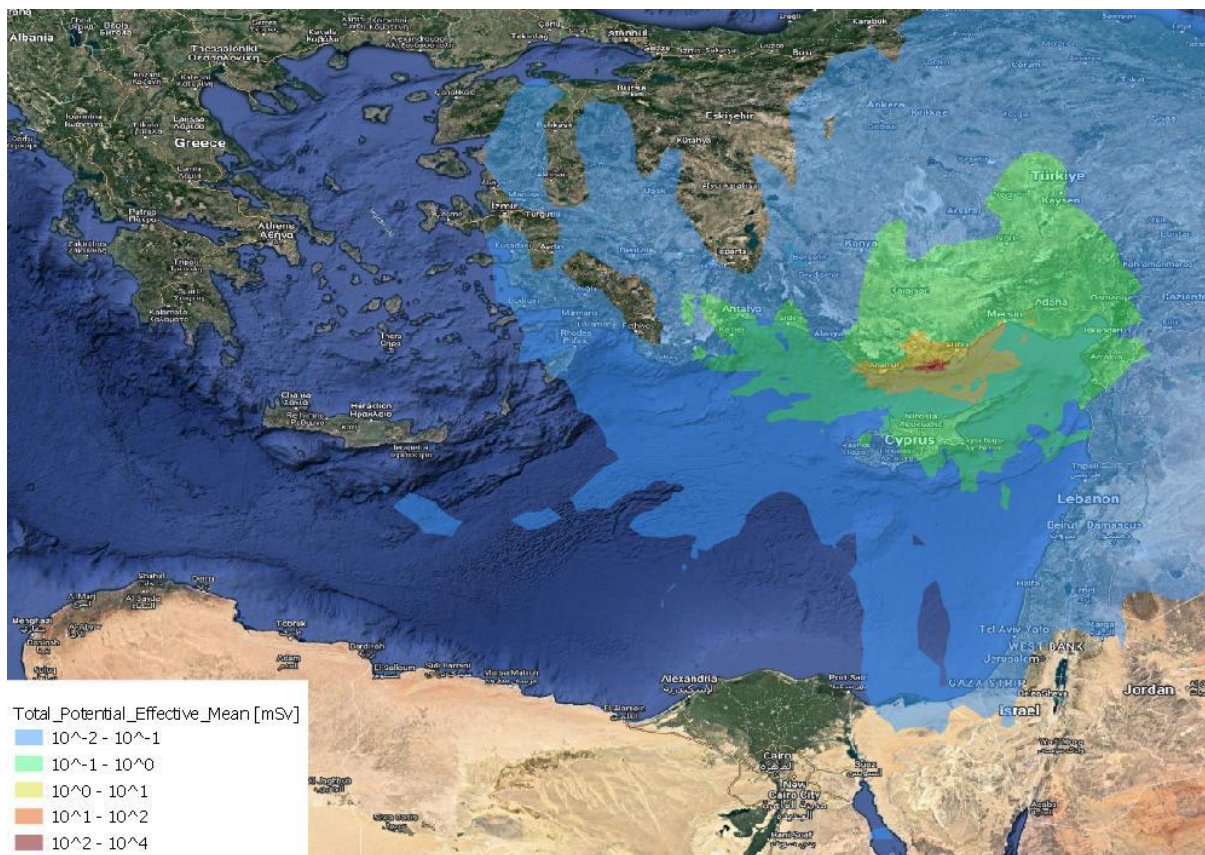
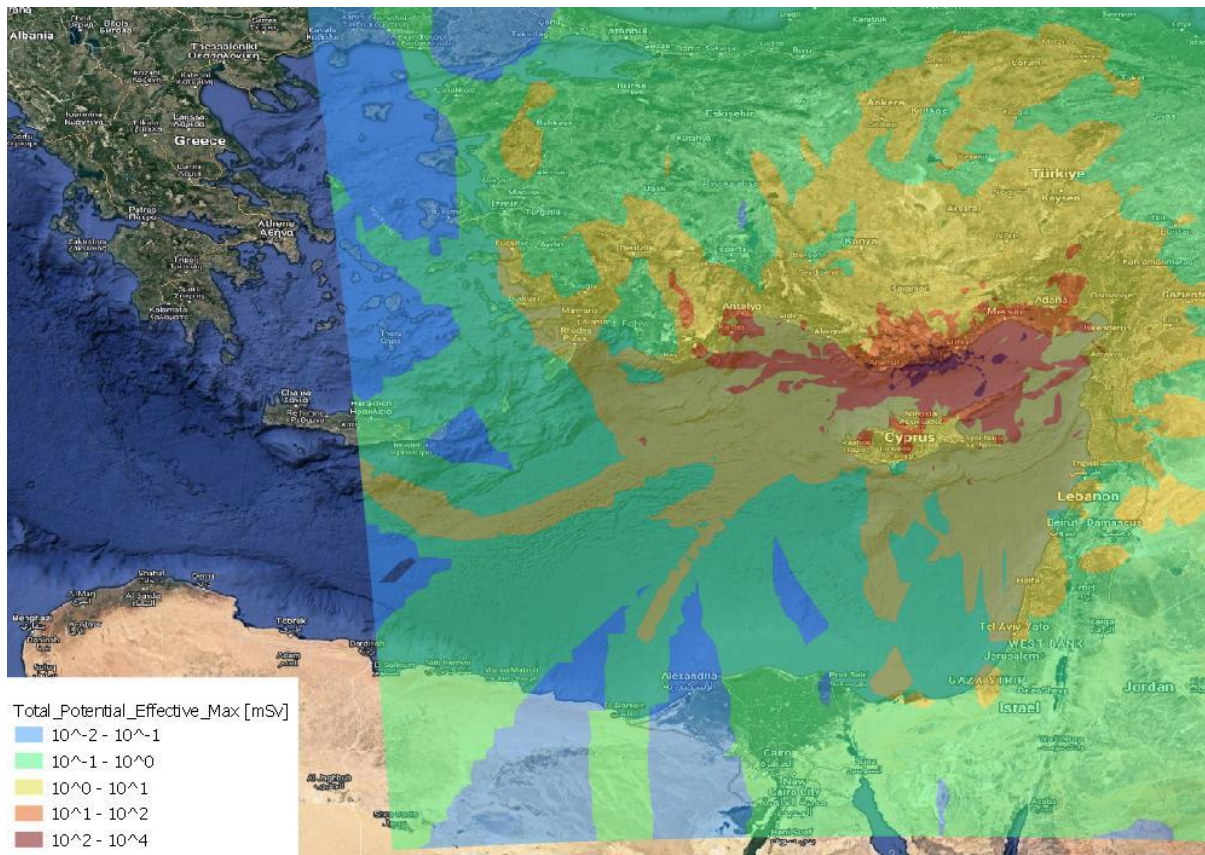
Εικόνα 5.14: Μέγιστη και μέση ενεργός δόση λόγω εισπνοής

Πίνακας 5.14: Ενεργός δόση λόγω εισπνοής στις επιλεγμένες περιοχές

	Καστελόριζο	Ρόδος	Άγιος Νικόλαος Κρήτης	Λευκωσία
Μέγιστη δόση [mSv]	1660×10^{-3}	700×10^{-3}	213×10^{-3}	17500×10^{-3}
Μέση δόση [mSv]	25×10^{-3}	15×10^{-3}	2×10^{-3}	236×10^{-3}

5.2.6. Ολική δυνητική ενεργός δόση

Στην εικόνα 5.15 παρουσιάζονται οι χάρτες μέγιστης και μέσης ολικής δυνητικής ενεργού δόσης. Παρατηρείται πάλι ότι σε αρκετές περιοχές γύρω από το εργοστάσιο η μέγιστη δόση ξεπερνά τα 20 mSv. Οι μέγιστες δόσεις γύρω από το εργοστάσιο Ακκούγιου (μαξ 2 χιλιόμετρα) φτάνουν κοντά τα 10^4 mSv, στην Κύπρο δεν ξεπερνούν τα 10^2 mSv, ενώ στην Ελλάδα δεν ξεπερνούν τα 10^0 mSv (με εξαίρεση στο Καστελόριζο και γύρω του). Σχετικά με τη μέση δόση, αυτή σε περιοχές μέχρι και 15 χιλιόμετρα από το εργοστάσιο Ακκούγιου ξεπερνά τα 10^1 mSv, φτάνοντας κοντά 10^4 ακριβώς εκεί. Συγκεκριμένα στην Κύπρο δεν ξεπερνούν τα 10^0 mSv, ενώ στην Ελλάδα μόνο σε νοτιοανατολικά νησιά (πχ. Καστελόριζο, Ρόδος) ξεπερνούν για λίγο τα 10^{-2} mSv.



Εικόνα 5.15: Μέγιστη και μέση ολική δυνητική δόση

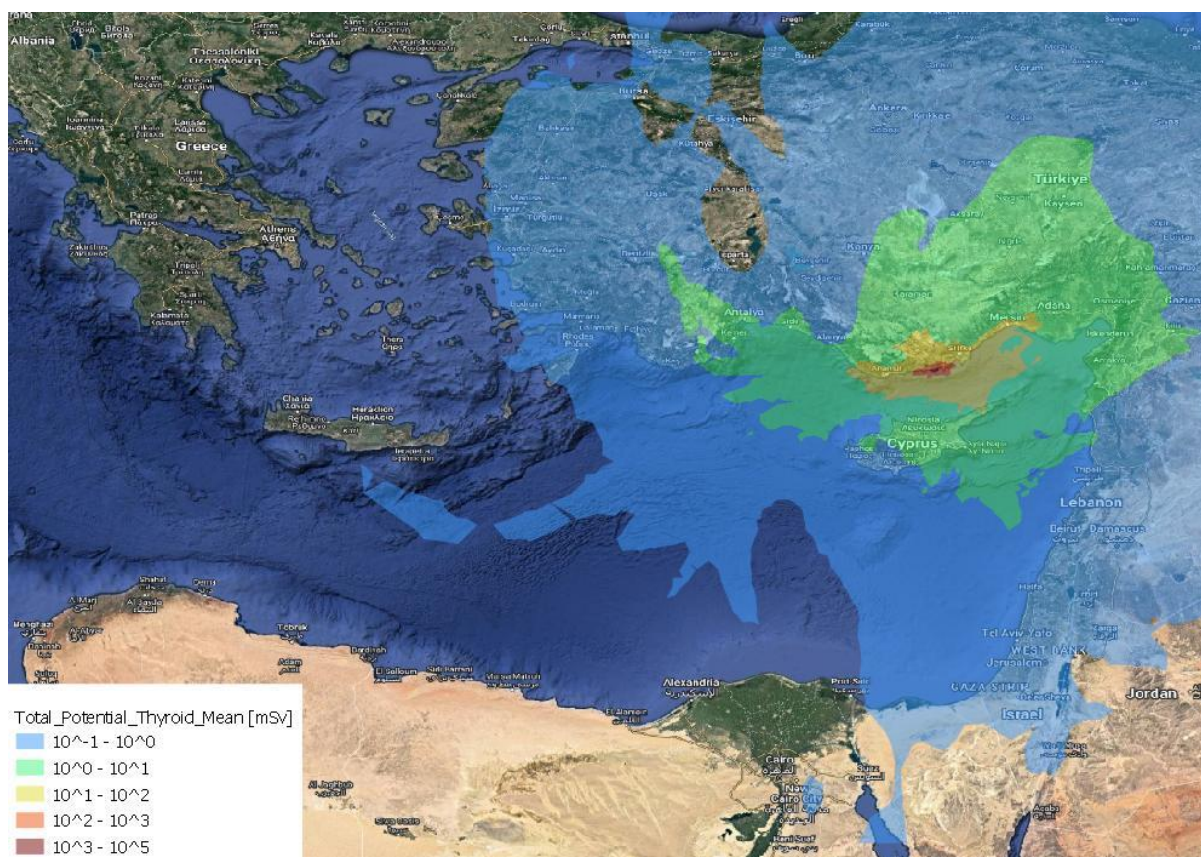
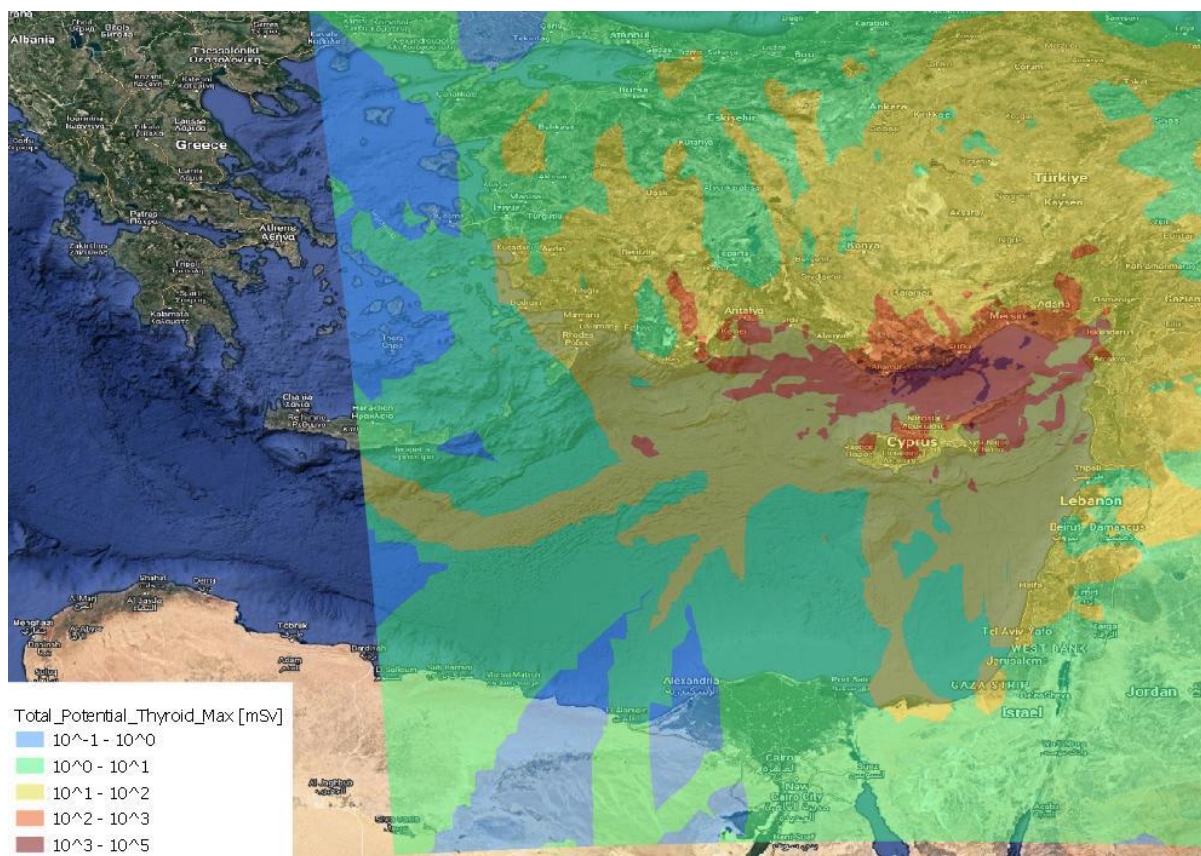
Πίνακας 5.15: Ολική δυνητική δόση στις επιλεγμένες περιοχές

	Καστελόριζο	Ρόδος	Άγιος Νικόλαος Κρήτης	Λευκωσία
Μέγιστη δόση [mSv]	1810×10^{-3}	730×10^{-3}	264×10^{-3}	18400×10^{-3}
Μέση δόση [mSv]	27×10^{-3}	19×10^{-3}	2×10^{-3}	257×10^{-3}

5.2.7. Ολική δυνητική δόση στον θυρεοειδή

Στην εικόνα 5.16 απεικονίζεται η μέγιστη και μέση ολική δυνητική δόση στον θυρεοειδή. Παρατηρούνται αξιοσημείωτα υψηλά επίπεδα μέγιστης δόσης σε μεγάλο τμήμα της μελετώμενης περιοχής, τα οποία σε περιοχές 5 χιλιομέτρων γύρω από το εργοστάσιο Ακκούγιου μπορεί να ξεπερνούν τα 10^4 mSv (βλ παράγραφο 3.10). Συγκεκριμένα σε πολλές περιοχές που φτάνουν και τα 360 χιλιόμετρα από το Ακκούγιου οι μέγιστες δόσεις κυμαίνονται μεταξύ 10^2 - 10^3 mSv (πορτοκαλί χρώμα), ξεπερνώντας το επίπεδο αναφοράς των 50 mSv (βλ. παράγραφο 3.10), ενώ γύρω από το Ακκούγιου μπορεί να φτάσουν κοντά τα 10^5 mSv. Ενδεικτικά στην Κύπρο σε κάποιες περιοχές όπως η Λευκωσία (245 mSv) η δόση υπερβαίνει το επίπεδο αναφοράς των 50 mSv, ενώ στην Ελλάδα μπορεί να φτάσει τα 25 mSv στα νοτιοανατολικά (βλ. Καστελόριζο). Σχετικά με τη μέση δόση, αυτή σε περιοχές μέχρι και 150 χιλιόμετρα από το Ακκούγιου ξεπερνά τα 10^1 mSv, φτάνοντας κοντά 10^4 mSv στα 6 χιλιόμετρα γύρω από εκεί. Στην Κύπρο δεν ξεπερνά τα 10^1 mSv, ενώ στην Ελλάδα μόνο σε νοτιοανατολικά νησιά (πχ. Καστελόριζο) πλησιάζει τα 0.4 mSv.

Σημειώνεται ότι σε περίπτωση εγκύου, η δόση στο έμβρυο σχετίζεται άμεσα με τη δόση στον θυρεοειδή της εγκύου. Ειδικότερα, η δόση στο έμβρυο υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τη δόση στον θυρεοειδή της μητέρας με συντελεστή ίσο με 1.54, ο οποίος αντιστοιχεί σε έκθεση της μητέρας μεταξύ της 211^{ης} και της 240^{ης} ημέρας κύησης, αποτελώντας τη δυσμενέστερη περίοδο για την έκθεση του εμβρύου [26].



Εικόνα 5.16: Μέγιστη και μέση ολική δυνητική δόση στον θυρεοειδή

Πίνακας 5.16: Ολική δυνητική δόση στον θυρεοειδή στις επιλεγμένες περιοχές

	Καστελόριζο	Ρόδος	Άγιος Νικόλαος Κρήτης	Λευκωσία
Μέγιστη δόση [mSv]	24100×10^{-3}	9400×10^{-3}	3310×10^{-3}	245000×10^{-3}
Μέση δόση [mSv]	364×10^{-3}	218×10^{-3}	33×10^{-3}	3330×10^{-3}

5.2.8. Στατιστική ανάλυση δόσης θυρεοειδή στην περιοχή της Λευκωσίας

Στις προηγούμενες παραγράφους αποτυπώθηκαν σε χάρτες και παρουσιάστηκαν αναλυτικά τα αποτελέσματα σχετικά με το εύρος διακύμανσης των ραδιολογικών επιπτώσεων, όπως εκτιμάται, σε εξάρτηση από τις διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες που μπορεί να επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή. Τα αποτελέσματα αυτά έδωσαν αντιπροσωπευτική εικόνα της μέσης, αλλά και της μέγιστης πιθανής έκθεσης του πληθυσμού στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου λόγω της ατμοσφαιρικής μεταφοράς του ραδιενεργού νέφους. Σε πολλές περιοχές, εκτός της περιοχής του σταθμού (πχ Κύπρος), η δόση ενδέχεται να υπερβεί τα κριτήρια δόσης, όπως φάνηκε παραπάνω (πχ Εικόνες 5.12, 5.16).

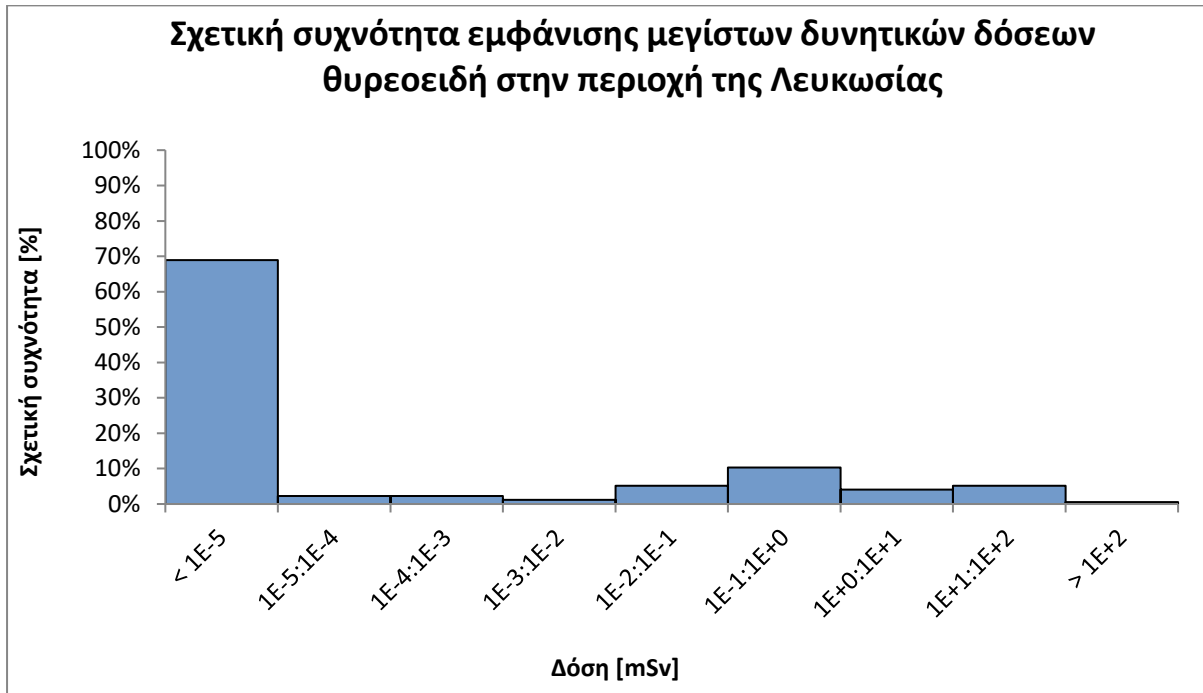
Για την εκτίμηση του ρίσκου απαιτείται η γνώση της πιθανότητας η έκθεση να υπερβεί τα κριτήρια δόσης. Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται στην παρούσα παράγραφο επιτρέπει την εκτίμηση της πιθανότητας υπέρβασης των κριτηρίων δόσης, μέσω απλής στατιστικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Παρακάτω θα παρουσιαστεί ενδεικτικά η εφαρμογή της στατιστικής επεξεργασίας και η αντίστοιχη πιθανότητα υπέρβασης του κριτηρίου δόσης για την περίπτωση της Λευκωσίας, η οποία βρίσκεται κοντά στον σταθμό (~115km).

Για το παράδειγμα αυτό μελετάται η μέγιστη ολική δυνητική δόση στον θυρεοειδή στη Λευκωσία. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται η σχετική συχνότητα εμφάνισης ανά εύρος τιμών δόσεων καθώς και η αθροιστική συχνότητα μη υπέρβασης δόσης.

Υπενθυμίζεται ότι στη μεθοδολογία που περιγράφεται στην παράγραφο 4.2 έχει δημιουργηθεί πίνακας που περιλαμβάνει 8056 σειρές (όσες το πλήθος των σημείων του πλέγματος) και 174 στήλες (όσες οι μελετώμενες μέρες/σενάρια) στις οποίες καταγράφονται οι αθροιστικές δόσεις στο τέλος της πέμπτης ημέρας μετά την έναρξη της έκλυσης (120 ώρες) .

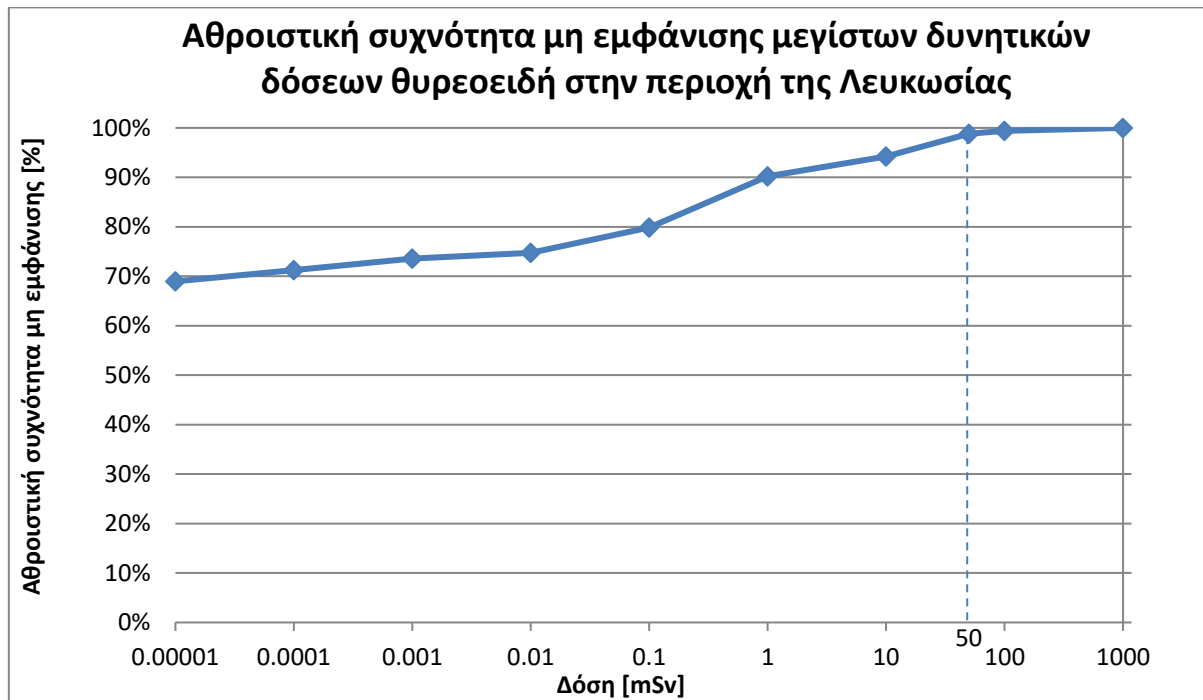
Από τον προαναφερόμενο πίνακα, αντλούνται οι 174 τιμές της σειράς δεδομένων που αντιστοιχούν στις συντεταγμένες της Λευκωσίας. Λαμβάνοντας αυτές τις 174 τιμές για τη μέγιστη ολική δυνητική δόση στον θυρεοειδή, μπορεί κανείς ενδεικτικά να δει ότι η μέγιστη από αυτές είναι 245 mSv.

Στο διάγραμμα 5.1. απεικονίζεται η πυκνότητα πιθανότητας με βάση εννέα διαστήματα δόσης στον θυρεοειδή. Όπως παρατηρείται, η συντριπτική συχνότητα (~69%) αφορά σε δόσεις μικρότερες από 1×10^{-5} mSv, δηλαδή αμελητέες. Η πιθανότητα η δόση να βρίσκεται στο διάστημα 1 έως 10 mSv είναι περίπου 4%, ενώ η πιθανότητα η δόση να βρίσκεται στο διάστημα που περιέχει το κριτήριο δόσης (50 mSv) είναι περίπου 5%. Η πιθανότητα η δόση να είναι πάνω από 100 mSv είναι της τάξης του 0.6%.



Διάγραμμα 5.1: Σχετική συχνότητα εμφάνισης μεγίστων δυνητικών δόσεων θυρεοειδή στην περιοχή της Λευκωσίας

Στο διάγραμμα 5.2. απεικονίζεται η αθροιστική συχνότητα μη εμφάνισης της μέγιστης δυνητικής δόση θυρεοειδή στην περιοχή της Λευκωσίας. Η πιθανότητα η δόση να μην ξεπερνά τα 1×10^{-5} mSv είναι 69%, ενώ η πιθανότητα να μην ξεπερνά τα 10 mSv είναι 94%. Η πιθανότητα να μην υπερβαίνεται το κριτήριο δόσης των 50 mSv είναι σχεδόν 99% ή ισοδύναμα η πιθανότητα η δόση στον θυρεοειδή να ξεπεράσει το κριτήριο των 50 mSv είναι της τάξης του 1%.



Διάγραμμα 5.2: Αθροιστική συχνότητα μη εμφάνισης μεγίστων δυνητικών δόσεων θυρεοειδή στην περιοχή της Λευκωσίας

Φαίνεται ότι, αν και η πιθανότητα είναι πάρα πολύ μικρή, ωστόσο, δεν μπορεί να αποκλειστεί κιόλας, η ενδεχόμενη έκθεση να απαιτεί τη λήψη κάποιων μέτρων για την προστασία από το ραδιενεργό ιώδιο στο νέφος, ειδικά για εγκύους και παιδιά.

Η μεγάλη επιρροή των μετεωρολογικών δεδομένων φάνηκε καθαρά και στα αποτελέσματα, όπως παρουσιάστηκαν και στις προηγούμενες παραγράφους. Από την απλή στατιστική ανάλυση και την εκτίμηση της πιθανότητας στην παρούσα παράγραφο, επιβεβαιώνεται το πολύ μεγάλο εύρος της πιθανής έκθεσης ανάλογα με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Ειδικότερα, όπως προκύπτει, η δόση μπορεί να κυμαίνεται από επίπεδα τα οποία είναι πρακτικά αμελητέα, έως και επίπεδα που ενδέχεται να απαιτούν κάποια άμεση απόκριση για την προστασία κατά τη διέλευση του ραδιενεργού νέφους.

Οι προσομοιώσεις στην παρούσα εργασία, αν και στηρίζονται σε όρο πηγής δέκα φορές μικρότερο από αυτόν που έχει χρησιμοποιήσει ο ΔΟΑΕ για γενικές μελέτες (βλ. παράγραφο 3.3), εντούτοις, θεωρούμε ότι μπορεί να παραμένουν συντηρητικές. Συγκεκριμένα, αν και δέκα φορές μικρότερος, ο θεωρούμενος όρος πηγής μπορεί να είναι αρκετά μεγαλύτερος

τελικά από την ενδεχόμενη έκλυση στους συγκεκριμένους αντιδραστήρες, λόγω της προηγμένης τεχνολογίας και της αυξημένης ασφάλειας, ειδικά στον τομέα μετριάσμου των ραδιενεργών εκλύσεων (διπλό περίβλημα, core catcher, κλπ). Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η πιθανολογική ανάλυση που έγινε στην παράγραφο αυτή είναι ενδεικτική καθώς αφορά μόνο τη δόση στον θυρεοειδή κατά τη φάση διέλευσης του νέφους (plume phase). Η εναπόθεση και η ρύπανση του εδάφους ενδέχεται να έχουν σημαντικές ραδιολογικές επιπτώσεις πιο μακροπρόθεσμα (πχ. Εικόνες 5.10, 5.11). Η πιθανολογική ανάλυση, αντίστοιχα με αυτή που παρουσιάστηκε για την άμεση έκθεση στον θυρεοειδή, μπορεί να πραγματοποιηθεί και για πιο μακροπρόθεσμη έκθεση (πχ συνολική έκθεση το πρώτο έτος). Θεωρείται ότι, αν και δεν συμπεριλήφθηκε στην παρούσα εργασία λόγω χρονικών περιορισμών, θα ήταν ενδιαφέρον να εκτιμηθεί η πιο μακροπρόθεσμη έκθεση και να συγκριθεί με την πρώιμη φάση. Αυτό θα βοηθούσε στην πιο περιεκτική και πληρέστερη κατανόηση των πιθανών ραδιολογικών επιπτώσεων σε όλη τους την έκταση.

6. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία εκτιμώνται τα εύρη διακύμανσης των ραδιολογικών επιπτώσεων στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, εξαιτίας ενός υποθετικού μείζονος πυρηνικού ατυχήματος διασυνοριακής κλίμακας στον νέο πυρηνικό αντιδραστήρα Ακκούγιου. Η προσέγγιση βασίζεται σε υπολογισμούς διασποράς μέσης εμβέλειας, λαμβάνοντας υπόψη τα μετεωρολογικά δεδομένα της ευρύτερης περιοχής σε διάστημα έξι μηνών. Τα μετεωρολογικά δεδομένα προέρχονται από επαν-ανάλυση των προγνωστικών δεδομένων και διόρθωσής τους βάσει των πραγματικών μετρήσεων. Πρόκειται, επομένως, για την αντιπροσωπευτικότερη εικόνα των καιρικών συνθηκών στην περιοχή που είναι διαθέσιμη για τέτοιους υπολογισμούς. Ο υποθετικός όρος πηγής του ατυχήματος λαμβάνεται θεωρώντας ως ικανοποιητική προσέγγιση τη χρήση σχετικών δεδομένων για τυπικό αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος (PWR) που έχει χρησιμοποιήσει ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας σε γενικές μελέτες εκτίμησης των ζωνών έκτακτης ανάγκης πυρηνικών αντιδραστήρων. Ειδικότερα, σύμφωνα με τον ΔΟΑΕ, θεωρείται ότι συνολικά εκλύεται το 10% του αποθέματος σε συνολικό διάστημα ίσο με 10 ώρες. Όμως, δεδομένου ότι ο νέος πυρηνικός σταθμός είναι τελευταίας τεχνολογίας και συνεπώς αναβαθμισμένος σε θέματα ασφαλείας, η συνολική έκλυση θεωρείται μία τάξη μεγέθους μικρότερη από την αντίστοιχη του ΔΟΑΕ. Ο συνδυασμός του όρου πηγής με τα μετεωρολογικά δεδομένα, που αντλούνται από την αμερικανική «Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (NOAA)», εισάγονται ως δεδομένα για την εκτίμηση της ατμοσφαιρικής διασποράς και έκθεσης με χρήση Lagrangian μοντέλου στο πλαίσιο του συστήματος JRODOS. Συνολικά, εκτελούνται 174 προσομοιώσεις, μία για κάθε σενάριο έκλυσης. Σε κάθε σενάριο έκλυσης, αυτό που αλλάζει είναι η ημερομηνία έναρξης της έκλυσης, που έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικές καιρικές συνθήκες και ατμοσφαιρική μεταφορά και διασπορά του νέφους. Από την επεξεργασία του δείγματος αυτού των 174 προσομοιώσεων, εξάγονται οι μέγιστες και μέσες τιμές σε κάθε τοποθεσία, οι οποίες τελικά αναπαρίστανται σε αντίστοιχους χάρτες δόσεων και συγκεντρώσεων. Οι τιμές αυτές συγκρίνονται με τα επίπεδα αναφοράς του ΔΟΑΕ για να ελεγχθεί αν τα υπερβαίνουν και συνεπώς αν θα απαιτούνται επιπλέον ειδικά μέτρα προστασίας.

Τα κύρια συμπεράσματα της παρούσας μελέτης συνοψίζονται παρακάτω:

- Όσον αφορά τις μελετώμενες δόσεις, φαίνεται ότι οι μέγιστες εμφανίζονται συνήθως σε μία ακτίνα περίπου 2 χιλιομέτρων γύρω από τον πυρηνικό σταθμό. Πρόκειται για μέγιστες δόσεις που κυμαίνονται ενδεικτικά γύρω στα 10^4 mSv, ξεπερνώντας αισθητά το μέγιστο επίπεδο αναφοράς των 100 mSv και φτάνοντας σε ντετερμινιστικές επιπτώσεις.

- Ωστόσο, και ειδικά για μεγαλύτερες αποστάσεις, οι χάρτες παρουσιάζουν εξαιρετικά πολύπλοκη και μεταβαλλόμενη εικόνα των ραδιολογικών επιπτώσεων. Η ακτίνα, μέσα στην οποία οι μέγιστες μελετώμενες δόσεις ξεπερνούν το επίπεδο αναφοράς των 100 mSv μπορεί να μεταβάλλεται πολύ ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, ενώ η απόσταση δεν είναι απαραίτητα η σημαντικότερη παράμετρος. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην διακύμανση των μετεωρολογικών δεδομένων. Παραδείγματος χάρη, βλέποντας τη μέγιστη ενεργό δόση λόγω εισπνοής, φαίνεται ότι κάποια περιοχή σε ακτίνα 100-200 χιλιομέτρων μπορεί να ξεπερνά τα 100 mSv, ενώ κάποια άλλη αρκετά πιο κοντά στον σταθμό, πχ ακτίνα 20-30 χιλιομέτρων, να μην τα ξεπερνά.
- Σχετικά με τις μέσες μελετώμενες δόσεις, αυτές φαίνεται ότι δεν υπερβαίνουν το μέγιστο επίπεδο αναφοράς των 100 mSv σε ακτίνες μεγαλύτερες από 4 χιλιόμετρα. Εξάιρεση αποτελεί η μέση δόση στον θυρεοειδή η οποία ενδέχεται να ξεπεράσει το αντίστοιχο επίπεδο αναφοράς των 50 mSv ακόμα και σε ακτίνα 40 χιλιομέτρων.
- Γενικότερα παρατηρείται ότι οι αντίστοιχες μέγιστες και μέσες τιμές δόσεων και συγκεντρώσεων σε μία τοποθεσία μπορεί να έχουν 1 με 2 τάξεις μεγέθους διαφορά.
- Σχετικά με την ολική δυνητική δόση στον θυρεοειδή, παρατηρούνται υψηλά επίπεδα μέγιστης δόσης σε μεγάλο τμήμα της μελετώμενης περιοχής. Συγκεκριμένα σε πολλές περιοχές της τάξης των 300 χιλιομέτρων από τον σταθμό, οι μέγιστες δόσεις ξεπερνούν το επίπεδο δόσης των 50 mSv.
- Όσον αφορά τη μέγιστη συγκέντρωση στο έδαφος, φαίνεται ότι μπορεί να ξεπεράσει το επίπεδο των 37 kBq/m² σε περιοχές που ξεπερνούν τα 300 χιλιόμετρα από το Ακκούγιου. Αντιστοίχως, η μέση συγκέντρωση ξεπερνά το επίπεδο αναφοράς σε ακτίνα 30 χιλιομέτρων, αλλά ενδέχεται να συμβεί το ίδιο ακόμα και σε περιοχή 60 χιλιομέτρων.
- Όσον αφορά την Κύπρο, φαίνεται ότι στις περισσότερες μελετώμενες περιπτώσεις δεν ξεπερνώνονται τα ανώτατα επίπεδα αναφοράς για την ενεργό δόση. Η μέγιστη δόση στον θυρεοειδή (βλ. Εικόνα 5.16) φάνηκε να ξεπερνά το επίπεδο αναφοράς των 50 mSv, φτάνοντας τα 245 mSv στην περιοχή της Λευκωσίας. Η μέγιστη συγκέντρωση στο έδαφος φτάνει τα 1.4×10^5 Bq/m² στην περιοχή της Λευκωσίας υπερβαίνοντας την τιμή των 37 kBq/m².
- Στην Ελλάδα, η οποία βρίσκεται πιο μακριά από το Ακκούγιου σε σχέση με την Κύπρο, δεν ξεπερνώνονται ούτε τα κατώτατα επίπεδα αναφοράς δόσεων και συγκεντρώσεων, ενώ οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στο Καστελόριζο και στην Ρόδο.

- Από την στατιστική ανάλυση και την εκτίμηση της πιθανότητας επιβεβαιώνεται το πολύ μεγάλο εύρος της πιθανής έκθεσης ανάλογα με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Ειδικότερα, όπως προκύπτει, η δόση μπορεί να κυμαίνεται από επίπεδα τα οποία είναι πρακτικά αμελητέα, έως και επίπεδα που ξεπερνούν τα επίπεδα αναφοράς, με πιθανή δηλαδή ανάγκη κάποιας απόκρισης για την προστασία κατά τη διέλευση του ραδιενεργού νέφους.
- Επιπλέον εκτιμήθηκε με χωριστές προσομοιώσεις η δόση ανά μοναδιαία τιμή έκλυσης για τα δύο κυριότερα ραδιονουκλίδια, δηλαδή το I-131 και το Cs-137, οι οποίες μπορεί να δώσουν μια γρήγορη εκτίμηση των μέγιστων δόσεων κατά την πρώτη φάση, αλλά και σε πιο μακροπρόθεσμη κλίμακα, αντίστοιχα.
- Σύμφωνα με τις γνώσεις μας, η συγκεκριμένη μεθοδολογία και τα υπολογιστικά εργαλεία που αναπτύχθηκαν είναι πρώτη φορά που εφαρμόζονται στην Ελλάδα, δίνοντας τη δυνατότητα για πιο αντιπροσωπευτική εκτίμηση των πιθανών ραδιολογικών επιπτώσεων λόγω ενός μεγάλου πυρηνικού ατυχήματος εκτός συνόρων. Λόγω των περιορισμών χρόνου και υπολογιστικής ισχύος, στο πλαίσιο εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας, η έκταση των σεναρίων και των μετεωρολογικών δεδομένων, περιορίστηκαν σε διάρκεια έξι μηνών. Θεωρείται ότι για πιο αξιόπιστη εκτίμηση της διακύμανσης των επιπτώσεων, απαιτείται μεγαλύτερο εύρος δύο ή τριών ετών. Η διαδικασία και η όλη μεθοδολογία θα είναι σε αυτήν την περίπτωση εντελώς ίδια, ωστόσο, θα αυξηθούν οι απαιτήσεις χρόνου και υπολογιστικής ισχύος.

Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 5.1: Σχετική συχνότητα εμφάνισης μεγίστων δυνητικών δόσεων θυρεοειδή στη Λευκωσία.....81

Διάγραμμα 5.2: Αθροιστική συχνότητα μη εμφάνισης μεγίστων δυνητικών δόσεων θυρεοειδή στη Λευκωσία.....82

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.1: Πυρηνικός σταθμός Ακκούγιου.....	18
Εικόνα 2.2: Σχέδιο κάτοψης εγκατάστασης Ακκούγιου.....	20
Εικόνα 2.3: Φάση κατασκευής του εργοστασίου Ακκούγιου.....	20
Εικόνα 3.1: Ατμοσφαιρική μεταφορά, φαινόμενα εναπόθεσης και μονοπάτια έκθεσης.....	23
Εικόνα 3.2: Φαινόμενα που λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο επίγειας τροφικής αλυσίδας όπως περιγράφονται στην παραπάνω παράγραφο.....	24
Εικόνα 3.3: Μοντέλο για κατοικημένες περιοχές.....	25
Εικόνα 3.4: Το «Hydrological Model Chain» του Jrodos.....	26
Εικόνα 3.5: Προσομοίωση ατμοσφαιρικής διασποράς τμημάτων της έκλυσης (puffs). (a) Συμπεριφορά του πλουμίου, (b) βραχυπρόθεσμη προσομοίωση.....	31
Εικόνα 4.1: Αρχεία μορφής csv.....	49
Εικόνα 4.2: Παράθυρο Data Source Manager.....	50
Εικόνα 4.3: Παράθυρο Generate Contours.....	51
Εικόνα 4.4: Παράθυρο Layer Properties.....	52
Εικόνα 4.5: Παράθυρο New Print Layout.....	52
Εικόνα 5.1: Μέγιστη και μέση ολοκληρωμένη συγκέντρωση καισίου στον αέρα.....	54
Εικόνα 5.2: Μέγιστη και μέση ολοκληρωμένη συγκέντρωση στον αέρα λόγω ιωδίου.....	56
Εικόνα 5.3: Μέγιστη και μέση συγκέντρωση καισίου στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση).....	58
Εικόνα 5.4: Μέγιστη και μέση συγκέντρωση ιωδίου στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση).....	59
Εικόνα 5.5: Μέγιστη και μέση ενεργός δόση στο έδαφος ανά ώρα λόγω καισίου.....	61
Εικόνα 5.6: Μέγιστη και μέση ενεργός δόση στο έδαφος ανά ώρα λόγω ιωδίου.....	62

Εικόνα 5.7: Μέγιστη και μέση ολική δυνητική δόση λόγω καισίου.....	64
Εικόνα 5.8: Μέγιστη και μέση ολική δυνητική δόση λόγω ιωδίου.....	65
Εικόνα 5.9: Μέγιστη και μέση ολική δυνητική δόση στον θυρεοειδή.....	67
Εικόνα 5.10: Μέγιστη και μέση αθροιστική ενεργός δόση από όλα τα νουκλίδια σε 1 έτους παιδιά σε 1 έτος.....	69
Εικόνα 5.11: Μέγιστη και μέση αθροιστική ενεργός δόση από όλα τα νουκλίδια σε ενήλικες σε 1 έτος.....	71
Εικόνα 5.12: Μέγιστη και μέση συγκέντρωση στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση).....	73
Εικόνα 5.13: Μέγιστη και μέση ενεργός δόση ανά ώρα.....	74
Εικόνα 5.14: Μέγιστη και μέση ενεργός δόση λόγω εισπνοής.....	76
Εικόνα 5.15: Μέγιστη και μέση ολική δυνητική δόση.....	77
Εικόνα 5.16: Μέγιστη και μέση ολική δυνητική δόση στον θυρεοειδή.....	79

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 3.1: Απόθεμα ραδιονουκλιδίων στην καρδιά του αντιδραστήρα και όρος πηγής.....	28
Πίνακας 3.2: Ομάδα ισοτόπων και παράμετροι εναπόθεσης.....	35
Πίνακας 3.3: Υπολογιστική δομή του μοντέλου RIMPUFF στο JRodos.....	38
Πίνακας 3.4: Κριτήρια δόσης που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.....	43
Πίνακας 5.1: Ολοκληρωμένη συγκέντρωση καϊσίου στον αέρα στις επιλεγμένες τοποθεσίες.....	55
Πίνακας 5.2: Ολοκληρωμένη συγκέντρωση ιωδίου στον αέρα στις επιλεγμένες περιοχές...56	
Πίνακας 5.3: Συγκέντρωση καϊσίου στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση) στις επιλεγμένες περιοχές.....	58
Πίνακας 5.4: Συγκέντρωση ιωδίου στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση) στις επιλεγμένες περιοχές.....	60
Πίνακας 5.5: Ενεργός δόση στο έδαφος ανά ώρα λόγω καϊσίου στις επιλεγμένες περιοχές.....	61
Πίνακας 5.6: Ενεργός δόση στο έδαφος ανά ώρα λόγω ιωδίου στις επιλεγμένες περιοχές.....	63
Πίνακας 5.7: Ολική δυνητική δόση λόγω καϊσίου στις επιλεγμένες περιοχές.....	64
Πίνακας 5.8: Ολική δυνητική δόση λόγω ιωδίου στις επιλεγμένες περιοχές.....	66
Πίνακας 5.9: Ολική δυνητική δόση στον θυρεοειδή.....	67
Πίνακας 5.10: Αθροιστική ενεργός δόση από όλα τα νουκλίδια σε 1 έτους παιδιά σε 1 έτος στις επιλεγμένες περιοχές.....	70
Πίνακας 5.11: Αθροιστική ενεργός δόση από όλα τα νουκλίδια σε ενήλικες σε 1 έτος στις επιλεγμένες περιοχές.....	71
Πίνακας 5.12: Συγκέντρωση στο έδαφος (υγρή και ξηρή εναπόθεση) στις επιλεγμένες περιοχές.....	73
Πίνακας 5.13: Ενεργός δόση ανά ώρα στις επιλεγμένες περιοχές.....	74

Πίνακας 5.14: Ενεργός δόση λόγω εισπνοής στις επιλεγμένες περιοχές.....76

Πίνακας 5.15: Ολική δυνητική δόση στις επιλεγμένες περιοχές.....78

Πίνακας 5.16: Ολική δυνητική δόση στον θυρεοειδή στις επιλεγμένες περιοχές.....80

Κατάλογος αναφορών

[1] Mariana Budjeryn, «Chernobyl: A nuclear accident that changed the course of history. Then came Fukushima», Bulletin of the Atomic Scientists, March 11, 2021,

Available: <<https://thebulletin.org/2021/03/chernobyl-a-nuclear-accident-that-changed-the-course-of-history-then-came-fukushima/>>

[2] Μητράκος Δ. (2022), Σημειώσεις Μαθήματος «Ραδιενέργεια και Περιβάλλον»

[3] «Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities», IAEA Safety Standards for protecting people and the environment, Vienna, 2018

[4] «The Fukushima Daiichi Accident», Report by the Director General IAEA, 2015

[5] «Operational Intervention Levels for Reactor Emergencies and Methodology for Their Derivation», International Atomic Energy Agency (IAEA), March 2017

[6] D. Mitrakos, C. Potiriadis, C. Housiadas, «An approach for estimating the radiological significance of a hypothetical major nuclear accident over long distance transboundary scales», Nuclear Engineering and Design 2016

[7] W.H. Leung, W.M. Ma, Philip K.Y. Chan, «Nuclear accident consequence assessment in Hong Kong using JRODOS», Journal of Environmental Radioactivity, Hong Kong Observatory, Hong Kong, China

[8] Mazzammal Hussain, Khurram Mehboo, Syed Zafar Ilyas, Kilian Smith and Saima Shaheen, «JRODOS customization for Pakistan and assessment of the consequences of a hypothetical nuclear accident», Journal of Radiological Protection

[9] Akkuyu.com,

Available: <<http://www.akkunpp.com/index.php?lang=en>>

[10] kathimerini.gr,

Available: <<https://www.kathimerini.gr/world/562392043/erntogan-kai-poytin-parontes-meso-vinteo-stin-teleti-ton-egkainion-toy-akoygiou/>>

[11] E. Akyuz, «Advantages and Disadvantages of Nuclear Energy in Turkey: Public Perception», University of Leeds, Leeds, England,

Available: <<https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/360884>>

[12] Dr. Hanife Topal-Namli & Dr. Suat Sean Namli, «NUCLEAR POWER IN TURKEY: PROS AND CONS», Journal of WEI Business and Economics-December 2014,

Available: <<https://westeastinstitute.com/journals/wp-content/uploads/2015/03/3.Hanife-Topal-Namli-JWEIBE.pdf>>

[13] «JRodos: An off-site emergency management system for nuclear accidents», Karlsruhe Institute of Technology (KIT), March 2017

[14] Available: <www.ncep.noaa.gov>

[15] Available: <<http://marine.copernicus.eu/>>

[16] «Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor», International Atomic Energy Agency (IAEA), May 2013

[17] Available: <<https://www.noaa.gov/>>

[18] «JRodos Training-NOMADS special provider and data», Text Version: 01.02.2017/CH/IH/CL

[19] S. Thykier-Nielsen, S. Deme, T. Mikkelsen, «Description of the Atmospheric Dispersion Module RIMPUFF, RODOS(WG2)-TN(98)-02», April 1999

[20] Heinz Müller, Florian Gering, Gerhard Pröhl, «Model Description of the Terrestrial Food Chain and Dose Module FDMT in RODOS PV6.0», December 2003

[21] IAEA, Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor, EPR-NPP PUBLIC PROTECTIVE ACTIONS, Vienna (2013)

[22] IAEA, Criteria for use in preparedness and response for a nuclear or radiological emergency, General Safety Guide, GSG-2, Vienna (2011b)

[23] IAEA, Generic Procedures for Response to a Nuclear or Radiological Emergency at Research Reactors, EPR-RESEARCH REACTOR, Vienna (2011a)

[24] IAEA, Preparedness and Response for a nuclear or radiological emergency: general safety requirements, GSR Part 7, Vienna, (2015)

[25] qgis.org,

Available: <<https://www.qgis.org/en/site/about/index.html>>

[26] Likhtarov, I., Kovgan, L., Chepurny, M., Ivanova, O., Boyko, Z., Ratia, G., Masiuk, S., Gerasymenko, V., Drozdovitch, V., Berkovski, V., Hatch, M., Brenner, A., Luckyanov, N., Voillequé, P. and Bouville, A., Estimation of the thyroid doses for Ukrainian children exposed in utero after the Chernobyl accident, Health Physics, Volume 100, 6, p. 583-593 (2011)

Παράρτημα

Ο κώδικας Matlab που αναπτύχθηκε για τη στατιστική επεξεργασία των αρχείων αποτελεσμάτων του JRodos δίνεται παρακάτω.

Τα ηλεκτρονικά αρχεία έχουν επίσης παραδοθεί με την εργασία.

```
clear all
clc

% Ground_Contamination_Drywet

s=8056; %arithmos seirwn
FoldeJrodosOut = 'C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\Ground_Contamination_Drywet\';

p = dir(fullfile(FoldeJrodosOut, '*2b12*.*)'); %to c allazei. bazw to arxiko olwn twwn arxeiwn gia na ta anagnwrisei

dat=dlmread('C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\XY_IAEA.txt'); %diabazei ta X,Y

for i=1:numel(p) %plhthos arxeiwn ston fakelo poy ksekinoywn apo 'c' px
    filename = strcat(FoldeJrodosOut,p(i).name);
    A = importdata(filename);
    sizeA=size(A);
    s = sizeA(1);
    r = sizeA(2);
    for j=1:s %plhthos seirwn
        Total_dose = A(j,r); %anoigma arxeiwn "txt", me pinakes 8056*25 to kathena
        B(j,i)= Total_dose; %A(j,25); %symplhrwsh neoy pinaka B me tis steiles ths 24hs wras gia kathena "txt"
    end
end

for j=1:s %plhthos seirwn
    Max_Dose(1,1)="Cell";
    Max_Dose(1,2)="X";
    Max_Dose(1,3)="Y";
    Max_Dose(1,4)="Value";
    Max_Dose(j+1,1)=j-1; %cell, ayksoysa arithmish
    Max_Dose(j+1,2)=dat(j,1);
    Max_Dose(j+1,3)=dat(j,2);
    Max_Dose(j+1,4)=max(B(j,:)); %Max Dose: H megisth timh kathe seiras toy pinaka B, topothethmenh se neo pinaka 8056*1
end

for j=1:s %plhthos seirwn
    Mean_Dose(1,1)="Cell";
    Mean_Dose(1,2)="X";
    Mean_Dose(1,3)="Y";
    Mean_Dose(1,4)="Value";
    Mean_Dose(j+1,1)=j-1; %cell, ayksoysa arithmish
    Mean_Dose(j+1,2)=dat(j,1);
    Mean_Dose(j+1,3)=dat(j,2);
    Mean_Dose(j+1,4)=mean(B(j,:)); %Max Dose: H megisth timh kathe seiras toy pinaka
```

```
B, topothethmenh se neo pinaka 8056*1
end
```

```
writematrix(Max_Dose, "C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\Results-IAEA\Ground_Contamination_Drywet_Max.txt", "Delimiter", "tab");
```

```
writematrix(Mean_Dose, "C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\Results-IAEA\Ground_Contamination_Drywet_Mean.txt", "Delimiter", "tab");
```

```
%%
```

```
clear all
clc
```

```
% Ground_Effective
```

```
s=8056; %arithmos seirwn
```

```
FoldeJrodosOut = 'C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\Ground_Effective\';
```

```
p = dir(fullfile(FoldeJrodosOut, '*2b12*.')); %to c allazei. bazw to arxiko olwn tw n arxeiwn gia na ta anagnwrisei
```

```
dat=dlmread('C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\XY_IAEA.txt'); %diabazei ta X,Y
```

```
for i=1:numel(p) %plhthos arxeiwn ston fakelo poy ksekinoy n apo 'c' px
    filename = strcat(FoldeJrodosOut,p(i).name);
```

```
    A = importdata(filename);
```

```
    sizeA=size(A);
```

```
    s = sizeA(1);
```

```
    r = sizeA(2);
```

```
for j=1:s %plhthos seirwn
```

```
    Total_dose = A(j,r); %anoigma arxeiwn "txt", me pinakes 8056*25 to kathena
```

```
    B(j,i)= Total_dose; %A(j,25); %sympplrhwsh neoy pinaka B me tis steiles ths 24hs
```

```
wras gia kathena "txt"
```

```
end
```

```
end
```

```
for j=1:s %plhthos seirwn
```

```
    Max_Dose(1,1)="Cell";
```

```
    Max_Dose(1,2)="X";
```

```
    Max_Dose(1,3)="Y";
```

```
    Max_Dose(1,4)="Value";
```

```
    Max_Dose(j+1,1)=j-1; %cell, ayksoysa arithmish
```

```
    Max_Dose(j+1,2)=dat(j,1);
```

```
    Max_Dose(j+1,3)=dat(j,2);
```

```
    Max_Dose(j+1,4)=max(B(j,:)); %Max Dose: H megisth timh kathe seiras toy pinaka B,
```

```
topothethmenh se neo pinaka 8056*1
```

```
end
```



```

for j=1:s %plhthos seirwn
    Mean_Dose(1,1)="Cell";
    Mean_Dose(1,2)="X";
    Mean_Dose(1,3)="Y";
    Mean_Dose(1,4)="Value";
    Mean_Dose(j+1,1)=j-1; %cell, ayksoysa arithmish
    Mean_Dose(j+1,2)=dat(j,1);
    Mean_Dose(j+1,3)=dat(j,2);
    Mean_Dose(j+1,4)=mean(B(j,:)); %Max Dose: H megisth timh kathe seiras toy pinaka
B, topothethmenh se neo pinaka 8056*1
end

writematrix(Max_Dose, "C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\Results-
IAEA\Ground_Effective_Max.txt", "Delimiter", "tab");

writematrix(Mean_Dose, "C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\Results-
IAEA\Ground_Effective_Mean.txt", "Delimiter", "tab");

%%

clear all
clc

% Inhalation_Dose_Effective

s=8056; %arithmos seirwn
FoldeJrodosOut = 'C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-
IAEA\Inhalation_Dose_Effective\';

p = dir(fullfile(FoldeJrodosOut, '*2b12*.*)'); %to c allazei. bazw to arxiko olwn tw
arxeiwn gia na ta anagnwrisei

dat=dlmread('C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\XY_IAEA.txt'); %diabazei ta
X,Y

for i=1:numel(p) %plhthos arxeiwn ston fakelo poy ksekinoyrn apo 'c' px
    filename = strcat(FoldeJrodosOut,p(i).name);
    A = importdata(filename);
    sizeA=size(A);
    s = sizeA(1);
    r = sizeA(2);
for j=1:s %plhthos seirwn
    Total_dose = A(j,r); %anoigma arxeiwn "txt", me pinakes 8056*25 to kathena
    B(j,i)= Total_dose; %A(j,25); %symplhrwsh neoy pinaka B me tis steiles ths 24hs
wras gia kathena "txt"
end
end
end

```

```

for j=1:s %plhthos seirwn
    Max_Dose(1,1)="Cell";
    Max_Dose(1,2)="X";
    Max_Dose(1,3)="Y";
    Max_Dose(1,4)="Value";
    Max_Dose(j+1,1)=j-1; %cell, ayksoysa arithmish
    Max_Dose(j+1,2)=dat(j,1);
    Max_Dose(j+1,3)=dat(j,2);
    Max_Dose(j+1,4)=max(B(j,:)); %Max Dose: H megisth timh kathe seiras toy pinaka B,
topothethmenh se neo pinaka 8056*1
end

for j=1:s %plhthos seirwn
    Mean_Dose(1,1)="Cell";
    Mean_Dose(1,2)="X";
    Mean_Dose(1,3)="Y";
    Mean_Dose(1,4)="Value";
    Mean_Dose(j+1,1)=j-1; %cell, ayksoysa arithmish
    Mean_Dose(j+1,2)=dat(j,1);
    Mean_Dose(j+1,3)=dat(j,2);
    Mean_Dose(j+1,4)=mean(B(j,:)); %Max Dose: H megisth timh kathe seiras toy pinaka
B, topothethmenh se neo pinaka 8056*1
end

writematrix(Max_Dose, "C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\Results-
IAEA\Inhalation_Dose_Effective_Max.txt", "Delimiter", "tab");

writematrix(Mean_Dose, "C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\Results-
IAEA\Inhalation_Dose_Effective_Mean.txt", "Delimiter", "tab");

%%

clear all
clc

% Total_Potential_Effective

s=8056; %arithmos seirwn
FoldeJrodosOut = 'C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-
IAEA\Total_Potential_Effective\';

p = dir(fullfile(FoldeJrodosOut, '*2b12*.*)'); %to c allazei. bazw to arxiko olwn tw
arxeiwn gia na ta anagnwrisei

dat=dlmread('C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\XY_IAEA.txt'); %diabazei ta
X,Y

for i=1: numel(p) %plhthos arxeiwn ston fakelo poy ksekinoyrn apo 'c' px
    filename = strcat(FoldeJrodosOut,p(i).name);

```

```
A = importdata(filename);
sizeA=size(A);
s = sizeA(1);
r = sizeA(2);
for j=1:s %plhthos seirwn
    Total_dose = A(j,r); %anoigma arxeiwn "txt", me pinakes 8056*25 to kathena
    B(j,i)= Total_dose; %A(j,25); %symplhrwsh neoy pinaka B me tis steiles ths 24hs
wras gia kathena "txt"
    end
end

for j=1:s %plhthos seirwn
    Max_Dose(1,1)="Cell";
    Max_Dose(1,2)="X";
    Max_Dose(1,3)="Y";
    Max_Dose(1,4)="Value";
    Max_Dose(j+1,1)=j-1; %cell, ayksoysa arithmish
    Max_Dose(j+1,2)=dat(j,1);
    Max_Dose(j+1,3)=dat(j,2);
    Max_Dose(j+1,4)=max(B(j,:)); %Max Dose: H megisth timh kathe seiras toy pinaka B,
topothethmenh se neo pinaka 8056*1
end

for j=1:s %plhthos seirwn
    Mean_Dose(1,1)="Cell";
    Mean_Dose(1,2)="X";
    Mean_Dose(1,3)="Y";
    Mean_Dose(1,4)="Value";
    Mean_Dose(j+1,1)=j-1; %cell, ayksoysa arithmish
    Mean_Dose(j+1,2)=dat(j,1);
    Mean_Dose(j+1,3)=dat(j,2);
    Mean_Dose(j+1,4)=mean(B(j,:)); %Max Dose: H megisth timh kathe seiras toy pinaka
B, topothethmenh se neo pinaka 8056*1
end

writematrix(Max_Dose, "C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\Results-
IAEA\Total_Potential_Effective_Max.txt", "Delimiter", "tab");

writematrix(Mean_Dose, "C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\Results-
IAEA\Total_Potential_Effective_Mean.txt", "Delimiter", "tab");

%%

clear all
clc

% Total_Potential_Thyroid

s=8056; %arithmos seirwn
```

```
FoldeJrodosOut = 'C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\Total_Potential_Thyroid\';

p = dir(fullfile(FoldeJrodosOut, '*2b12*.')); %to c allazei. bazw to arxiko olwn tw n
arxeiwn gia na ta anagnwrisei

dat=dlmread('C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\XY_IAEA.txt'); %diabazei ta
X,Y

for i=1:numel(p) %plhthos arxeiwn ston fakelo poy ksekinoy n apo 'c' px
    filename = strcat(FoldeJrodosOut,p(i).name);
    A = importdata(filename);
    sizeA=size(A);
    s = sizeA(1);
    r = sizeA(2);
for j=1:s %plhthos seirwn
    Total_dose = A(j,r); %anoigma arxeiwn "txt" kathe meras, me pinakes 8056 (kelia)
*25 (wres hmeras+1 stlh) to kathena
    B(j,i)= Total_dose; %A(j,25); %sympplrhwsh neoy pinaka B me tis steiles ths 24hs
wras gia kathena "txt" kathe meras
    end
end

for j=1:s %plhthos seirwn
    Max_Dose(1,1)="Cell";
    Max_Dose(1,2)="X";
    Max_Dose(1,3)="Y";
    Max_Dose(1,4)="Value";
    Max_Dose(j+1,1)=j-1; %cell, ayksoysa arithmish
    Max_Dose(j+1,2)=dat(j,1);
    Max_Dose(j+1,3)=dat(j,2);
    Max_Dose(j+1,4)=max(B(j,:)); %Max Dose: H megisth timh kathe seiras toy pinaka B,
topothethmenh se neo pinaka 8056*1
end

for j=1:s %plhthos seirwn
    Mean_Dose(1,1)="Cell";
    Mean_Dose(1,2)="X";
    Mean_Dose(1,3)="Y";
    Mean_Dose(1,4)="Value";
    Mean_Dose(j+1,1)=j-1; %cell, ayksoysa arithmish
    Mean_Dose(j+1,2)=dat(j,1);
    Mean_Dose(j+1,3)=dat(j,2);
    Mean_Dose(j+1,4)=mean(B(j,:)); %Max Dose: H megisth timh kathe seiras toy pinaka
B, topothethmenh se neo pinaka 8056*1
end

writematrix(Max_Dose, 'C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\Results-IAEA\Total_Potential_Thyroid_Max.txt', "Delimiter", "tab");
```

```

writematrix(Mean_Dose, "C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\Results-
IAEA\Total_Potential_Thyroid_Mean.txt", "Delimiter", "tab");

%%

clear all
clc

% Effective_Dose_Adults

s=8056; %arithmos seirwn
FoldeJrodosOut = 'C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-
IAEA\Effective_Dose_Adults\';

p = dir(fullfile(FoldeJrodosOut, '*2b12*.')); %to c allazei. bazw to arxiko olwn twv
arxeiwn gia na ta anagnwrisei

dat=dlmread('C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\XY_IAEA.txt'); %diabazei ta
X,Y

for i=1: numel(p) %plhthos arxeiwn ston fakelo poy ksekinoyv apo 'c' px
    filename = strcat(FoldeJrodosOut,p(i).name);
    A = importdata(filename);
    sizeA=size(A);
    s = sizeA(1);
    r = sizeA(2);
    for j=1:s %plhthos seirwn
        Total_dose = A(j,r); %anoigma arxeiwn "txt", me pinakes 8056*25 to kathena
        B(j,i)= Total_dose; %A(j,25); %sympplrhwsh neoy pinaka B me tis steiles ths 24hs
        wras gia kathena "txt"
    end
end

for j=1:s %plhthos seirwn
    Max_Dose(1,1)="Cell";
    Max_Dose(1,2)="X";
    Max_Dose(1,3)="Y";
    Max_Dose(1,4)="Value";
    Max_Dose(j+1,1)=j-1; %cell, ayksoysa arithmish
    Max_Dose(j+1,2)=dat(j,1);
    Max_Dose(j+1,3)=dat(j,2);
    Max_Dose(j+1,4)=max(B(j,:)); %Max Dose: H megisth timh kathe seiras toy pinaka B,
    topothethmenh se neo pinaka 8056*1
end

for j=1:s %plhthos seirwn
    Mean_Dose(1,1)="Cell";
    Mean_Dose(1,2)="X";

```

```

Mean_Dose(1,3)="Y";
Mean_Dose(1,4)="Value";
Mean_Dose(j+1,1)=j-1; %cell, ayksoysa arithmish
Mean_Dose(j+1,2)=dat(j,1);
Mean_Dose(j+1,3)=dat(j,2);
Mean_Dose(j+1,4)=mean(B(j,:)); %Max Dose: H megisth timh kathe seiras toy pinaka
B, topothethmenh se neo pinaka 8056*1
end

writematrix(Max_Dose, "C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\Results-
IAEA\Effective_Dose_Adults_Max.txt", "Delimiter", "tab");

writematrix(Mean_Dose, "C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\Results-
IAEA\Effective_Dose_Adults_Mean.txt", "Delimiter", "tab");

%%

clear all
clc

% Effective_Dose_1Y

s=8056; %arithmos seirwn
FoldeJrodosOut = 'C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\Effective_Dose_1Y\';

p = dir(fullfile(FoldeJrodosOut, '*2b12*.*)'); %to c allazei. bazw to arxiko olwn tw
arxeiwn gia na ta anagnwrisei

dat=dlmread('C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\XY_IAEA.txt'); %diabazei ta
X,Y

for i=1: numel(p) %plhthos arxeiwn ston fakelo poy ksekinoyrn apo 'c' px
    filename = strcat(FoldeJrodosOut,p(i).name);
    A = importdata(filename);
    sizeA=size(A);
    s = sizeA(1);
    r = sizeA(2);
    for j=1:s %plhthos seirwn
        Total_dose = A(j,r); %anoigma arxeiwn "txt", me pinakes 8056*25 to kathena
        B(j,i)= Total_dose; %A(j,25); %sympplrhwsh neoy pinaka B me tis steiles ths 24hs
        wras gia kathena "txt"
    end
end

for j=1:s %plhthos seirwn
    Max_Dose(1,1)="Cell";
    Max_Dose(1,2)="X";
    Max_Dose(1,3)="Y";
    Max_Dose(1,4)="Value";

```

```
Max_Dose(j+1,1)=j-1; %cell, ayksoysa arithmish
Max_Dose(j+1,2)=dat(j,1);
Max_Dose(j+1,3)=dat(j,2);
Max_Dose(j+1,4)=max(B(j,:)); %Max Dose: H megisth timh kathe seiras toy pinaka B,
topothethmenh se neo pinaka 8056*1
end
```

```
for j=1:s %plhthos seirwn
Mean_Dose(1,1)="Cell";
Mean_Dose(1,2)="X";
Mean_Dose(1,3)="Y";
Mean_Dose(1,4)="Value";
Mean_Dose(j+1,1)=j-1; %cell, ayksoysa arithmish
Mean_Dose(j+1,2)=dat(j,1);
Mean_Dose(j+1,3)=dat(j,2);
Mean_Dose(j+1,4)=mean(B(j,:)); %Max Dose: H megisth timh kathe seiras toy pinaka
B, topothethmenh se neo pinaka 8056*1
end
```

```
writematrix(Max_Dose, "C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\Results-
IAEA\Effective_Dose_1Y_Max.txt", "Delimiter", "tab");
```

```
writematrix(Mean_Dose, "C:\Jrodos\Giorgos - Diplomatiki\Akkuyu-IAEA\Results-
IAEA\Effective_Dose_1Y_Mean.txt", "Delimiter", "tab");
```